



## 深部固体资源开采评述与探索

李夕兵<sup>1,2</sup>, 周 健<sup>1,2</sup>, 王少锋<sup>1,2</sup>, 刘 冰<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 长沙 410083)

**摘 要:** 以国内外深部资源开采现状及其研究成果为基础, 综述国内外工业界和学术界对深部的划分和界定, 探讨深部界定的标准、深地资源的极限采深及其开采模式; 同时对提升运输方式如何适用深部开采的要求、深井开采高温如何调节等进行归纳总结, 并提出一些新的构思; 特别是针对深部稀有、贵重、战略资源的开采理论与关键技术, 结合深部硬岩矿山高应力、高井深和高地温等特点, 给出“变害为利”的新策略和初步研究结果。

**关键词:** 深部开采; 极限采深; 深部采矿方法; 深井提升运输; 深部充填降温; 变害为利

**文章编号:** 1004-0609(2017)-06-1236-27

**中图分类号:** TU45

**文献标志码:** A

地壳蕴藏着大量宝贵的矿产资源, 几十年持续的大规模资源开采使得我国浅部矿产资源已趋于枯竭, 我国未来矿产资源开发将全面进入第二深度空间(1000~2000 m)范围内的深部矿床, 金属矿深部开采将成为常态<sup>[1-3]</sup>。世界采矿大国南非开采深度达到 4000 m, 澳大利亚 1900 m, 加拿大 3000 m。据统计与预测, 我国“十三五”期间有近 50 余座金属矿山将步入 1000 m 以深开采范畴, 其中有近一半在未来 10~20 年间开采深度将达到 1500 m 以深。进入深部开采环境的矿山, 首先将面临高地应力问题, 若不采取与高应力环境相适应的采矿技术与工艺, 势必发生较大的工程灾害, 也会严重抑制矿山的规模化生产, 进而对我国资源经济的发展产生很严重的冲击。大量文献资料显示, 很多金属矿山在深部开采中都遇到了高能级岩爆与矿震、大面积采空区失稳、冒顶和片帮等动力灾害问题, 且难以精准预测与有效防治<sup>[4-7]</sup>。其次, 岩层温度随深度以(10~40) °C/km 的速率增加, 深井的高温环境条件严重影响工人的劳动生产率, 而为有效降温, 又必将大大增加采矿成本<sup>[4, 8-9]</sup>。再次, 随开采深度的增加, 矿石和各种物料的提升高度显著增加, 从而大大增加提升成本, 并对安全生产构成威胁。这说明当前的开采理论与技术已滞后于人类深地工程实践活动<sup>[10-11]</sup>, 难以进行有效、科学指导, 亟待探索和开拓。这些技术问题如不能很好地解决, 不仅给我国许多即将进入深部开采矿山的安全生产带来许多隐患,

而且严重制约着深地资源的开采效率和效益。在深部资源开采成为常态的形势下, 迫切需要思考与研究如下难题:

进入深部以后, 不同工程活动方式诱发的高应力和高能级的灾害更加凸显, 浅部开采理论与技术是否仍然适用?

进入深部以后, 深部高应力硬岩开采方法、提升运输方式及深部充填降温技术如何变革?

进入深部以后, 尤其在矿床埋藏深、岩温高、岩爆倾向大、品位低、开采强度大的条件下, 如何实现安全、经济、高效、清洁生产?

这些都是深部固体资源开采中必须面对且亟待优先探索的基础性科学问题与技术难题。正如习近平主席在“科技三会”上指出: “当前, 国家对战略科技支撑的需求比以往任何时期都更加迫切。从理论上讲, 地球内部可利用的成矿空间分布在从地表到地下 1 万 m, 目前世界先进水平勘探开采深度已达 2500 m 至 4000 m, 而我国大多小于 500 m, 向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”<sup>[12]</sup>。有鉴于此, 为深入贯彻《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》和“十三五”科技发展规划的总体精神, 为满足地下矿山和岩石工程安全生产的迫切需求, 本文作者以国内外开采现状及其研究成果为基础, 进行归纳总结, 针对随着采深的不断增大而突显的高应力硬岩开采方法、提升运输方式及深部充填降温技术

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0600706); 国家自然科学基金资助项目(41630642)

**收稿日期:** 2017-02-10; **修订日期:** 2017-05-20

**通信作者:** 李夕兵, 教授, 博士; 电话: 13974870961; E-mail: xbli@csu.edu.cn

的变革, 特别是深部稀有、贵重、战略资源的开采理论与关键技术, 提出了深部高应力矿山安全高效开采构思, 并揭示了深部矿岩的受力特征和灾变机理, 在此基础上提出了随着采深的不断增大而突显的高应力硬岩开采方法新模式, 以期引起学界对相关难题规律性知识交叉和集成的重视, 进而为深部固体资源的安全高效开采提供理论支撑和技术保障。

## 1 深部资源开采的界定

纵观近半个世纪以来, 国内外采矿与岩石力学界专家学者有关深部的界定已有不少提法, 但出发点却

各不相同。深部是什么? 多深算进入深部? 至今国际上尚无公认统一的有关深矿井的定量划分标准。这里作者统计了国内外典型深部金属矿山的采深, 然后综述了国内外工业界和学术界对深部的划分和界定, 并提出了深部界定的新思考。

### 1.1 国内外典型深部矿山统计

据不完全统计, 目前国外开采深度超千米的金属矿山百余个, 分布在南非、加拿大、澳大利亚和欧盟等国家和地区, 而世界上开采深度最深的在产矿井主要分布在南非和加拿大<sup>[13]</sup>, 其中前 10 位中 7 个都在南非, 加拿大占 2 个(见图 1)。南非、加拿大、印度、美国和俄罗斯等是世界上金属矿采深井最大的国

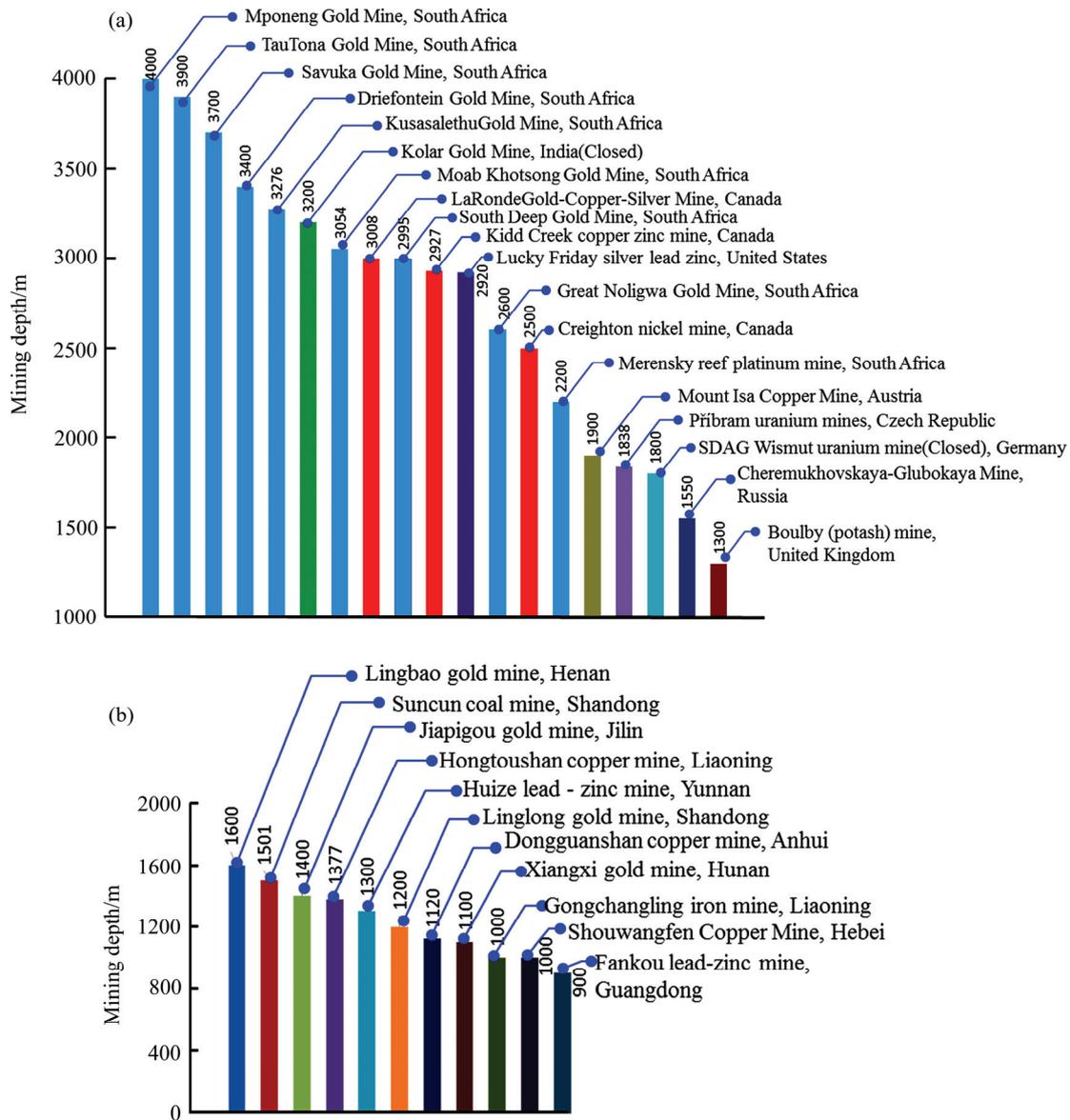


图 1 国内外典型金属矿山开采深度对比<sup>[2, 10-11, 13-16]</sup>

Fig. 1 Comparison mining depth of typical metal mine around the world: (a) Typical deep mine in foreign countries; (b) Typical deep mine in China<sup>[2, 10-11, 13-16]</sup>

家,其绝大多数金矿的开采深度超过 2000 m,如南非 Mponeng 金矿采深目前已超过 4000 m(2.5 英里),矿体埋深更是超过 7500 m<sup>[13]</sup>;加拿大 LaRonde 多金属矿开拓深度已达到 3008 m,矿体延伸至 3700 m<sup>[14]</sup>;美国著名的有岩爆倾向多金属矿 Lucky Friday 最近也完成了 2920 m 的竖井开拓工程<sup>[15]</sup>。虽然和国外的众多深部金属矿山相比,中国金属矿的开采深度较浅,但是一大批金属矿山正处于向深部全面推进的阶段,如红透山铜矿、湘西金矿、夹皮沟金矿、冬瓜山铜矿、凡口铅锌矿、玲珑金矿、会泽铅锌矿、程潮铁矿等都基本已进入或即将进入 1000~2000 m 深部开采范畴<sup>[2,11]</sup>,其中辽宁红透山铜矿达到 1300 m,吉林夹皮沟金矿达到 1400 m,河南灵宝鑫鑫金矿达到 1600 m。近期,在三山岛金矿西岭矿区 1600~2000 m 深处,探明一个金属储量达 400 t 的大型金矿床,为我国在胶东半岛深部类似矿集区找到更大规模金矿床指明了方向<sup>[16]</sup>。从图 1 可以看出,世界上最深的矿山(2000 m 以上)主要为金、银、铂等贵金属矿。

## 1.2 当前工业界对深部开采深度的界定

世界各采矿大国工业界对深部开采深度有着不同的划分,如图 2 所示。美国矿务局出版的采矿、矿物及相关术语辞典中定义所谓深部开采通常解析为 5000 英尺以上(1524 m)<sup>[17]</sup>;南非工业界根据是否需要特定制冷降温定义深部金矿开采深度为 1500 m;同时

于 1996 年首次提出“Ultra-deep”开采概念<sup>[18]</sup>,即采深大于 3500~5000m 为超深开采的范畴<sup>[18-20]</sup>,加拿大也沿用这一概念并将 2500 m 以深视为超深部开采<sup>[21]</sup>。前苏联有学者将矿井大致划分为 2 级<sup>[22]</sup>:深矿井(600~1000 m)和大深度矿井(1000~1500 m)。其他国家涉及深部开采深度的明确论述和其定量界限甚少,邹喜正<sup>[23]</sup>查阅大量文献推算出煤矿领域部分国家深部开采起始深度:英国和波兰为 750 m、日本 600 m、德国 800 m,并将埋深超过 1200 m 的矿井称为超深开采或大深度开采。澳大利亚深部开采范畴为 1000~2000 m<sup>[24]</sup>。此外 JAGER 等<sup>[19]</sup>综合地下开采中能量释放率、垂直应力大小、应力开裂程度、采场闭合率、地质对矿柱高宽比稳定性的影响、采场地层沉降程度和岩爆灾害程度等因素,将地下开采深度细致地分为浅(<1000 m),中(1000~2250 m),深(2250~3500 m)和超深(>3500 m)开采等 4 个类别,见图 3 和表 1 所示。

我国采矿手册规定开采深度 600 m 为深部开采,深度大于 2000 m 为超深开采<sup>[25]</sup>。而在“十五”期间金属矿采深超过 600 m 定义为深部,随后改为 800 m、1000 m,现在“十三五”提出实现 1000 m 以深规模化采矿和 1500 m 以深建井示范,探明 1500m 以深岩体力学行为。由此可见,“深部”是一个相对术语,深部开采的深度界定是随时间、采矿工业发达程度和资源赋存条件而不断变化的。

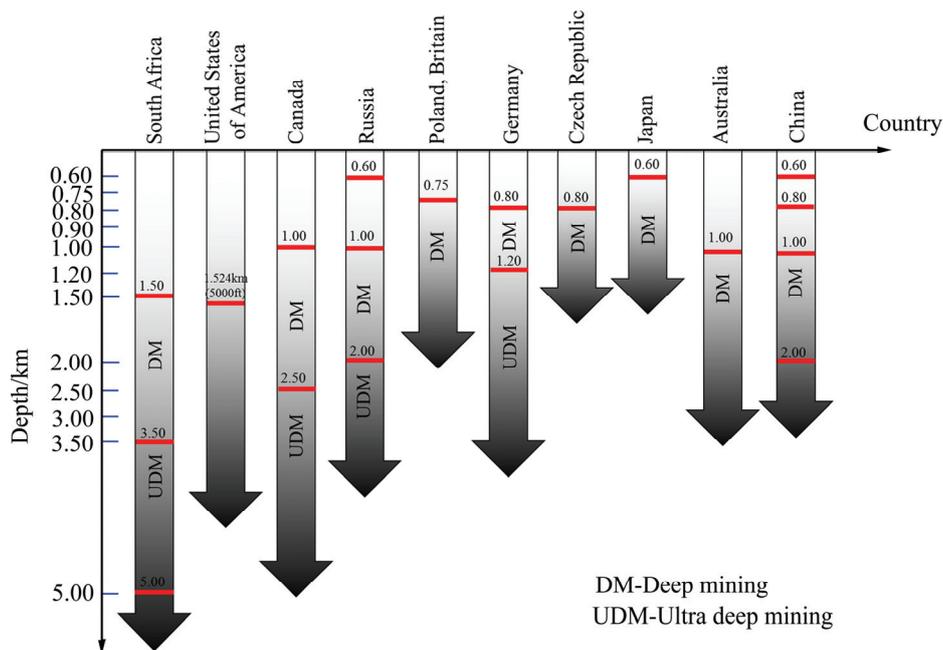


图 2 工业界对深部开采深度的界定<sup>[17-25]</sup>

Fig. 2 Definition of deep mining depth in industry<sup>[17-25]</sup>

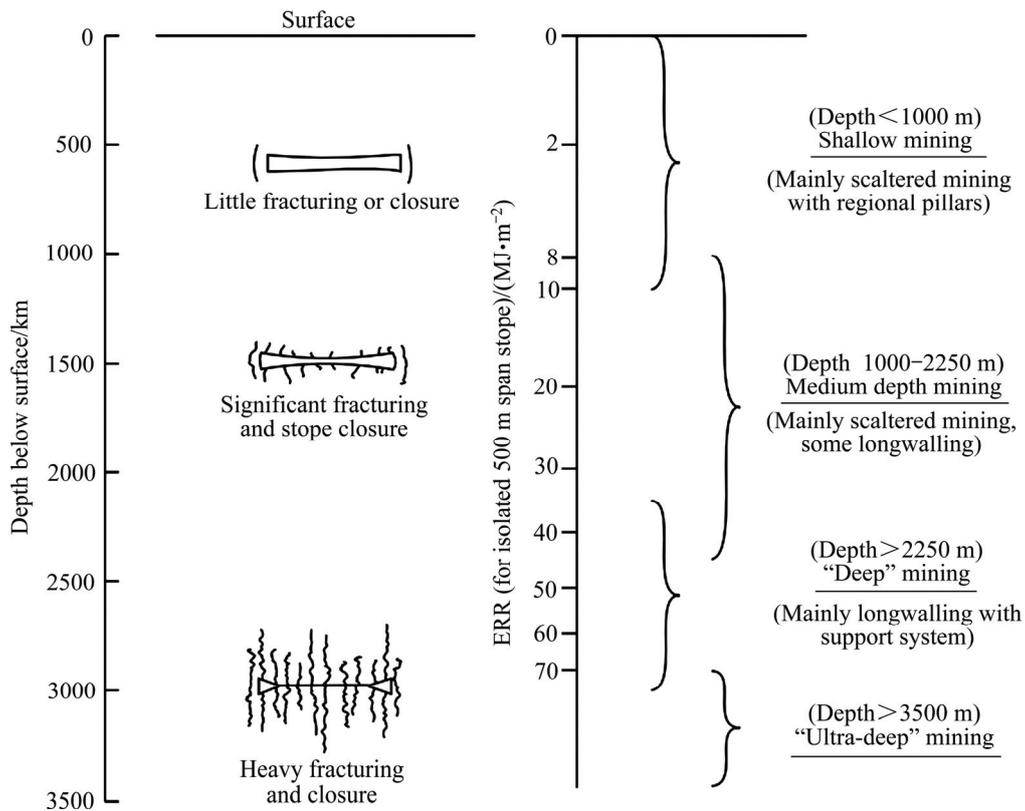


图 3 浅、中、深和超深开采环境(具体值随现场条件有所变化)<sup>[19]</sup>

Fig. 3 Shallow, medium, deep and ultra-deep mining environments (Boundaries are approximate, and vary with local conditions)<sup>[19]</sup>

表 1 不同开采深度相关参数值<sup>[19]</sup>

Table 1 Values of parameters associated with different mining depths<sup>[19]</sup>

Mining	Typical depth/m	Typical ERR/(MJ·m <sup>-2</sup> )	Vertical virgin stress/MPa	Stress fracturing	Stope closure/(mm·m advance <sup>-1</sup> )	Influence of geology on h/w stability	Possible extent of FOG's	Rockburst hazard
Shallow	<1000	<8	<25	Little/None	Low(<10)	Strong	Can be large	Minimal
Medium depth	1000-2250	8-40	25-60	Moderate	Moderate(10-30)	Moderate	Often small	Moderate-severe <sup>#</sup>
Deep	2250-3500	40-80 <sup>#</sup>	60-90	Deep	High(30-60)	Moderate	Usually small	Severe <sup>#</sup>
Ultra-deep	>3500	>80 <sup>#</sup>	>95	Very deep	Very high(>60) <sup>#</sup>	Moderate	Small	Very severe <sup>#</sup>

Note: ERR—Energy release rate; h/w—height/width; FOG—Falls of ground; “<sup>#</sup>”—If regional support were not used.

