



非爆破岩理论和技术发展与展望

王少锋, 孙立成, 周子龙, 吴毓萌, 石鑫垒

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 地下资源开采及地下空间开发利用规模不断加大, 促使非爆破岩技术得到了长足发展, 并衍生出机械刀具破岩、水力破岩、微波破岩、热冲击破岩、膨胀破岩、联合破岩等技术。本文阐述了各类非爆破岩理论, 并综述了各类非爆破岩技术的发展与应用进程。针对目前非爆破岩技术的发展瓶颈和面临的挑战, 展望了非爆破岩理论与技术的发展方向。为满足深地战略重大需求, 非爆破岩亟需完成理论突破、技术变革、设备升级, 以实现复杂地质环境下坚硬岩石的安全、高效、经济、智能及绿色破碎。

关键词: 非爆破岩; 深部硬岩; 机械刀具破岩; 水力破岩; 微波破岩; 热冲击破岩; 联合破岩

文章编号: 1004-0609(2022)-12-3883-30

中图分类号: TD853

文献标志码: A

引文格式: 王少锋, 孙立成, 周子龙, 等. 非爆破岩理论和技术发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3883–3912. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43082

WANG Shao-feng, SUN Li-cheng, ZHOU Zi-long, et al. Development and prospect of non-blasting rock breakage theory and technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3883–3912. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43082

随着国民经济发展, 矿产和油气资源开采、水利水电建设以及地下空间开发利用的规模和工程建设力度不断加大, 施工环境也愈加复杂和恶劣。岩体作为上述工程的主体施工对象, 如何将其安全、高效、经济、智能、绿色地破碎, 是施工建设过程中必须要面临和解决的问题。2016年, 我国启动了“深地资源勘查开采”重点专项, 作为国家深地战略科技布局的开篇之作, “深地专项”针对深部矿产资源开采理论与技术研究等七个任务展开跨行业、跨区域的协同创新。2021年, 在《“十四五”规划纲要和2035年远景目标纲要》中指出, 将瞄准“深空深地深海”前沿领域, 开展具有前瞻性和战略性的科技项目。与浅部岩体相比, 深部岩体处于“三高一扰动”(高应力、高地温、高渗透压和强开挖扰动)的复杂环境, 易出现挤压大变形、板

裂、岩爆等非常规破裂灾害, 这无疑加大了岩石工程中的破岩难度^[1-4]。

钻爆法破岩具有技术成熟、应用范围广等优点, 在采矿、水利、交通等大型岩石工程中应用广泛。在凿岩钻孔工艺方面, 从早期的人工手把钎凿孔到手持式凿岩机, 再到大型的凿岩台车, 凿岩钻孔效率不断提高。在凿岩钻孔数字化、智能化和无人化进程中, 电脑导向台车和凿岩机器人等凿岩钻孔设备也应运而生。在爆破工艺方面, 随着岩石破碎工程规模的增大以及爆破质量要求的提高, 微差爆破技术、光面爆破技术、预裂爆破技术、定向爆破技术、深孔爆破技术等得到了快速发展。在爆破材料方面, 出现了静态膨胀剂致裂、液态惰性气体相变致裂、等离子爆破等技术替代传统炸药化学爆炸^[5-7]。其中, 钻孔预裂爆破技术通过形成大量裂

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174099, 51904333); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30842)

收稿日期: 2022-04-01; **修订日期:** 2022-10-08

通信作者: 王少锋, 教授, 博士; 电话:18073369486; E-mail: sf.wang@csu.edu.cn

隙改善岩层透气性或诱导顶板垮落卸压以防止冲击地压和巷道围岩失稳灾害,目前在煤层气抽采、切顶卸压等方面有着不可替代的作用。新型爆破工艺及爆破材料在一定程度上改善了传统钻爆法的作业条件和作用效果,但钻爆法仍然普遍存在危险性高、能量利用率低、衍生破坏大、智能化进程缓慢等问题,较难满足现代岩石工程所倡导的安全、高效、绿色、智能需求^[8-11]。此外,随着岩石开挖进入深部,地应力逐渐增大,爆破对岩石的冲击强度加大,地应力对爆破裂纹形成与扩展的导向作用也愈加明显,爆破破岩效果难以达到施工设计要求。处于高地应力状态下的岩体,储存有大量的弹性变形能,在爆破破岩扰动作用下,极易诱发岩爆、冲击地压等工程灾害,严重影响岩石工程的作业安全。因此,亟待探索能够克服钻爆法弊端的非爆破破岩方式,以替代传统钻爆法,实现岩石工程中的安全、高效破岩。自20世纪后期起,国内外涌现出包括机械刀具破岩、水力破岩、微波破岩和热冲击破岩在内的多种新型非爆破破岩方式。这些新型非爆破破岩方式一经提出,便吸引了国内外专家学者和工程技术人员广泛关注;经过数十年的实践、发展和完善,新型非爆破破岩方式取得了长足进步,促进了采矿、水利、交通等岩石工程的飞速发展。

为了解并展现国内外岩石破碎领域研究进展和发展趋势,在EI和Web of Science数据库中以“rock breakage or rock breaking or rock fragmentation or rock excavation or rock heading”为检索词,在CNKI数据库中以“破岩or岩石(体)破碎or岩石(体)开挖or岩石(体)掘进”为检索词,检索有关岩石破碎的文献。截至2022年3月,岩石破碎相关文献逐年变化情况如图1所示。自1998年以来,岩石破碎相关文献逐年增加,特别在近十年,文献数量迅速增多,表明随着地下资源开采和地下空间开发利用需求的加大,有关岩石破碎理论、技术和应用的研究热度不断升高。图2所示为Web of Science上检索的各国发表岩石破碎相关文献数量。由图2可见,我国岩石破碎相关文献数量占全部文献的一半以上,高于全球其他国家发表相关文献的总和,表明我国地下工程建设力度的加大以及“深地专项”的开展促进了我国在岩石破碎理论、技术和应用方面的研究,使我国在岩石破碎领域处于国际领先

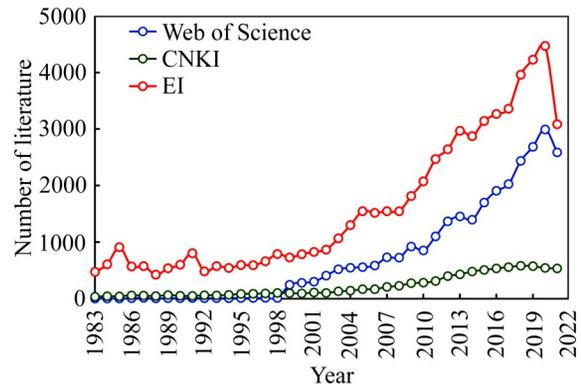


图1 岩石破碎相关文献的逐年变化

Fig. 1 Year-by-year changes of literatures related to rock fragmentation

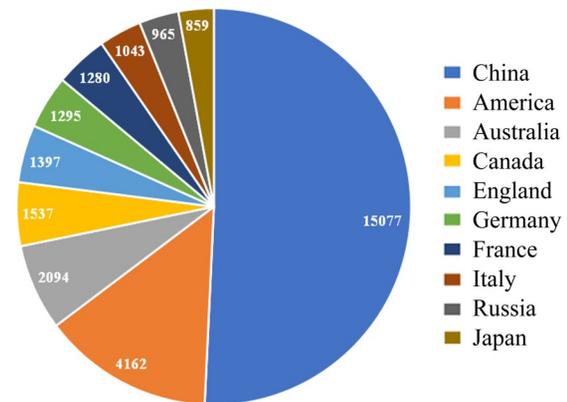


图2 世界各国与岩石破碎相关的文献数量

Fig. 2 Number of literatures related to rock fragmentation in different countries (Web of Science)

地位。

在CNKI数据库中,岩石破碎领域的主要研究主题有:全断面岩石掘进机(TBM)、破岩机理、数值模拟、PDC、盘形滚刀、掘进机、滚刀破岩、高压水射流、牙轮钻头、冲击破岩、爆破破岩等(见图3)。据CNKI数据库文献统计,在我国岩石破碎领域,有关TBM的文献最多,有关滚刀破岩、PDC刀具破岩、高压水射流破岩、冲击破岩的文献也较为丰富,而有关爆破破岩的文献较少。这表明爆破破岩这种传统方法已发展较为成熟,而非爆破破岩作为新兴技术,在近年来才广受关注。此外,数值模拟可以追踪并显示岩石破碎的复杂过程,可为阐明各类破岩方法的破岩机理提供有力帮助,在岩石破碎相关研究中得到了广泛应用。

结合国内外岩石破碎的发展现状和趋势,非爆破破岩方式主要有机械刀具破岩、水力破岩、微波破

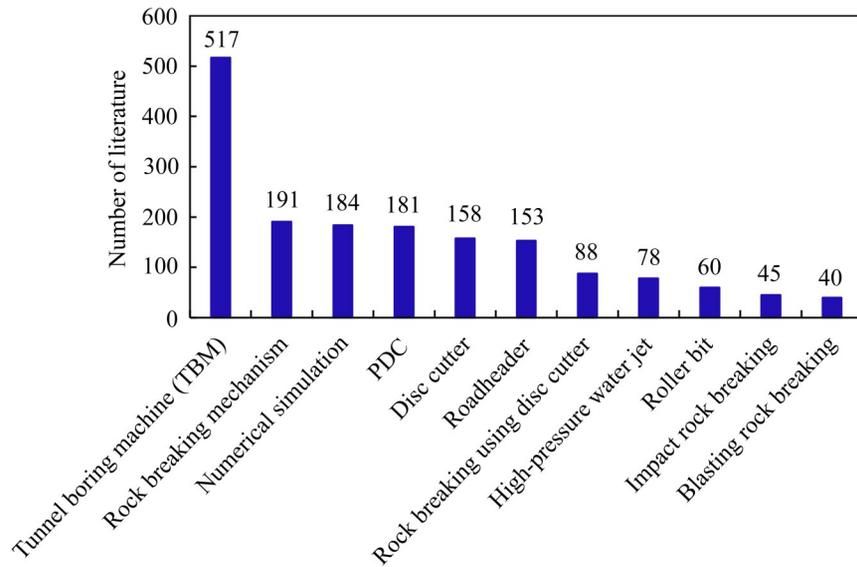


图3 岩石破碎相关文献的主要研究主题

Fig. 3 Main research topics of literatures related to rock fragmentation (CNKI)

岩、热冲击破岩、膨胀破岩、联合破岩等。随着岩石工程施工环境越来越复杂、岩石工程质量要求越来越高, 上述非爆破岩方式有着广阔的应用前景。本文将阐述非爆破岩理论、技术及应用, 总结非爆破岩目前所面临的困难和挑战, 并提出相应的应对策略, 展望非爆破岩未来的发展与突破方向。

1 非爆破岩理论与方法

1.1 机械刀具破岩

机械刀具破岩是通过破岩设备提供能量, 将破岩刀具与岩石紧密接触并产生应力集中, 使破岩刀具侵入并破碎岩石。破岩刀具是将破岩设备的能量传递到岩石的重要工具, 选择合适的破岩刀具对破岩效率及经济效益至关重要。根据破岩方式和用途, 可将破岩刀具分为: 截割刀具(Drag tools)、滚压刀具(Roller tools)、冲击刀具(Impact tools)。截割刀具是在岩石表面侵入然后进行切割, 可以破碎单轴抗压强度低于 120 MPa 的岩石, 但在高接触应力和高温下刀具极易磨损, 适用于破碎低磨蚀性的岩石。其中, 镐型截齿(Conical pick)的刀柄是圆柱形, 破岩过程中截齿可以在齿座中旋转而可保证均匀磨损, 与其他截割刀具相比使用寿命更长, 可以用于破碎中度磨蚀性的岩石^[12-13]。滚压刀具通过绕轴旋转, 与岩石表面循环接触, 可以破碎单轴抗压

强度达到 250 MPa 且具有高磨蚀性的极坚硬硬岩。冲击刀具通常与冲击(液压)破碎机一起使用, 通过高频循环冲击岩石表面破碎岩石, 一般适用于破碎单轴抗压强度低于 100 MPa 的岩体。

1.1.1 镐型截齿破岩

镐型截齿在破岩时, 截齿与岩石的接触区域会形成复杂应力场, 当接触区域周围的拉应力达到岩石抗拉强度时会产生 Hertz 裂纹。受挤压的岩石会发生塑性变形并产生细小岩屑, 岩屑在高压下集聚并形成密实核, 岩屑受到挤压而储存能量, 并将截齿提供的载荷传递到岩石周围区域。当接触区域周围的应力达到岩石抗剪强度或压应力达到岩石抗压强度时, 会产生源裂纹; 随着截齿力增大, 密实核对岩石的压力也不断增高, 形成的裂纹不断扩展, 直至裂纹贯穿岩石表面, 岩石碎块从原岩剥落。截齿破岩过程如图 4 所示。在破岩时, 上述过程是在瞬间完成, 在岩石碎块剥落过程中伴随有局部较小碎块的剥落, 表现为截齿力的波动变化。

目前, 镐型截齿破岩理论大多是基于 Evans 破岩理论修正和改进的。EVANS^[14]认为, 镐型截齿在破岩时会产生径向压应力和环向拉应力, 当环向拉应力达到岩石抗拉强度时, 岩石发生破坏, “V”形碎块剥落。Evans 破岩理论模型如图 5 所示。在 Evans 破岩理论中, 峰值截齿力(Peak cutting force,

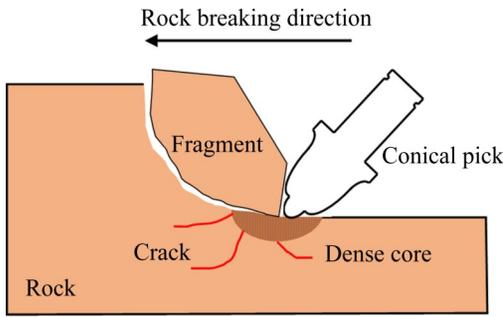
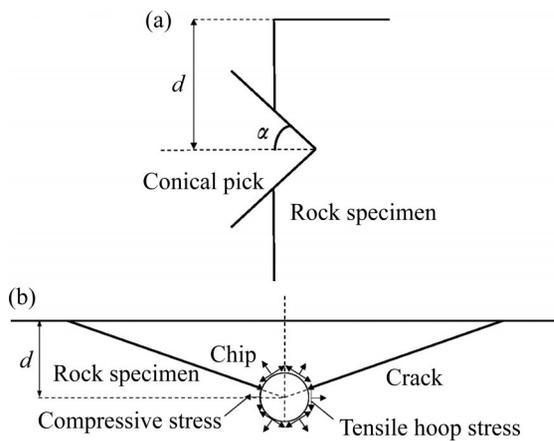


图4 镐型截齿破岩过程

Fig. 4 Rock breaking process with conical pick

图5 Evans 破岩理论模型^[15]Fig. 5 Model of Evans rock breaking theory^[15]

F_{PC} 预测模型如式(1)所示:

$$F_{PC, Ev} = \frac{16\pi\sigma_t^2 d^2}{\sigma_c \cos^2 \alpha} \quad (1)$$

式中: $F_{PC, Ev}$ 为 Evans 破岩理论获得的峰值截齿力; σ_t 为岩石抗拉强度; σ_c 为单轴抗压强度; α 为镐型截齿尖部半角; d 为截割深度。在 Evans 破岩理论中, 没有考虑摩擦作用对截齿破岩的影响。ROXBOROUGH 等^[15]考虑截齿与岩石间的摩擦作用, 修正了 Evans 破岩理论, 得到峰值截齿力预测模型如式(2)所示:

$$F_{PC, Ro} = \frac{16\pi\sigma_c \sigma_t^2 d^2}{\left[2\sigma_t + \sigma_c \cos\left(\frac{\tan f}{1 + \tan f}\right)\right]^2} \quad (2)$$

式中: f 为摩擦角。此外, 在 Evans 破岩理论中, 峰值截齿力与岩石单轴抗压强度呈反比, 且当 α 趋于零时, 峰值截齿力也不会降为零, 这两点与现实情况相悖。因此, GOKTAN^[16]进一步修正了 Evans 破岩理论, 得到峰值截齿力预测模型如式(3)所示:

$$F_{PC, Go} = \frac{4\pi\sigma_t d^2 \sin^2(\alpha + f)}{\cos(\alpha + f)} \quad (3)$$

此后, GOKTAN 等^[17]拟合出全尺寸破岩试验中峰值截齿力与截割参数和岩石性质之间的关系, 得到峰值截齿力半经验模型如式(4)所示:

$$F_{PC, Go \text{ and } Gu} = \frac{12\pi\sigma_t d^2 \sin^2\left[\frac{1}{2}(90^\circ - \omega) + f\right]}{\cos\left[\frac{1}{2}(90^\circ - \omega) + f\right]} \quad (4)$$

