



高温处理后含铜矽卡岩的 动态力学特性及损伤破碎特征

王 春^{1,3}, 熊宏威¹, 舒荣华^{2,4}, 薛文越¹, 胡慢谷¹, 张攀龙¹, 雷彬彬¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 焦作 454003;

2. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 赣州 341000;

3. 河南理工大学 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 焦作 454003;

4. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 为探究热处理后矿岩的动态力学特性及损伤破坏特征, 以含铜矽卡岩为研究对象, 开展“岩样密度、热处理温度、冲击气压”三因素影响下的动态冲击试验研究。研究表明: “三因素”对含铜矽卡岩本构曲线变化趋势的影响不明显, 都未改变动态压缩应力-应变曲线先后经历的似直线段、非线性上凸段、类平台段和峰后下降段; 但含铜矽卡岩的动态峰值应力、动态变形模量却随热处理温度的升高而减小, 随岩样密度的增大而增大; 基于生物种群理论定义了可反映热损伤程度的损伤变量, 并得出岩样内部损伤先后经历了缓慢增加-快速增加-减速增加-宏观破坏四个阶段; 接着, 通过捕捉冲击过程中岩样的损伤历程、分析破碎块度的形状及分形维数特征, 得出裂纹起裂于岩样入射端, 且分形维数的变化规律与破碎岩块块度随热处理温度、岩样密度、冲击气压变化而变化的规律相呼应; 最后结合岩样内部破裂面形态及碎块多呈长条状、三棱锥状和粉末状, 得出热处理后含铜矽卡岩的破坏模式复杂多变, 且以拉伸破坏和压剪破坏为主, 以混合型摩擦破坏为辅。基于研究结论, 可推测热处理温度、动态扰动都对矿岩的动态强度劣化、损伤破碎程度起促进作用, 而岩样密度的增大有利于提升矿岩抗外界冲击荷载的能力, 其为深部资源开发利用及围岩状态控制方案的制定提供了理论参考。

关键词: 高温处理; 含铜矽卡岩; 动态力学特性; 损伤破碎特征; 分形维数

文章编号: 1004-0609(2022)-09-2801-18

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

引文格式: 王 春, 熊宏威, 舒荣华, 等. 高温处理后含铜矽卡岩的动态力学特性及损伤破碎特征[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(9): 2801-2818. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-36737

WANG Chun, XIONG Hong-wei, SHU Rong-hua, et al. Dynamic mechanical characteristic and damage-fracture behavior of deep copper-bearing skarn after high temperature treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(9): 2801-2818. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-36737

随着深部资源开发利用工程的不断增多, 如干热型地热能开采、深部核储存、深部矿产开采(高温破岩或火灾后围岩加固)等, 涉及的矿岩体均可

能经历一定的高温环境。这些高温环境将带来工程围岩力学性质难测的难题, 再者, 深部岩体的施工难免涉及压裂、热冲击等动态扰动环境, 二者共同

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904093, 52074101); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(202102310217); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200856)

收稿日期: 2021-06-15; **修订日期:** 2021-09-26

通信作者: 舒荣华, 讲师, 博士; 电话: 15273118371; E-mail: srh1025@jxust.edu.cn

作用严重加剧了工程灾害频发的可能及预测的难度^[1-2]。同时,深部岩体的岩性也影响着工程围岩的应力分布^[3],进一步分析可认为矿岩的密度对工程围岩的强度、变形特性产生着举足轻重的影响。因此,基于高温作用后岩体的实际工程环境,开展“矿岩密度、热处理温度、动态扰动”三因素影响下矿岩的动态力学特性及损伤破坏规律方面的研究具有重要的科学意义。