### 1.3 学术界对深部开采的界定

“深部开采”虽为常态,但学术界对什么是“深部”,如何科学定量界定“深部”说法不一,人们从深部开采条件和深部岩石力学特征等出发,对深部给出了不同的界定。

#### 1) 根据深部岩体破坏特征确定临界采深

前捷克斯洛伐克学者 ALDORF 等<sup>[26]</sup>根据  $\pi$  定理,综合考虑各种因素,较系统地提出并划分了临界采深

(见图 4),提出了亚临界深度、临界深度、超临界深度等概念和定义,用于表征不同程度的深部开采。钱七虎<sup>[27]</sup>建议依据分区破裂化现象来界定深部岩体工程;谢和平等<sup>[28]</sup>认为深部的界定需要结合应力状态、应力水平和原岩性质共同确定,并提出极限采深应从工作面环境温度、巷道变形控制以及采动岩体能量聚集灾变等方面综合确定;何满潮<sup>[29]</sup>建议将深部开采深度定义为工程岩体最先开始出现非线性力学现象的深度;

李铁等<sup>[30]</sup>认为深部开采临界深度是采动岩体的动力响应由线性转为非线性的深度；古德生<sup>[31]</sup>从高应力、高地温、高井深三个方面综合阐述了深部开采所具有的突出特征，建议 800 m 作为金属矿深部开采的界定深度。在以深部开采科学问题为主题的香山科学会议第 175 次学术讨论会上<sup>[32]</sup>：有专家提出以岩爆发生频率明显增加来界定，也有专家认为应以围岩应力释放达到其强度来界定。许多学者在“深部”概念的基础上，提出了不同的临界深度  $H_{cr}$  力学模型及经验公式，建立了深部工程的评价指标，加深了人们对“深部”这一概念的科学研究，如表 2<sup>[33-44]</sup>所列(其中公式(9)~(12)由于原始文献无法获取这里间接引用罗列公

式<sup>[42]</sup>)，但是绝大多数只考虑了自然应力状态，对于深部矿井来讲，真实状态远比这复杂得多，仍有待于进一步研究。

2) 根据提升能力确定临界采深

KRATZ 等<sup>[45]</sup>从矿井提升能力的角度，确定临界采深(见图 5)，即根据矿石品位以及矿山现有的开采技术经济条件，矿山生产达到最低的经济效益需要满足一个最低的出矿效率指标，然而对于现有的矿石提升系统，其提升能力会随着提升深度的增加而降低，其变化曲线与最低出矿效率指标的交点则可定义为临界提升深度。临界提升深度会随着提升技术的发展而不断提高。

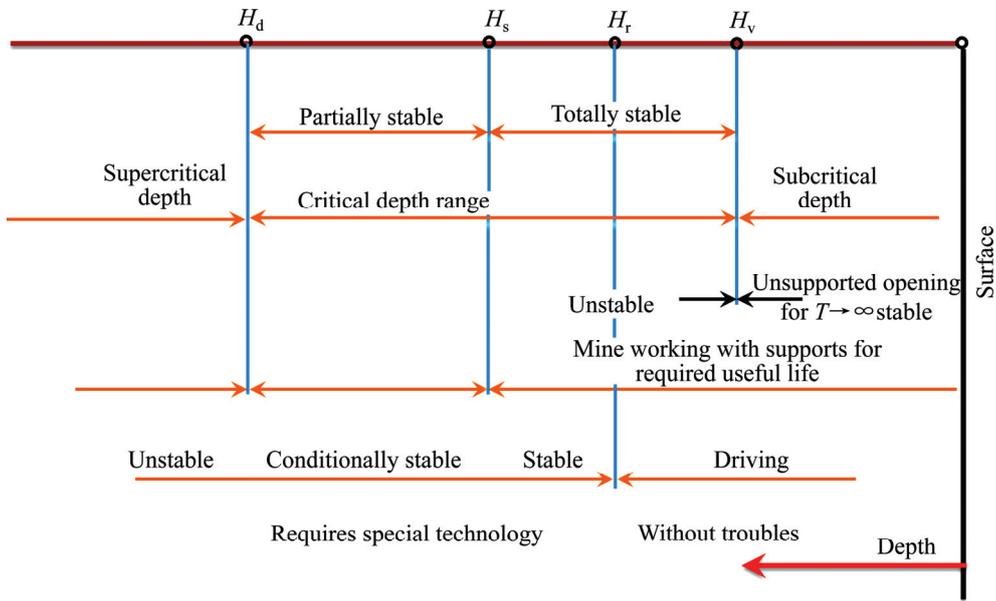


图 4 临界深度范围分类<sup>[26]</sup>

Fig. 4 Classification of critical depth ranges<sup>[26]</sup>

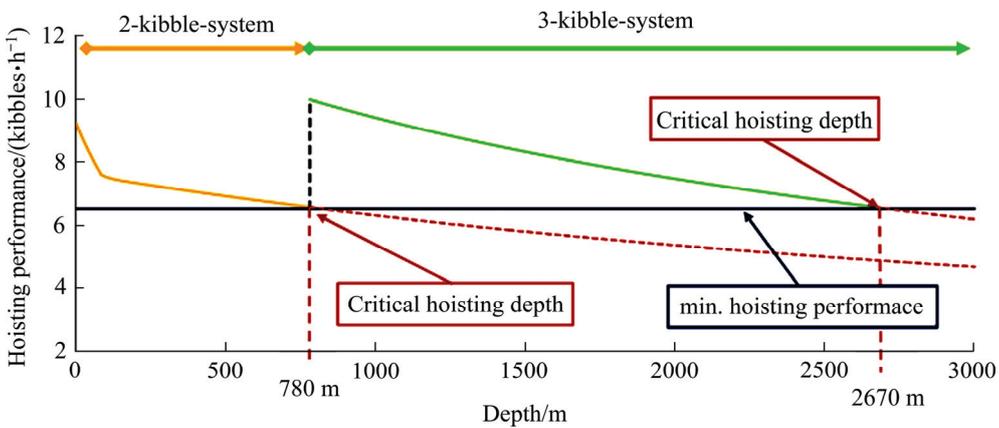


图 5 提升系统和深度对装岩提升能力的影响<sup>[45]</sup>

Fig. 5 Interaction of mucking and hoisting performance affected by depth and hoisting system<sup>[45]</sup>

表 2 临界深度  $H_{cr}$  经验公式<sup>[33-44]</sup>

Table 2 Empirical formula of critical depth  $H_{cr}$ <sup>[33-44]</sup>

No.	Researcher (year)	Formula	Note
1	KVAPIL (1957) <sup>[33]</sup>	$H_{cr}=3\sigma_c\phi\sin\phi/(2\gamma\times 9.81\cos\phi-m)$	
2	SINGH (1986) <sup>[34]</sup>	$H_{cr}=(\sigma_c-\sigma_t)/2\gamma\eta$	
2	HOU (1989) <sup>[35]</sup>	$H_{cr}=[0.318(1-\mu)\sigma_c]/[(3-4\mu)\gamma]$	$\sigma_c$ is uniaxial compressive strength of rock, MPa; $\sigma_t$ is uniaxial tensile strength of rock, MPa; $\gamma$ is bulk density of rocks, KN/m <sup>3</sup> ; $\mu$ is poisson's ratio of rock; $\xi_0=\mu/(1-\mu)$ —knockback lateral pushing due to Poisson's coefficient( $\mu$ ); $\xi_1=(1-2\mu)/(1-\mu)$ ; $k_n$ is probable stress concentration coefficient around the working; $a=B/2$ ; $C$ is internal cohesion of rock mases; $k_n$ is near workings influence coefficient; $k_t$ is side-wall stress concentration coefficient; $k_{pl}$ is rock mass plasticity; $k$ is a coefficient characterizing bedrock; $k_1$ coefficient that depends on type of rock; $\sigma_{pl}$ is rock's stress at plasticity; $\lambda$ is lower modulus, MPa; $\phi$ is angle of internal friction of rocks, (°); $p$ is compressive strength of rocks under natural conditions, kp/cm <sup>2</sup> ; $\eta$ is lateral stress coefficient; $\sigma_e$ represents elastic stress for case of triaxial compression, MPa; $\sigma_{cr}$ is critical stress, MPa; $\sigma_t$ is additional stress, MPa; $\beta$ is a dimensionless coefficient; $P$ is panel width (ft); $\omega$ is abutment angle, °; $k_0$ is a coefficient and $k_0>1$ ; $g$ is gravitational constant.
3	PENG et al (1996) <sup>[36]</sup>	$H_{cr}=(\sigma_t)/\{\gamma[(1+\lambda)+2(1-\lambda)\cos 2\theta]\}$	
4	TANG (2000) <sup>[37]</sup>	$H_{cr}=(1-\mu)\sigma_c/[5(1-\mu)\gamma]$	
5	SAUKU (1992) <sup>[38]</sup>	$H_{cr}=C/[k_n\xi_0(a n_0-\tan\phi)]/\sigma_c$ for drift roof,	
		$H_{cr}=2C\tan[(90+\phi)/2]/k_t k_n \xi_0$ for wall-side	
		$H_{cr}=C\{e^{\pi\tan\phi}[\tan((90+\phi)/2)^2-1]\}/k_t k_n \xi_0 \tan\phi$ for floor	
6	PAN and LI (2002) <sup>[39]</sup>	$H_{cr}=(\lambda\sigma_c(1-\sin\psi)[(1+E/\lambda)/(1-\sin\phi)-E/\lambda-1])/2E\gamma$	
7	ZHANG et al (2004) <sup>[40]</sup>	$H_{cr}=[0.2k(1-\mu)\sigma_c]/[(4\mu-1)\gamma]$	
8	ZHANG et al (2006) <sup>[41]</sup>	$H_{cr}=\{[3k_0/(1-2\mu)]^{0.5}\sigma_c\}/[(1+2k)\gamma]$	
9	LABASSE et al <sup>[42]</sup>	$H_{cr}=\sigma_c/\gamma$	
10	TIMBAREVICI et al <sup>[42]</sup>	$H_{cr}=2\sigma_c/2\xi_0\gamma$	
11	BELAENKO <sup>[42]</sup>	$H_{cr}=\sigma_c/\xi_1\gamma$	
12	BEALER <sup>[42]</sup>	$H_{cr}=\sigma_c/k\gamma$	
13	CVAPIL <sup>[42]</sup>	$H_{cr}=\sigma_c/k_1\gamma$	
14	TODERAŞ et al (2015) <sup>[42]</sup>	$H_{cr}=[(1-\mu)\sigma_{pl}]/(\sqrt{3}\gamma)$ for mine shafts	
15	TODERAŞ et al (2015) <sup>[42]</sup>	$H_{cr}=\sigma_{pl}/(\sqrt{3}\gamma)$ for galleries	
16	TODERAŞ et al (2015) <sup>[42]</sup>	$H_{cr}=(7.34\gamma/\sigma_c-0.248)\pm 0.1$	
17	HEASLEY (2008) <sup>[43]</sup>	$H_{cr}=P/(2\times\tan\omega)$	
18	WANG et al (2015) <sup>[44]</sup>	$H_{cr}=(\sigma_{cr}-\eta\sigma_t)/\lambda\beta g$	

3) 根据地温确定临界采深

地下温度随着深度的增加而升高。进入深部开采后, 需要借助通风以及制冷系统对井下作业环境进行降温。对于传统采矿方法, 人的生理、心理以及机器的可靠性对环境温度具有一定的适应程度。早在 1949 年, SPALDING<sup>[46]</sup>就指出, 高岩石温度是最有可能限制采矿作业深度的因素。最近, 王希然等<sup>[47]</sup>认为存在一个满足人机工程学需求的临界温度, 相应地也存在一个现有制冷技术经济条件下的临界采深, 当开采深度大于此临界采深后, 纵使通过现有的制冷技术也难以满足工人对井下作业舒适度以及机器可靠度的最低

需求。以冬瓜山铜矿为例(见图 6), 发现在矿井特殊环境下导致矿工疲劳和烦恼的临界预防点—等效温度和综合温度指标分别为 28.48 °C 和 26.14 °C, 矿井临界深度 745 m<sup>[47]</sup>。

1.4 深部界定的标准

作者认为, 从经济层面上讲, 在全球经济贸易的大背景下, 各个国家资源开采技术水平与资源赋存条件不同, 资源开采往深部推进的过程中, 由于高应力、高地温、高井深导致的开采难度增加与成本上升的量也不相同。然而矿山企业追求的是去除开采成本后的

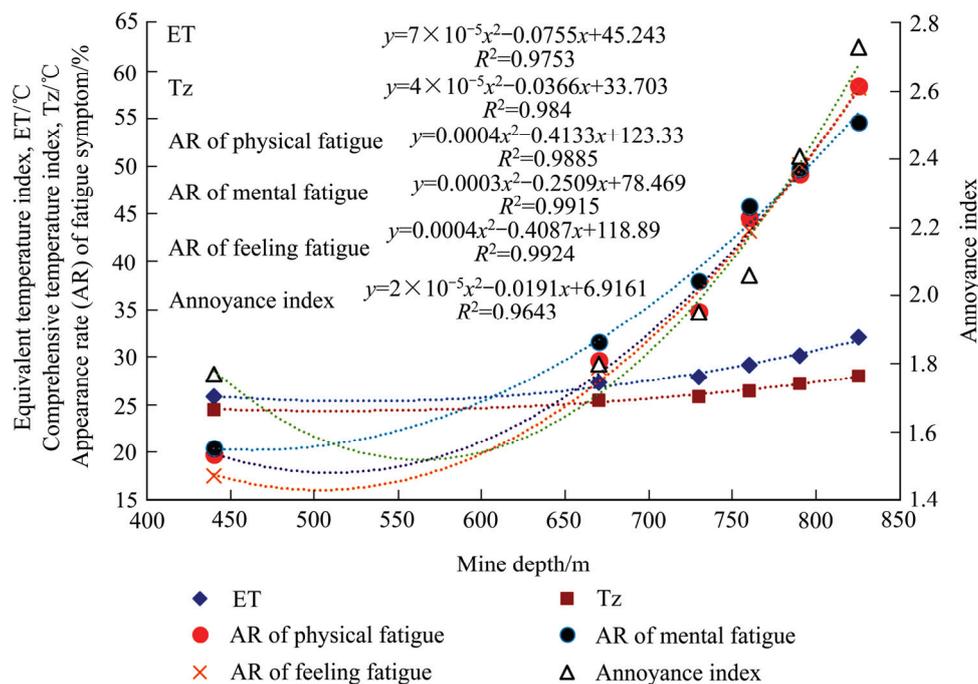


图6 采深对工程烦恼指数和疲劳症状的影响(据文献[47]修改)

Fig. 6 Effect of mining depth on annoyance index and fatigue symptom(Modified from Ref. [47])

盈余,因此深部的定义不仅直接受到客观开采难度的影响,也间接受到开采成本的影响,故而深部的定义随时间和国家地域的变化而变化。从技术层面上讲,深部应该满足:1) 高应力—岩体静应力集中和开采扰动增大到足以导致矿岩的非常规破坏;2) 高井深—提升排水困难导致常规开采特别是提升成本急剧增加;3) 高地温—地温增大到人的舒适感受发生突变,生理、心理承受力发生变化。

因此,深部的界定应根据科学产能要求和资源赋存条件,并囊括高应力、高地温和高井深等综合因素,是一个涉及现有经济技术条件和资源开采条件,并与时间和地域密切联系的系统问题。

## 2 地下矿山的开采深度

为确保深部开采能够顺利和安全进行,同时还能使矿山企业有利可图,世界采矿大国,如南非、加拿大、美国、澳大利亚、欧盟和中国等国家、工业部门和研究机构密切配合,集中人力和财力就深部开采基础性问题及相关技术开展了深入的研究。