式中: ω 为截割破岩时的倾角。

基于 Evans 破岩理论, 许多学者对峰值截齿力模型做了大量修正工作, 但峰值截齿力的预测值与全尺寸试验值之间仍然存在明显差异。BILGIN 等^[18]根据各类镐型截齿破岩试验数据, 建立了峰值截齿力与岩石物理力学性质(单轴抗压强度、抗拉强度、施密特锤回弹值、弹性模量)之间的一系列回归表达式。此外, TIRYAKI 等^[19]采用多元回归分析、回归树模型和神经网络方法预测镐型截齿的峰值截齿力。BAO 等^[20]发现峰值截齿力与截割深度呈幂函数关系, 由此提出了峰值截齿力预测模型如式(5)所示:

$$F_{PC, Ba} = \Gamma d^{\frac{4}{3}} \quad (5)$$

式中: Γ 为与岩石应变能释放率和截齿几何形状有关的参数。上述截齿破岩理论和峰值截齿力预测模型的提出和建立, 促进了人们对截齿破岩过程的理解与认知, 是非爆破岩理论的重要组成部分, 在工程应用及破岩设备研发中起到了重要作用, 但截齿破岩理论仍需不断改进以更准确地反映实际破岩过程。

1.1.2 盘形滚刀破岩

盘形滚刀在破岩时, 滚刀在法向力作用下与掌子面紧密接触并压入岩石, 滚刀在刀盘的带动下在掌子面上旋转并滚压岩石, 岩石产生挤压、剪切、张拉的综合破坏。在盘形滚刀破岩过程中, 与滚刀接触区域内岩石受到滚压形成粉碎体, 并被压实形成密实核。密实核将滚刀上的载荷传递到相邻区域, 从而在密实核周围产生大量微裂隙, 并形成损伤区。随着盘形滚刀破岩的持续进行, 在损伤区周围形成裂纹并逐渐向外部扩展, 当相邻两个盘形滚刀下方形成的裂纹贯穿时, 岩石碎块从原岩剥落。盘形滚刀破岩过程如图6所示。

目前, 盘形滚刀破岩机理主要有挤压破坏机

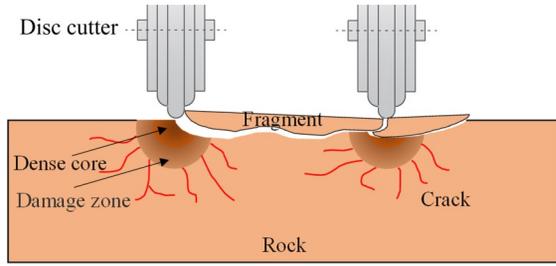


图 6 盘形滚刀破岩过程

Fig. 6 Rock breaking process with disc cutter

理、剪切破坏机理和张拉破坏机理^[21]。挤压破坏机理认为滚刀在压入岩石后, 当施加在滚刀上的垂直载荷高于岩石单轴抗压强度时, 滚刀底部岩石被压碎。剪切破坏机理认为滚刀在压入岩石后, 滚刀下方受压并形成密实核, 处于滚刀侧面的岩石在剪切力的作用下被破碎。张拉破坏机理认为滚刀在压入岩石后, 滚刀下方所形成的密实核会储存能量, 该部分能量释放会造成附近岩石的塑性变形并产生张拉裂纹, 随着破岩过程的进行, 裂纹发育扩展, 直至张拉裂隙贯穿, 岩石发生张拉破坏。基于上述滚刀破岩机理, 许多学者提出了滚刀破岩的垂直力、滚动力、侧向力预测模型。Evans 认为滚刀破岩所需的垂直力和滚刀与岩石接触面在岩石表面上的投影面积成正比, 从而得到滚刀破岩的垂直力预测模型如式(6)所示^[22]:

$$F_{V-Ev} = \frac{4}{3} \sigma_c h \sqrt{R^2 - (R-h)^2} \tan \frac{\theta}{2} \quad (6)$$

式中: F_{V-Ev} 为垂直力; h 为滚刀侵入深度; R 为滚刀半径; θ 为滚刀刀角。但在后续的实践中发现, 通过 Evans 滚刀破岩预测模型得到的垂直力低于实际值。

AKIYAMA^[23] 基于 Evans 滚刀破岩预测模型, 建立了滚刀破岩的侧向力预测模型如式(7)所示。

$$F_{S-Q} = \frac{\sigma_c}{2} R^2 (\phi - \sin \phi \cos \phi) \quad (7)$$

式中: F_{S-Q} 为侧向力; ϕ 为盘刀接岩角。同时, 根据剪切破岩机理, AKIYAMA^[23] 的滚刀破岩预测模型也可以表述为式(8)。

$$F_{S-Q} = R\phi\tau S \quad (8)$$

式中: τ 为岩石抗剪强度; S 为盘刀间距。ROXBOROUGH 等^[24] 沿用了 Evans 的论点, 并将 Evans 滚刀破岩预测模型中的投影面积修正为矩形面积, 建立了滚刀破岩的垂直力预测模型, 如式

(9)所示:

$$F_{V-Ro} = 4\sigma_c h \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2Rh - h^2} \quad (9)$$

同时, 根据垂直力和滚动力之间的关系, 得到滚动力预测模型如式(10)所示:

$$F_{R-Ro} = 4\sigma_c h^2 \tan \frac{\theta}{2} \quad (10)$$

式中: F_{R-Ro} 为滚动力。此外, 科罗拉多矿业学院根据滚刀线性截割试验得到滚刀破岩垂直力预测模型, 如式(11)所示^[25]。在科罗拉多矿业学院滚刀破岩模型中, 垂直力一部分用于压碎滚刀下部岩石, 另一部分用于剪切破坏相邻盘刀间的岩石。

$$F_{V-K} = Rh^2 \left[\frac{4}{3} \sigma_c + 2\tau \left(\frac{S}{h} - 2 \tan \frac{\theta}{2} \right) \right] \tan \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

同时, 根据几何关系和切割系数, 得到滚刀破岩滚动力预测模型如式(12)所示:

$$F_{R-K} = \left\{ \sigma_c h^2 + \left[\frac{4\tau\phi h^2 (S - 2h \tan \frac{\theta}{2})}{2R(\phi - \sin \phi \cos \phi)} \right] \right\} \tan \frac{\theta}{2} \quad (12)$$

目前, 科罗拉多矿业学院滚刀破岩模型被广泛应用于 TBM 设计过程中。之后, ROSTAMI^[26] 根据滚刀破岩实验数据, 对科罗拉多矿业学院滚刀破岩模型作了进一步修正。此后, 有学者将 TBM 破岩参数和岩石性质引入滚刀破岩模型, 并基于试验数据, 建立了经验/半经验滚刀破岩截割力预测模型。滚刀破岩模型和滚刀破岩截割力预测模型为滚刀破岩参数优化设计提供了理论支撑, 推动了滚刀破岩的发展与应用。

1.1.3 冲击刀具循环冲击破岩

冲击破岩是依靠冲击机构提供的冲击载荷, 经过钎杆等冲击刀具施加在岩石上, 使冲击刀具侵入岩石并形成破碎坑, 破碎坑之间相互贯穿完成破岩作业。冲击刀具破岩可以划分为四个阶段: 当刀具与岩石表面接触时, 接触区域岩石受到极高应力, 岩石被接触压碎; 刀具下方区域岩石被压密, 形成压实体; 压实体下方产生张开裂纹, 且随着刀具载荷的增大, 裂纹扩展并向下延伸; 在刀具对岩石不断加载过程中, 压实体周围区域应力也逐渐增大, 当达到某一阈值时, 压实体周围会产生剪切裂纹, 并朝着自由面扩展; 当裂纹扩展至自由面时, 岩石碎块从原岩崩裂, 并形成破碎坑。冲击破岩需要重复上述破岩过程以满足破岩需求, 冲击破岩过程如图 7 所示。

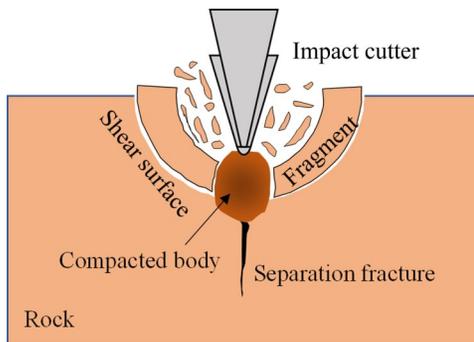


图7 冲击破岩过程

Fig. 7 Impact rock breaking process

岩石破碎过程在本质上就是能量积累和释放的过程，机械刀具破岩在本质上也就是通过刀具将破岩设备上的机械能传递到岩石，用于弹性变形、塑性变形、形成断裂面、破坏岩石等^[27]。当刀具对岩石施加的应力未达到峰值强度前，岩石吸收并储存能量，接触区域岩石产生大量微裂隙，形成损伤区。随着刀具对岩石施加应力的增大及岩石内能量的累积，损伤区周围会形成径向、侧向、中间裂纹，并不断发育扩展，在该过程中，岩石储存的能量被释放。当裂纹贯穿岩石表面时，碎块从原岩剥落。

虽然各类机械刀具破岩所用的刀具不同，破岩过程和机理也不尽相同，但总结各类机械刀具的破岩过程，基本可以划分为四个阶段：弹性变形阶段、塑性变形阶段、裂纹产生及扩展阶段、碎块剥落阶段。弹性变形阶段是刀具侵入岩石的初始阶

段，此时岩石孔隙逐渐被压密，岩石变形与刀具载荷呈线性相关。在塑性变形阶段，岩石表面破碎所产生的细小岩屑被压实，形成密实核，该阶段伴随有微裂隙产生和塑性变形。随着破岩过程的进行，密实核周围区域应力增大，当达到岩石峰值强度后，裂纹产生并逐渐发育扩展。当裂纹之间相互贯穿或贯穿岩石自由面时，大颗粒碎块从原岩剥落，该阶段就是碎块剥落阶段。至此，该区域范围内岩石被破碎。机械刀具破岩是一个持续循环的过程，相近的破碎区(破碎带)之间会相互影响。

目前，大部分的机械刀具破岩模型都是二维的，这与实际破岩过程并不相符，因此机械刀具破岩模型需要逐步往三维模型发展。在三维破岩模型中，需要建立三维刀具模型、三维受力模型、三维碎块模型等，模型会更加复杂。此外，机械刀具破岩存在明显的跃进现象，当刀具侵入岩石后，刀具对岩石的作用力逐渐升高，当达到某一阈值时，岩石碎块剥落，刀具作用力瞬间跌落，然后开始下一循环的破岩过程。因此，应该根据不同阶段时岩石的受力状态和破坏状态，建立分阶段、分破坏状态的机械刀具破岩模型。

1.2 水力破岩

1.2.1 水力压裂技术

水力压裂技术是利用地面的高压泵站以超过地层吸液能力的排量向封闭的钻孔中注入压裂液，使钻孔受到超过岩石抗拉强度与断裂韧性的高压使之出现裂缝，从而改变地层结构，形成裂缝网络系统

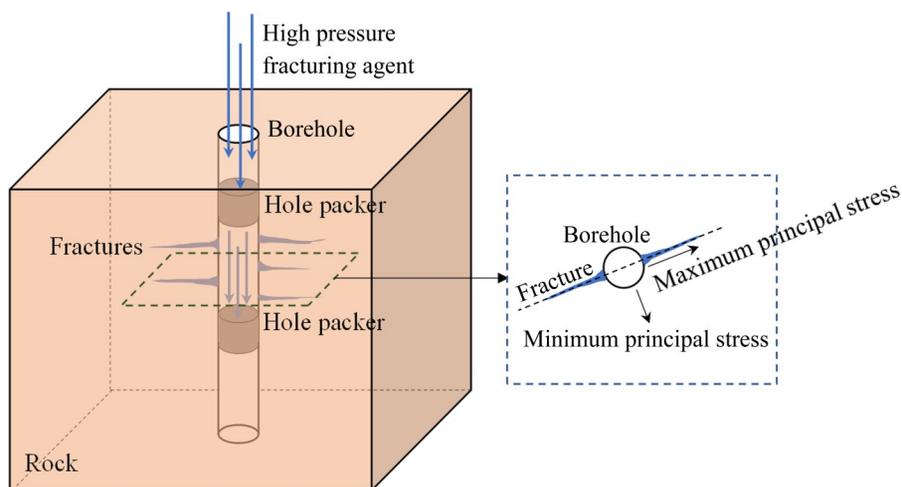


图8 水力压裂技术示意图

Fig. 8 Schematic diagram of hydraulic fracturing technology

的技术(见图 8)。水力压裂破岩机理主要包括裂缝起裂机理和裂缝延伸机理, 其主要特征是微裂隙的形成、生长、交互, 以及宏观破坏的出现和发展。水力压裂破岩受到地应力状态、岩石特性、岩层界面性质、压裂液的流体特性以及注入压力的影响, 属于典型的渗流-损伤耦合问题。岩石的透水性是影响裂缝起裂的重要因素, YANG 等^[28]讨论了不透水与透水两类岩石对裂缝起裂的影响。HUBBERT 等^[29]发现当钻孔井壁的切向应力达到岩石的抗拉强度时, 岩石就会产生拉伸裂缝, 并基于不透水岩石的线弹性断裂力学理论, 得到钻孔的破裂压力计算公式, 如式(13)所示:

$$P_1 = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + T_1 - P_0 \quad (13)$$

式中: P_1 为破裂压力; T_1 为不透水岩石的抗拉强度; P_0 为初始岩体孔隙压力; σ_{\min} 和 σ_{\max} 分别为最小和最大水平主应力。但 HUBBERT 等^[29]没有考虑岩石的透水性, 无法解释孔隙压力对岩石起裂行为的影响。对于可透水岩石, 需要考虑孔隙效应(Pore pressure effect), HAIMSON 等^[30]利用孔隙弹性理论推导出渗透性岩石的水力压裂判据, 如式(14)所示:

$$P_1 - P_0 = \frac{3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + T_2 - 2P_0}{2 - 2\eta} \quad (14)$$

$$\eta = \frac{\alpha(1 - 2\nu)}{2(1 - \nu)}, 0 \leq \eta \leq 0.5 \quad (15)$$

式中: T_2 为钻孔在水压作用下的抗拉强度; α 为孔隙流体压力系数; ν 为泊松比; η 为孔隙弹性参数。DETOURNAY 等^[31]基于以上判据, 提出了一种考虑井筒增压速率的水力压裂模型, 如式(16)~(18)所示:

$$P_1 - P_0 = \frac{3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + T_2 - 2P_0}{1 + (1 - 2\eta)h(\gamma)} \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{\nu\lambda^2}{4cS}, 0 \leq \gamma \leq \infty, 0 \leq h(\gamma) \leq 1 \quad (17)$$

$$S = T_2 + 3\sigma_h - \sigma_H - 2P_0 \quad (18)$$

式中: ν 为钻孔加压速率; λ 为微裂纹长度范围; c 为扩散系数。还有学者对 Hubbert 模型作了进一步改进, 其中包括 SONG 等^[32]提出的水平应力均匀化的修正准则, 这些模型的提出有力地推动了水力压裂机理的研究。

由于地质条件的非均质性和边界条件的复杂性, 通过实验研究水力压裂裂缝的起裂和延伸是较

为困难的, 通常采用数值模拟的方法进行研究。曹平等^[33-34]也指出, 基于岩石断裂学的研究可采用 FEM、BEM、ABAQUS 等模拟软件进行分析, 并发现岩石在水环境下开裂的最大荷载明显下降。在有关裂缝延伸机理的研究中, LI 等^[35]认为, 地层应力状态直接影响裂缝延伸, 最小主应力方向决定裂缝走向。注入压裂液速度是影响裂缝扩展为复杂几何形状的重要因素。此外, 水力裂缝和天然裂缝的相互作用也是裂缝延伸的主要因素之一。

1.2.2 水射流技术

水射流技术是将液态水或者夹杂球形钢材、陶瓷等材料的粒子流体通过加压装置后从小直径喷嘴中射流出来, 形成高速射流束, 以高度集中的能量冲击、切割岩石的技术。水射流技术, 涉及流体、固体、气体和流固耦合, 其破岩机理存在以下理论: 冲击应力波破碎理论、空化效应破碎理论、准静态弹性破碎理论、裂纹扩展破碎理论和渗流-损伤耦合破碎理论等。

冲击应力波破碎理论认为, 水射流技术破岩的冲击载荷在岩石中会产生应力波, 使岩石发生破坏。HEYMANN^[36]考虑了冲击波速度对破岩的影响, 建立了不同状态下的水锤压力计算式。ZHOU 等^[37]通过非线性波动模型及数值算法, 用应力波解释了高速液固碰撞的基本问题。黄飞^[38]研究发现, 应力波破碎理论可以很好地解释高压水射流作用下岩石宏观破裂现象。水锤压力作用于岩石, 以应力波的形式在岩石内部传播、散开, 冲击波会在岩石表面以瑞利表面波的形式传播, 同时以体积波的形式在岩石内部相互干涉、叠加, 最终对岩石造成破坏^[39], 如图 9 所示。水射流的应力波不同于爆炸产生的应力波, 对于低速射流甚至淹没射流作用下岩石中是否存在应力波尚需进一步研究, 该理论依然有许多无法解释的现象。