目前,基于深部岩体所处的实际工程环境,国内外学者展开了大量研究,主要是立足室内岩石力学模拟试验,探讨实时高温、高温处理后、动态扰动等条件下岩石的强度、变形及破坏特征。针对岩样处于实时高温或高温处理后的两种试验环境,部分学者以花岗岩、砂岩、石灰岩等为研究对象,分析了岩石的物理力学性质,发现随温度升高,岩石的质量、密度、纵波波速等物理参数相应减小,抵抗外界压缩荷载的能力先小幅减小后大幅降低的现象^[4-9]。以动态扰动为控制因素研究岩石的动态力学特征时,发现受扰动的岩样强度、弹性模量等力学参数小于未受扰动的岩样^[10-11],且随扰动次数的增加,岩石的峰值应力、弹性模量相应减小,屈服应变却相应增大^[12-15]。至于高温处理后岩样的力学特性,学者们也进行了相关研究,杨圣奇等^[16]和TIAN等^[17]研究了高温处理后不同晶粒花岗岩的破坏力学特性,发现粗粒花岗岩对热处理温度的敏感性高,残余强度随热处理温度的升高而增大。许金余等^[18]、TAN等^[19]和武仁杰等^[20]研究了不同层理岩石的动态力学特性,发现动态强度、变形模量随冲击速度的增加而增大,随热处理温度的升高相应减小。研究高温、动载对岩石损伤破坏特征的影响程度时,发现多种破坏模式交织在一起导致岩样失去抗载能力。李夕兵等^[21]和PING等^[22]研究发现高温处理后砂岩的主要破坏模式是拉伸破坏,且温度越高破碎程度越大。茅献彪等^[23]和李庆森等^[24]研究发现,随应变率的增大高温处理后岩石的破坏模式由张拉破坏向剪切破坏转化。LI等^[25]、RAE等^[26]和PING等^[27]也发现随热处理温度的升高岩石的动态破坏由脆性向延脆性转化,随加载速率的增大破碎程度加剧。部分学者还对高温处理后、冲击荷载作用下岩石破坏后的碎块进行了分形处理,发现温度越高、冲击速率越大,分形维数越大,提出采用分形维数可定量揭示高温处理后岩石的动态破碎特

性、力学特征及破碎耗能的规律^[28-32]。综上所述,关于岩石动态力学特性及损伤破坏特征的研究主要考虑了热处理温度和冲击荷载两因素,至于矿物成分有差异的岩石,尤其是含金属矿物岩石经历高温处理后受冲击扰动荷载作用时的力学特征及破坏规律方面的研究存在不足。

为弥补上述不足,本文以含铜矽卡岩为研究对象,采用室内相似环境模拟的力学试验方法,即采用矿岩密度大小表征岩样成分差异、高温处理过程模拟岩体受热历程、动态冲击荷载营造压裂、热冲击产生的扰动效应,展开高温处理后含铜矽卡岩的动态力学参数、损伤历程、破坏模式等方面的研究,力图为深部资源开发利用及掌握围岩的动态损伤力学性质提供理论参考。

1 高温处理后含铜矽卡岩的动态力学试验

1.1 试验系统

开展试验所采用的系统由SHPB冲击力学试验装置及VIC-3D非接触全场应变测量系统组成,VIC-3D主要用于捕捉冲击过程中岩石破碎的照片,各装置实物图如图1所示。

冲击过程中,由SHPB系统配备的高速应变仪采集冲击过程中入射杆、透射杆上产生的入射应力波、透射应力波及反射应力波,然后基于一维应力波在细长杆中传播无畸变的特性,采用“三波法”便可间接获取各冲击时刻含铜矽卡岩岩样承受的动态应力和产生的动态压缩应变、应变率,计算公式如下^[33-36]:

$$\begin{cases} \sigma(t) = \frac{AE}{2A_s}(\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \\ \varepsilon(t) = \frac{C}{L_s} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt \\ \dot{\varepsilon}(t) = \frac{C}{L_s} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_I(t)$ 、 $\sigma_R(t)$ 、 $\sigma_T(t)$ 分别为冲击过程中入射杆、透射杆上的入射应力、反射应力和透射应力; $\sigma(t)$ 、 $\varepsilon(t)$ 、 $\dot{\varepsilon}(t)$ 分别为含铜矽卡岩的动态应力、应变、应变率; A 、 A_s 分别为弹性杆和岩样的横截面积; E 、 C 、 L_s 分别为弹性杆的弹性模量、纵波波速和岩样的长度。