### 2.1 国内外深部开采研究现状

#### 2.1.1 南非

南非本身是世界矿业大国,拥有先进的深矿开采

技术,在20世纪60年代南非就成立了南非矿山安全研究咨询委员会(Safety in Mines Research Advisory Committee, SIMRAC)<sup>[48]</sup>,组建并开展一系列的深部开采探索研究及工程实践工作,在20世纪70年代,南非首先发现分区破裂现象<sup>[49]</sup>,并建立了成套的微震监测系统。随后南非政府、大学与工业部门密切配合,于1998年7月启动了耗资约合1380万美元为期4年的著名“Deep Mine”研究计划<sup>[48]</sup>,旨在解决3000~5000 m深度的金矿安全、经济开采所需解决的一些关键问题。研究内容包括安全技术研究、地质构造研究、采场布置与采矿方法、降温与通风、采场支护、岩爆控制、超深竖井掘进、钢绳提升技术和无绳提升技术等。

2011年,南非科学和工业研究理事会又与日本合作开展了南非地下矿山深层地震方面的研究(Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks, 1000~3000 m)<sup>[50]</sup>,旨在阐明震源岩石性质、增强对金矿地震孕育和前兆的认识、提高金矿地震危险性评估的可靠性、改进金矿强地面运动预测的可靠性和微地震事件位置的估计,使地震灾害损害评估更加精确。

#### 2.1.2 加拿大

加拿大是继南非后的一个有3000m深井的国家,早在20世纪80年代,在加拿大安大略省Sudbury对Creighton镍矿微震与岩爆开展了计算机模型研究

(Canadian Ontario Industry Project (1985~1990))<sup>[51]</sup>。Laurentian 大学的地质力学研究中心 (Geomechanics Research Centre, GRC) 针对岩爆潜在区的支护体系和岩爆危险评估等进行了卓有成效的探讨(Canadian Rockburst Research Program, CRRP)<sup>[52]</sup>, 并出版了加拿大岩爆支护手册(Canadian Rockburst Support Handbook), 至今仍被视为这方面的经典岩爆研讨报告。最近, 由加拿大安大略省萨德伯里矿业创新卓越中心(Centre for Excellence in Mining Innovation, CEMI) 提出倡议建立加拿大的超深采矿联盟(Ultra-Deep Mining Network, UDMN)<sup>[21]</sup>, 斥资 4600 万美元 (2015~2019 年), 旨在解决地表以下深度达 2500 m 处采矿所涉及的 4 个主要战略主题: 减少应力灾害、减少能耗、提升矿石运输与生产能力、改进工人安全性, 如图 7 所示。

2.1.3 澳大利亚

澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO)和西澳大学联合成立了澳大利亚地质力学中心(Australian Centre for Geomechanics, ACG)<sup>[53]</sup>, 该中心自 1999 年来针对深部矿山开采中遇到的挑战开展以下项目的研究: 矿压支护系统优化,

微震及岩爆风险管理平台研发, 挤压大变形及防范措施, 矿山充填及有效应力评估, 深部高应力开采中吸能锚网的研究及应用。并由该中心组织有若干与深部开采相关的国际会议, 共同应对在深部工程中日益增长的岩爆等岩石动力灾害, 进而为地下工程结构及开采安全提供有力的技术保障。

2.1.4 欧盟

欧盟启动了 3 项有代表性和前瞻性的课题:

- 1) 未来智能深矿井的创新技术与理念(Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future, i<sup>2</sup>mine)<sup>[54]</sup>的概念, 旨在开发新的深部地下矿物资源和废物处置方法、技术, 以及必要的机器和设备, 以提高矿物的回收率, 降低矿物开发中伴生废物的运输量, 减少地面设施, 降低矿物开发对环境的影响, 实现深部开采的安全、生态和可持续;
- 2) 热、电、金属矿物的联合开发(Combined Heat, Power and Metal extraction, CHPM2030)<sup>[55]</sup>, 旨在提高地下资源及地热能源的综合利用率, 通过开发一种新颖的, 潜在的颠覆性技术解决方案, 可以帮助满足欧洲在能源和战略金属方面的需求;
- 3) 利用生物技术从深部矿床中提取金属的新采矿理念(New Mining Concept for Extracting Metals from Deep Ore Deposits

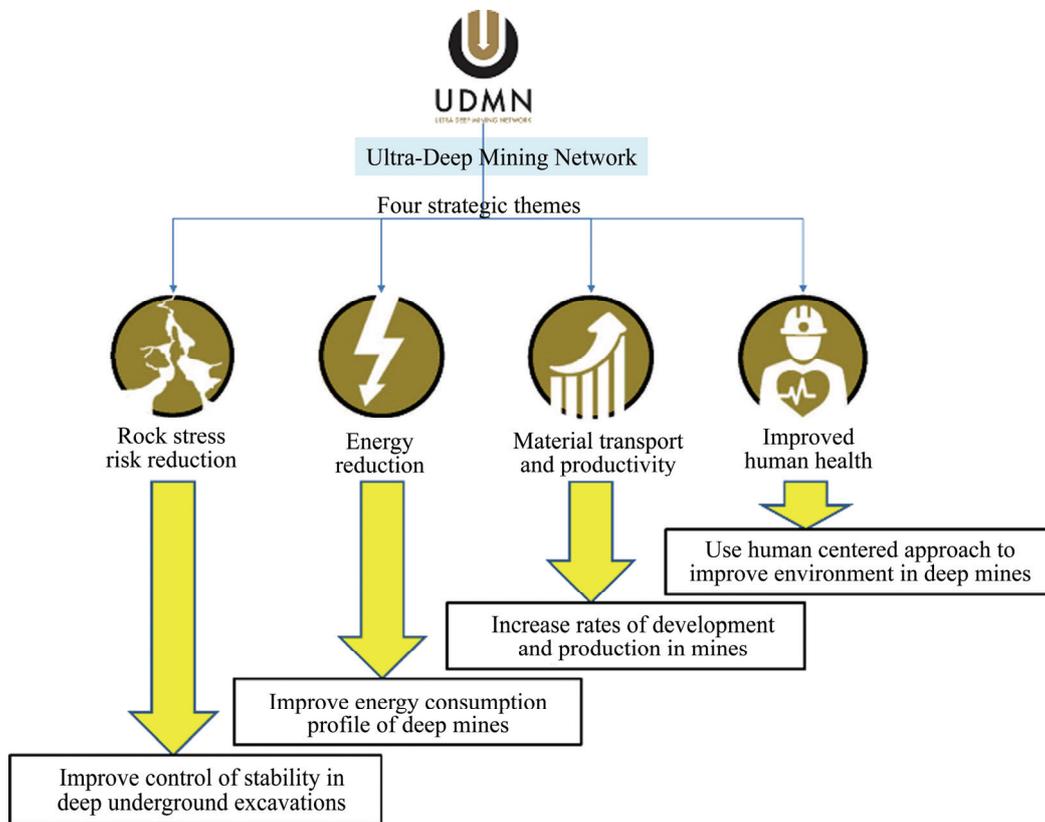


图 7 超深采矿联盟研究主题

Fig. 7 Research themes of ultra-deep mining network

using Biotechnology, IOMore)<sup>[56]</sup>(2015~2018年),旨在联合传统采矿和原位生物浸取对地下1000 m以下金属资源进行开发,并实现最小的环境影响。

### 2.1.5 美国

早在20世纪60年代中期,美国矿务局、Idaho大学、密西根工业大学及西南研究院等就已经开展深井开采及岩爆研究,并提供岩爆的预警及控制方法<sup>[4]</sup>。近年来美国矿业重心转移到职业安全与健康、矿区生态环境恢复治理(矿山公园)等方面,研究和提出相关建议、标准并鉴定和评估工作场所的危险性及在测量技术和控制工艺等方面开展研究。同时美国也是建立“深地科学与工程实验室”最多的国家,如利用Homestake金矿的废弃矿井建立了Sanford地下实验室,开展工程学、地质学和生物学等领域的实验项目。在美国新墨西哥州芬顿山(Fenton Mountain)执行热干岩发电计划<sup>[57]</sup>,钻井深度为4250~4660 m,希望攻克高温高压下热干岩的钻进、热干岩人工致裂技术和热干岩体中“水—岩—热—力”的耦合作用等岩石力学难题。

### 2.1.6 印度

印度Kolar金矿区是最早观察到并文献记录了岩爆现象的典型深部硬岩矿山之一,且被公认为是岩爆的严重发生区域,其“区域”性岩爆随着开采深度的增大而范围越来越广<sup>[58]</sup>。印度国家岩石力学研究所在Kolar金矿利用微震监测系统揭示采矿活动和产生微震事件的关系,并致力于开发相应的预测模型。虽然该矿已关闭,但是还存在一些遗留问题,近年来主要开展重金属污染<sup>[59]</sup>和地下水治理<sup>[60]</sup>方面研究。

### 2.1.7 俄罗斯

为开拓“深地”新领域,前苏联最早开展“大陆科学钻探研究”,在1970~1989年间,已完成12262 m深度的科学钻孔—科拉超深钻孔(Kola Superdeep Borehole)<sup>[61]</sup>。前苏联国家科委、机械工业部和矿业研究单位协同制定了确保深凹露天矿正常劳动条件的综合治理规划和研究课题<sup>[62]</sup>,并在1983年就开展了-1600 m深的矿井开采相关问题专题研究。近年来,俄罗斯科学家找到了一种从太空探测地球内部能源和资源的独特方法。这种空间地质勘探新技术,为人类开发地下资源开创了全新的未来<sup>[63]</sup>。最近开展了利用岩体弹性能作为可再生能源的来源研究<sup>[64]</sup>,研发“地下火箭”破岩技术及相应的工程设计试验模型<sup>[65]</sup>,并继续深入研究深部非常规破坏现象—分区破裂化机理<sup>[66]</sup>。

### 2.1.8 中国

国家先后设立“九五”、“十五”、“十一五”、“十二五”科技攻关项目和“十三五”重点研发计划,对

深部开采所要攻克的关键问题开展了大量研究。2001年召开了以“深部高应力下的资源开采与地下工程”为主题的香山会议;2004年启动了国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”,对深部岩石力学问题展开了深入系统的研究,极大地促进了我国深部岩石力学理论与技术的发展。为建立深部地下工程动力灾害综合防治的理论与技术体系,2009年通过设立国家973项目“深部重大工程灾害的孕育演化机制与动态调控理论”和“煤炭深部开采中的动力灾害机理与防治基础研究”,对深部开采条件下动力灾害的孕育-发生-演化机理、以及预警防治对策有了系统研究。毋庸置疑的是,我国在深部资源开采及深部岩体力学方面进行了大量的科研投入,以期全面提升深部资源的获取能力<sup>[67]</sup>。

随着固体资源开采深度的增加,国家在“十三五”国家重点研发计划“深地矿产资源勘查开发”重点专项中又启动了深部矿产资源开采理论与技术等多个项目,试图建立1500 m以深、2000 m以浅深部岩体力学与开采理论体系、安全监测预警技术体系,1000 m以深规模化采矿示范,为深部开采理论方法与灾害防控技术提供理论与技术支撑。

## 2.2 深部实验室与学术交流

### 2.2.1 地下试验室

为了探讨深部开采及其在深部岩体中的一些特殊现象,许多国家利用废弃的矿井和地下隧道建立地下实验室<sup>[68-69]</sup>(见图8),如加拿大原子能有限公司的地下研究实验室(AECL's URL)、美国内华达州的Yucca Mountain地下实验室、瑞士Mont Terri岩石实验室,瑞典核燃料和废物管理公司Äspö硬岩实验室(Äspö HRL)、日本Kamaishi Mine地下实验室和中国在锦屏的大型地下实验室等。这些地下实验室为深部岩体力学、地球结构演化、生态学等学科提供了重要实验场所和良好的低本底环境。图9所示为Äspö硬岩实验室平面图<sup>[70]</sup>。在图9上可以看出,利用该实验室可以进行岩柱稳定性试验(Äspö Pillar Stability Experiment, APSE)、长期扩散实验(Long term diffusion Experiment, LTDE)、充填管路试验(Backfill and plug test, ZEDEX)、孔壁围岩在热-应力耦合作用下的破裂和硬岩板裂等一系列的深部开采实验,并取得了许多创新性成果。

### 2.2.2 学术会议

目前涉及深部开采领域的主要学会:国际采矿及金属协会、国际岩石力学学会及下属17个专业委员会、国际爆破工程师协会及相应的地区或地方分会。

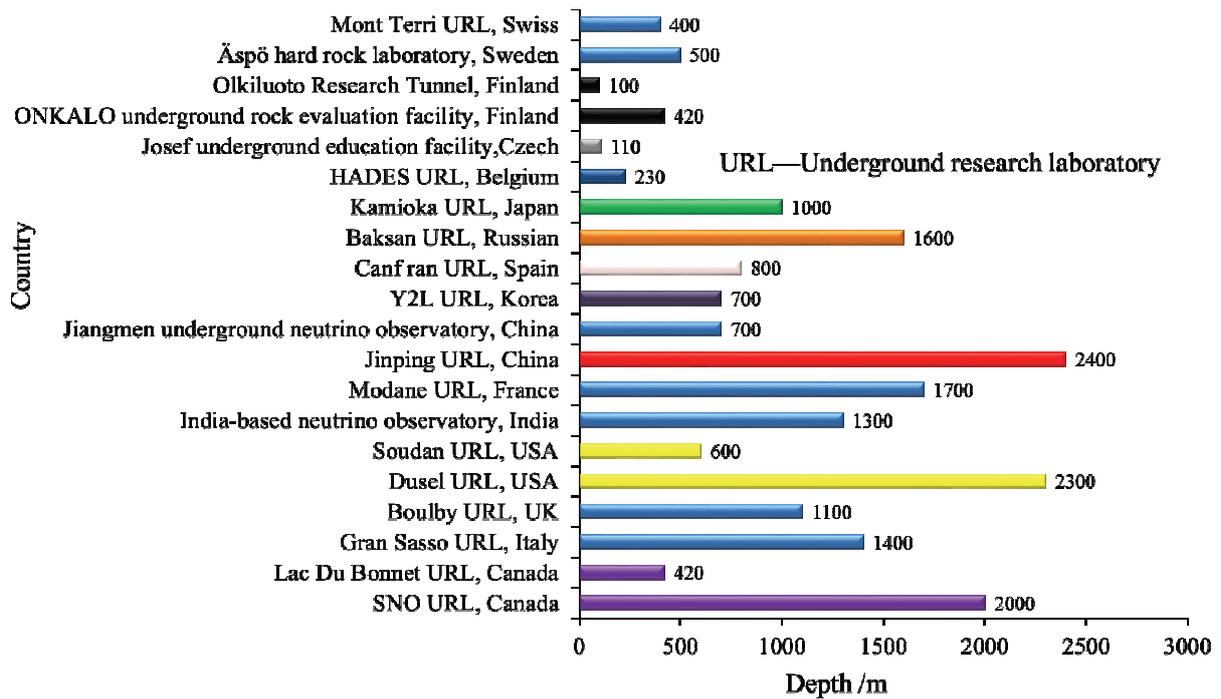


图 8 世界上主要地下实验室<sup>[68-69]</sup>

Fig. 8 Principal underground laboratories in world<sup>[68-69]</sup>

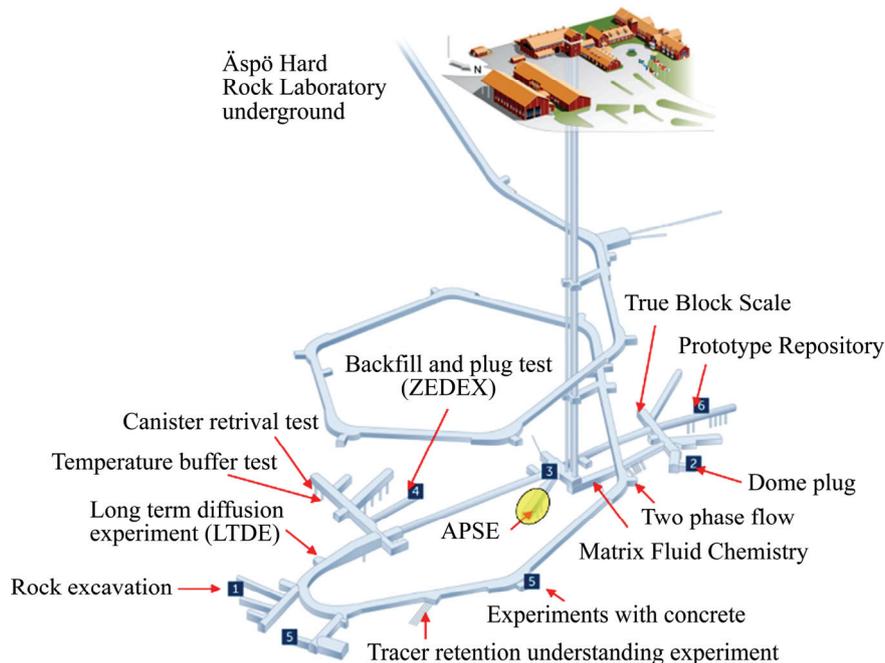


图 9 Äspö 硬岩实验室布局(据文献[70]修改)

Fig. 9 Layout of the Äspö hard rock laboratory(Modified from Ref. [70])

相关的会议有: 世界采矿大会(WMC 已举办 24 届)、国际岩石力学会议(ISRM, 已举办 13 届)、矿震与地震活动国际研讨会 (RaSiM, 已举办 8 届)、国际深部高应力开采会议(Deep Mining, 已举办 8 届)、国际采矿岩层控制会议(已举办 35 届)、国际充填采矿会议(已

举办 11 届)、国际岩石爆破破碎学术会议(已举办 11 届)、国际膏体充填与尾矿浓密学术研讨会(已举办 18 届)、矿山安全科学国际会议(已举办 3 届)及相应的地区会议等。这些学会和相关学术会议促进了深部工程相关问题的交流。最近在加拿大蒙特利尔举行的第三