空化效应破岩原理认为由充满蒸汽或空气的负压空穴在固体表面破裂所产生的能量集中于一点, 形成较大的压力使岩石破碎。CROW^[40]认为由岩石颗粒前后的压差导致的空化效应是造成岩石破坏的主要原因。受到空化效应破坏强度大的限制, 普通实验手段难以测量, 且对于微观破坏的定性分析较为困难, 所以该理论尚无完善的理论模型。

准静态弹性破碎理论则认为岩石在射流冲击作用下, 在冲击区正下方某处将产生最大剪应力, 在

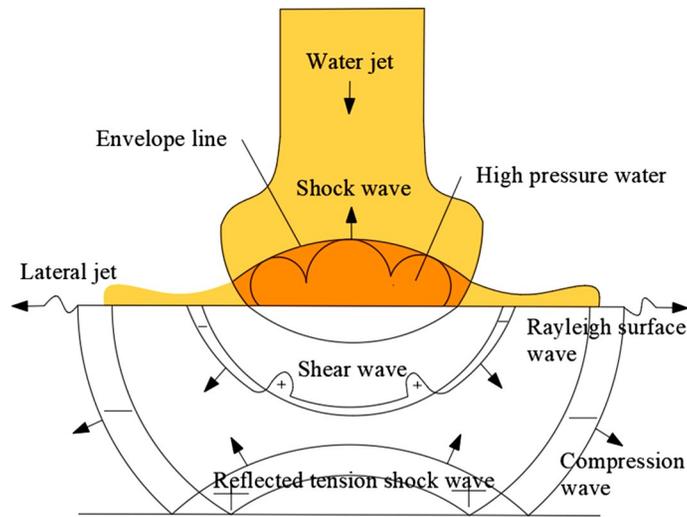


图9 高压水射流与固体间的作用模型^[39]

Fig. 9 Interaction model of high pressure water jet and solids^[39]

接触边界周围产生拉应力，该剪应力和拉应力分别大于岩石的抗剪和抗拉强度，造成岩石破坏。徐小荷等^[41]提出的密实核-劈拉破岩理论认为，在岩石出现裂隙后，水汇集在接触面形成球形密实核，储能到一定程度后开始膨胀并最终劈开岩石。KONDO等^[42]将水射流的冲击力看作准静态荷载，以弹性力学理论为基础建立了岩石破碎的强度判据。但该理论对于水射流速度、射流长度、脉冲射流的间隔时间有一定的要求，存在一些局限性。

裂纹扩展理论认为，岩石的天然裂纹在水射流作用下会发生延伸和扩展，从而造成岩石破裂。FORMAN等^[43]研究发现在水射流作用下岩石发生起裂，在孔隙内形成拉应力，当到达临界值后裂隙扩展导致岩石破碎，又称为拉伸-水楔理论。李根生等^[44]研究表明，岩石在高压水射流作用下主要破坏机制分为穿晶断裂和剪切错位两种形式。裂纹扩展理论相对于其他理论有更多的试验现象支持，但裂隙扩展的原因不明造成该理论存在较多分歧。

渗流-损伤耦合破碎理论认为水射流破岩是由水流冲击应力波损伤和渗流致裂耦合作用造成的。倪红坚等^[45]通过损伤力学理论建立了水射流破岩的损伤模型及其耦合模式。同时，王瑞和等^[46]发现高压水射流破岩过程分为两个阶段：第一个阶段是水流冲击产生应力波，使岩体拉伸破坏；第二个阶段以水射流的准静态压力为主，扩大裂纹以及孔隙的直径，从而破碎岩体。

1.3 微波破岩

微波是一种波长为0.001~1 m、频率为0.3~300 GHz的超高频电磁波。在微波照射作用下，岩石矿物自身的介电特性会消耗微波能量，并将该能量转化为热能，使介电特性较强的矿物在短时间内迅速升温，在岩石内部形成“热点”。微波破岩是将微波作用于岩石上，将电磁场的能量传递给岩石，岩石介质分子由于反复的极化现象，在物体内部发生“内摩擦”，将电磁能转换为热能，使岩石温度升高，从而导致岩石在水分蒸发、内部分解、膨胀的共同作用下发生破坏，其过程^[47]如图10所示。微波破岩过程中存在着多物理场耦合问题，包括电磁场、温度场和应力场。目前，用于衡量微波强度及可适用性的参数主要有穿透深度和单位体积介电材料损耗的微波功率。其中，穿透深度是指微波从表面衰减到1/e倍初始功率值的深度。METAXAS

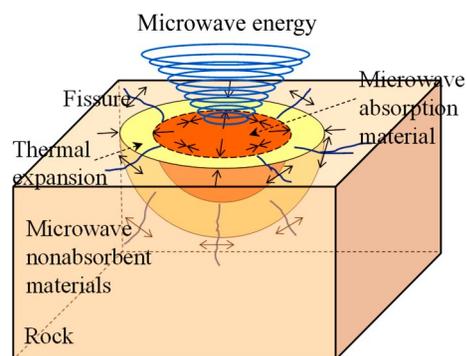


图10 微波破岩过程^[47]

Fig. 10 Microwave rock breaking process^[47]

等^[48]认为穿透深度取决于电磁波的频率和材料的介电常数。SCHÖN^[49]基于此进一步研究发现, 岩石的损耗因子远小于介电常数, 并得到微波在岩石中的穿透深度计算公式, 如式(19)所示:

$$H = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (19)$$

式中: H 为微波穿透深度; λ_0 为微波波长; ϵ' 为岩石材料介电常数; ϵ'' 为材料的损耗因子。此外, 微波加热岩石还受到岩石材料内各矿物吸收微波的电场强度、微波频率及其介电损耗的影响, SAXENA^[50]提出了单位体积介电材料损耗的微波功率的计算公式, 如式(20)所示:

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (20)$$

式中: P 为损耗的微波功率; f 为微波频率; ϵ_0 为真空介电常数; E 为电场强度。微波破岩理论研究中, 需要充分考虑岩石性质变化、非均匀性和不连续性, 探究微波侵入、温度剖面以及岩石损伤和裂缝产生机制, 从而优化微波破岩参数。

1.4 热冲击破岩

热冲击破岩是利用岩石表面与内部的温度差, 使岩石的物理力学性质发生改变, 造成岩石内部矿物之间变形不匹配, 导致矿物边界产生局部热应力, 一旦热应力超过了矿物之间的固结程度, 岩石内将会产生晶间断裂, 进而形成裂隙网格, 出现热破裂现象, 从而破碎岩体。在岩石破裂的温度效应方面, 张宗贤等^[51]发现对岩石进行热冲击可以充分利用岩石中包括微裂隙和矿物成分在内的各种天然属性来降低岩石的断裂韧度; XIA^[52]研究表明岩石在温度场作用下更容易开裂。AL-SHAYEA等^[53]通过声发射技术研究岩石在不同温度条件下的损伤过程。YAVUZ等^[54]探究了岩石在不同温度下自然冷却后物理性质的变化规律。

1.4.1 液氮射流破岩

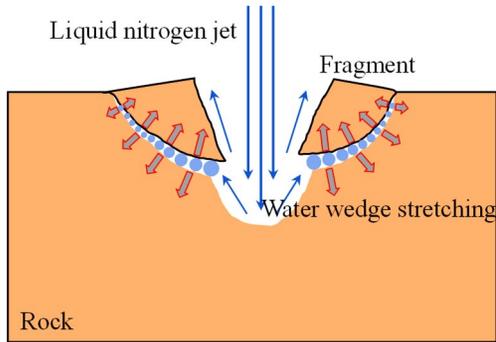
液氮射流破岩是以液氮作为钻井流体, 通过增压设备调制液氮形成高压流体, 在岩石内形成多个射孔眼, 岩石在液氮冷冲击后, 表面温度急剧下降, 产生显著的变温热应力, 使得岩体表面产生新的微裂隙并促使原有裂隙扩展, 然后注入高压液氮进行压裂, 形成复杂的裂隙网格, 实现岩石破裂。液氮射流破岩机理复杂, 涉及射流冲击和低温致裂的耦合作用, 液氮低温冷却诱导的热应力会破坏矿

物颗粒之间的胶结结构, 对岩石造成损伤。国内外学者针对液氮冷冲击损伤机制、液氮射流破岩机理以及液氮磨料射流宏微观机理展开了深入研究。

MCDANIEL等^[55]在研究液氮对煤岩的压裂过程中发现煤岩体与液氮接触后会发生起裂现象, 且含水煤层液氮冷冲击破岩效果更好。任韶然等^[56]建立了煤岩冷冲击后收缩计算模型, 通过液氮对煤岩的冷冲击试验, 发现液氮冷冲击能够使煤岩基质收缩, 产生热应力裂纹, 提高煤岩的渗透率, 并改变煤岩内部结构和力学强度。蔡承政等^[57]开展了不同种类岩石的液氮冻结试验, 发现液氮冻结后, 孔隙度大的岩石损伤程度比孔隙度小的岩石损伤程度要大。QU等^[58]通过研究不同应力水平和初始温度下液氮和水对致密砂岩的压裂情况, 发现液氮压裂能够降低砂岩的起裂应力。CAI等^[59]认为液氮喷射压裂技术不仅可以避免水力压裂过程的资源浪费和污染问题, 还可以提高岩层的渗透率, 对于页岩等低渗储层的开发具有广阔的应用空间。WU等^[60]通过测试空气、水、液氮处理后的岩石物理力学性质, 发现液氮冷却对岩石的损伤程度大于其他两种方式。黄中伟等^[61-63]对比分析了页岩、砂岩、花岗岩等高温岩石液氮冷却后的力学特性, 并研究了液氮射流破岩的宏观特征、微观机理、液氮-岩石的传热特征及损伤规律, 发现液氮冷冲击能够极大地改变岩石性质; 冷却前岩石温度越高, 冷却过程中产生的热应力越大, 冷却损伤程度越大, 并定义了岩石冷冲击劣化因子, 如式(21)所示:

$$D_1 = 1 - \frac{I_{LN_2}}{I_{air}} \quad (21)$$

式中: D_1 为岩石力学参数劣化因子; I_{LN_2} 、 I_{air} 分别为液氮冷却和自然冷却后的力学参数。此外, 黄中伟等^[61-63]对比了磨料水射流、氮气磨料射流、液氮射流破岩过程, 发现液氮射流破岩效果优于其他两种射流方式。液氮射流破岩时会产生大量的热裂缝, 在射流压力下, 液氮极易渗入裂隙, 形成水楔效应, 如图 11 所示。流体在裂隙中产生拉应力集中, 使裂纹扩展、贯通, 扩大了液氮的冷却面积, 进一步增大液氮作用于岩石后形成热应力的区域, 有利于降低液氮射流破岩过程中的起裂应力; 且在液氮冲击过程中, 岩石中会形成复杂裂纹网格, 降低了破岩难度。目前, 液氮射流破岩研究主要以室内试验为主, 理论研究、数值模拟尚显不足, 液氮

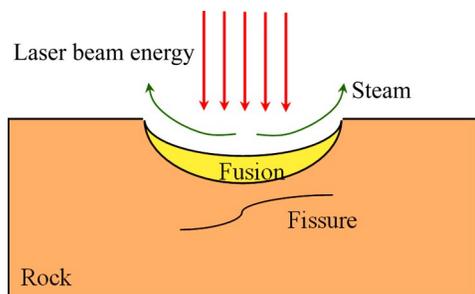
图11 液氮射流水楔效应^[61]Fig. 11 Wedge effect of liquid nitrogen injection^[61]

致裂机理、传热特征尚不明确。与水射流相比，液氮射流是射流冲击及低温冷却的耦合作用，需要进一步研究液氮冲击过程中的热-流-固耦合作用机理及特征。

1.4.2 激光破岩

激光破岩是通过高能激光束对岩石表面快速加热，导致局部岩石温度瞬间升高，产生局部热应力，由于矿物颗粒之间热膨胀系数、熔点不同，致使岩石内出现晶间断裂和晶内断裂，甚至可能诱导矿物颗粒由固态瞬间相变成熔融和气态，并形成高温等离子体，然后借助辅助气流或其他方式破碎岩石，是一种非接触式的物理破岩方法。激光破岩大致有以下三种破坏形式：当激光辐照产生的热应力大于岩石自身强度时，出现热裂解现象；当岩石受到的激光辐射温度高于其熔点时，发生熔融；当激光辐照岩石能量足够大时，岩石可能由固态直接相变为气态^[64]，如图12所示。

激光与岩石相互作用过程是传热学、流体力学、电磁学多学科交叉的多物理场耦合问题。GRAVES等^[65]在激光辅助岩样钻取及石油开采等方面开展了前瞻性应用研究。REED等^[66]通过激光对

图12 激光破岩时岩石破坏形式^[64]Fig. 12 Failure pattern during laser rock breaking^[64]

不同岩石进行钻探试验，提出了系统的钻探方案。易先中等^[67]开展了激光破岩机理与钻孔技术研究，试验结果表明：通过激光辐照的岩石，存在热破碎、汽化以及熔融等破坏方式，并利用传热学基本理论和能量守恒原理，简化相变过程中的固液、液气相变界面上的导热系数、焓、比能等主要参数，建立了激光辐照下岩石固、液、气三相变化过程中的温度场数学模型，与BJORNDALLEN等^[68]采用移动面模型得到的结论相一致，并使用GALERKIN方法对破岩实际案例进行分析，发现激光辐照中心区域温度最高，光斑边缘温度略低，与激光辐照空间分布形状基本一致。激光破岩的目的是利用更小的能量破碎更大体积的岩石，通常将破岩比能和穿孔速率作为衡量岩石破碎效率的评判标准。POONIWALA^[69]得到了比能(E_s)和穿孔速率(R)计算公式，如式(22)和(23)所示。

$$E_s = \frac{P}{dV/dt} = \frac{P}{dws} \quad (22)$$

$$R = \frac{P}{E_s A} \quad (23)$$

式中： E_s 为比能； P 为激光输入功率； dV/dt 为单位时间内破碎岩体的体积； d 为激光侵入岩石深度； w 为侵入孔洞宽度； s 为激光器的移动速度； R 为激光穿孔速率； A 为激光侵入孔洞的截面积。

激光破岩作为一种新兴的破岩方法，具有精准、高效和清洁等特点，将激光破岩技术应用于石油钻井能够提高钻井速度、减少钻井成本、改善钻井性能。要实现激光井下高效作业还要对光源的稳定性、安全性及长距离能量损耗问题进行综合考虑。此外，激光破岩的热应力场、热应变场、渗流场等多物理场耦合理论有待深入研究，相关物性参数的基本关系尚不明确。

1.4.3 等离子体电脉冲破岩

等离子体电脉冲破岩是利用电极在岩石或液体介质中产生的等离子体通道受热膨胀激发冲击应力波使岩石发生破碎，如图13所示。在进行等离子体电脉冲破岩时，工作电极与岩石被浸入液体介质，击穿电压上升的时间决定瞬时等离子体通道在何种介质(岩石或液体介质)中形成。根据等离子体通道分别在岩石和液体介质中形成的不同情况，将等离子体电脉冲破岩分为电脉冲破岩和液电破岩两类。在等离子体通道形成后，高压电脉冲电源中的

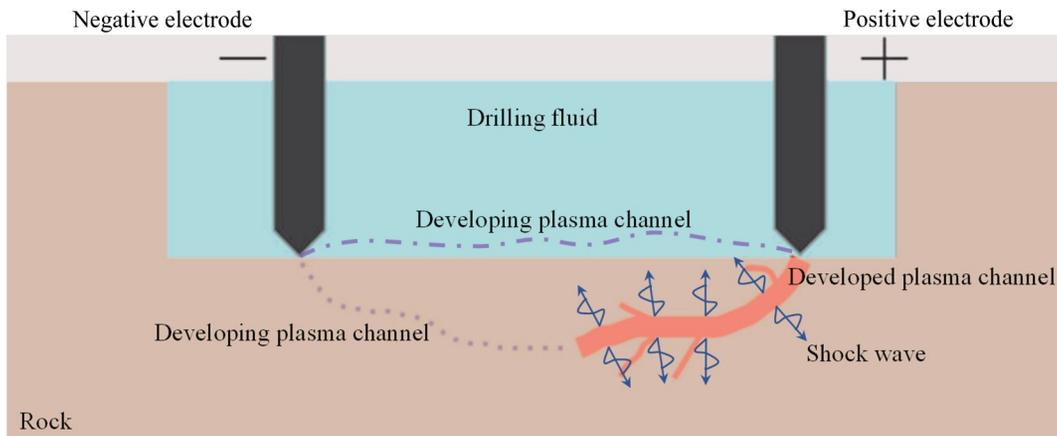


图 13 等离子体电脉冲破岩过程^[75]

Fig. 13 Rock breaking process using plasma electric pulse^[75]