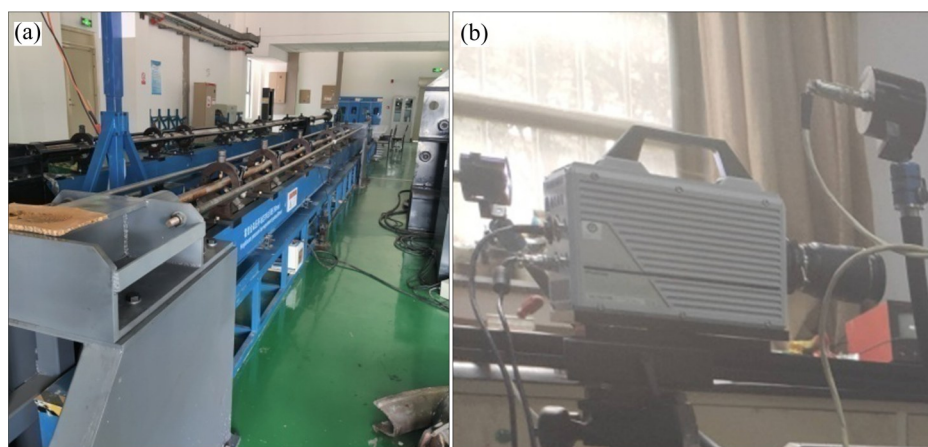


图1 高温处理后含铜矽卡岩的动态力学试验系统

Fig. 1 Dynamic mechanical test system for copper-bearing skarn after high temperature treatment: (a) SHPB test system; (b) VIC-3D strain measurement system

1.2 岩样制备

试验用岩样取自某铜矿埋深约900 m处出矿巷道附近的矿岩体,选取结构致密、表面无明显裂纹的含铜矽卡岩岩块运至岩样加工试验室进行加工。为减少离散性,提高试验精度,选取同一矿岩块并按照岩石力学试验测试要求钻取岩芯,同时将岩芯加工成直径为50 mm、高度为50 mm的圆柱体试件,试件的两端也进行精细打磨,确保两端面的不平行度和不垂直度都小于0.02 mm。最后,根据试验目的按密度大小将含铜矽卡岩试件进行分类,用于开展动态力学试验。

1.3 高温处理

将密度相近的含铜矽卡岩试件同一批次放入KSW-5D-12型高温箱式炉内进行高温加热,热处理温度分布设置为200℃、400℃、600℃、800℃四个水平。加热时待温度达到设定温度后,维持恒定温度2 h不变,然后关闭高温炉,将岩样置于炉内自然冷却到室温后取出。加热处理后的岩样表面出现了部分微裂纹,部分高温处理前后岩样的对比图如图2所示。

1.4 试验方案

随各种资源开采深度越来越大,历经的温度可能越来越高,在压裂、热冲击应力扰动下,矿岩体物理力学性质的变化规律主导着深部资源开采的高

效性和安全性。部分学者也曾探究实时高温或高温作用后岩体的物理力学性质,得出两种方式下岩样的峰值强度、峰值应变、体积等虽然存在一定的差异,但整体的变化趋势一致,且高于400℃时高温作用后的岩样物理力学性质弱化情况强于实时高温^[4, 37-38]。高温破岩、矿井火灾等将导致矿岩体同时经历实时高温、高温作用后的两种环境条件,研究高温处理后岩石的动态力学特性及损伤破碎特征对提高破岩效率、修复或加固火灾后围岩更具有实际意义。因此,以含铜矽卡岩为研究对象,采用密度大小表征岩样成分差异、高温处理过程模拟岩体受热历程、动态冲击荷载营造压裂、热冲击产生的扰动效应,开展高温处理后岩样的动态力学试验,揭示含铜矽卡岩的动态力学特性和破碎特征。具体试验方案如表1所示。

2 高温处理后岩样的动态力学特性

2.1 动态变形特征

分析高温处理后含铜矽卡岩受冲击荷载作用时的动态压缩应力-应变曲线变化的规律,可在一定程度上反映含铜矽卡岩内部结构特征与热处理过程、岩样密度大小、动态扰动三因素之间的关系。图3列出了上述三因素不同时含铜矽卡岩典型的动态压缩应力-应变曲线。