届矿山安全科学会议和在澳大利亚珀斯举行的第八届“Deep Mining 2017”国际会议就大篇幅报道了深部开采岩爆和微震等研究最新进展<sup>[67]</sup>。

在国内,谢和平院士<sup>[5]</sup>于2001年在北京香山主持召开了以“深部高应力下的资源开采与地下工程”为主题的香山科学会议第175次学术讨论会。随后钱七虎院士主持了中国科协第21期分区破裂<sup>[71]</sup>和51期岩爆机理“新观点-新学说”学术沙龙<sup>[72]</sup>,多名专家和学者就深部特有地压显现现象进行了交流、争论和探讨,并从不同层面展示其最新研究进展和认识。2011年起每年由中俄双方轮流承办的中俄矿山深部开采岩石动力学高层论坛,为加强两国技术经验交流,研究并解决矿山深部开采理论与技术难题起到了积极作用。最近,蔡美峰院士主持召开了第234场中国工程科技论坛,国内众多专家就深部矿产资源高效开采进行了深入交流。

### 2.3 露天矿的开采深度

在探讨地下矿山能采多深之前,首先应该了解露天开采所能达到的极限深度。这里给出了2个国外著名大型极深露天矿山成功开采案例。世界上采深第一的露天铜矿—美国宾汉峡谷铜矿(Bingham Canyon Copper Mine)(见图10),宽4000 m,深1200 m,矿石储量约为9.60亿 t,铜品位0.47%,金品位0.25 g/t,钼0.044%,银2.08 g/t<sup>[73]</sup>。该矿整体边坡角约38°,2013年人类采矿史上规模最大的一次边坡崩塌事故就发生在宾汉姆峡谷铜矿,6500万~7000万 m<sup>3</sup>的滑坡体冲入近千米深的矿坑底部,约1.5亿 t的土石方滑落近千米产生了剧烈的冲击震动。但由于该矿采用稳定性雷达、引伸仪、自动经纬仪、时域反射计和微震监测多

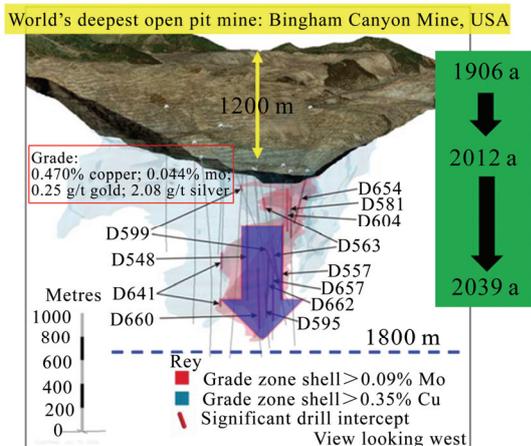


图10 宾汉峡谷铜矿(据文献[73]修改)  
Fig. 10 Bingham Canyon copper mine (Modified from Ref. [73])

种监测技术提前预警,保障了零伤亡的奇迹。按照Gideon Chitombo教授在世界采矿主题报告上的构想<sup>[74]</sup>,若不发生崩塌事故而继续向下开采,最终露天矿可达1800 m,服役至2039年。

继美国犹他州宾汉峡谷铜矿之后,地球上第二大最深的露天矿是智利丘基卡玛塔铜矿<sup>[75]</sup>(Chuquicamata Copper Mine),矿石储量约为104.97亿 t,铜品位0.8%以上,2014年闭坑(见图11),最终露天坑深1100 m,随后转入地下开采,预计2018年投产,已探明储量可采至2055年。

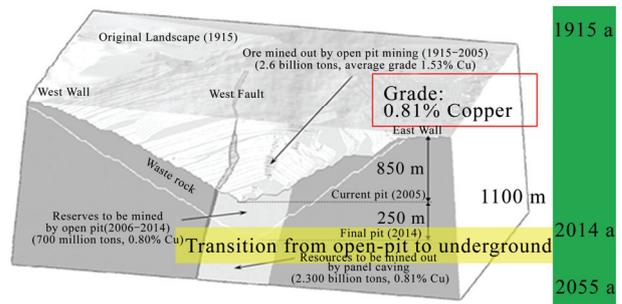


图11 丘基卡玛塔铜矿(据文献[75]修改)  
Fig. 11 Chuquicamata copper mine (Modified from Ref. [75])

露天矿进入深凹开采后,矿山生产将面临3个难题:1) 生产成本急剧增加。随运输距离增长,运输效率降低而运输成本(占生产总成本40%~60%)增加,导致生产成本急剧上升,经济效益迅速下滑;2) 高陡边坡安全性亟待解决。采场边坡随露天坑延深而不断地加高加陡,开采难度和采场破坏概率越来越大,开采安全性越来越差,同时对于露天矿山,提高边坡角又是充分回收资源、降低生产成本、增加矿山效益的重要手段之一。如对于大型露天矿山,边坡角提高1°,即可减少剥离量数千万吨,经济效益十分显著,但边坡角增大,势必导致安全性下降;3) 作业环境日益恶化。深凹露天矿坑内大气质量急剧下降。且采矿过程中不可避免产生大量的炮烟、粉尘、及矿用卡车尾气和扬尘等难以消散。此外坑内积水排放和自然通风困难,导致露天坑内作业面环境十分恶劣,尘毒浓度增加,空气污染特别严重。

可见露天矿能采多深主要取决于:1) 经济性—矿石品位、最优经济剥采比;2) 安全性—边坡角。尤其是随矿山开采深度的增加,优化边坡结构参数显得尤为重要。CHEN<sup>[76]</sup>和 SJÖBERG<sup>[77]</sup>从工程类比的角度出发,现场调研边坡高度和整体边坡角之间的关系,统计结果如图12所示。目前露天矿山边坡设计仍严重依赖于工程经验和工程类比,尝试大量的边坡角,直至获得合理参数。

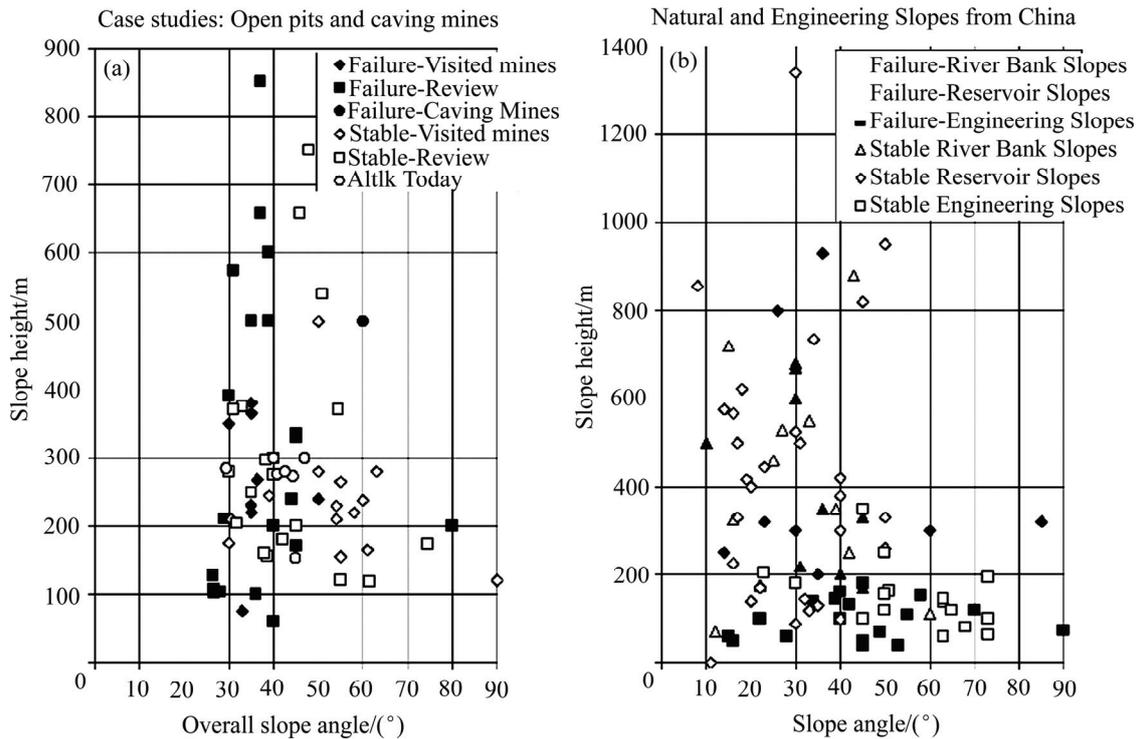


图 12 整体边坡角与边坡高度的关系

Fig. 12 Overall angle versus height versus for stable and unstable slope: (a) Ref. [76]; (b) Ref. [77]

## 2.4 深地开采模式与极限采深

### 2.4.1 开采模式

图 13 给出了作者为不同深地资源特别是有色贵重矿物资源开采设计的开发模式。在浅部, 可采用常规的开采方法。随着地下开采进入深部高应力环境后, 深部硬岩承受的高地应力意味着深部岩体贮存着高弹性能, 可通过开挖诱导工程, 将深部高地应力岩体弹性能诱变为用于岩体破碎的有用能, 即通过诱导工程使高应力在开挖岩体周围形成损伤区后, 再利用采矿机械等方法对损伤区进行截割落矿, 继而实现高应力诱导机械化连续开采<sup>[78]</sup>。这将会大幅度提高深部硬岩的开采效率, 并可为深井智能化采矿和无人采矿提供技术基础; 继续向深部进发, 对于有色金属特别是贵金属, 由于矿石中有益技术含量很低<sup>[79]</sup>, 传统提升矿石的矿井提升方法将会因为提升有用矿物质以外的大量废石而消耗过多的能量, 使其经济性极差, 这时, 在井下配备破碎、选矿系统, 对开采的矿石进行分选从而只提升矿精粉或者矿物质, 抑或是制备成矿浆进行不间断水力提升, 进而也可以利用深井高压对水力提升系统进行压力补偿从而节约提升耗能, 不失为最为经济有效的办法。随着矿物质赋存深度的继续增加, 由于高地温和高地压, 井下作业环境将极为恶劣, 以人和采矿机械为主导的采矿活动将无法进行, 然而

高地压、高地温以及发展充分的水力提升技术将会为深部溶浸采矿和热、电、矿物资源联合开发提供有利条件, 比如可以利用高地压进行耦合致裂矿体从而产生众多供溶浸液流通的导水裂隙, 利用高地温不但促进溶浸液与矿物质的反应速度, 而且高地温可通过溶浸液实现地热回收; 当开采进入极深状态后, 地温超过一定阈值, 常态化开采技术难以进行, 正如南非科学与工业研究协会(Council for Scientific and Industrial Research, CSIR)的地质物理学家 RAY 等<sup>[80]</sup>所指出: “矿工工作的极限深度约 10000 m—此深度热量和不稳定的岩石结构让开采活动无法进行”。如图 14 所示<sup>[81]</sup>, 深地物质所处的状态与浅部有极大不同, 大体上随着深度增加地下物质有脆性逐渐过渡为延性, 并且物质状态逐渐由固态过渡为流固混合态, 如德国大陆深钻计划在 1987~1995 施工的 KTB 深地钻孔, 发现在 9101 m 的地球深部温度高达 265 °C, 高温高压改变了物质的存在状态, 原本认为会以固态存在的物质反而伴随大量的液体和气体呈流固混合态存在<sup>[82]</sup>。此时可以利用集采掘、液化、充填、水力提升于一体的集成化、智能化、无人化采矿舱对深地资源进行精准化、精细化无废开采。

### 2.4.2 极限采深

地下矿能采多深? 5000 m, 10000 m 或者几万

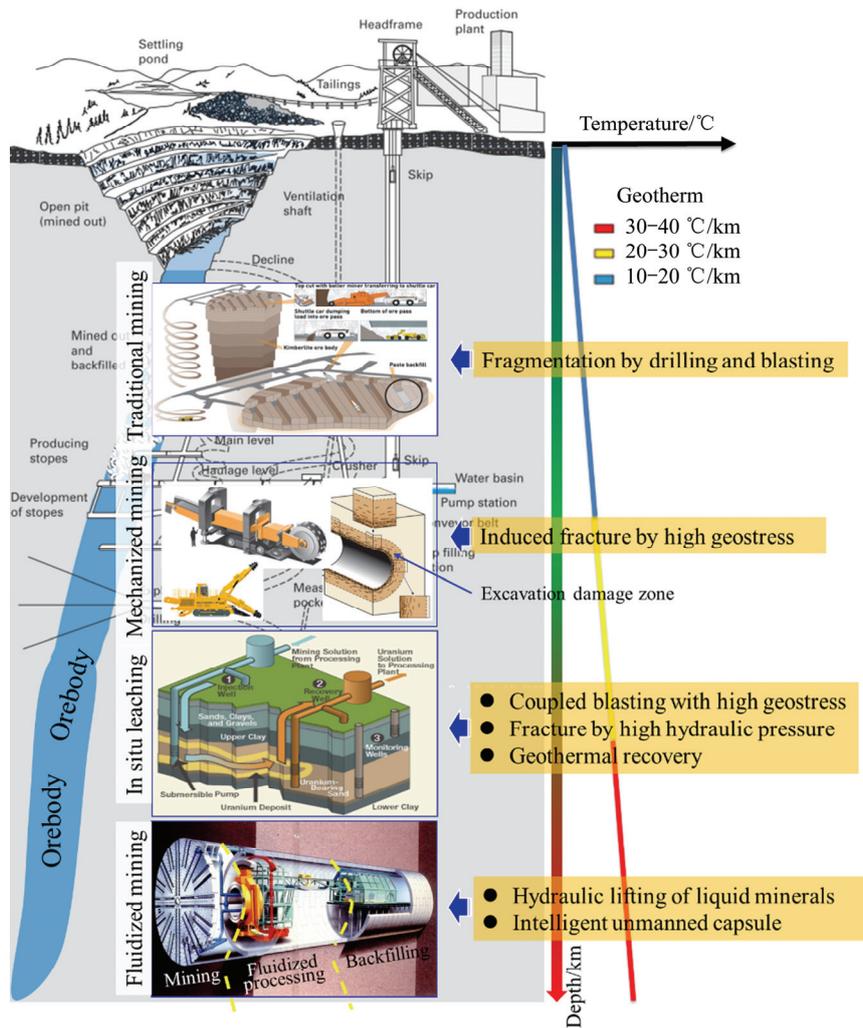


图 13 地下采矿模式随开采深度分类

Fig. 13 Classification of underground mining models with mining depth

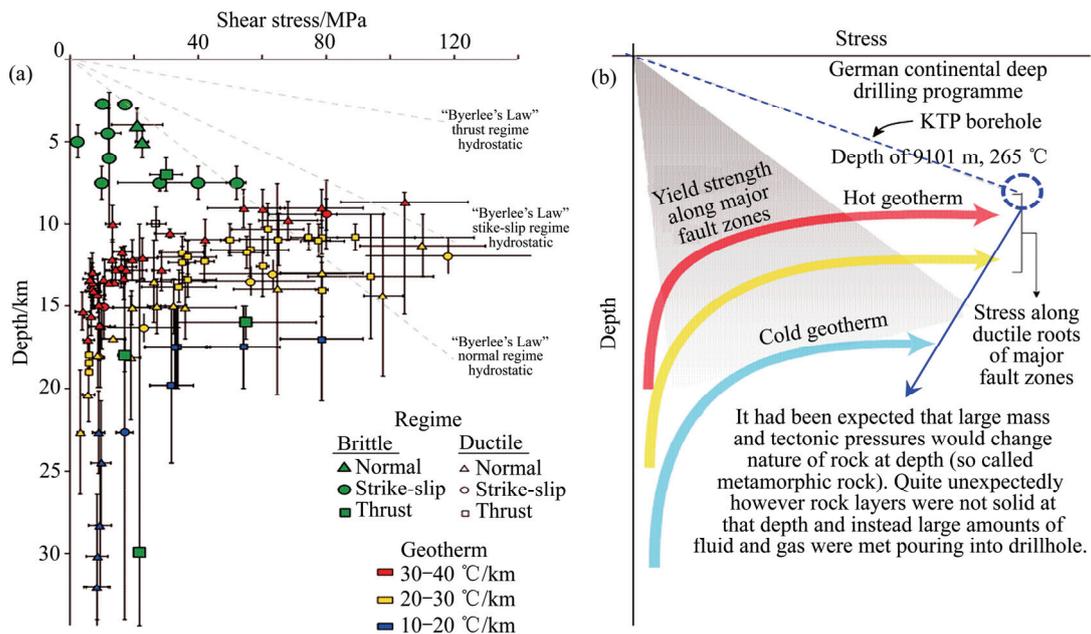


图 14 深地物质热力状态图<sup>[81]</sup>

Fig. 14 Geotherm and geostress conditions in deep earth<sup>[81]</sup>

米?本文作者认为极限开采深度需满足以下条件:

1) 与当前的经济技术相适应,并受矿石品位、开采方式、地质条件等因素影响;

2) 随着技术进步,可采深度不断增大;

3) 常规金属以及煤炭化工原料资源,因其赋存特性及矿产品特征,应该有极限采深,但贵金属等随着深度的不断增大,必须有突破性技术出现,如原地溶浸与流态开采;

4) 随着自身环境下的高温高压特征,深部资源的开发将逐渐由固态提升到流态提取转变(例如煤层气化、原地煤转油、溶浸开采),而如何实现固体资源的流态化开采,将是未来矿业工作者所要攻克的重大难题。