能量释放到等离子体通道中, 并对通道加热(可达 10^4 K)。等离子体通道受热膨胀, 产生冲击应力波(可达 $10^9 \sim 10^{10}$ Pa)并对周围岩石做功, 使岩石发生破碎。在液电破岩中, 等离子体通道膨胀产生的应力波作用在岩石表面, 能量传递效率较低; 电脉冲破岩时等离子体通道在岩石内部形成, 其产生的应力波能实现岩石的充分破碎, 破碎效率更高。SCHIEGG 等^[70]对电脉冲破岩钻井的应用前景给予了综合评估, 认为电脉冲钻井的能量传递受井眼的尺寸限制很小, 其大孔径钻进费用约为 800 \$/m。BOEV 等^[71]、MAKER 等^[72]、CHO 等^[73-74]研究了岩石中可能的电击穿过程, 结果表明, 在高压短脉冲放电电压下, 岩石的击穿场强小于液体介质, 放电等离子体通道在岩石内部形成, 等离子体通道受热膨胀, 产生的冲击应力波对周围岩石做功, 使得岩石内部产生“内伤”; 当冲击应力波对岩石的作用超过岩石的自身强度时, 岩石就被破坏。祝效华等^[75]开展了等离子体电脉冲钻井破岩电击穿实验与数值模拟研究, 发现电脉冲破碎结果中存在贯穿破碎和未贯穿破碎两种状况, 并提出了一种岩石介质击穿模型(概率发展模型)用于研究单脉冲击穿时电路结构参数对破岩能耗分配的影响规律。

1.5 膨胀破岩

膨胀破岩是利用膨胀介质或机械机构的体积膨胀作用对孔壁周围岩石产生冲击和膨胀挤压作用, 形成径向拉应力, 进而使岩体产生径向裂隙而破裂或破碎的一种破岩技术^[76], 主要有液态 CO_2 相变破

岩、液压劈裂机破岩、静态膨胀剂破岩等方法, 如图 14 所示。液态 CO_2 相变破岩时, 将液态 CO_2 密封于一高强度容器内, 激发器激发后释放出大量热能使 CO_2 在密闭容器内呈现一种高能状态, 当高能量状态的 CO_2 突破泄能头定压破裂片的封堵作用时, CO_2 快速发生液-气相变, 体积迅速膨胀, 形成高压气体从卸能头侧面出气口泄出, 对周围岩石产生冲击和膨胀挤压作用, 使岩石产生径向裂隙, 随后 CO_2 气体侵入岩石裂隙, 使裂隙进一步发育, 从而破碎岩石^[77]。液压劈裂机破岩是利用液压动力驱动的孔内刚性分裂器分裂膨胀从而胀裂岩石的岩石破碎方法。液压劈裂机由分裂器和动力站组成, 分裂器是一个可在液压动力驱动下分裂膨胀的楔块组件^[78]。静态膨胀剂破岩是利用体积膨胀可控的膨胀剂在岩石孔内的物理或化学膨胀过程在孔壁形成径向拉应力而胀裂岩石的破岩方法, 例如氧化钙遇水膨胀破岩、金属膨胀剂破岩、高压泡沫胀裂破岩等^[79-80]。

1.6 联合破岩

1.6.1 高压水射流辅助破岩

高压水射流辅助破岩主要以水射流切割和压胀岩石两种作用方式辅助破岩, 如图 15 所示。对于水射流切割, 首先通过水射流切割岩石, 在岩石上形成具有一定深度的切槽, 达到卸压的目的, 之后利用机械刀具破岩, 从而降低破岩难度, 提高破岩效率。水射流压胀是在机械刀具破岩时在刀具附近施加高压水射流, 促进刀具与岩石作用区域裂纹的

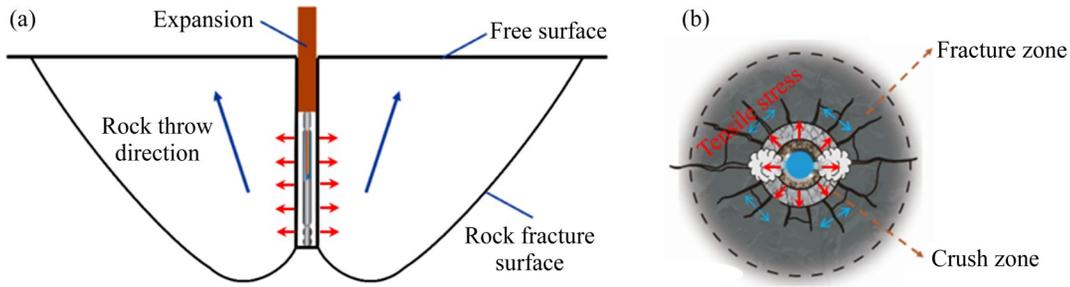
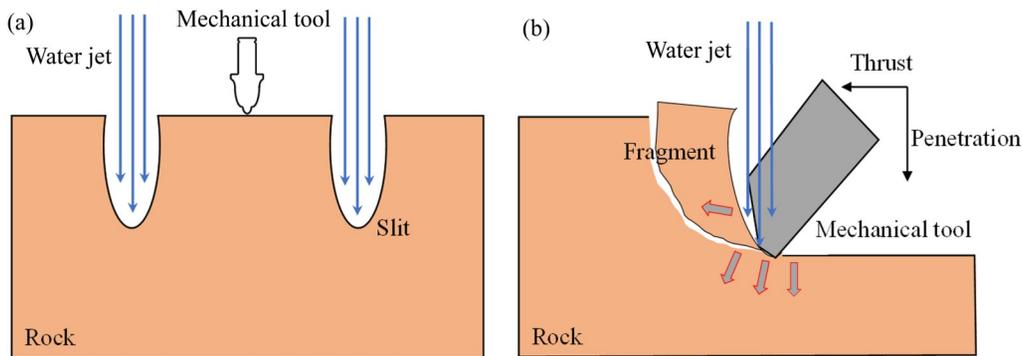
图14 膨胀破岩过程^[76]Fig. 14 Rock breaking process using volume expansion^[76]: (a) Side view; (b) Virtual view

图15 高压水射流辅助破岩作用方式

Fig. 15 High pressure water jet-assisted rock breaking mode: (a) Water jet cutting; (b) Water jet pressure expansion

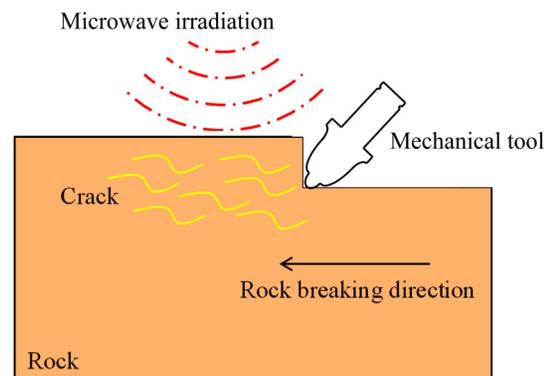
快速扩展，形成水楔效应，胀裂岩石，并能起到降温、降尘的作用，从而提高破岩效率。

REHBINDER^[81]认为，水射流辅助破岩分为三个方面作用：一是水力冲蚀，通过高压水对岩石表面进行冲蚀；二是水力破碎，高压水冲蚀过岩石表面后，继续作用于岩石内部，加速微裂隙的扩展和发育；三是孔隙水压力，高压水进入岩体内部会形成水楔效应，在岩体裂隙末端形成张拉应力，使岩体产生非弹性膨胀，促使裂隙网络生成。CICCU等^[82]开展了水射流辅助破岩试验，发现在150 MPa的高压水辅助下，机械刀具截割深度大幅提高。张文华等^[83]开展了高压水射流-机械截齿联合破岩数值模拟，发现联合破岩效率远高于高压水射流和机械刀具单独破岩的效率。卢义玉等^[84]通过水射流辅助PDC刀具破岩试验确定了水射流对机械刀具受力的影响，进一步优化了喷嘴位置。江红祥等^[85]探究了水射流参数对水射流辅助破岩效果的影响，优化射流参数，达到水射流辅助破岩最低比能。此外，在深海开采领域，李艳等^[86]探究了水射流辅助破岩的应用效果，发现高速水射流冲击破碎多金属

硫化物可以大幅提高采矿设备的效率。

1.6.2 微波辅助破岩

微波辅助破岩是利用微波加热与机械刀具破岩组合的一种新型破岩方式。在刀具破岩过程中同时施加微波能，可快速加热岩石，降低岩石强度，从而提高破岩效率，微波辅助破岩过程如图16所示^[87]。HASSANI等^[88]设计了一种微波辅助破岩设备，并对微波辅助破岩实际效果进行了测试，探究了不同岩石在不同微波功率下的破碎特性。SATISH等^[89]研究了微波加热对玄武岩的影响，结

图16 微波辅助破岩过程^[87]Fig. 16 Microwave-assisted rock breaking process^[87]

果表明,玄武岩对微波辐射的反应十分良好,能够极大降低机械截割所需的能量。在微波辐照下,岩石能够快速升温,产生的热应力使岩体内部出现新裂隙,并扩展原生裂隙,波速大幅度降低,孔隙率增大,动态压缩强度大幅降低,从而能够显著提高岩石的可切割性。严妍等^[90]对比了连续加热和脉冲间歇加热两种微波加热方式对岩石的影响,发现间歇加热更有利于机械破岩。

1.6.3 液氮辅助破岩

液氮辅助破岩利用低温液氮作为钻井流体,通过井底增压设备形成高压液氮射流,对井底岩石进行冷却压裂,然后通过机械刀具旋转切割岩石^[91]。图 17 所示为液氮辅助破岩理想破岩设备的破岩过程。液氮通过双重隔热钻柱被运输到井底,增压后对岩石进行喷射;钻柱内外管间环空区域注入空气,空气由钻孔外侧流出,对井壁及返流的液氮进行回温,防止钻口周围岩体温度骤变引起井壁坍塌;液氮冷却压裂岩石后,岩石可切割性提高,有利于机械刀具破碎岩石。该方法有效结合了液氮损伤岩石方式与机械刀具切割岩石方式,可显著提高深井硬岩钻进速度。DAI 等^[92]研究发现,液氮在提高岩石截割效率方面具有很好的效果,热冲击和射流冲击的共同作用有利于裂纹的扩展和岩石截割效率的提高。

1.6.4 激光辅助破岩

激光辅助破岩是将激光和机械刀具结合,首先利用激光辐照实现岩石的热裂解、熔化甚至汽化,使岩体内部产生局部热应力,弱化岩石的物理力学性质,然后通过机械刀具将岩石剥落。在激光辅助破岩过程中,穿孔速率计算公式修正为式(24)^[69]:

$$R = \frac{1}{A} \left(\frac{P_L}{E_{SEL}} + \frac{P_M}{E_{SEM}} \right) \quad (24)$$

式中: P_L 、 P_M 分别为激光输入功率和机械刀具功率; E_{SEL} 、 E_{SEM} 分别为激光破岩比能和机械刀具破岩比能。从式(24)可以看出,激光辅助破岩速率高于激光破岩速率,在激光辅助破岩的过程中,激光的主要作用是降低破岩门槛,便于机械刀具破岩,提高破岩效率。

1.6.5 超声波辅助破岩

超声波辅助破岩技术是运用超声波碎岩装置将机械振幅施加至岩石,使岩石固有频率(一般为 20~40 kHz)与施加给岩石的机械振动频率(可达 20 kHz 以上)相等而破碎岩石,最终达到高效破岩目的的新型破岩技术^[93],如图 18 所示。2000 年初,美国国家航天局(NASA)研制出超声波钻探取样器,进行外太空土壤、岩体、冰层的取样。黄家根等^[93]分析了超声波高频旋冲击破岩机理,发现存在最优振动频率使破岩效率最高。赵研等^[94]数值仿真了超声波辅助 PDC 切削齿振动破岩过程,分析了不同超

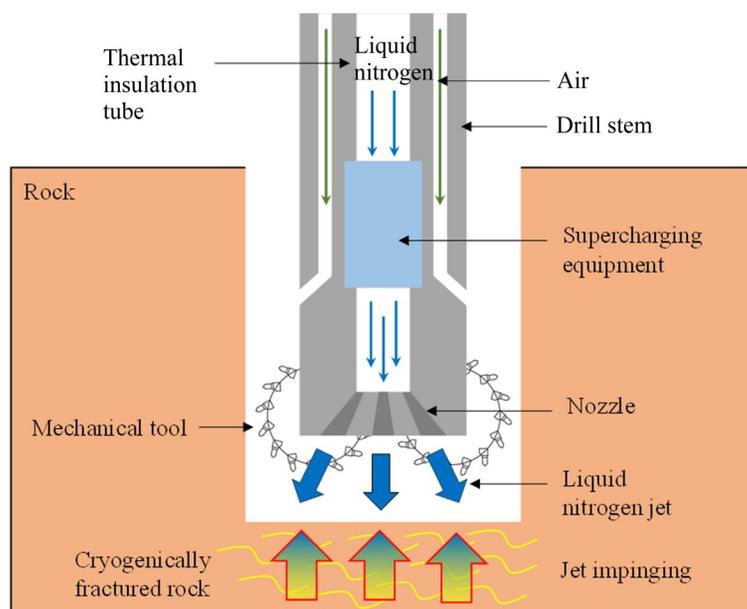


图 17 液氮辅助破岩过程^[61]

Fig. 17 Liquid nitrogen-assisted rock breaking process^[61]

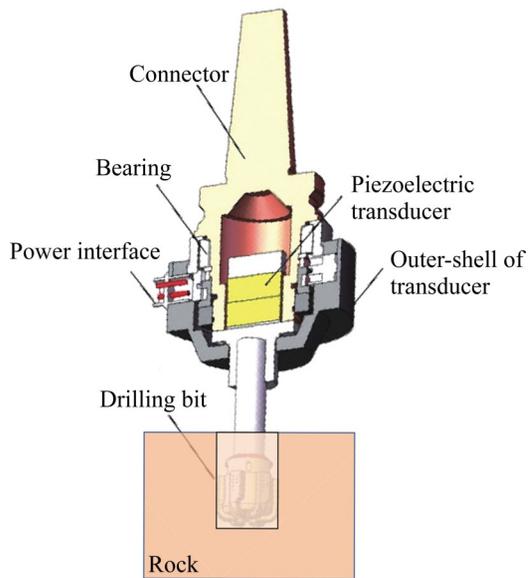


图18 超声波辅助破岩过程^[93]

Fig. 18 Ultrasonic wave-assisted rock breaking process^[93]

声波振动频率下PDC钻进破岩比功和切削力的变化规律；结果表明，在激励频率从20 kHz增长至40 kHz的过程中，破岩比功与平均切削力都呈现先减少后增加的变化趋势，即在25~30 kHz之间存在一个最优频率，使得破岩比功最小、钻进破岩效率最高；当激励频率接近岩石固有频率时，超声波振动切削的平均切削力较常规切削小20.5%，并更易产生大块岩屑。路宗羽等^[95]开展了超声波高频旋冲

钻井技术破岩试验，研究了钻压、超声波振幅、转速和钻头直径对超声波高频旋冲破岩效率的影响规律；结果表明，试验条件下超声波高频旋冲钻井技术的破岩效率相比常规旋转破岩技术提高77.65%；影响超声波高频旋冲破岩效率的因素从大到小依次是钻压、超声波振幅、钻头直径和转速。超声波高频旋冲钻井技术可为深部硬地层机械高效钻进提供一种新的破岩方法。

2 非爆破岩技术及应用

2.1 机械刀具破岩技术应用

近半个世纪以来，以机械刀具破岩为基础的非爆破岩技术和设备取得了较为突出的成果，各种旋转截齿切削式、滚刀压裂式、冲击式破岩设备相继出现。目前，应用较为广泛、破岩效果较好的机械刀具破岩设备包括：基于镐型截齿旋转切削破岩的悬臂式掘进机、滚筒采煤机；基于盘形滚刀滚压破岩的盾构机、隧道掘进机(Tunnel boring machine, TBM)、反井钻机；基于冲击头循环冲击破岩的液压破碎锤、高频破碎锤(见图19)等。

掘进机(Roadheaders)具有高机动性、灵活性的优点，在地下开采和巷道开挖中具有非常重要的地位。在20世纪40年代后期，欧洲首次将掘进机应用于煤矿开采。掘进机的截割头上安装有镐型截



图19 机械刀具破岩设备及其破岩刀具

Fig. 19 Mechanical rock breaking machines and cutters: (a) Longwall shearer; (b) Roadheader; (c) Rise drilling machine; (d) Tunnel boring machine; (e) Hydraulic crushing hammer; (f) High frequency crushing hammer

齿,截割头的旋转带动截齿旋转截割,根据截割头旋转方向可以分为横轴悬臂式掘进机和纵轴悬臂式掘进机。最早研制成功应用于巷道掘进的机型有匈牙利的F5型和苏联的ΠK-2M型掘进机。我国的掘进机研制始于20世纪60年代,目前常见的掘进机有煤炭科学研究总院生产的EBZ50TY型掘进机、三一集团生产的EBZ318H型掘进机。EBZ318H掘进机可以开挖强度达到130 MPa的岩体,截割电机功率达318 kW,截割头转速为30.6 r/min,能够应用于煤巷或全岩巷掘进,极大提高了开挖效率。此外,还有各类智能掘进机和掘锚护一体机,应用范围不断扩展。然而掘进机在破碎硬岩时,截齿易发生磨损,影响掘进效率,因此掘进机在硬岩矿山应用较少。李夕兵等^[96]采用EBZ160TY型掘进机研究了非爆破连续开采在坚硬磷矿体中的应用效果,结果表明,在松动矿体内该掘进机的开采效率达到72 t/h,高于钻爆法的开采效率,但在非松动区域开采时,截齿磨损严重。王少锋等^[97-98]进一步采用纵轴悬臂式掘进机和横轴悬臂式掘进机对高应力诱导致裂后的深部坚硬磷矿体进行非爆机械化开采尝试,开采效率分别可达107.7 t/h和75.8 t/h。