### 3 适用于高深井要求的矿石提升运输方式

表3给出了国内外典型深部矿山的提升方式。通过对国内外深部矿山提升运输系统统计分析可知,目前在深部开采实践中,绝大多数矿井采用多级竖井提升方式,并借助胶带输送机、轨道运输或者无轨设备进行开采阶段内的矿石转运,也有一些矿山在井下设置了破碎粗磨站,对矿石进行粗磨后再转运提升。竖井提升方式便于向下延伸,随着开采转向深部,只需延伸提升竖井或者增加下一级提升竖井即可。此外,竖井提升属于传统提升方式,经验积累丰富,技术成熟,如果采用其他提升方式,技术改造工程量较大。然而竖井提升方式也存在如下不足:

1) 非连续提升,间歇性作业—装载和提升工序分离,罐笼在提升竖井内的提升耗时过长;

2) 提升能力有限—进入深部开采后,矿石品位降低,为了满足经济技术条件,增大矿石提升效率将是必然趋势,然而竖井提升只能通过增大单次提升量或者加快提升速度来提高提升效率,这就需要更大的提升功率,对提升动力机械和提升缆绳是极大的挑战;

3) 系统自身能耗高—进入深部开采后,需要借助粗重的钢丝绳进行长距离提升矿石,自重能耗急剧增大,从而导致提升系统输出的能量大部分用来提升钢丝绳,而用于提升矿石的有效功率则占比较小。

同时,如何快速将矿工和材料送到深部工作面并返回也值得深思。对于深部矿石提升和人员运输需改变目前升降机运送机制,是利用竖井,还是胶带,抑或是利用创新性的提升方法,例如封闭式胶带、水力

提升、磁悬浮升降机提升等,是直接提升矿石,还是先进行矿废分离、粗磨、分选后再提升矿精粉,亦或是原地溶浸,这些问题都亟需深入细致地研究。

#### 3.1 多级竖井提升

竖井的一段提升深度受升降机自身容重的限制,目前单根升降机钢缆最多只能抵达2950 m<sup>[80]</sup>。由于深井提升的有效载荷将随深度增加而显著下降,提升费用必然大幅度增加且安全可靠降低,因此一段提升一般不超过2000 m,而当采深超过2000~5000 m及以上时,目前国内外深部矿山绝大多数都采用多级竖井提升系统,该系统一般包括一个主提竖井和多个辅助提升竖井。竖井沿矿体向下延伸方向依次错开,竖井之间通过胶带、无轨设备或者机车进行矿石运输。其中最为典型的是南非TauTona金矿所采用的3级竖井提升方式<sup>[83]</sup>,如图15所示。第1级竖井到达67水平,深1951 m,第2级竖井到达102水平,深1164 m,第3级竖井到达122水平,深819 m,在竖井之间通过胶带或者无轨设备进行转运,但是矿工们从地面往返工作面耗时长,有效作业时间短。

#### 3.2 封闭式胶带运输

目前的井下胶带运输系统是敞开式的,在运输过程中碎矿直接暴露在通风系统中,极易扬尘,污染井下环境,并且为了防止矿石散落,一般运输速度较低且具有较大的转弯半径,难以满足深井提升要求。近年来,在地面建筑、化工、冶炼等行业散体物料运输过程中出现了一种管状带式输送系统<sup>[84]</sup>。该系统将胶带卷成封闭式的管状,从而包裹散体物料,可实现长距离、大落差、高效率的物料连续提升运输,如SiCON公司研发的封闭式胶带输送系统<sup>[85]</sup>(见图16)。其主要优点如下:

1) 将散体物料全部包裹在胶带内,防止运输过程中扬尘和滑落,可以增大运输速度(可达到3 m/s以上)和提高提升坡度(可达到36°);

2) 系统结构简单,易于扩展延伸,质量轻,摩擦力小,系统能耗小;

3) 系统占有空间小,转弯灵活,具有较小的转弯半径(小于6 m);

4) 利用输送带的往复运行,可实现双向输送物料。

综合以上特点,本文作者认为适当的改进该系统有望在未来应用于深部矿石提升。

表3 国内外典型深部矿山提升系统统计<sup>[13-15]</sup>Table 3 Statistics of typical deep mine lifting systems around world<sup>[13-15]</sup>

Mine	Mining method	Hoisting systems
Mponeng Gold Mine, South Africa	Grid mining(5400 t/d) A mixture of concrete, water, and rock is packed into excavated areas	Twin-shafts system housing two vertical shafts and two service shafts; Ore hoisting
TauTona Gold Mine, South Africa	Longwall mining Scattered grid mining	A main shaft (2000 m deep) system supported by secondary and tertiary shafts; Ore hoisting
Savuka Gold Mine, South Africa	Longwall mining Sequential grid mining	A three-shaft system including the main, secondary and tertiary shafts; Ore hoisting
Driefontein Gold Mine, South Africa	A combination of longwall and scattered mining methods-dip-pillar mining with backfilling of the mined-out areas to facilitate secondary extraction of some 50% of the remaining pillars -40 m wide pillars with 140m spans	Eight operating shaft systems which access the VCR and CLR. Shafts 1, 2, 4 and 5 access the eastern part of the mine while shafts 5, 6 and 7 access the west part Ore hoisting
Kusasaletu Gold Mine, South Africa	Sequential grid mining	Twin vertical and twin sub-vertical shaft systems Ore lifting
Moab Khotsong Gold Mine, South Africa	Scattered grid mining with an integrated backfill support system	Twin-shafts system Ore hoisting
South Deep Gold Mine, South Africa	Conventional drift and bench and low-profile mining methods Fully mechanised drift and fill and long-hole stoping Mechanised low-profile mining	Two shaft systems including the 2995 m deep Twin shaft complex and the South Shaft complex Ore hoisting
Kidd Creek Copper/zinc Mine, Canada	From open pit operation to underground production Blasthole stoping with cemented backfill(7000 t/d)	Three shafts Ore hoisting
Great Noligwa Gold Mine, South Africa	Pillar mining Scattered pillar mining	Twin shaft system Ore hoisting
Creighton Nickel Mine, Canada	From open pit operation to underground production Shrinkage mining and mechanised undercut-and-fill mining Large-diameter blasthole method combined with vertical retreat mining (3755 t/d)	All ore is hoisted up 9-shaft Extracted ore is crushed underground The crushed ore being conveyed to the level loading pocket at 9-shaft The mine is now looking at alternatives to trucking this ore upward along the ramp
Agnico-Eagle's LaRonde Mine, Canada	Longitudinal retreat with cemented rock or paste backfill, Transverse open stoping with cemented rock backfill, paste or unconsolidated backfill(7300 t/d)	#3 shaft: single-lift shaft (2250 m); #4 shaft bottoms out at over 3000 m down; Ore hoisting
Zondereinde mine, South Africa	Typical drill and blast narrow tabular reef mining techniques Mining activities are carried out using hydro-powered equipment including rock drills and high pressure waterjets along with electric scraper winches	Twin shaft system; Ore-passes gullies Battery powered electric locomotives the shafts are 90m apart is provided through a decline that is equipped with a conveyor belt system
Mount Isa Mines, Australia	Cut-and-fill in the early 1990s Now used bench stoping Paste backfill	An internal shaft (reach to 1900 m) two rail systems underground crushing station
Pyhäsalmi zinc-copper Mine, Finland	Conventional sublevel and bench-stoping mining methods are used at the mine	Main and secondary shafts Underground crushing station
Kristineberg Mine, Sweden	Cut-and-fill method with all activities thoroughly mechanised	The connection of shafts by rail haulage Self-driving truck
Hongtoushan Copper Mine, China	Upward stratified filling method, segmented empty field method, a small amount of shallow hole retained ore method, retained ore and sub-mining of the two-step mining method and then filling the goaf	Secondary shaft lift Underground mine waste separation, waste rock backfill mined - out area
Suncun Coal Mine, China	Integrated mechanized longwall mining	Belt transport; Raw coal is transported by belt to ground; many links, more equipment, more staff

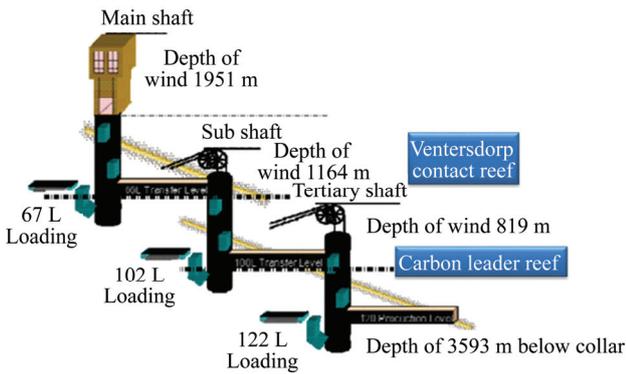


图 15 南非 TauTona 金矿 3 级竖井提升简图<sup>[83]</sup>

Fig. 15 Sketch of three shaft lifting system in TauTona gold mine, South African<sup>[83]</sup>

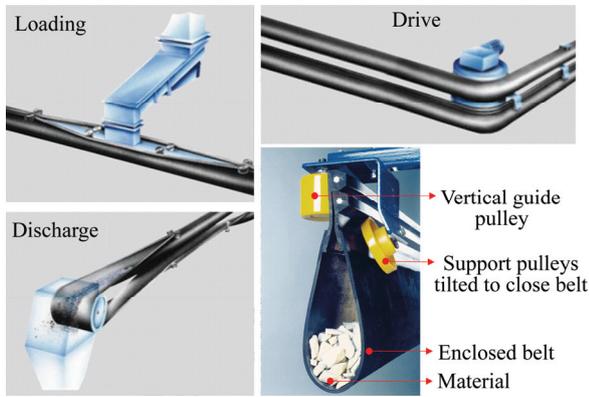


图 16 封闭式胶带输送系统<sup>[85]</sup>

Fig. 16 Enclosed belt conveyor system<sup>[85]</sup>

### 3.3 水力提升

水力提升技术目前主要在深海固体资源开采中运用,多用于垂直提升深海矿物结核等粗颗粒物质。近年来,有学者尝试在地下深部开采中进行矿浆制备及

水力提升<sup>[86]</sup>(见图 17)。矿石经破碎站破碎和球磨机粉磨成矿粉并调制成浆体,再用高压泵将矿浆从矿浆池连续注入位于竖井内的垂直管道中,并与管道中上升的水流混合稀释,从而被连续输送至地表,脱水后运往选矿厂。该提升运输过程连续,并易于实现自动化、智能化和无人化作业,但是该方法需要建立在井下的矿石破碎和粉磨系统,目前实际应用还较少。赵国彦等<sup>[87]</sup>提出一种深井双管水力提升矿石的方法,如图 18 所示,即通过在井下构造一种双管的水力提升系统,依靠在副井(风井、管缆井)双管中外管的静水压和地表、井下的二泵站,形成对矿浆提升的抽压双作用,减少了提升时单个泵体功率与能量耗损,增加了深井管道提升高度;充分利用深井水大需要排水的特点,解决了矿石提升与排水的难题,并取消了矿山主井的建设,减少了深井开采成本,不仅经济实用,而且自动化程度高,适用于埋藏较深、涌水量较大的地下矿山。

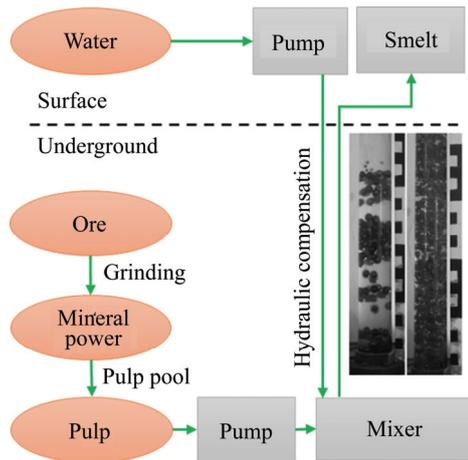


图 17 矿浆制备及水力提升简图<sup>[86]</sup>

Fig. 17 Sketch of pulp preparation and hydraulic lifting<sup>[86]</sup>

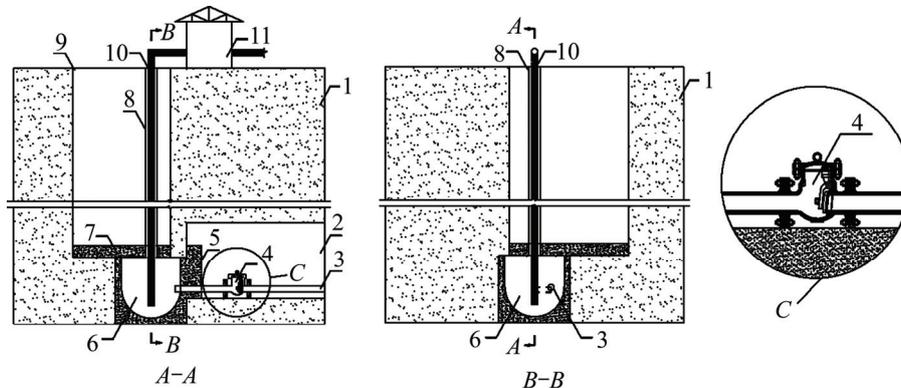


图 18 深井开采双管水力提升示意图<sup>[87]</sup>

Fig. 18 Schematic diagram of double pipe hydraulic lifting in deep mining<sup>[87]</sup>. 1—Surrounding rock; 2—Tunnel; 3—Slurry pipeline; 4—Check valve; 5—Partition wall; 6—Buffer pulp bin; 7—Bottom hole isolation layer; 8—Hydrostatic pipe; 9—Auxiliary; 10—Hydraulic lifting pipe; 11—Surface pumping station

## 4 深部开采高温调节

岩层温度升高是深部开采无法回避的热害问题。

在深部开采条件下,地温升高是井下工作条件恶化的重要原因,持续的高温将对人员的健康和工作能力造成极大的伤害,使劳动生产率大幅下降和生产事故大量增加,同时还会降低井下设备的工作性能,减少井下设备的使用寿命。在深部开采条件下,岩层温度明显升高<sup>[8-9]</sup>,如世界范围内的千米深井平均地温为30~40℃,南非M-poneng金矿已开采到地下4000m,地温达66℃;南非的西部矿,井深3300m,井下气温达到50℃;日本丰羽铅锌矿,采深500m,但受裂隙热水影响,井下气温高达80℃。地温升高易引起井下工人生理、心理状况变化,造成注意力分散、劳动率低下,甚至无法工作。

### 4.1 深部降温方式

依据国外深部开采经验<sup>[88]</sup>,随着采深的增加,深部高温依次通过常规通风系统、空气制冷系统、水冷系统和冰冷却系统进行调节,如图19所示。1)当井深为400~800m时,采用通风系统降温—增大风量、风速来稀释井下热量,改善人体散热条件,这是大断面巷道中常用的方法;2)当井深为800~1500m时,仅靠通风难以达到降温要求,常采用压缩空气制冷系统降温,主要用于辅助工作面降温;3)当井深为1500~2500m时,采用供水制冷系统降温:①井下分散制冷—空调地点增多,制冷机散发大量热量,既不经济也难以满足降温要求;②井上、井下联合制冷—目的在于改善井下冷凝温度过高的问题,采用2级循环输送冷水,即井筒中用高压管路,井下用低压管路,用高、低压换热器在井底车场附近连接;③井上集中制冷—因为是地表比井下的冷凝温度低,井上预冷塔制冷效率高,并且安装、维修容易,成本也相对低。地表制冷厂出来的水一般为2~4℃。4)当井深超过2500m时,采用地表制冰系统降温—冰块破碎后通过管道输送到井下冷库内,然后通过热交换系统、对空气和水进行冷却,可提高冷量输送效率,减少井下泵水量,并降低泵水成本,且降温效果显著。如南非Mponeng金矿利用冰的溶解热调节作业温度。冰在地表产生然后通过竖井运输到1800m的地下,并且使储存水的温度保持在10℃。2000m<sup>3</sup>的井下冰坝能够有效制冷井下工作环境,降温装置示意如图20所示<sup>[89]</sup>。

冰水混合系统温度为10℃。通过冰冷降温技术,实现了采场温度降到28℃,据南非金矿的调查统计资料显示,当井下空气温度为28℃时,完成生产任务率为100%,气温升高后,完成任务率逐渐降低<sup>[47]</sup>。

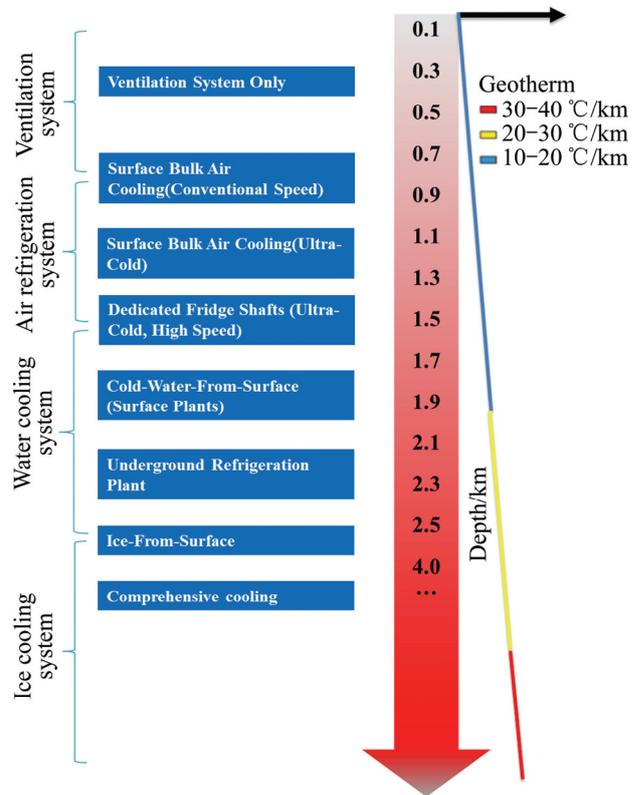


图19 不同深度降温制冷模式(据文献[88]修改)