采煤机(Shearers)是综采成套装备的主要设备,使用最广的为滚筒采煤机。在长壁采煤工作面,滚筒按规定的牵引速度前进,矿岩经过滚筒上截齿的旋转截割掉落并被装载机构装入工作面输送机,实现高效率机械化连续开采。采煤机可在厚度为1.0~9.0 m、纵向和横向倾斜度低于45°的煤层中作业,采煤机采高范围越大,适应的倾角角度越小,其牵引速度可达40 m/min,破岩比能根据煤矿硬度的不同在0.7~10 MJ/m³范围内。20世纪40年代,苏联首先研制出截框式采煤机;50年代,英国研制出滚筒采煤机;60年代初,我国引进并改进采煤机,经过几十年的不断创新,滚筒采煤机在我国煤矿得到了广泛应用,显著提高了煤矿机械化程度和采煤效率。至今为止,国外相继研制出DBMN7050采煤机、移动式采煤机、CM连续采煤机、液压冲击式连续采掘机,我国也研制出装机功率达3450 kW的MG1100/3050-WD型采煤机,可实现9 m厚度煤层的一次采全高智能化高效开采,年生产能力能够达到1500万t,保障了我国在“十三五”期间重点建设的14个亿t级大型煤矿的高效开采,促进了我国煤矿业的发展。但采煤机结构复杂、机体庞大,且

停工检修时间长、刀具磨损快、成本昂贵,通常只应用于较大型软岩矿山开采,难以在硬岩矿山普遍推广使用。

隧道掘进机是通过旋转刀盘上的滚刀挤压剪切破坏岩石,并能够实现破岩、出渣、支护连续作业。普遍而言,隧道掘进机包含盾构机和TBM(Tunnel boring machine),欧美国家将隧道掘进机统称为TBM,日本则统称为盾构,我国习惯上按照用途进行区分,盾构用于软土地层开挖,TBM用于岩石地层开挖。与盾构相比,TBM通常不具备土压、泥水压等维持掌子面稳定的能力。早在1846年,MAUS设计出最早的隧道掘进机,后WILSON研制出具有现代TBM特征的隧道掘进机,但受到工艺水平的限制,难以达到应用需求,发展较为缓慢。直至1956年,ROBBINS研制出采用盘形滚刀的TBM,达到良好的应用效果,促进了隧道掘进机的发展。近几十年来,随着地下隧道工程数量的增加及质量要求的提高,盾构和TBM得到长足的进步和发展。目前,国外的隧道掘进机生产厂家主要有罗宾斯公司、三菱重工、川崎重工、威尔特公司及海瑞克公司等。我国中铁装备、铁建重工等隧道掘进机生产厂家也实现了泥水平衡盾构、土压平衡盾构、TBM系列产品的自主设计制造^[99]。我国自主研发的超大直径复合土压平衡盾构机“麒麟号”,开挖直径可达12 m,适用于地下水少、渗透系数较小的黏性地层,解决了盾构掘进开挖、渣土改良、开挖面稳定性控制、物料输送交互作业等难题,成功应用在长距离复合地层;我国出口的最大直径硬岩TBM“雪山号”,开挖直径达11 m,能够开挖强度为15~160 MPa的岩体,针对埋深大、强度高、软岩破碎的区域,具备快速超前处理不良地质的能力,成功应用于澳大利亚SnowyHydro2.0项目建设。隧道掘进机开挖效率高、施工质量好,但体型庞大、成本昂贵,在开挖超过150 MPa的极坚硬岩体时,刀具磨损严重,制约了施工速度。将TBM与高压水射流破岩、激光破岩等技术结合起来,可以进一步提高开挖效率,改善TBM对硬岩的适用性。

1871年,HONIGMANN通过多次扩孔工艺实现了直径为7.65 m的井筒钻凿,铺就了现代钻井法凿井工艺的发展道路^[100]。20世纪50年代,衍生出反井钻机钻井凿井技术,即通过反井钻机由下向上

钻凿井筒,该技术利用岩石自重排渣,克服了钻井排渣困难的弊端,提高了钻进效率。但反井钻机主要应用于岩石稳定的地层,在自支撑能力较差的地层使用易造成坍塌。目前,依靠导孔偏斜控制技术,国外生产的反井钻机钻凿深度可达千米,钻井直径可达7 m。我国从20世纪80年代开始研制反井钻机,已研制出ZFY5.0/600等大型反井钻机,钻井最大深度达560 m,钻井直径达到6 m,钻机上安装的适用于硬岩钻进的新型镐形镶齿滚刀,可以满足不同岩石条件下的工程需要,解决了硬岩地层中钻进反井难题,既可以应用于煤矿等软岩地层,也可以应用于强度达300 MPa以上的硬岩地层。

液压破碎锤作为一种冲击破岩设备,应用灵活,使用维护方便,被广泛应用于矿山及市政建设中的岩石、矿石、混凝土破碎。1967年,德国Krupp公司研制出了第一台液压冲击器。经过几十年的发展,德国Krupp、芬兰Rammer、美国Stanley、Montabert、日本Furukawa、韩国GB/SB等一系列液压破碎锤产品占领了全球的主要市场。我国从20世纪70年代开始研制液压破碎锤,至今山河智能装备集团的SWB系列破碎锤和安徽惊天公司的YB系列破碎锤在同类产品中达到国际先进水平。与活塞式破碎锤相比,高频破碎锤利用高速运转所产生的破坏力破碎岩石,每分钟打击次数达1300~3000次,具有破岩效率更高、能耗和排放更少、噪声小的优点^[101]。2021年笔者利用液压高频破碎锤在深部坚硬磷矿体中进行了开采试验,开采效率达50.6 t/h,达到了矿山开采的需求,同时该破岩方法也表现出工时利用率高、粉尘少,扰动小的优点。

机械刀具破岩技术和设备层出不穷,从无到有,从有到新,不断改进,在各类岩石工程中得到成功应用。综合分析上述机械刀具破岩设备可以发现,极坚硬岩石的破碎仍然是亟需解决的难题。对于极坚硬岩石,一方面从岩石本身出发,可通过改变应力状态或人工预制缺陷提高岩石的截割特性;另一方面,可通过提高现有破岩设备的破岩能力,增大破岩功率来提高硬岩的破碎效率。然而,增大机械刀具的破岩载荷和破岩功率无疑会增大设备体积,造成设备成本的提高,并影响应用的灵活性。因此,需要改进刀具载荷施加方式,通过“静载荷+动载”的方式提高机械刀具对硬岩的破碎能力。

2.2 水力破岩技术应用

1947年,水力压裂技术在美国Hugoton气田井首次应用,自此开始了水力压裂技术研究的序幕。经过70多年的发展,该技术从理论研究到现场实践取得了惊人的发展,并逐步应用在页岩油气开发、煤矿开采、地应力测量、地热资源开发、核废料处理、井下岩层控制等岩石工程领域。水射流技术始于19世纪中叶,当时主要用于淘金及金矿开采,直至20世纪中期,苏联将水射流技术应用于煤矿开采。目前,水射流技术已被广泛应用到水力清洗、切割、采矿等领域。随着开采深度的增加,普通的水力破岩已经无法应用到复杂的开采环境,为了满足深部资源的开采需求并提高资源的开采效率,脉动水力压裂技术、高压电脉冲压裂技术、定向水力压裂技术、超短半径水平井技术、水射流与水力压裂联合作业技术涌现出来并成功应用于煤层增透以及煤层气、石油气增产等方面。

脉动水力压裂通过脉动泵将连续流体转化为脉动流体,依靠周期性的脉动射流致裂岩石。该技术具备脉动疲劳和水楔作用双效破岩机制,在疏通岩体孔隙通道、降低注液压力、控制压裂效果等方面具有显著优势。翟成等^[102]发现原生裂隙在强烈的脉动水压力作用下,会在裂隙末端产生交变应力,使孔隙反复压缩、膨胀,最终发生疲劳损伤破坏。聂翠平等^[103]根据低频作用下瞬间作用力变大的原理发明了一种新型的石油井下低频脉动水力压裂技术,在实际工程应用中发现“多裂缝”油气试验井增产189.47%。LI等^[104-105]提出了变频脉冲的压裂工艺,相关研究表明选择先低频后高频的压裂工艺有利于提高疲劳效果和裂缝网络形成的效率。CHEN等^[106]研制了三轴加载可调频高压脉冲注液压裂系统,并提出了基于压力-流量调节的变频脉冲水力压裂技术。

高压电脉冲技术是在水力压裂的基础上,附加高压放电产生脉冲荷载,利用脉冲荷载在岩层裂隙的一端形成水激波及振动效应,从而改变岩体的裂隙参数和形态特征,增大岩层的渗透性。电脉冲技术早在20世纪就应用在油田增产增注上,先后在国内油水井应用17口,有效率达90%,累计增液6192.6 t。鲍先凯等^[107]研究表明,在高压脉冲作用下裂隙尖端出现较大的拉应力,形成应力集中,裂隙会更快地产生和延伸。马帅旗等^[108]发现,该技

术能改变煤层孔隙和裂隙结构,提高煤层的增透效果。BAO等^[109]研究表明,在相同水压条件下,高压电脉冲技术的效果明显优于普通的水压压裂,并且放电电压越高,孔隙和裂纹数量越多,范围越大。BIAN等^[110]发现,随着峰值电压的增大,可以形成更多的长裂纹和微裂纹,扩大破坏损伤面积,提高水力压裂的速率。

煤层中水力压裂裂缝的扩展方向一般被钻孔周边的应力分布所控制,由于在实际工程中需要裂缝按一定的方向扩展,因此产生了定向水力压裂技术。该技术是在岩层中施工定向钻孔,定向孔可以引导裂隙的发展方向,形成更大范围的压裂区域,增大了卸压增透区,提高瓦斯抽采量。徐幼平等^[111]模拟了水力压裂的起裂、扩展过程,并将定向水力压裂技术进行了现场实际应用。李栋等^[112]在定向水力压裂技术基础上提出多孔割缝增透方法,大幅提高了煤层的透气性,同时还有效降低了揭煤时间以及高压水对围岩的破坏。HUANG等^[113-114]研究发现,将主顶板的压裂位置向矿柱内部移动,可以达到定向水力压裂的效果,而且还可以降低应力以及顶板的冲击力。YU等^[115-116]通过地表定向水力压裂技术进行顶板控制,消除井下工作面周围的应力集中。

超短半径水平井是指曲率半径远比常规的短曲率半径水平井更短的一种水平井,又称径向水平井技术。它是以高压水射流破岩为基础的新型油田增产工艺,在20世纪80年代由美国Bechtel公司和Petrophysics公司研制。1994年,吴德元等^[117]将径向水平井技术的概念引入国内,为我国的资源开采提供了一种高效经济的手段。1998年,杨永印等^[118]通过地面全尺寸模拟水平钻进试验进一步验证了高压水射流钻径向水平井技术的可行性。我国首次在辽河油田开展了径向水平井技术的现场实践,通过该技术成功改造了韦5井,将日产量提高约3.8倍。

水射流与水力压裂联合作业技术是将水射流与水力压裂技术联合起来,分别利用两者不同的特性来对岩层进行压裂,实现水射流与水力压裂技术的有机结合。该技术先用高压水射流冲击岩体,使钻孔周围的岩体发生破碎,并在岩体内形成大量的裂隙,再在钻孔内注入压裂液来压裂岩体,不仅可以降低岩层起裂的压力,还可以提高资源开采效率。

王耀锋^[119]将三维旋转水射流和水力压裂联合起来,同步压裂岩体,实现了煤层的卸压和增透。李宗福等^[120]在矿山实际应用中发现,与单一方法相比,联合作业可以明显提高煤层的透气性,提高瓦斯抽采浓度和抽采效率。徐雪战^[121]研究表明,岩层在受到水射流冲击后,原岩应力圈向岩体深部转移,使岩体的渗透率增大,水力压裂效果得以提升。

水力压裂和水射流技术在常规油气开发、煤层气以及页岩气开发中应用广泛,极大地推动了石油、矿业领域的发展。随着资源开采走向深部,水力破岩技术面临着更大的需求和挑战。目前,水力破岩技术面临的困难主要来自复杂地质条件所带来的难以预测的动力灾害,盲目地进行水力破岩可能会造成不可预估的次生灾害。水力破岩技术需要开发新型压裂材料,降低压裂液成本,提高耐高温性能,研究可回流控制的支撑液,开发适应多类地层的水力破岩技术。此外,伴随人工智能技术的发展,迫切需要逐渐实现水力压裂装备的实时监测、参数优化、远程操控的一体化和智能化,形成智能压裂系统。

2.3 微波破岩技术应用

1945年,一位美国雷达工程师偶然发现了微波的热效应,此后逐渐应用到食品、卫生等相关行业,直至今日,微波技术已经在采矿、选矿、冶金等行业应用。KINGMAN等^[122]发现微波对不同矿物成分的矿石加热效果是不同的。VORSTER等^[123]证明了微波是降低矿物粉碎过程能耗的可行手段。WHITTLES等^[124]将微波照射归结为“热点效应”。在上述研究的基础上,JONES等^[125]量化了微波功率密度和照射时间对岩石强度的影响,认为脉冲波可以有效弱化岩石。此外,AMANKWAH等^[126]、SAMOUHOS等^[127]发现在处理红土矿方面,微波辐射存在巨大潜力。LU等^[128-129]研究发现,对于不同矿物成分的岩石进行选择加热,其致裂效果更好。HARTLIEB等^[130-131]实验表明,微波照射矿石会造成矿物性质的显著变化,可以应用于矿物加工。

目前,微波破岩尚没有得到实质性的工程应用,且在微波破岩机理研究、高效加热设备和控制装置研发等方面还不够完善。随着对微波破岩技术研究的逐渐深入,微波破岩作为一种清洁高效的非

爆破岩技术,有望在各个领域发挥重要作用,具有广阔的工程应用前景。

2.4 热冲击破岩技术应用

2.4.1 液氮射流破岩技术应用

1997年, MCDANIEL等^[55]首次开展了低温液氮压裂现场应用,实现了5口井压裂增产,压裂后产气量大幅提升。随后,该方法被应用于页岩气开采。LI等^[132]对比了液氮压裂技术与水力压裂技术,认为液氮的低温特性及膨胀增压过程能够很好地改造储层,且不会污染储层。QIN等^[133]利用真三轴设备研究了液氮在地层中传热及岩体裂隙扩展情况,结果表明液氮循环注入能够扩大低温影响区域,可更加高效地产生裂隙网络,是一种有效的煤层气开发技术手段。蔡承政等^[134]研究了液氮对页岩的致裂效应,发现岩石经液氮冷却后,波速降低、渗透率增大。WU等^[135]对比了液氮射流破岩和水射流破岩相关试验结果,发现液氮射流破碎岩石体积更大,能耗更低,证明了液氮射流破岩的应用价值。

目前,液氮在运输过程中损耗量大,导致成本增加。随着工业技术的发展,液氮的运输与储存问题将会得到有效解决,将液氮应用到储层增透增产、坚硬岩石的破碎领域具有广阔的发展前景。目前已在室内试验中验证了液氮射流、液氮压裂技术在储层压裂、岩石破碎等方面具有明显的优势。近年来,高温干热岩等清洁地热能源的开发日益兴起,将液氮破岩应用于干热岩层的地热能开采中将会是未来的研究热点之一。由于液氮与干热储层存在巨大的温度差,与常规水力压裂相比,液氮压裂能够产生更为丰富的裂隙网络,同时液氮在裂隙中流动时会升温汽化膨胀增压,促进裂隙扩展,可进一步提高储层压裂效果。此外,液氮压裂技术也可用于煤层气、页岩气等低渗能源物质的开发。

2.4.2 激光破岩技术应用

1994年,在美国国会通过军用大功率激光器向工业转化的议案中,首次提出了激光破岩思想。该技术的发展和研究经历了激光切割、激光破岩和激光辅助钻井三个阶段。1968年,美国研发出世界上第一台红宝石晶体激光器,初步设想将其应用到破岩、钻井领域,但当时的激光器功率小、输出能量低、波长较长且难以聚焦,无法实现激光的远距离

传输,难以应用于软化、切割硬岩。之后,美国气体技术研究所提出将高能激光应用到天然气钻孔中,Argonne国家实验室及科罗拉多矿业学院利用激光器开展了一系列破岩试验和基础理论研究,发现激光破岩的效率远高于机械刀具破岩效率^[136-137]。21世纪初,日本学者利用二氧化碳激光器在不同传导介质中开展岩石钻孔试验,发现岩石的石英含量、颜色、矿物胶结情况、表面粗糙度、岩性等因素直接影响激光破岩比能^[138]。目前高能激光器尚未实现工业化,现有的激光破岩技术主要用来辅助破岩。随着激光技术的发展和应用经验的积累,以及材料、激光传输等难题的攻克,将会极大推动激光在岩石破碎领域的应用。

2.5 联合破岩技术应用

2.5.1 高压水射流辅助破岩技术应用

1976年,美国科罗拉多矿业学院利用315 MPa高压水辅助全断面掘进机破岩,证实高压水射流辅助破岩能够提高掘进效率,自此国内外展开了大量有关水射流辅助破岩技术的研究。1983年,英国的RH22掘进机结合了水射流技术,井下截割试验发现水射流辅助掘进机破岩效率提高了50%,破岩比能降低,粉尘大幅减少^[139]。日本于1984年开始采用高压水射流切割技术,在1985年研制出结合高压水射流切割技术的中硬岩掘进设备,并开展了十几年的现场试验,证明了水射流辅助破岩的适用性^[140]。1988年,Flowdfill公司与Grace钻井公司合作研发出双管射流辅助钻井系统,极大提高了钻进效率^[141-142]。长沙矿山研究院在1982年研制出我国第一台水射流钻机,水压可达300 MPa,通过一系列射孔试验,证明了水射流钻机在坚硬岩石中应用的可行性和有效性^[143]。2013年,LU等^[144]研究设计出一套磨料水射流辅助钻井设备,并与常规水射流技术进行对比,发现在磨料水射流的辅助下,钻井深度提高,转矩和推力减小,钻头磨损程度显著降低。

2.5.2 微波辅助破岩技术应用

将微波加热技术与机械刀具截割破岩结合,能够有效降低机械刀具的破岩比能,延长刀具的使用寿命,有望成为未来金属矿床开采的一种替代方式。张强^[145]对比了微波辅助钻机破岩和未经微波处理的钻机破岩数据,发现经微波处理的钻机钻进

深度是未经微波处理的 6.5 倍左右。目前, 微波辅助破岩仍处于研究探索阶段, 大型设备的研制仍存在许多难题, 微波辐照设备与机械刀具的配合、机械刀具对高温的耐受性等问题亟需解决, 将微波辅助破岩应用到实际工程现场中仍然任重道远。

2.5.3 液氮辅助破岩技术应用

黄中伟团队提出了一种液氮辅助钻井提速新方法, 以液氮作为钻井流体, 使用双层隔热钻柱, 利用井下的增压设备实现高压液氮辅助破岩^[91]。该方法能够实现高效破岩和储层增透助产, 但在实际工程应用中仍存在诸多难点和挑战。液氮的低温特性使得管材的韧性大幅度降低, 承受冲击动载能力明显下降, 管柱脆断风险大幅提高。同时, 液氮黏度低, 在钻井排砂过程中容易出现脱砂和砂堵等一系列问题。此外, 在液氮压裂过程中, 通过“油套同注”的方法实现了现场应用, 但施工成本太高, 难以大规模应用。因此, 应从管柱成本和液氮注入技术方面入手, 降低管柱成本, 优化液氮注入技术, 实现低成本施工。

2.5.4 激光辅助破岩技术应用

EZZEDINE 等^[146]通过一系列激光辐照/冲击岩石试验和数值模拟, 发现激光辅助破岩的主要机制是冲击效应而非热效应, 同时明确了激光辅助破岩在钻井过程中能够改善地层, 提高破岩效率。POONIWALA^[69]提出了激光-机械三牙轮钻头的概念和设计方案。ZEDIKER^[147]开展了激光与 PDC 钻头联合钻进的现场试验, 实现了激光辅助下的高速钻进, 证明了激光辅助破岩的有效性。有关激光辅助破岩的研究, 国内目前仍处于室内试验和理论研究阶段, 李美艳等^[148]、韩彬等^[149]对激光辅助破岩和射孔进行了一系列室内试验, 从微观角度分析了岩石受热破坏后的形貌特点, 并通过 PDC 钻头对岩石进行了可钻性试验, 也证明了激光辅助破岩的有效性。

非爆破岩技术的应用, 丰富了岩石工程的施工手段, 促进了非爆破岩理论和方法的发展, 但受到作业设备和作业条件的限制, 非爆破岩技术的应用仍然面临严峻挑战, 有许多应用难题亟需攻克。图 20 总结了非爆破岩技术的优势和发展方向。

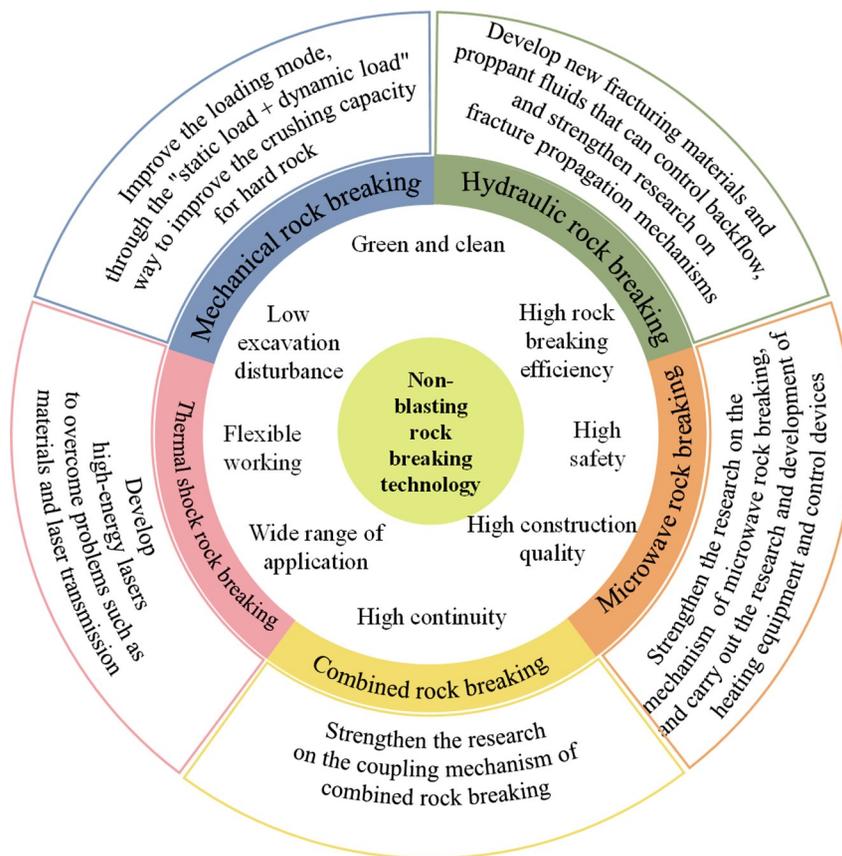


图 20 非爆破岩技术的优势和发展方向

Fig. 20 Advantages and development directions of non-blasting rock breaking technology

3 非爆破岩面临的挑战与对策

非爆破岩极大程度克服了钻爆法的弊端，但在理论发展和技术应用过程中，仍然存在以下挑战性问题：1) 现有岩石破碎理论未充分考虑深部复杂应力条件对岩石破碎特性的影响，而复杂应力条件直接影响到非爆破岩效果；2) 硬岩强度大、完整性好、耐磨性高，破岩难度大，各类非爆破岩技术难以实现硬岩的高效破碎；3) 目前非爆破岩装备未能充分满足深部硬岩破碎工程对安全、高效、经济性、精细化、智能化的需求。

总而言之，目前岩石工程的施工难度越来越大，对破岩效果、工程质量的要求越来越高，非爆破岩需要实现对复杂地质环境下坚硬岩石的经济、智能、安全、高效破碎，其面临的挑战与对策如图21所示。

岩石工程逐渐进入深部，在深部岩石工程中，应力条件对施工的影响不容忽视，研究者需要进一步开展深部复杂应力条件下的破岩试验和理论研究，探究地应力对非爆破岩的影响，建立考虑深部复杂边界应力作用影响的破岩模型，指导深部岩石工程施工。处于高地应力状态下的深部岩体，储存有大量的弹性势能，一方面会严重威胁到岩石工程的安全，但另一方面，弹性势能可以作为破岩能

量，提高非爆破岩效率。在香山第175次科学会议上，李夕兵提出了将高地应力“变害为利”的构想，即通过开挖诱导工程，使矿体内发生应力重分布，诱导深部高应力预先致裂岩体，从而提高该部分硬岩矿体的可切割性，实现高效非爆开采^[150-151]。在非爆破岩发展进程中，需要进一步探寻有利于岩石破碎且防止灾害发生的深部高应力诱导与能量调控方法，研究深部岩体应力条件、储能特性与外界破岩作用载荷的耦合特性，开发深部高地应力与高储能诱导利用协同破岩方法与技术。此外，针对高储能岩体，需要研究深部硬岩破碎过程的多场多相耦合及多尺度破裂、破坏、破碎过程，揭示破岩扰动诱发高储能岩体动力灾害的力学及能量机制，提出针对性的防控方法，在诱导利用高应力和高储能促进破岩效率的同时，防止破岩扰动诱发岩体动力灾害的发生，从而实现深部硬岩的安全高效破碎。

现有岩石破碎技术的破岩载荷作用方式主要有机械刀具切削、冲击、冲击+切削、水射流、热能冲击等，但单一的破岩载荷作用方式难以实现硬岩的高效破碎。联合破岩则是通过高压水射流、微波、液氮、激光等措施，改变岩石的物理力学性质，辅助机械刀具破岩，从而提高破岩效率。目前，多破岩方式联合破岩的耦合机制不清，需要研究机械刀具载荷与高压水射流或者热冲击载荷的耦合机制，揭示机械与水/热力联合破岩特性，开发

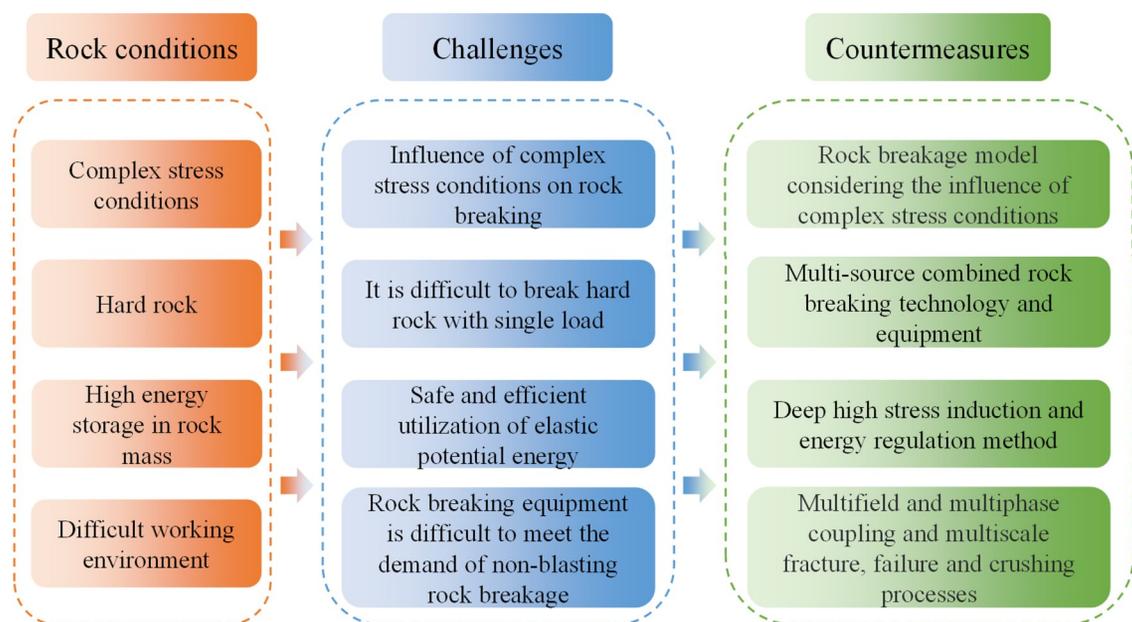


图21 非爆破岩面临的挑战与对策

Fig. 21 Challenges and countermeasures of non-blasting rock breaking

多源联合破岩技术及装备。除目前广为熟知的联合破岩方式外, 美国 Petra 公司研发的“Swifty”钻机, 可在非接触状态下利用超高温热能(超过 982 °C 的超高温气体), 通过热散裂技术, 实现硬岩的高效破碎。HyperSciences 公司也推出了一种基于高超声速弹丸撞击技术的掘进技术, 在开挖硬岩和磨蚀性岩层时效率极高。硅谷初创公司 Earthgrid 正在开发一款等离子挖掘机器人, 其首先使用多个高达 27000 °C 的等离子炬钻产生的超高温使岩石产生裂缝并汽化, 然后继续用高压破坏已经剥落的岩石, 使其分裂成更小的碎块, 最终变成粉末。由此可见, 要实现硬岩的高效破碎, 要从岩石本身和破岩设备两方面着手。硬岩可截割性差, 需要通过高温预处理、人工预制缺陷等方式, 破坏岩石的完整性, 提高硬岩可截割性。破岩设备在破碎硬岩时需要提供更大的破岩载荷, 破岩设备会朝着大型化发展, 但地下岩石工程作业空间有限, 大型设备难以应用, 破岩载荷的优化提升需要从改变载荷类型出发, 将传统的静载破岩转为“动载荷+静载”耦合破岩, 对硬岩同时施加动载和静载, 从而实现硬岩的高效破碎。此外, 对于难破碎硬岩, 应当以岩石

可截割性为衡量参数, 构建岩体原位监测感知、岩体可截割性精准改善、破岩参数智能调控一体化的非爆破岩模式。

如图 22 所示, 为了满足深地工程建设和深地资源开发的需求, 深部硬岩破碎需要向着更高效、更安全、更经济、更精细的方向发展。在理论方面, 需要突破已有岩石破碎理论的局限, 建立深部高应力与破岩载荷耦合、多源破岩载荷耦合、破岩过程多场多相多尺度耦合作用力学与能量模型; 在技术及装备方面, 需要实现技术变革和装备升级, 开发深部高地应力与高储能诱导利用协同破岩方法与技术以及机械、水力、热力等多源联合破岩技术及装备, 并努力实现破岩设备的机械化和自动化、破岩作业过程的连续化和精细化、破岩过程管控的数字化和信息化以及破岩全过程的智能化和无人化; 在破岩设计方面, 需要重视岩石破碎全周期优化设计, 开发与深部岩体特性、地应力条件、破岩需求协同匹配的精细化智能破岩方法与技术体系, 实现原本高风险的岩石破碎作业向低风险、高安全度方向发展, 并实现深部高地应力等灾害条件向促进破岩的有利因素转变。

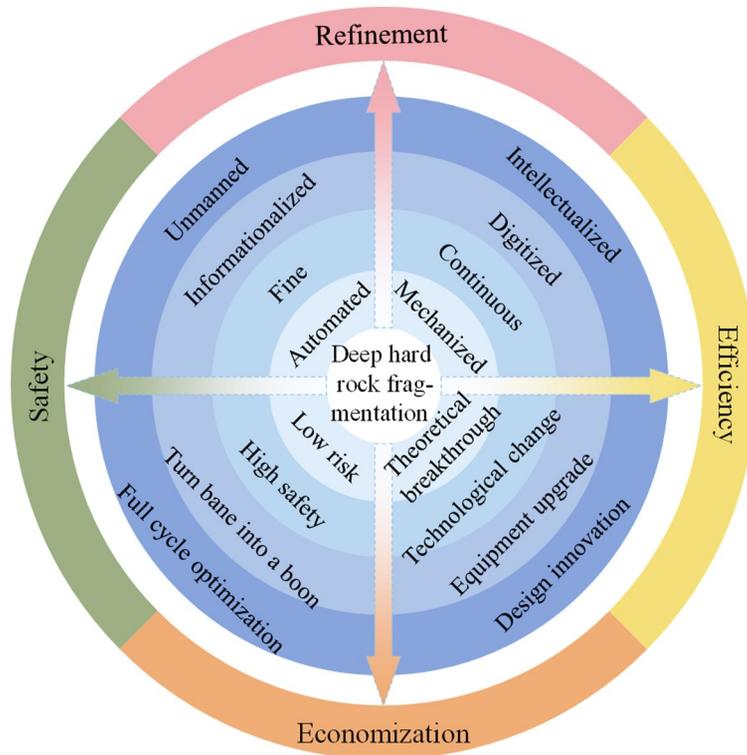


图 22 深部硬岩非爆机械化破碎技术发展方向

Fig. 22 Development direction of non-blasting mechanized breaking technology in deep hard rock

4 结语

随着地下资源开采及地下空间开发利用规模不断加大,非爆破岩理论和技术得到了长足的发展,有力保障了岩石工程的安全、高效、经济、绿色施工。本文综述了机械刀具破岩、水力破岩、微波破岩、热冲击破岩、膨胀破岩、联合破岩理论和技术,并基于目前非爆破岩所面临的困难与挑战,展望了非爆破岩的未来发展方向。

1) 面对现代岩石工程施工环境的复杂化、施工条件的困难化、施工质量的高标准化,非爆破岩亟需完成理论突破、技术变革、设备升级、设计创新,实现对复杂地质环境下坚硬岩石的安全、高效、经济、智能、绿色破碎。