Fig. 19 Refrigeration modes with different depths (Modified from Ref. [88])

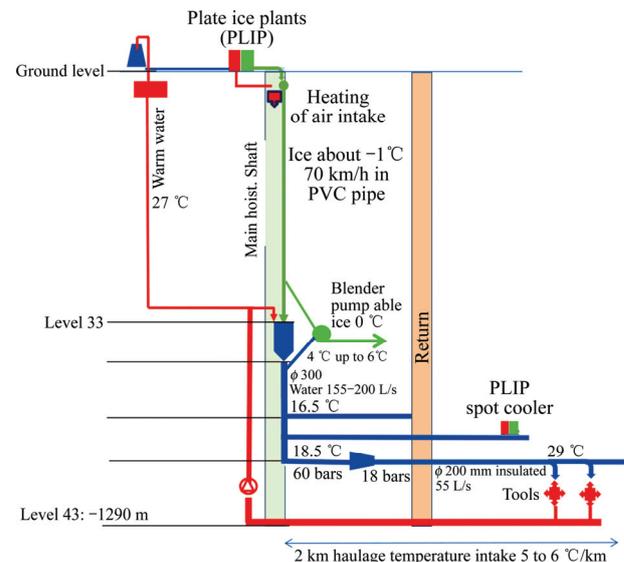


图20 降温装置示意图<sup>[89]</sup>

Fig. 20 Schematic diagram of cooling device<sup>[89]</sup>

当开采深度超过 4000 m 以后, 若继续往深部进发, 本文作者认为一方面必须借助更先进的制冷技术进行降温, 另一方面也需要缩小制冷空间, 研制隔热材料与个体防护装备, 从而对井下高温环境进行综合调节。深部充填将是缩小制冷空间和进行深部热隔离的有效途径之一。

### 4.2 深部充填降温

深部开采中充填体除了控制地压外, 还有一个主要的功能是隔热和降温, 同时缩小地下有限空间。但深部充填既不能用常规低浓度充填(充填强度低且导致大量排水困难), 也不宜用膏体充填(流动性差、输送困难), 应该采用高浓度充填或者似膏体充填。

随着固体质量浓度的增加, 胶结充填分为: 普通、高浓度、似膏体和膏体充填, 如图 21 所示<sup>[90]</sup>。进入深部后, 一方面由于输送距离增大, 如果用膏体充填, 需要克服极大的输送阻力, 输送困难并极易造成堵管引起管路破裂, 同时流动性差, 也不利于充填料在采空区的流动; 另一方面, 如果降低充填浓度, 一定程度上可以提高流动性, 但需要泌出更多的水, 深部排水又极其困难, 因此深部适宜的充填方法应该是似膏体充填。

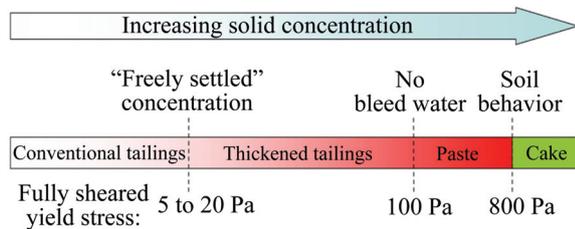


图 21 充填方式的定义<sup>[90]</sup>

Fig. 21 Definition of backfilling method<sup>[90]</sup>

以国内成功采用似膏体充填的开阳磷矿为例<sup>[91]</sup>, 在磷石膏与黄磷渣配比为 4:1 的条件下, 浆体充填浓度小于 61% 时为胶结充填, 流体为牛顿体; 充填浓度为 61.00%~64.77% 时, 属于似膏体充填; 当充填浓度在 64.77%~67.29% 之间时, 属于膏体充填, 如图 22 所示。在开阳磷矿充填中, 当浓度高于 65% 时, 发生了多次爆管与堵管现象。结合低浓度充填和膏体充填的优点, 得出在深部不宜采用结构流形式的膏体充填, 而应该采用流动性好, 沿程阻力相对不大, 且泌水率小的似膏体充填。研究表明, 对于磷石膏充填, 推荐的似膏体浓度为 61.00%~64.77%。

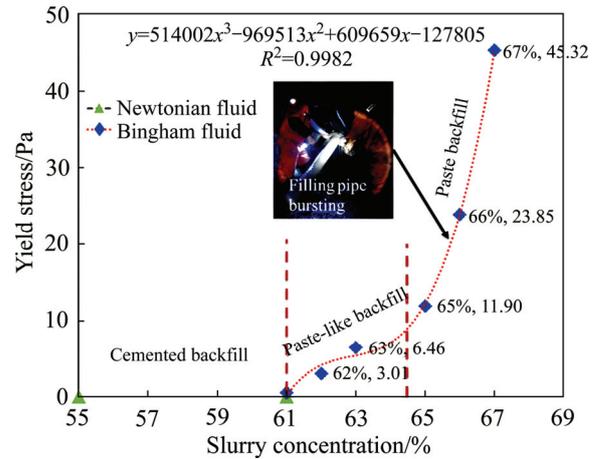


图 22 开阳磷矿充填质量浓度与其屈服应力关系

Fig. 22 Relationship between quality concentration of backfilling and its yield stress in Kaiyang phosphate mine

### 4.3 深部开采联合降温

进入更深部后, 在空冷、水冷、冰冷等制冷降温系统的基础上, 还要进行联合降温, 如图 23 所示:

- 1) 隔热材料—将隔热材料(胶结剂、硅粉、珍珠岩等组成)以及新型隔热阻水复合材料用喷射混凝土的方法喷射到巷道或采场壁面上, 将高温围岩与作业空间用隔热材料隔离, 以降低制冷成本;
- 2) 缩小井下工作空间—比如采用有效的充填方法将采空区及时回填, 可减少热流并改善通风系统或者采用作业舱。
- 3) 个体防护—通过个体防护服, 将个体与热环境隔离, 并保证个体的舒适性。目前, 相变冷却服装是一种比较常见的高温作业个体冷却防护装备, 其原理是通过固相液相和气相的变化吸收热量达到降温目的。个体防护准备应与深井工作环境相适应, 以降低成本<sup>[92]</sup>。显然个体防护成本随采深增加而增加, 随所要达到的个体温度降低而增加。

## 5 深部高应力矿山开采技术变革与实践

深部硬岩处于高应力状态, 深部岩体开挖过程实际上是高应力岩体的快速卸荷和由于爆破冲击、大面积落矿出矿、甚至矿区周边地震等动力扰动联合作用的过程, 如图 24 所示。深部开采中出现的一系列岩体非常规破坏现象—岩爆、分区破裂、板裂等无疑是深部高应力岩体在开采扰动下的应力和能量的释放。为此, 在 2001 年香山第 175 次科学会议期间, 李夕兵等<sup>[4]</sup>就提出了深部开采中硬岩实际上处于“高静应力+

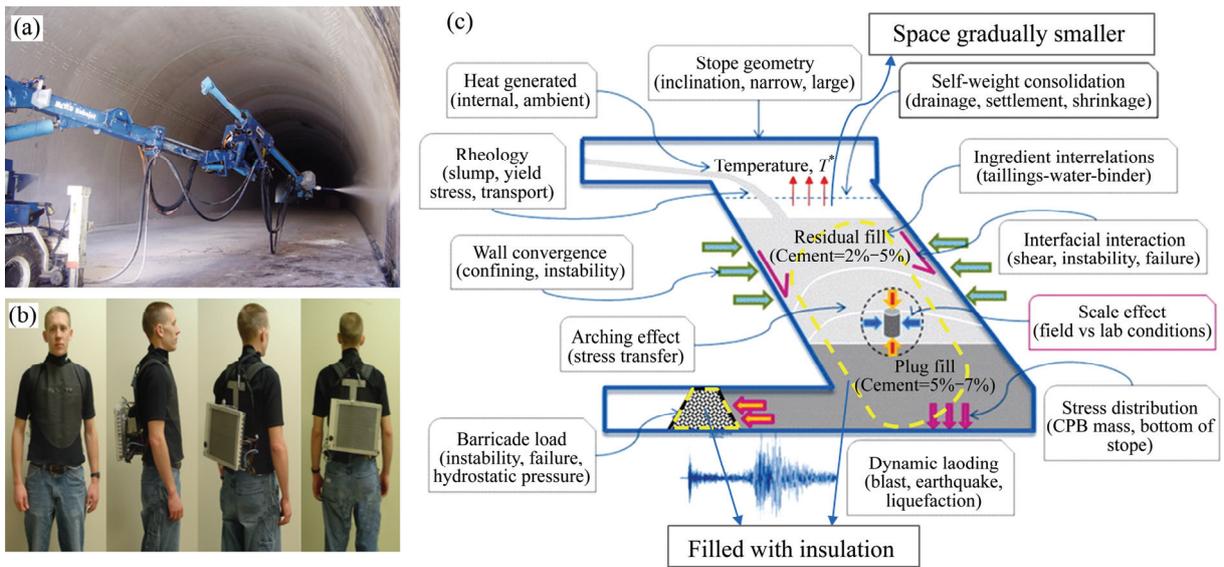


图 23 联合降温方法

Fig. 23 Combined cooling methods: (a) Injection heat insulation material; (b) Personal protection<sup>[93]</sup>; (c) Filling insulation and reduce refrigeration space<sup>[94]</sup>

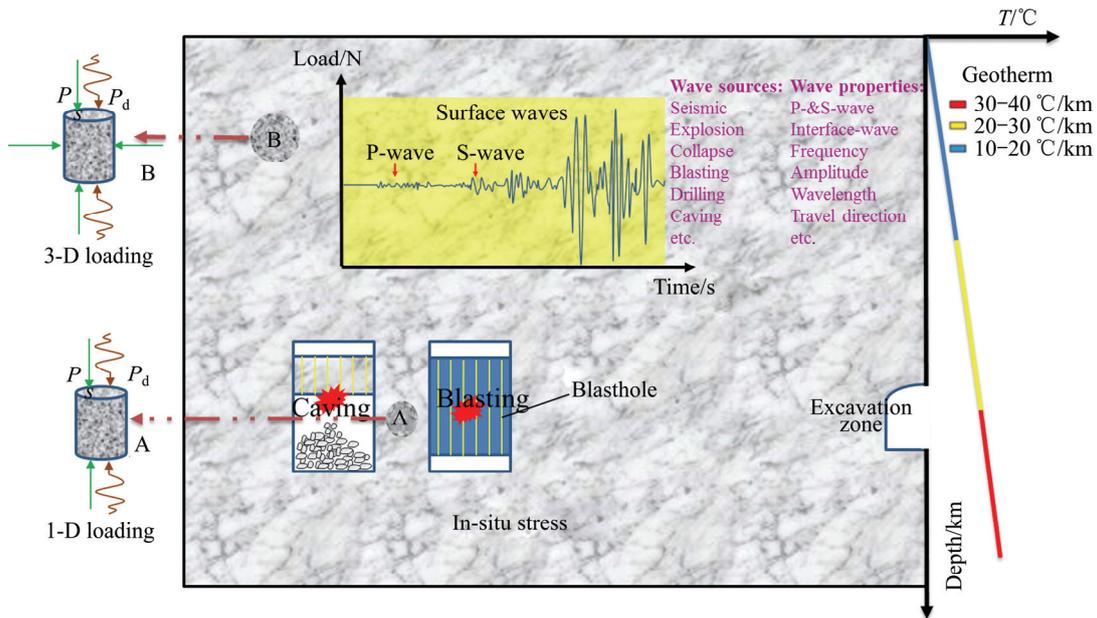


图 24 深部岩石受力模型示意图

Fig. 24 Schematic diagram of rock stress models at deep level

动力扰动”组合加载的学术思想(见图 24)，深部岩体的破坏是静载和动力扰动共同作用的结果<sup>[1-2, 95-99]</sup>。如何将深部高应力岩体开采扰动诱发的非常规岩体破裂的灾害转化为深部岩体的有效破裂，实现深部高应力岩体能量的有效调控碎裂诱变，显然是深部硬岩矿山开采技术变革的关键。

### 5.1 深部高应力矿山变害为利的安全高效开采构思

图 25 给出了李夕兵等<sup>[4, 8]</sup>在 2001 年第 175 次香山

会议上提出的“变害为利”的深地资源安全高效开采的构思，这里将复述在这一会议上的主要想法。高应力、高地温、高井深是影响深井开采及灾害控制的 3 大因素：高应力导致岩爆等灾害，高地温产生恶劣的工作环境，高深井导致矿石提升排水困难。以往将上述 3 个因素单纯视为灾害性因素而集中研究其如何控制，如岩爆机理与预测、热害抑制与缓解、提升系统优化。事实上，高应力、高地温、高井深这 3 个灾害性因素有可诱变成有利因素的一面：高应力有利于竖

硬矿岩致裂与块度控制; 高地温可加速原地溶浸采矿过程中矿物与溶浸液间的相互作用; 高井深存在的高水压有利于高水压设备或井下动力源的更新。高井深

导致的提升困难必然促使进行以提升量最小为目的的采矿方法变革。概括起来, 如何实现这 3 个不利因素的有效转变, 如图 26 所示:

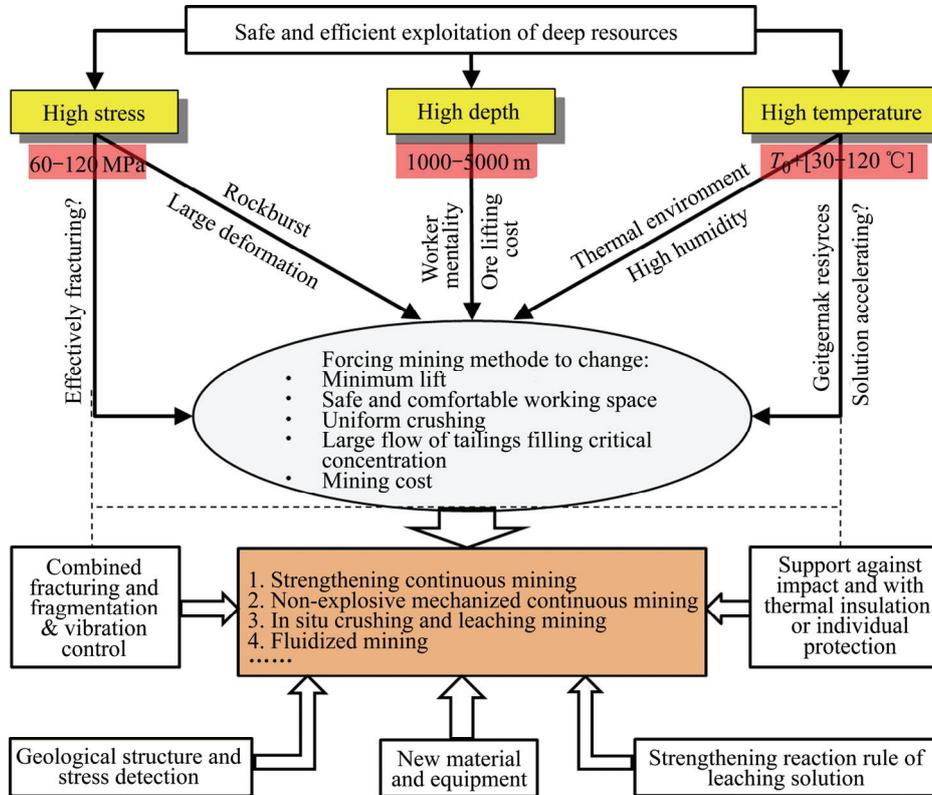


图 25 深地资源安全高效开采发展框架(据文献[4]修改)

Fig. 25 Development framework for safe and efficient exploitation of deep resources(Modified from Ref. [4])

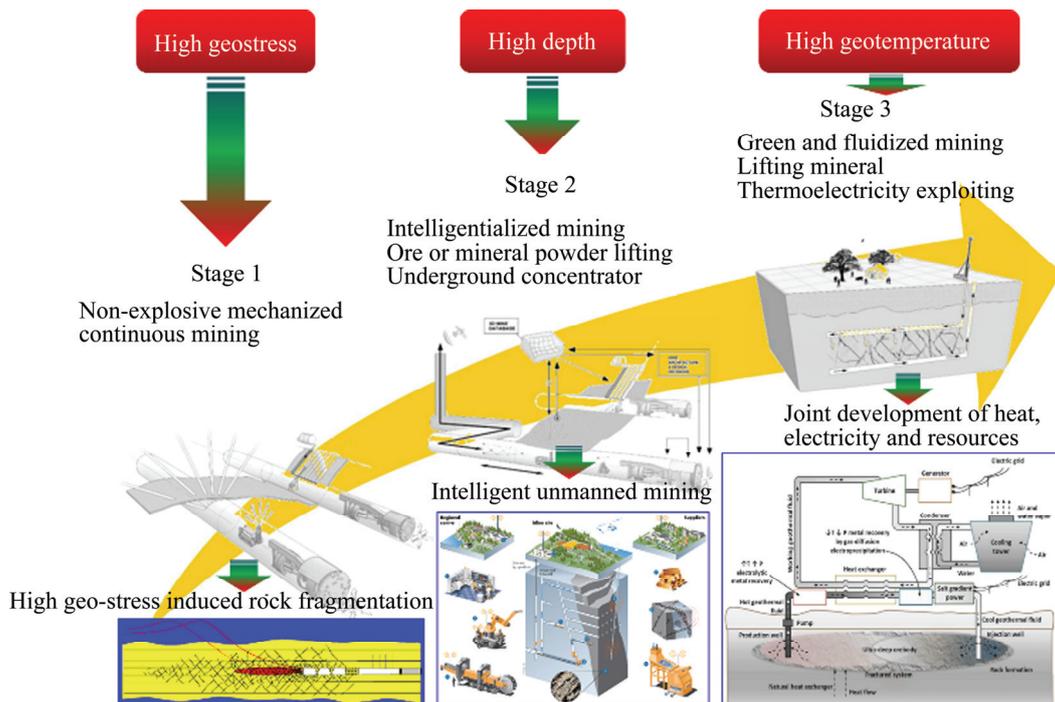


图 26 三高环境“变害为利”策略

Fig. 26 Strategy of three high environment with “convert harm into benefit”

1) 高应力。高应力隐含的能量在合适的诱导工程下, 有利于极坚硬矿岩的致裂破碎, 为此可创造一种高应力诱导破碎, 实现高应力诱导非爆破连续采矿的方法。为此已经在开阳磷矿初步实现这一构想, 即通过开挖合理的诱导工程, 将深部高地应力能量诱变为用于岩体破碎的有利因素, 当高应力在开挖岩体周围形成一定的松动圈后, 再利用采矿机械对松动区内的岩体进行截割落矿, 大幅度提高深部硬岩的可切削性和开采效率。

2) 高井深。高井深导致的矿石提升困难, 人在深部的心理生理等一系列变化, 促使进行减少提升或不提升矿石的采矿方法变革, 同时, 也应尽可能实现矿山智能化与自动化, 井下少用或不用人员, 向智能化无人化开采迈进。另一方面, 深井高水头, 可作为新的动力源推动高水动力矿浆管道提升运输的研发, 即将矿石在地下破碎、研磨后, 用水力泵送到地表, 在技术经济适宜时, 还可建造地下选矿厂, 实现废石不出坑。本文作者曾提出一种利用深井采矿用水势能驱动的矿山节能凿岩掘进方法<sup>[100]</sup>, 即利用深部矿床开采中从地面引入的用于防尘降温及冲洗炮孔等的天然水, 由于地面与凿岩掘进工作面之间的天然落差势能而产生的流体压力能, 通过压力控制设备及流量调节装置后去驱动凿岩机械等掘进机械设备工作, 并通过废水回收处理装置将驱动凿岩机械等工作后的废水回收处理后用于降温防尘。该方法既能充分利用水的天然落差势能、极大地降低能量消耗、节约能源, 降低生产成本, 提高经济效益; 又能提高工作效率, 且安全环保, 在深部开采中应用前景广泛。

3) 高地温。一方面, 高地温有利于对贵金属或贫矿资源进行原地破碎溶浸采矿、提高矿物溶浸效果。另一方面, 井下储存大量的地热能源, 将热能送到地面, 通过地面的热交换又可实现井下工作面降温。当开采深度到达一定临界值, 地温很高, 这时, 即可实现溶浸开采与地热资源的联合回收, 一旦技术成熟将带来采矿工艺的巨大变革, 实现真正意义上的绿色流态开采。

## 5.2 硬岩诱导致裂非爆连续开采

众所周知, 大部分煤矿山都实现了机械化连续采矿, 这是因为煤矿及其围岩较软, 采用机械设备进行直接掘进回采既能达到很高的生产能力又能改善工人作业环境。许多软岩矿山也都开始了机械化开采的研究与应用。但硬岩矿山实现非爆连续开采需满足2个必要条件<sup>[78]</sup>: 高效能采掘设备和有发育的岩体节理等结构。

目前高效能的机械破岩方法有: 1) 切削破岩—使用金属刀具, 靠刃角作用于岩体, 通过机械使岩石剪切破坏, 从外层逐渐与母体分离的方法; 2) 冲击破岩—依靠风动、液压等凿岩设备, 施加瞬时冲击载荷, 使岩石受力超出其最大抗压强度的破岩方法; 3) 冲击或振动切削破岩—采用滑移型牙轮钻头和钻进刀头, 实现冲击压碎和剪切碾碎共同作用的一种动静组合破岩方法。另一方面, 深部高应力条件下硬岩贮存了大量能量, 岩体开挖卸荷引起贮存能量的变化、转移和重新分布, 加剧了岩石中裂纹的扩展; 而且采矿进入深部后, 会出现更多的岩体非常规破裂, 比如岩爆、板裂、分区破裂等, 其与深部高应力硬岩在开挖卸荷和动力扰动下岩体中的能量转移和释放密切相关。事实上深部的非常规破裂是一个高能量岩体的自破裂过程, 这满足发育的岩体节理条件。为此只要找到适当的诱导破裂方法, 就可以将深部岩体的灾害性破坏诱变为有序致裂, 在不用炸药或少用炸药的情况下实现深部矿床的安全高效开采。可以说深部高地应力这一特殊的环境成为硬岩非爆连续开采的一个有利因素, 给非爆开采硬岩矿山一个良好的契机。为此李夕兵等<sup>[78]</sup>通过对开阳磷矿深部磷矿体进行的地质调查和对深部磷矿体矿开展的高应力硬岩矿山非爆开采试验等, 初步论证高应力诱导致裂硬岩采矿切实可行。而且进入高应力环境后, 相当深度范围内可采用高应力诱导机械化连续开采。非爆连续开采是硬岩开采全新的课题, 还存在着诸多创造性与探索性的研究内容。

## 5.3 深部矿山智能化无人采矿的美好憧憬

实现从劳动密集型转向生产系统的无人化, 是世界所有采矿人的梦想。而深部开采由于特定的恶劣环境, 必然要走向智能化和无人化开采, 即从单一的生产设计转向一体化的科学决策, 从高强度的人在地下作业转向地面办公室的智能管控。随着计算机技术特别是信息处理能力海量化和可视化技术、3S (RS, GPS, GIS) 技术和虚拟现实技术的发展<sup>[3]</sup>、“互联网+”和中国制造 2025 等国家行动计划的实施, 传统的生产方式正不可避免地发生着变化, 自 GORE<sup>[101]</sup>在 1998 年发表演说——《数字地球: 展望 21 世纪我们这颗行星》以来, “数字 X”——数字地球、数字中国、数字城市、数字地理、数字人体、数字工厂、数字矿山……风起云涌。数字矿山是变革传统采矿业的一剂良药, 是矿山提高生产技术和安全管理水平, 实现可持续发展和现代化的必由之路。

实现智能化采矿技术的革新在很大程度上依赖于采矿装备的创新。近年来, 成套的无轨设备、遥控铲

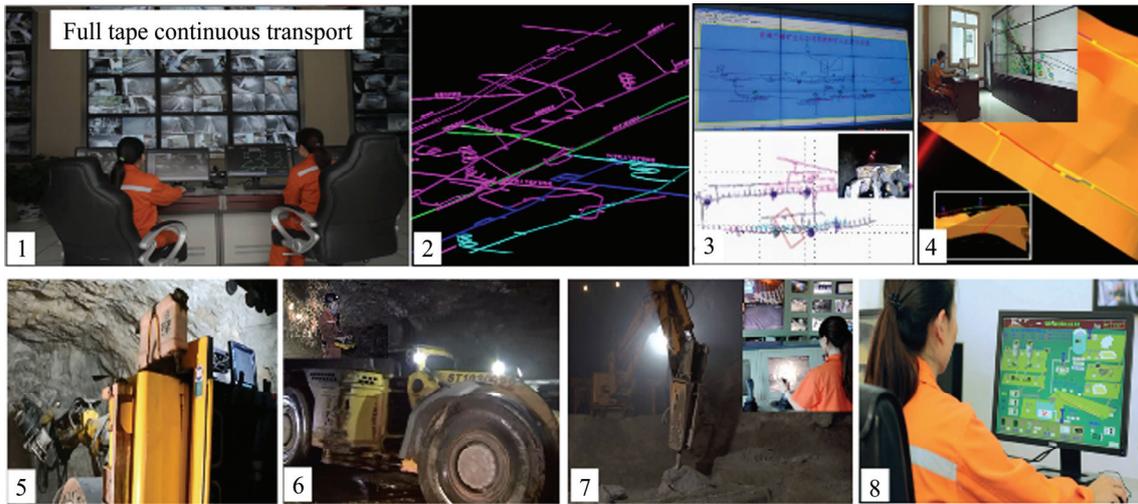


图 27 开阳磷矿智能化无人采矿

Fig. 27 Intelligent unmanned mining in Kaiyang phosphate mine: 1—Ground control center; 2—Roadway system visualization and design automation; 3—Precise localization of personnel and equipment; 4—Ground pressure Monitoring visualization; 5—Equipment automation; 6—Remote control scraper; 7—Underground crushing unmanned; 8—Intelligent filling

运机与凿岩台车等遥控设备极大地提高了采矿的效率和安全性, 无人驾驶汽车在地下矿山的试运行, 凿岩机器人和装载机器人的研制成功, 保障了矿山安全、高效、绿色及可持续开采的实施。瑞典、加拿大和芬兰等国家和工业部合作开展“智能采矿”研究与应用已有 20 多年, 给矿业发展带来深远影响。而国内仍处于建设智能化无人化矿山的初级阶段, 虽然我国在“十二五”规划中将“地下金属矿智能开采技术”项目列入 863 计划, 但要实施现场对接、工业化转化还需较长的时间。在这一阶段, 无人采矿的核心技术仍然是传统采矿工艺和生产组织管理的自动化和智能化。贵州开阳磷矿率先在国内探索并初步实现了智能化采矿, 在资源与开采环境可视化、生产过程与设备智能化、生产信息与决策管理科学化的基础上, 实现了设计智能化、监测可视化、设备自动化、生产系统无人化和管控一体化(见图 27)。

智能采矿体系是一个复杂的系统工程, 新一代高级智能化无人化采矿技术必将涉及采矿工艺及生产过程自身的变革, 采矿设计和井下设备性能与可靠性等问题都需要进一步探索, 井下无人设备维护、事故处理等都需进一步研究。信息及通信技术的进步, 必将推动智能化无人化采矿从现行的基于传统采矿工艺的自动化采矿和遥控采矿, 向以先进传感器及检测监控系统、智能采矿设备、高速数字通信网络、新型采矿工艺等集成为主要技术特征的高级智能化无人化矿山发展。

## 6 结语

几十年持续的大规模资源开采使浅部资源日益枯竭, 矿产资源开发走向深部已成必然, 本文作者以国内外开采现状及其研究成果为基础, 通过归纳总结, 提出了作者对深部固体资源开采问题的一些认识、设想和思考:

1) 深部的界定应根据科学产能要求和资源赋存条件, 并囊括高应力、高地温和高井深等综合因素, 是一个涉及现有经济技术条件和资源开采条件并与时间和地域相关的系统问题。

2) 深部固体资源的开采深度与当前的经济技术相适应, 并受矿石品位、开采方式、地质条件等因素影响, 且随技术进步可采深度不断增大, 随着深度的不断增大, 深部资源的开发将逐渐由固态提升向流态化开采突破性转变。

3) 对于高井深矿石提升和人员运输需改变目前升降机运送机制, 封闭式胶带运输、磁悬浮升降机、地下物流系统、矿浆水力提升等新兴技术值得重视。

4) 对高地温环境需借助先进的制冷技术进行降温, 而缩小制冷空间, 研制隔热材料与个体防护装备, 从而对井下高温环境进行综合调节不失为经济有效手段。而深部充填将是缩小制冷空间和进行深部热隔离的有效途径之一。

5) 基于深部开采矿岩受力特征、秉承“变害为利”的思想,构建了深地资源安全高效开采发展框架、指出高应力有利于坚硬矿岩致裂与块度控制,并初步实践了深部硬岩开挖与灾害控制互换的非爆连续开采新模式。

上述设想存在大量的理论与技术攻关工作需要开展。“互联网+”、“大数据”和“中国制造2025”让智慧矿山触手可及,为此必须集中优势力量,借助工业4.0的东风,力争“十三五”期间开发并完善不同于浅部矿床开采的新模式与新方法。从而为深部资源的安全高效开采提供理论支撑和技术保障。

## REFERENCES

- [1] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
LI Xi-bing. Rock dynamics fundamentals and applications[M]. Beijing, Science Press, 2014.
- [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): 2552-2562.
- [3] 王运敏. 金属矿采矿工业面临的机遇和挑战及技术对策[J]. 现代矿业, 2011(1): 1-4.  
WANG Yun-min. Opportunities and challenges to metal mine mining industry and the technical countermeasures[J]. Modern Mining, 2011(1): 1-4.
- [4] 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.
- [5] 谢和平. 深部高应力下的资源开采——现状、基础科学问题与展望[C]// 香山第 175 次科学会议. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 179-191.  
XIE He-ping. Resources development under high ground stress: present state, base science problems and perspective[C]// The 175th Xiangshan Science Congress. Beijing: China Environment Science Press, 2002: 179-191.
- [6] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Classification of rockburst in underground projects: comparison of ten supervised learning methods[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016: 30(5): 04016003.
- [7] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Comparative performance of six supervised learning methods for the development of models of hard rock pillar stability prediction[J]. Natural Hazards, 2015, 79(1): 291-316.
- [8] 古德生, 李夕兵. 有色金属深井采矿研究现状与科学前沿[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(2): 1-5.  
GU De-sheng, LI Xi-bing. Science problem and research state of deep mining in metal and nonferrous mines[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(2): 1-5.
- [9] OWENS B. Mining: Extreme prospects[J]. Nature. 2013, 495(7440): S4-6.
- [10] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.  
XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11), 2161-2178.
- [11] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1-16.  
XIE He-ping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1-16.
- [12] 习近平. 习近平总书记讲话全文: 为建设世界科技强国而奋斗[EB/OL]. [2016-09-20]. <http://www.cast.org.cn/n17040442/n17135960/n17136021/17226246.html>.
- [13] XI Jin-ping. Full text of president Xi Jinping's speech: Striving for the construction of the world's scientific and technological power[EB/OL]. [2016-09-20]. <http://www.cast.org.cn/n17040442/n17135960/n17136021/17226246.html>.
- [14] The top ten deepest mines in the world-Mining Technology [EB/OL]. [2016-09-20]. <http://www.mining-technology.com/features/feature-top-ten-deepest-mines-world-south-africa/>.
- [15] LaRonde Between Rouyn-Noranda & Val-d'Or, QC, Canada[EB/OL]. [2016-09-20]. [https://www.agnicoeagle.com/English/operations-and-development-projects/operations/laronde/default.aspx](https://www.agnicoeagle.com/English/operations-and-development-projects/operations/laronde/default.aspx#sthash.fK72pBuK.dpuf).
- [16] ELS F. Idaho silver mine shaft sunk to final depth of 9,587 feet[EB/OL]. [2016-09-20]. <http://www.mining.com/idaho-silver-mine-shaft-sunk-final-depth-9587-feet/>.
- [17] 王琼杰. 以安全高效开采技术振兴金属采矿业——访中国工程院院士、北京科技大学教授蔡美峰[EB/OL]. [2016-09-20]. [http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201607/t20160727\\_1412790.htm](http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201607/t20160727_1412790.htm).
- [18] US Bureau of Mines. A dictionary of mining, mineral, and related terms[M]. Second Edition, Washington, DC: U.S. Bureau of Mines. 1996: 860.
- [19] DIERING D H. Ultra-deep level mining-future requirements[J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy. 1997, 97: 249-256.
- [20] JAGER A J, RYDER J A. A handbook on rock engineering practice for tabular hard rock mines[M]. Safety in Mines Research Advisory Committee, Johannesburg, 1999: 29-43.