2) 对于具有高应力、高储能、强扰动特性的深部硬岩,需要探究深部硬岩破碎过程的多场多相耦合及多尺度破裂、破坏、破碎过程,揭示破岩扰动诱发高储能岩体动力灾害的力学及能量机制,探寻有利于岩石破碎且防止灾害发生的深部高应力诱导与能量调控方法,开发深部高地应力与高储能诱导利用协同破岩方法与技术。

3) 硬岩破碎难度大,需要从改善岩石可截割性与提高载荷破岩能力两方面着手,研究多种类型载荷耦合破岩机制,开发多源联合破岩技术及装备,并构建集岩体原位监测感知、岩体可截割性精准改善、破岩参数智能调控一体化的非爆破岩模式。

REFERENCES

- [1] 谢和平,李存宝,高明忠,等.深部原位岩石力学构想与初步探索[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):217-232.
XIE He-ping, LI Cun-bao, GAO Ming-zhong, et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 217-232.
- [2] 李夕兵,姚金蕊,宫凤强.硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2551-2563.
LI Xi-bing, YAO Jin-rui, GONG Feng-qiang. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2551-2563.
- [3] ZHOU Z, CAI X, LI X, et al. Dynamic response and energy evolution of sandstone under coupled static - dynamic compression: Insights from experimental study into deep rock engineering applications[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 1305-1331.
- [4] ZHU W, LI S, LI S, et al. Influence of dynamic disturbance on the creep of sandstone: An experimental study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 1023-1039.
- [5] 何满潮,郭鹏飞,张晓虎,等.基于双向聚能拉张爆破理论的巷道顶板定向预裂[J].爆炸与冲击,2018,38(4):795-803.
HE Man-chao, GUO Peng-fei, ZHANG Xiao-hu, et al. Directional pre-splitting of roadway roof based on the theory of bilateral cumulative tensile explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(4): 795-803.
- [6] 杨仁树,左进京,杨国梁.切缝药包定向控制爆破的试验研究[J].振动与冲击,2018,37(24):24-29.
YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, YANG Guo-liang. An experimental study on slotted cartridge directional controlled blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(24): 24-29.
- [7] 董志富,翟会超,刘银,等.特殊条件下露天矿山非常规爆破技术及其应用[J].黄金,2021,42(8):48-52.
DONG Zhi-fu, ZHAI Hui-chao, LIU Yin, et al. Unconventional blasting technology in open-pit mines under special conditions and its application[J]. Gold, 2021, 42(8): 48-52.
- [8] LI X, GONG F, TAO M, et al. Failure mechanism and coupled static-dynamic loading theory in deep hard rock mining: A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(4): 767-782.
- [9] LI X, CAO W, TAO M, et al. Influence of unloading disturbance on adjacent tunnels[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 84: 10-24.
- [10] WANG S, LI X, WANG S. Three-dimensional mineral grade distribution modelling and longwall mining of an underground bauxite seam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 123-136.
- [11] WANG S, LI X, YAO J, et al. Experimental investigation of rock breakage by a conical pick and its application to non-explosive mechanized mining in deep hard rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 122: 104063.
- [12] DEWANGAN S, CHATTOPADHYAYA S, HLOCH S. Wear assessment of conical pick used in coal cutting operation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5):

- 2129-2139.
- [13] NAHAK S, CHATTOPADHYAYA S, DEWANGAN S, et al. Microstructural study of failure phenomena in WC 94%-CO 6% hard metal alloy tips of radial picks[J]. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2017, 11(1): 36-47.
- [14] EVANS I. Line spacing of picks for effective cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1972, 9(3): 355-361.
- [15] ROXBOROUGH F, LIU Z. Theoretical considerations on pick shape in rock and coal cutting[C]//GOLOSINSKI T S. *Proceedings of the Sixth Underground Operator's Conference*. Kalgoorlie: [s.n.], 1995: 189-193.
- [16] GOKTAN R. A suggested improvement on Evans cutting theory for conical bits[C]//GURGENCI H, HOOD M. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Mine Mechanization and Automation*. Brisbane: [s. n.], 1997: 57-61.
- [17] GOKTAN N, GUNES R. A semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks[J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2005, 105(4): 257-263.
- [18] BILGIN N, DEMIRCIN M, COPUR H, et al. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(1): 139-156.
- [19] TIRYAKI B, BOLAND J, LI X. Empirical models to predict mean cutting forces on point-attack pick cutters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(5): 858-864.
- [20] BAO R, ZHANG L, YAO Q, et al. Estimating the peak indentation force of the edge chipping of rocks using single point-attack pick[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(3): 339-347.
- [21] INNURATO N, ORESTE P. Theoretical study on the TBM tool-rock interaction[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29, 297-305.
- [22] EVANS I. The force required to cut coal with blunt wedges[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1965, 2(1): 1-12.
- [23] AKIYAMA T. A theory of the rock-breaking function of the disc cutter[J]. *Komatsu Technology*, 1970, 16(3): 56-61. (in Japanese)
- [24] ROXBOROUGH F, PHILLIPS H. Rock excavation by disc cutter[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1975, 12(12): 361-366.
- [25] OZDEMIR L. Development of theoretical equation for predicting tunnel boreability[D]. Colorado: Colorado School of Mines, 1977.
- [26] ROSTAMI J. Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutter through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure[D]. Colorado: Colorado School of Mines, 1997.
- [27] SONG H, SHI H, JI Z, et al. The percussive process and energy transfer efficiency of percussive drilling with consideration of rock damage[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 119: 1-12.
- [28] YANG T, ZHU W, YU Q, et al. The role of pore pressure during hydraulic fracturing and implications for groundwater outbursts in mining and tunnelling[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(5): 995-1008.
- [29] HUBBERT M, WILLIS D. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. *Transactions of the AIME*, 1957, 210(1): 153-168.
- [30] HAIMSON B, FAIRHURST C. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1967, 7(3): 310-318.
- [31] DETOURNAY E, CHENG A. Influence of pressurization rate on the magnitude of the breakdown pressure[M]. [S.l.]: American Rock Mechanics Association, 1992.
- [32] SONG I, HAIMSON B. Effect of pressurization rate and initial pore pressure on the magnitude of hydrofracturing breakdown pressure in Tablerock sandstone[C]//DC Rocks 2001-The 38th U S Symposium on Rock Mechanics. [S.l.]: American Rock Mechanics Association, 2001: 235-242.
- [33] 曹平, 曹日红, 赵延林, 等. 岩石裂纹扩展-破断规律及流变特征[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(8): 1737-1762.
CAO Ping, CAO Ri-hong, ZHAO Yan-lin, et al. Propagation-coalescence and rheologic fracture behavior of rock cracks[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(8): 1737-1762.
- [34] 曹平, 陈绍名. 水岩作用下岩体裂纹亚临界扩展[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(5): 1325-1331.
CAO Ping, CHEN Shao-ming. Subcritical growth of rock crack under water-rock interaction[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(5): 1325-1331.
- [35] LI G, LI L, TANG C. Study on the mechanisms of hydraulic fracturing crack initiation and propagating[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 188: 101-105.

- [36] HEYMANN F. High-speed impact between a liquid drop and a solid surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(13): 5113–5122.
- [37] ZHOU Q L, LI N, CHEN X, et al. Analysis of water drop erosion on turbine blades based on a nonlinear liquid – solid impact model[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(9): 1156–1171.
- [38] 黄飞. 水射流冲击瞬态动力特性及破岩机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
HUANG Fei. On the transient dynamics of water jet impinging target and the mechanism of water jet breaking rock[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [39] KENNEDY C, FIELD J. Damage threshold velocities for liquid impact[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(21): 5331–5339.
- [40] CROW S. A theory of hydraulic rock cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1973, 10(6): 567–584.
- [41] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
XU Xiao-he, YU Jing. *Rock breaking mechanics*[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.
- [42] KONDO M, FUJII K, SYOJI H. On the destruction of mortar specimens by submerged water jets[C]//*The Second International Symposium on Jet Cutting Technology*. Cambridge, UK: [s.n.], 1974: 69–88.
- [43] FORMAN S, SECOR G. The mechanics of rock failure due to water jet impingement[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1974, 14(1): 10–18.
- [44] 李根生, 廖华林, 黄中伟, 等. 超高压水射流作用下岩石损伤破碎机理[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(10): 284–293.
LI Gen-sheng, LIAO Hua-lin, HUANG Zhong-wei, et al. Rock damage mechanisms under ultra-high pressure water jet impact[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(10): 284–293.
- [45] 倪红坚, 王瑞和, 张延庆. 高压水射流作用下岩石的损伤模型[J]. *工程力学*, 2003, 20(5): 59–62.
NI Hong-jian, WANG Rui-he, ZHANG Yan-qing. A damage model for rock under high pressure water jet[J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(5): 59–62.
- [46] 王瑞和, 倪红坚. 高压水射流破岩钻孔过程的理论研究[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(4): 44–47, 148.
WANG Rui-he, NI Hong-jian. Theoretical study on rock break-off process during high-pressure water jet[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2003, 27(4): 44–47, 148.
- [47] WEI W, SHAO Z, CHEN W, et al. Heating process and damage evolution of microwave absorption and transparency materials under microwave irradiation[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 7(3): 86.
- [48] METAXAS A, MEREDITH R. *Industrial microwave heating*[M]. Stevenage: IET, 1988.
- [49] SCHÖN J. *Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics*[M]. [S.l.]: Elsevier, 1996.
- [50] SAXENA A. *Electromagnetic theory and applications*[M]. 2nd ed. Oxford, UK: Alpha Science International Ltd., 2013.
- [51] 张宗贤, 喻勇, 赵清. 岩石断裂韧度的温度效应[J]. *中国有色金属学报*, 1994, 4(2): 7–11.
ZHANG Zong-xian, YU Yong, ZHAO Qing. Temperature effect on fracture toughness of rocks[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1994, 4(2): 7–11.
- [52] XIA M. Thermo-mechanical coupled particle model for rock[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(7): 2367–2379.
- [53] AL-SHAYEA N, KHAN K, ABDULJAUWAD S. Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode (I – II) fracture toughness of a limestone rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(4): 629–643.
- [54] YAVUZ H, DEMIRDAG S, CARAN S. Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(1): 94–103.
- [55] MCDANIEL B, GRUNDMANN S, KENDRICK W, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid[C]//*SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas: SPE, 1997.
- [56] 任韶然, 范志坤, 张亮, 等. 液氮对煤岩的冷冲击作用机制及试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 3790–3794.
REN Shao-ran, FAN Zhi-kun, ZHANG Liang, et al. Mechanisms and experimental study of thermal-shock effect on coal-rock using liquid nitrogen[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2): 3790–3794.
- [57] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮冻结条件下岩石孔隙结构损伤试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(4): 965–971.
CAI Cheng-zheng, LI Gen-sheng, HUANG Zhong-wei, et al. Experiment study of rock porous structure damage under cryogenic nitrogen freezing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4): 965–971.
- [58] QU H, TANG S, LIU Y, et al. Characteristics of complex

- fractures by liquid nitrogen fracturing in brittle shales[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(4): 1807–1822.
- [59] CAI C, HUANG Z, LI G, et al. Feasibility of reservoir fracturing stimulation with liquid nitrogen jet[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 144: 59–65.
- [60] WU X, HUANG Z, SONG H, et al. Variations of physical and mechanical properties of heated granite after rapid cooling with liquid nitrogen[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(7): 2123–2139.
- [61] 黄中伟, 张世昆, 李根生, 等. 液氮磨料射流破碎高温花岗岩机理[J]. *石油学报*, 2020, 41(5): 604–614.
HUANG Zhong-wei, ZHANG Shi-kun, LI Gen-sheng, et al. Breakage mechanism of high-temperature granite by abrasive liquid nitrogen jet[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(5): 604–614.
- [62] 黄中伟, 温海涛, 武晓光, 等. 液氮冷却作用下高温花岗岩损伤实验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(2): 68–76.
HUANG Zhong-wei, WEN Hai-tao, WU Xiao-guang, et al. Experimental study on cracking of high temperature granite using liquid nitrogen[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2019, 43(2): 68–76.
- [63] 黄中伟, 武晓光, 李冉, 等. 高压液氮射流提高深井钻速机理[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 768–775.
HUANG Zhong-wei, WU Xiao-guang, LI Ran, et al. Mechanism of drilling rate improvement using high-pressure liquid nitrogen jet[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 768–775.
- [64] 张魁, 杨长, 陈春雷, 等. 激光辅助TBM盘形滚刀压头侵岩缩尺试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(1): 87–96.
ZHANG Kui, YANG Zhang, CHEN Chun-lei, et al. Scale model test on laser-assisted rock indentation by TBM disc cutter indenter[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 87–96.
- [65] GRAVES R, O'BRIEN D. StarWars laser technology applied to drilling and completing gas wells[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, LA: SPE, 1998.
- [66] REED C, XU Z, PARKER R, et al. Application of high powered lasers to drilling and completing deep wells[R]. Cass Avenue, IL: Argonne National Lab, 2003.
- [67] 易先中, 高德利, 明燕, 等. 激光破岩的物理模型与传热学特性研究[J]. *天然气工业*, 2005, 25(8): 62–65, 9.
YI Xian-zhong, GAO De-li, MING Yan, et al. Physical model of removing rock by laser and its heat transfer characteristics[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(8): 62–65, 9.
- [68] BJORNDALEN N, BELHAJ H, AGHA K, et al. Numerical investigation of laser drilling[C]//SPE Eastern Regional Meeting. Pittsburgh, PA: OnePetro, 2003.
- [69] POONIWALA S. Lasers: The next bit[C]//SPE Eastern Regional Meeting. Canton, OH: OnePetro, 2006.
- [70] SCHIEGG H O, RØDLAND A, ZHU G, et al. Electro-pulse-boring (EPB): Novel super-deep drilling technology for low cost electricity[J]. *Journal of Earth Science*, 2015, 26(1): 37–46.
- [71] BOEV S, VAJOV V, JGUN D, et al. Destruction of granite and concrete in water with pulse electric discharges[C]//Digest of Technical Papers. 12th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, CA: IEEE, 2002: 1369–1371.
- [72] MAKER V, LAYKE J. Gastrointestinal injury secondary to extracorporeal shock wave lithotripsy: A review of the literature since its inception[J]. *Journal of the American College of Surgeons*, 2004, 198(1): 128–135.
- [73] CHO S H, YOKOTA M, ITO M, et al. Electrical disintegration and micro-focus X-ray CT observations of cement paste samples with dispersed mineral particles[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 57: 79–85.
- [74] CHO S H, CHEONG S S, YOKOTA M, et al. The dynamic fracture process in rocks under high-voltage pulse fragmentation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(10): 3841–3853.
- [75] 祝效华, 罗云旭, 刘伟吉, 等. 等离子体电脉冲钻井破岩机理的电击穿实验与数值模拟方法[J]. *石油学报*, 2020, 41(9): 1146–1162.
ZHU Xiao-hua, LUO Yun-xu, LIU Wei-ji, et al. Electrical breakdown experiment and numerical simulation method of rock-breaking mechanism of plasma electric pulse drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(9): 1146–1162.
- [76] 周盛涛, 罗学东, 蒋楠, 等. 二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(7): 883–893.
ZHOU Sheng-tao, LUO Xue-dong, JIANG Nan, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(7): 883–893.
- [77] 谢晓锋, 李夕兵, 李启月, 等. 液态CO₂相变破岩桩井开挖技术[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(8): 2031–2038.
XIE Xiao-feng, LI Xi-bing, LI Qi-yue, et al. Liquid CO₂ phase-transforming rock fracturing technology in pile-well excavation[J]. *Journal of Central South University (Science*