- [20] SCHWEITZER J K, JOHNSON R A. Geotechnical classification of deep and ultra-deep Witwatersrand mining areas, South Africa[J]. *Mineralium Deposita*, 1997, 32(4): 335-348.
- [21] Ultra-Deep Mining Network. The business of mining deep: below 2.5 kms[EB/OL]. [2016-09-20]. <https://www.miningdeep.ca/>.
- [22] 俞东风, 刘听成. 煤矿开采深度现状及发展趋势[J]. *煤*, 1997, 6(6): 38-41.  
YU Dong-feng, LIU Ting-cheng. Current situation and development trend of coal mine depth[J]. *Coal*, 1997, 6(6): 38-41.
- [23] 邹喜正. 关于煤矿巷道矿压显现的极限深度[J]. *矿山压力与顶板管理*, 1993(2): 9-14.  
ZOU Xi-zheng. Depth limit of ground behavior in coal mine[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 1993(2): 9-14.
- [24] Mining Rock Mechanics Group. Design, construction and monitoring of ramp and level development at great depth[EB/OL]. [2016-09-30]. <http://rockmechanics.curtin.edu.au/research/mining3/>.
- [25] 解世俊, 周德元, 宋晓天. 采矿手册(第四卷)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 318-320.  
XIE Shi-jun, ZHOU De-yuan, SONG Xiao-tian. *Mining handbook (Volume IV)*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990: 318-320.
- [26] ALDORF J, EXNER K. Mine openings: stability and support[M]. New York: Elsevier, 1986: 95-102.
- [27] 钱七虎. 深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定[J]. *东华理工学院学报(自然科学版)*, 2004, 27(1): 1-5.  
QIAN Qi-hu. The characteristics scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 2004, 27(1): 1-5.
- [28] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 高明忠, 张茹, 高亚楠, 刘建峰, 谢凌志. 深部开采的定量界定与分析[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 1-10.  
Xie He-ping, GAO Feng, JU Yang, GAO Ming-zhong, ZHANG Ru, GAO Ya-nan, LIU Jian-feng, XIE Ling-yun. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 1-10.
- [29] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 24(16): 2854-2858.  
HE Man-chao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 24(16): 2854-2858.
- [30] 李铁, 蔡美峰, 纪洪广. 抚顺煤田深部开采临界深度的定量判别[J]. *煤炭学报*, 2010(3): 363-367.  
LI Tie, CAI Mei-feng, JI Hong-guang. Quantitative discrimination of critical depth in deep exploitation in Fushun coalfield[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010(3): 363-367.
- [31] 古德生. 金属矿床深部开采中的科学问题[C]// 香山科学会议编. 科学前沿与未来(第六集). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 192-201.  
GU De-sheng. The science problems in deep mining of metal deposit[C]// Xiangshan Science Conference ed. *Science Foreland and Future (Volume VI)*. Beijing: China Environment Science Press, 2002: 192-201.
- [32] 赵生才. 深部高应力下的资源开采与地下工程——香山会议第175次综述[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 295-298.  
ZHAO Sheng-cai. Resources exploitation and underground engineering under high in-situ stress: Xiangshan Conference for the 175th Time[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(2): 295-298.
- [33] BUJOK P, PORZER M, LABUS K, KLEMPA M, PAVLUŠ J. Experimental modeling of abandoned shallow oil wells convergence[J]. *Engineering Geology*, 2013, 157: 1-7.
- [34] SINGH R N. Mine inonoations[J]. *International journal of mine water*, 1986, 5(3): 1-27.
- [35] 侯发亮, 王敏强. 圆形隧洞中岩爆的判据及防治措施[C]// 岩石力学在工程中的应用. 北京: 知识出版社, 1989: 195-201.  
HOU Fa-liang, WANG Min-qiang. The rockburst criterion and prevention and cure step in the circular tunnel[C]// *Application of Rock Mechanics to Projects*. Beijing: Knowledge Press, 1989: 195-201.
- [36] 彭祝, 王元汉, 李廷芥. Griffith理论与岩爆的判别准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(S1): 491-495.  
PENG Zhu, WANG Yuan-han, LI Ting-die. Griffith theory and the criteria of rock burst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(S1): 491-495.
- [37] 唐宝庆, 李显方, 曹平. 金属矿山硐室发生岩爆的数学判据的研究[J]. *江西有色金属*, 2009, 23(2): 14-15.  
TANG Bao-qing, LI Xian-fang, CAO Ping. On mathematical criteria on rockbursts in metal mines chamber[J]. *Jiangxi Nonferrous Metals*, 2009, 23(2): 14-15.
- [38] SAUKU H. Drift support estimated by “Critical Depths” method[C]// Proc of the 8th Coal Congress of Turkey, Zonguldak, 1992: 291-306.
- [39] 潘一山, 李忠华. 矿井岩石结构稳定性的解析分析[C]// 全国固体力学学术会议论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 2002: 11.  
PAN Yi-shan, LI Zhong-hua. Analysis of mine rock structures stability[C]// *National Conference on Solid Mechanics*. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2002: 11.
- [40] 张金明, 朱晓源, 程鹏. 拉森斯(Russenses)岩爆判据研究[J]. *浙江水利科技*, 2004(1): 9-11.  
ZHANG Jin-ming, ZHU Xiao-yuan, CHENG Peng. Study on Russenses rock burst principle[J]. *Zhejiang Hydretechnics*, 2004(1): 9-11.
- [41] 张永利, 李忠华, 陈德怀. 北京大台井深部岩巷岩爆发生条件及影响因素[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(3): 84-86.

- ZHANG Yong-li, LI Zhong-hua, CHEN De-huai. Formation conditions and affecting factors of rockburst in deep rock lane of Beijing Datai Well[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(3): 84–86.
- [42] TODERAŞ M, MORARU RI, POPESCU-STELEA M. Underground mine workings convergence dependence on operation time and location depth[J]. *Journal of Mining Science*. 2015, 51(3): 541–52.
- [43] HEASLEY K A. Back analysis of the crandall canyon mine using the Lamodel program[R]. West Virginia University, Research report. The Web Version, 2008: 4–6.
- [44] 王鲁瑀, 臧传伟, 王哲勤, 陈洁. 巷道临界深度的计算模型及失稳机理分析[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(5): 220–222.  
WANG Lu-yu, ZANG Chuan-wei, WANG Ze-qin, CHEN Jie. A critical depth calculation model and instability mechanism analysis for roadway[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(5): 220–222.
- [45] KRATZ T, MARTENS P N. Optimization of mucking and hoisting operation in conventional shaft sinking[J]. *Mining Report*, 2015, 151(1): 38–47.
- [46] SPALDING J. Deep mining: An advanced textbook for graduates in mining and for practising mining engineers[M]. London, UK: Mining Publications, 1949.
- [47] 王希然, 李夕兵, 董陇军. 矿井高温高湿职业危害及其临界预防点确定[J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(2): 157–163.  
WANG Xi-ran, LI Xi-bing, DONG Long-jun. Occupational hazard of high temperature and high humidity in mines and determination of critical prevention points[J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(2): 157–163.
- [48] SIMRAC. SIMRAC Final Project Reports[R]. Safety in Mines Research Advisory Committee, Department of Minerals and Energy, South Africa, 2001.
- [49] 李夕兵. 分区破裂化正确认识与准确定位对金属矿山深部开采的重大意义[C]// 新观点新学说学术沙龙文集 21: 深部岩石工程围岩分区破裂化效应. 2008: 32–34.  
LI Xi-bing. There is a significant significance for the deep mining of metal mines by the correct understanding and accurate positioning of zonal disintegration[C]// *New Viewpoints New Theory of Academic Salon Collection 21: Zonal disintegration effect of wall rock in deep rock engineering*, 2008: 32–34.
- [50] DURRHEIM R J, OGASAWARA H, NAKATANI M, YABE Y, MILEV A M, CICHOWICZ A, KAWAKATA H, MORIYA H. Observational studies to mitigate seismic risks in mines: A new Japanese-South African collaborative research project[C]// 5th International Seminar on Deep and High Stress Mining, Santiago, Chile, 2010: 11.
- [51] HEDLEY D G F. Rockburst handbook for ontario hardrock mines[R]. CANMET Special Report SP92-1E, Ottawa, Canada Communication Group, 1992.
- [52] CAMIRO. Canadian rockburst research program 1990-1995[R]. Vol. 1–6, CAMIRO Mining Division, Sudbury, Canada, 1995.
- [53] Australian Centre for Geomechanics. ACG research[EB/OL]. [2016–09–20]. <http://acg.uwa.edu.au/acg-research/>.
- [54] iMine. Project overview[EB/OL]. [2016–09–20]. <http://www.i2mine.eu>.
- [55] CHPM2030: Combined Heat, Power and Metal extraction[EB/OL]. [2016–09–20]. <http://www.chpm2030.eu>.
- [56] Biomore. A project for winning deep ores[EB/OL]. [2016–09–20]. <http://www.biomore.info/project/>.
- [57] DUCHANE D, BROWN D. Hot dry rock (HDR) geothermal energy research and development at Fenton Hill, New Mexico[J]. *Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin*, 2002, 23(4): 13–19.
- [58] SHIVAKUMAR K, RAO M V M S, Srinivasan C, KUSUNOSE K. Multifractal analysis of the spatial distribution of area rockbursts at Kolar Gold Mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(2): 167–172.
- [59] KRISHNA A K, MOHAN K R, MURTHY N. Assessment of heavy metal contamination in sediments using multivariate statistical techniques in an abandoned mining site: A case study from Kolar Gold Fields Area, Karnataka, India[J]. *Assessment*, 2011, 4(6): 1052–1058.
- [60] GUPTA P, ROY S. Evaluation of spatial and seasonal variations in groundwater quality at Kolar Gold fields, India[J]. *American Journal of Environmental Engineering*, 2012, 2(2): 19–30.
- [61] Kola superdeep borehole, the deepest borehole in the world [EB/OL]. [2016–09–20]. <https://www.dovregroup.com/news/kola-superdeep-borehole>.
- [62] МЕЛЬНИКОВ Н В. 深凹露天矿的科学技术课题[J]. *矿业工程*, 1980: 19–22.  
МЕЛЬНИКОВ Н В. The science and technology project of deep open pit mine[J]. *Mining Engineering*, 1980: 19–22.
- [63] 李有观. 太空探地矿[J]. *科学*: 北京, 2006(11): 51–51.  
LI You-guan. Space exploration of mineral resources[J]. *Science*: Beijing, 2006(11): 51–51.
- [64] RYL'NIKOVA M V, MANEVITCH L I, EREMENKO V A, SMIRNOV V V. Utilization of elastic energy of rock mass as a source of renewable energy[J]. *Journal of Mining Science*, 2015, 51(6): 1180–1190.
- [65] OPARIN V N, DANILOV B B, SMOLYANITSKY B N. “Underground rocket” design principles[J]. *Journal of Mining Science*, 2010, 46(5): 536–545.
- [66] MAKAROV V V, GUZEV M A, ODINTSEV V N, KSENDZENKO L S. Periodical zonal character of damage near the openings in highly-stressed rock mass conditions[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(2): 164–169.
- [67] 周健. 应变型岩爆预测和爆坑深度估计的监督学习方法[D]. 长沙: 中南大学, 2015.  
ZHOU Jian. Strainburst prediction and spalling depth estimation

- using supervised learning methods[D]. Changsha: Central South University, 2015.
- [68] 程建平, 吴世勇, 岳 骞, 申满斌. 国际地下实验室发展综述[J]. 物理, 2011, 40(3): 149-154.  
CHENG Jian-ping, WU Shi-yong, YUE Qian, SHEN Man-bin. A review of international underground laboratory developments[J]. Physics, 2011, 40(3): 149-154.
- [69] BETTINI A. Underground laboratories[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, 626: S64-S68.
- [70] Äspö Hard Rock Laboratory. A unique place for experiments and research[EB/OL]. [2017-01-10]. [http://www.skb.com/publication/2485505/Aspo\\_Laboratory.pdf](http://www.skb.com/publication/2485505/Aspo_Laboratory.pdf).
- [71] 中国科协学会学术部. 深部岩石工程围岩分区破裂化效应[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.  
Academic Society of China Association for Science Department. Zonal disintegration effect of wall rock in deep rock engineering[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2008.
- [72] 中国科协学会学术部. 岩爆机理探索[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.  
Academic Society of China Association for Science Department. Exploring the mechanism of rockbursts[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [73] Discovery at the Bingham Canyon Mine[EB/OL]. [2016-09-20]. [http://www.earthexplorer.com/2009-11/discovery\\_at\\_the\\_bingham\\_canyon\\_mine.asp](http://www.earthexplorer.com/2009-11/discovery_at_the_bingham_canyon_mine.asp).
- [74] World Mining – Future mass mining options under consideration. <https://www.slideshare.net/aelminingservices/world-mining-future-mass-mining-options-under-consideration-gideon-gpc>[EB/OL]. [2016-09-20].
- [75] OLAVARRIA S, ADRIASOLA P, KARZULOVIC A. Transition from open pit to underground mining at Chuquicamata, Antofagasta, Chile[C]// International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, Cape Town, SA IMM Symposium series S44, Johannesburg, 2006: 421-434.
- [76] CHEN Z. Recent developments in slope stability analysis[C]// Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics. Tokyo: CRC Press, 1995: 1041-1048.
- [77] SJÖBERG J. Large scale slope stability in open pit mining: A review[D]. Lulea: Lulea University of Technology, 1999.
- [78] 李夕兵, 姚金蕊, 杜 坤. 高地应力硬岩矿山诱导致裂非爆连续开采初探——以开阳磷矿为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1101-1111.  
LI Xi-bing, YAO Jin-rui, DU Kun. Preliminary study for induced fracture and non-explosive continuous mining in high-geostress hard rock mine — A case study of Kaiyang phosphate mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1101-1111.
- [79] RAGNARSDÓTTIR K V. Rare metals getting rarer[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(11): 720-721.
- [80] 揭秘世界最深金矿: 地下 4350 米相当 10 个帝国大厦. <http://tech.sina.com.cn/d/2012-03-15/08146839293.shtml>[EB/OL]. [2016-09-20].
- [81] BEHR W M, PLATT J P. Brittle faults are weak, yet the ductile middle crust is strong: Implications for lithospheric mechanics[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(22): 8067-75.
- [82] Wikipedia. German continental deep drilling programme [EB/OL]. [2016-11-20]. [https://en.wikipedia.org/wiki/German\\_Continental\\_Deep\\_Drilling\\_Programme](https://en.wikipedia.org/wiki/German_Continental_Deep_Drilling_Programme).
- [83] RAMPEDI M S, GENC B. An investigation into the optimization of personnel transportation to level 15 and below at Khuseleka No. 1 Shaft, Anglo Platinum[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2012, 112(4): 323-30.
- [84] ELLEGAARD J, PEDERSEN S F, STEENSTRUP F H R G, HANSEN, M K, NIELSEN M, LINDEMANN M, NIELSEN R. Flexible closed belt conveyor: US Patent 9,463,929[P]. 2016-10-11.
- [85] Sicon®-Special Conveyor Belts for Industrial Applications [EB/OL]. [2016-09-20]. [http://www.contitech.de/pages/produkte/transportbaender/cbgingustry/sicon\\_en.html](http://www.contitech.de/pages/produkte/transportbaender/cbgingustry/sicon_en.html).
- [86] van WIJK J M. Vertical hydraulic transport for deep sea mining: A study into flow assurance [D]. TU Delft: Delft University of Technology, 2016.
- [87] 赵国彦, 林春平, 赵 凡, 李正魁, 洪昌寿, 彭 俊, 孙贵东. 一种深井双管水力提升矿石的方法. 中国, CN201610266381.7[P]. 2016-04-26.  
ZHAO Guo-yan, Lin Chun-ping, ZHAO Fan, LI Zheng-kui, HONG Chang-tao, PENG Jun, SUN Gui-dong. A method of double-pipe hydraulic lifting ore in deep mine. China, CN201610266381.7[P]. 2016-04-26.
- [88] MACKAY L, BLUHM S, Van RENSBURG J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining [C]// The 4th International Platinum Conference: Platinum in transition 'Boom or Bust'. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010: 285-292.
- [89] BRISSET P. Cooling underground mines with ice. Setting new standards for health, safety and energy-efficiency[EB/OL]. [2016-01-20]. [http://kti-plersch.com/Files/Filer/KTI\\_GLOBAL/PDF\\_News/KTI-Newsletter-Mining-2015.pdf](http://kti-plersch.com/Files/Filer/KTI_GLOBAL/PDF_News/KTI-Newsletter-Mining-2015.pdf).
- [90] COOKE R. Pipeline design for paste and thickened tailings systems[C]// Tailings and Mine Waste'08, 2008: 95-100.
- [91] 姚 华, 何忠国, 龙再显, 黎正强. 磷石膏充填采矿法在马路坪矿段的应用[J]. 采矿技术, 2010, 10(4): 20-21.  
YAO Hua, HE Zhong-guo, LONG Zai-xian, LI Zheng-qiang. Application of phosphogypsum filling mining method in Maluping mine[J]. Mining Technology, 2010, 10(4): 20-21.

- [92] NGÔ V T, NADEAU S, MACKOWIAK J, HALLÉ S. Ergonomic challenges in designing personal cooling equipment for ultra-deep mining[C]//Advances in Ergonomics in Design. Switzerland: Springer, 2016: 757–767.
- [93] ERNST T C, GARIMELLA S. Demonstration of a wearable cooling system for elevated ambient temperature duty personnel[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 60(1/2): 316–324.
- [94] YILMAZ E, BELEM T, BENZAAZOUA M. Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions[J]. Engineering Geology, 2015, 185: 52–62.
- [95] LI X B, MA C D, CHEN F, XU J C. Experimental study of dynamic response and failure behavior of rock under coupled static-dynamic loading[C]// Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS, Rotterdam: Mill Press, 2004: 895.
- [96] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, HONG L, YIN T B. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 739–748.
- [97] LI X B, CAO W Z, TAO M, ZHOU Z L, CHEN Z H. Influence of unloading disturbance on adjacent tunnels[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 84: 10–24.
- [98] TAO M, LI X B, LI DY. Rock failure induced by dynamic unloading under 3D stress state[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2013, 65: 47–54.
- [99] DU K, TAO M, LI X B, ZHOU J. Experimental study of slabbing and rockburst induced by true-triaxial unloading and local dynamic disturbance[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 3437–3453.
- [100] 李夕兵, 周梓荣, 古德生. 利用深井采矿用水势能驱动的矿山节能凿岩掘进方法. 中国, CN200510031567.6[P]. 2005–05–20.
- LI Xi-bing, ZHOU Zi-rong, GU De-sheng. Measurement of energy saving drilling in mine driven by potential energy of deep mine mining. China, CN200510031567.6[P]. 2005–05–20.
- [101] GORE A. The digital earth: Understanding our planet in the 21st century[J]. Australian Surveyor, 1998, 43(2): 89–91.

## Review and practice of deep mining for solid mineral resources

LI Xi-bing<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2</sup>, WANG Shao-feng<sup>1,2</sup>, LIU Bing<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Based on the current situation of deep resources exploitation at home and abroad and its research achievements, the division and difference of the deep from industry and academy around the world were summarized in this work. The definition and the critical depth of deep mining for solid mineral resources and its mining modes were also discussed. Then, some new strategies and/or alternatives on deep mining for solid mineral resources were proposed for deep hoist & transportation, and temperature control of deep mining, etc.. Lastly, incorporating with the characteristics of high stress, great lifting depth and high temperature in deep hard-rock mines, a new strategy and mining mode which can be “convert harm into benefit” were given for the deep rare, valuable and strategic resources exploitation.

**Key words:** deep mining; critical depth; deep mining method; deep hoist and transportation; deep filling and cooling technology; convert harm into benefit

**Foundation item:** Project(2016YFC0600706) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(41630642) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2017-02-10; **Accepted date:** 2017-05-20

**Corresponding author:** LI Xi-bing; Tel: +86-13974870961; E-mail: xbli@csu.edu.cn

(编辑 王超)