- and Technology), 2018, 49(8): 2031–2038.
- [78] 何方. 液压劈裂技术在隧道静态破碎开挖中的应用[J]. 矿产与地质, 2021, 35(6): 1198–1204.
- HE Fang. Application of hydraulicsplitting technology in static fracturing excavation of tunnel[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(6): 1198–1204.
- [79] 李志强. 高压泡沫涨裂破岩装置设计及性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- LI Zhi-qiang. Design and performance research of high-pressure foam apparatus for rock fragmentation[D]. Xuzhou: China University of Mining Science and Technology, 2021.
- [80] 张超, 王海亮. 金属膨胀剂在地铁开挖中的破岩研究[J]. 公路, 2016, 61(7): 302–307.
- ZHANG Chao, WANG Hai-liang. Research on the application of metal expansion agent in rock breaking of the subway excavation[J]. Highway, 2016, 61(7): 302–307.
- [81] REHBINDER G. A theory about cutting rock with a water jet[J]. Rock Mechanics, 1980, 12(3): 247–257.
- [82] CICCU R, GROSSO B. Improvement of the excavation performance of PCD drag tools by water jet assistance[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(4): 465–474.
- [83] 张文华, 汪志明, 张永忠. 高压射流冲击破碎岩石的有限元计算[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(1): 10–12.
- ZHANG Wen-hua, WANG Zhi-ming, ZHANG Yong-zhong. FEM calculation on rock breaking process by high pressure jet impact[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1): 10–12.
- [84] 卢义玉, 陆朝晖, 李晓红, 等. 水射流辅助PDC刀具切割岩石的力学分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3037–3040, 3046.
- LU Yi-yu, LU Chao-hui, LI Xiao-hong, et al. Mechanical analysis of water jets assisting PDC bit to cut rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3037–3040, 3046.
- [85] 江红祥, 杜长龙, 刘送永, 等. 水射流—机械刀具联合破岩的影响因素试验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(8): 1013–1017.
- JIANG Hong-xiang, DU Zhang-long, LIU Song-yong, et al. Experiment research of influence factors on combined breaking rock with water jet and mechanical tool[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(8): 1013–1017.
- [86] 李艳, 梁科森, 李皓. 深海多金属硫化物开采技术[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2889–2901.
- LI Yan, LIANG Ke-sen, LI Hao. Mining technology of deep-sea polymetallic sulfide[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2889–2901.
- [87] 卢高明, 李元辉, HASSANI F, 等. 微波辅助机械破岩试验和理论研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1497–1506.
- LU Gao-ming, LI Yuan-hui, HASSANI F, et al. Review of theoretical and experimental studies on mechanical rock fragmentation using microwave-assisted approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1497–1506.
- [88] HASSANI F, NEKOOVAGHT P. The development of microwave assisted machineries to break hard rocks[C]// Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Seoul, Korea: International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2011.
- [89] SATISH H, OUELLET J, RAGHAVAN V, et al. Investigating microwave assisted rock breakage for possible space mining applications[J]. Mining Technology, 2006, 115(1): 34–40.
- [90] 严妍, 陈楷华, 陈静, 等. 低品位磁铁矿微波连续和脉冲加热辅助磨矿的对比研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(3): 883–894.
- YAN Yan, CHEN Kai-hua, CHEN Jing, et al. Comparative study on microwave-assisted grinding of low-grade magnetite by continuous heating and pulsed heating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(3): 883–894.
- [91] 黄中伟, 武晓光, 谢紫霄, 等. 液氮射流破岩及压裂研究进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 952–963.
- HUANG Zhong-wei, WU Xiao-guang, XIE Zi-xiao, et al. Theory and research progress of liquid fracturing and rock breaking[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(6): 952–963.
- [92] DAI X, HUANG Z, WU X, et al. Failure analysis of high-temperature granite under the joint action of cutting and liquid nitrogen jet impingement[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(12): 6249–6264.
- [93] 黄家根, 汪海阁, 纪国栋, 等. 超声波高频脉冲钻井技术破岩机理研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 23–29.
- HUANG Jia-gen, WANG Hai-ge, JI Guo-dong, et al. Study on rock breaking mechanism of ultrasonic high frequency rotary-percussive drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4): 23–29.
- [94] 赵研, 张丛珊, 高科, 等. 超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(4): 11–20.
- ZHAO Yan, ZHANG Cong-shan, GAO Ke, et al. Rock breaking simulation analysis for the ultrasonic vibration-assisted PDC cutter[J]. Drilling Engineering, 2021,

- 48(4): 11-20.
- [95] 路宗羽, 郑珺升, 蒋振新, 等. 超声波高频旋冲钻井技术破岩效果试验研究[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(2): 20-25.
LU Zong-yu, ZHENG Jun-sheng, JIANG Zhen-xin, et al. An experimental study on rock breaking efficiency with ultrasonic high-frequency rotary-percussive drilling technology[J]. Petroleum Drilling Technology, 2021, 49(2): 20-25.
- [96] 李夕兵, 曹芝维, 周健, 等. 硬岩矿山开采方式变革与智能化绿色矿山构建——以开阳磷矿为例[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(10): 2364-2380.
LI Xi-bing, CAO Zhi-wei, ZHOU Jian, et al. Innovation of mining models and construction of intelligent green mine in hard rock mine: In Kaiyang Phosphate Mine as an example[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(10): 2364-2380.
- [97] 王少锋, 李夕兵, 王善勇, 等. 深部硬岩截割特性及可截割性改善方法[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(3): 895-907.
WANG Shao-feng, LI Xi-bing, WANG Shan-yong, et al. Fragmentation characteristics of deep hard rock and the improvement for rock cuttability[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(3): 895-907.
- [98] 王少锋, 李夕兵, 宫凤强, 等. 深部硬岩截割特性与机械化破岩试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2772-2782.
WANG Shao-feng, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, et al. Breakage characteristics and mechanized mining experiment in deep hard rock[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2772-2782.
- [99] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.
WANG Meng-shu. Tunneling by TBM/shield in China: State-of-art, problems and proposals[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 179-187.
- [100] 谭杰, 刘志强, 宋朝阳, 等. 我国矿山竖井凿井技术现状与发展趋势[J]. 金属矿山, 2021(5): 13-24.
TAN Jie, LIU Zhi-qiang, SONG Zhao-yang, et al. Status and development trend of mine shaft sinking technique in China[J]. Metal Mine, 2021(5): 13-24.
- [101] 王开乐, 杨国平, 胡凯俊, 等. 高频破碎锤的发展现状与研究[J]. 矿山机械, 2015, 43(4): 1-4.
WANG Kai-le, YANG Guo-ping, HU Kai-jun, et al. Development situation and research of high-frequency vibro-ripper[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(4): 1-4.
- [102] 翟成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1996-2001.
ZHAI Cheng, LI Xian-zhong, LI Quan-gui. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1996-2001.
- [103] 聂翠平, 兰剑平, 王祖文, 等. 井下低频水力脉动压裂技术及其应用[J]. 钻采工艺, 2021, 44(2): 38-42.
NIE Cui-ping, LAN Jian-ping, WANG Zu-wen, et al. Downhole low frequency hydraulic pulsing fracturing technology and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(2): 38-42.
- [104] LI Q, LIN B, ZHAI C. The effect of pulse frequency on the fracture extension during hydraulic fracturing[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 296-303.
- [105] LI Q, LIN B, ZHAI C. A new technique for preventing and controlling coal and gas outburst hazard with pulse hydraulic fracturing: a case study in Yuwu coal mine, China[J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2931-2946.
- [106] CHEN J, LI X, CAO H, et al. Experimental investigation of the influence of pulsating hydraulic fracturing on pre-existing fractures propagation in coal[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 189: 107040.
- [107] 鲍先凯, 赵金昌, 武晋文, 等. 脉冲荷载作用下煤体裂纹扩展研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(2): 43-46.
BAO Xian-kai, ZHAO Jin-chang, WU Jin-wen, et al. Study on cracks extension of coal under pulse load[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(2): 43-46.
- [108] 马帅旗. 高压电脉冲放电煤层增透研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(5): 15-18.
MA Shuai-qi. Research on coal seam permeability improvement by high-voltage electric pulse discharge[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(5): 15-18.
- [109] BAO X, GUO J, LIU Y, et al. Damage characteristics and laws of micro-crack of underwater electric pulse fracturing coal-rock mass[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 111: 102853.
- [110] BIAN D, NIU S, WU J, et al. Rock fracturing under pulsed discharge homenergetic water shock waves with variable characteristics and combination forms[J]. Shock and Vibration 2018, 2018: 6236953.
- [111] 徐幼平, 林柏泉, 翟成, 等. 定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(7): 104-110.
XU You-pin, LIN Bai-quan, ZHAI Cheng, et al. Analysis on dynamic characteristics of cracks extension in directional hydraulic fracturing and its application[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(7): 104-110.

- [112] 李栋, 卢义玉, 荣耀, 等. 基于定向水力压裂增透的大断面瓦斯隧道快速揭煤技术[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 363-369, 378.
LI Dong, LU Yi-yu, RONG Yao, et al. Rapid uncovering seam technologies for large cross-section gas tunnel excavated through coal seams using directional hydraulic fracturing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 363-369, 378.
- [113] HUANG B, CHEN S, ZHAO X. Hydraulic fracturing stress transfer methods to control the strong strata behaviours in gob-side gateroads of longwall mines[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(11): 236.
- [114] HUANG B, LIU J, ZHANG Q. The reasonable breaking location of overhanging hard roof for directional hydraulic fracturing to control strong strata behaviors of gob-side entry[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 1-11.
- [115] YU B, ZHAO J, XIAO H. Case study on overburden fracturing during longwall top coal caving using microseismic monitoring[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(2): 507-511.
- [116] YU B, GAO R, KUANG T, et al. Engineering study on fracturing high-level hard rock strata by ground hydraulic action[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 156-164.
- [117] 吴德元, 沈忠厚. 一种新型高压水力喷射径向水平钻井系统[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(2): 128-130.
WU De-yuan, SHEN Zhong-hou. An Ultrashort radius radial horizontal drilling system[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1994, 18(2): 128-130.
- [118] 杨永印, 沈忠厚, 王瑞和, 等. 径向水平钻进技术试验研究[J]. 石油钻探技术, 1998, 26(1): 4-7, 60.
YANG Yong-yin, SHEN Zhong-hou, WANG Rui-he, et al. Experimental studies on radial horizontal drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1998, 26(1): 4-7, 60.
- [119] 王耀锋. 三维旋转水射流与水力压裂联作增透技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
WANG Yao-feng. Study on permeability-increasing technology combining 3D swirling water jet with hydraulic fracturing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [120] 李宗福, 孙大发, 陈久福, 等. 水力压裂-水力割缝联合增透技术应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 72-76.
LI Zong-fu, SUN Da-fa, CHEN Jiu-fu, et al. Application of permeability improving technology combined with hydraulic pressure fracturing and hydraulic slotting[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 72-76.
- [121] 徐雪战. 低透气煤层超高压水力割缝与水力压裂联合增透技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 311-317.
XU Xue-zhan. Combined permeability enhancement technology of ultra-high pressure hydraulic slot and hydraulic fracturing in low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 311-317.
- [122] KINGMAN S, VORSTER W, ROWSON N. The influence of mineralogy on microwave assisted grinding[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(3): 313-327.
- [123] VORSTER W, ROWSON N, KINGMAN S. The effect of microwave radiation upon the processing of Neves Corvo copper ore[J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, 63(1): 29-44.
- [124] WHITTLES D, KINGMAN S, REDDISH D. Application of numerical modelling for prediction of the influence of power density on microwave-assisted breakage[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 68(1/2/3/4): 71-91.
- [125] JONES D, KINGMAN S, WHITTLES D, et al. Understanding microwave assisted breakage[J]. Minerals Engineering, 2005, 18(7): 659-669.
- [126] AMANKWAH R, PICKLES C. Microwave roasting of a carbonaceous sulphidic gold concentrate[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(13): 1095-1101.
- [127] SAMOUHOS M, TAXIARCHOU M, HUTCHEON R, et al. Microwave reduction of a nickeliferous laterite ore[J]. Minerals Engineering, 2012, 34: 19-29.
- [128] LU G, LI Y, HASSANI F, et al. The influence of microwave irradiation on thermal properties of main rock-forming minerals[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 1523-1532.
- [129] LU G, ZHOU J, LI Y, et al. The influence of minerals on the mechanism of microwave-induced fracturing of rocks[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 180: 104123.
- [130] HARTLIEB P, TOIFL M, KUCHAR F, et al. Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution[J]. Minerals Engineering, 2016, 91: 34-41.
- [131] HARTLIEB P, KUCHAR F, MOSER P, et al. Reaction of different rock types to low-power (3.2 kW) microwave irradiation in a multimode cavity[J]. Minerals Engineering, 2018, 118: 37-51.
- [132] LI Z, XU H, ZHANG C. Liquid nitrogen gasification fracturing technology for shale gas development[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 138: 253-256.

- [133] QIN L, ZHAI C, LIU S, et al. Mechanical behavior and fracture spatial propagation of coal injected with liquid nitrogen under triaxial stress applied for coalbed methane recovery[J]. *Engineering Geology*, 2018, 233: 1–10.
- [134] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮对页岩的致裂效应及在压裂中应用分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(1): 79–85.
- CAI Cheng-zheng, LI Gen-sheng, HUANG Zhong-wei, et al. Thermal cracking effect of liquid nitrogen on shale and its application analysis in hydraulic fracturing[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2016, 40(1): 79–85.
- [135] WU X, HUANG Z, LI G, et al. Experiment on coal breaking with cryogenic nitrogen jet[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 169: 405–415.
- [136] SALEHI I, GAHAN B, BATARSEH S. Laser drilling-drilling with the power of light[R]. Chicago: Gas Technology Institute, 2007.
- [137] GAHAN B, PARKER R, BATARSEH S, et al. Laser drilling: determination of energy required to remove rock[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, LA: OnePetro, 2001.
- [138] KOBAYASHI T, NAKAMURA M, OKATSU K, et al. Underwater laser drilling: Drilling underwater granite by CO₂ laser[C]//SPE Indian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. Mumbai, India: OnePetro, 2008.
- [139] BARHAM D, BUCHANAN D. Review of water jet assisted cutting techniques for rock and coal cutting machines[J]. *Mining Engineer*, 1987, 146(310): 6–14.
- [140] 佐藤幸次, 李翠英. 兼用高压水射流的中硬岩掘进机的研制[J]. *煤炭技术*, 1991, 10(4): 18–21.
- SATO Koji, LI Cui-ying. Development of medium-hard rock roadheader with high-pressure water jet[J]. *Coal Technology*, 1991, 10(4): 18–21.
- [141] KOLLE J, OTTA R, STANG D. Laboratory and field testing of an ultra-high-pressure, jet-assisted drilling system[C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, Netherlands: OnePetro, 1991.
- [142] BUTLER T, FONTANA P, OTTAWA R. A method for combined jet and mechanical drilling[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, LA: OnePetro, 1990.
- [143] 刘家英, 韦颖. 水射流钻机及穿孔试验[J]. *长沙矿山研究院季刊*, 1984, 4(1): 40–43.
- LIU Jia-ying, WEI Ying. Hydraulic jet drill and penetration test[J]. *Quarterly of CIMR*, 1984, 4(1): 40–43.
- [144] LU Y, TANG J, GE Z, et al. Hard rock drilling technique with abrasive water jet assistance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60: 47–56.
- [145] 张强. 岩石破碎技术发展趋势[J]. *有色矿山*, 1996, 26(6): 20–22.
- ZHANG Qiang. Development trend of rock crushing technology[J]. *Nonferrous Mines*, 1996, 25(6): 20–22.
- [146] EZZEDINE S, RUBENCHIK A, YAMAMOTO R, et al. Laser-enhanced drilling for subsurface EGS applications[J]. *GRC Transactions*, 2012, 36: 287–290.
- [147] ZEDIKER M. High power fiber lasers in geothermal, oil and gas[C]//SPIE LASE. Proc SPIE 8961, Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications. San Francisco, CA: SPIE, 2014, 8961: 52–58.
- [148] 李美艳, 韩彬, 张世一, 等. 激光辅助破岩规律及力学性能研究[J]. *应用激光*, 2015, 35(3): 363–368.
- LI Mei-yan, HAN Bin, ZHANG Shi-yi, et al. Study on laser assisted rock breaking law and mechanical properties[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(3): 363–368.
- [149] 韩彬, 李美艳, 李璐, 等. 激光辅助破岩可钻性评价[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(9): 94–97, 6.
- HAN Bin, LI Mei-yan, LI Lu, et al. Rock drillability evaluation of laser assisted rock breaking[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(9): 94–97, 6.
- [150] 李夕兵, 古德生. 深井坚硬矿岩开采中高应力的灾害控制与破碎诱变[C]//香山第175次科学会议. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 101–108.
- LI Xi-bing, GU De-sheng. The hazard control and cataclastic mutagenesis induced by high stress in hard rock mining at depth[C]//The 175th Xiangshan Science Congress. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 101–108.
- [151] 李夕兵, 周健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(6): 1236–1262.
- LI Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(6): 1236–1262.

Development and prospect of non-blasting rock breakage theory and technology

WANG Shao-feng, SUN Li-cheng, ZHOU Zi-long, WU Yu-meng, SHI Xin-lei

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The continuous increase in the scale of underground resource mining and underground space development and utilization have promoted the rapid development of non-blasting rock breakage technologies, such as mechanical, hydraulic, microwave, thermal impact, expansion, combined and other rock breakage methods. This paper expounded various non-blasting rock breakage theories, and summarized the development and application processes of various non-blasting rock breakage technologies. Aiming at the current bottleneck and challenges of non-blasting rock breakage, the development direction of non-blasting rock breakage theory and technology was prospected. In order to meet the major requirements of “deep-ground” strategies, non-blasting rock breakage urgently needs to complete theoretical breakthroughs, technological changes, and equipment upgrades to achieve safe, efficient, economical, intelligent and green breakage of hard rocks in complex geological environments.

Key words: non-blasting rock breakage; deep hard rock; mechanical tool-based rock breakage; hydraulic rock breakage; microwave rock breakage; thermal impact-based rock breakage; combined rock breakage

Foundation item: Projects(52174099, 51904333) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2021JJ30842) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province

Received date: 2022-04-01; **Accepted date:** 2022-10-08

Corresponding author: WANG Shao-feng; Tel: +86-18073369486; E-mail: sf.wang@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)