如图3所示,热处理温度、岩样密度、冲击气

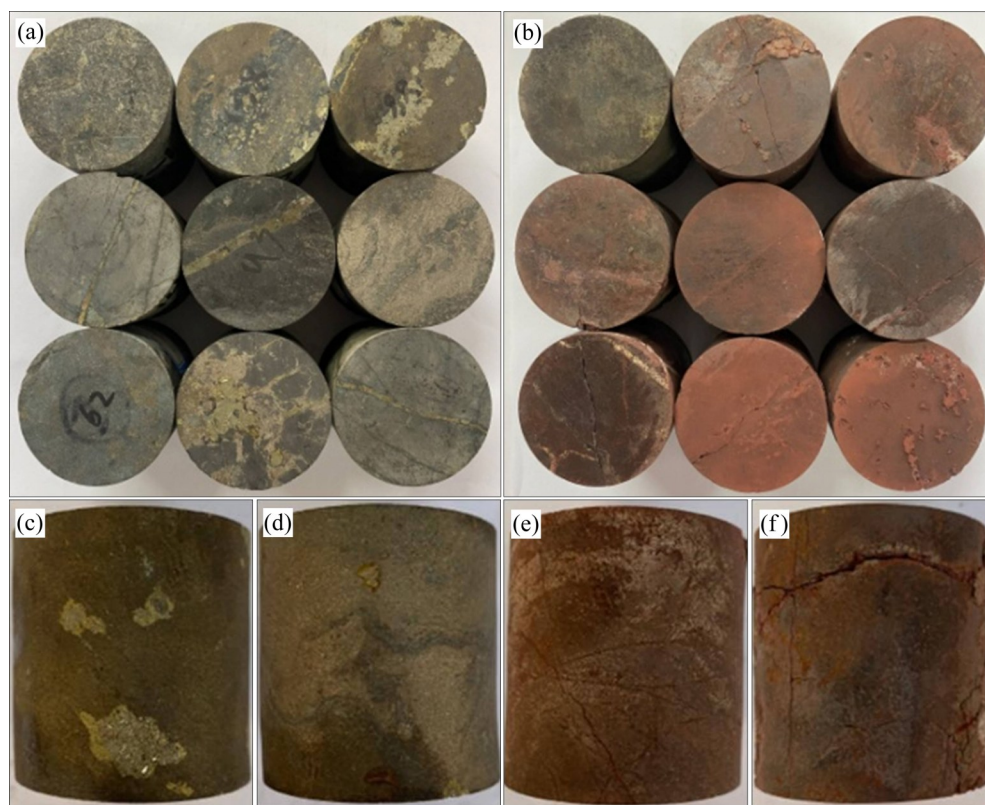


图2 部分高温处理前后的岩样图片

Fig. 2 Some pictures of rock samples before and after high temperature treatment: (a) Before heating; (b) After heating; (c) 200 °C; (d) 400 °C; (e) 600 °C; (f) 800 °C

表1 高温处理后含铜矽卡岩动态力学试验方案

Table 1 Dynamic mechanical test scheme for copper-bearing skarn after high temperature treatment

Group No.	Dependent variable			Lithology
	Density, $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Heat treatment temperature, $\theta/^{\circ}\text{C}$	Impact pressure, $p/$ MPa	
1	4.12–4.36 Mean value 4.25	200	0.2	Copper-bearing skarn
		400		
		600		
		800		
2	2.5–3.0	600	0.2	
	3.0–3.5			
	3.5–4.0			
	4.0–4.5			
3	4.22–4.45	600	0.2	
	Mean value 4.35		0.3	
			0.4	
			0.5	

压不同时, 动态压缩应力-应变曲线的变化趋势基本一致, 都呈先增大后降低波动振荡起伏的趋势发展, 且峰值应力处出现短暂的局部平台段。微型平

台段出现的原因是试验过程中冲击应力波为矩形波导致的, 同时也体现外界荷载即使达到含铜矽卡岩的最大抗冲击能力时, 由于作用时间极短, 岩石破

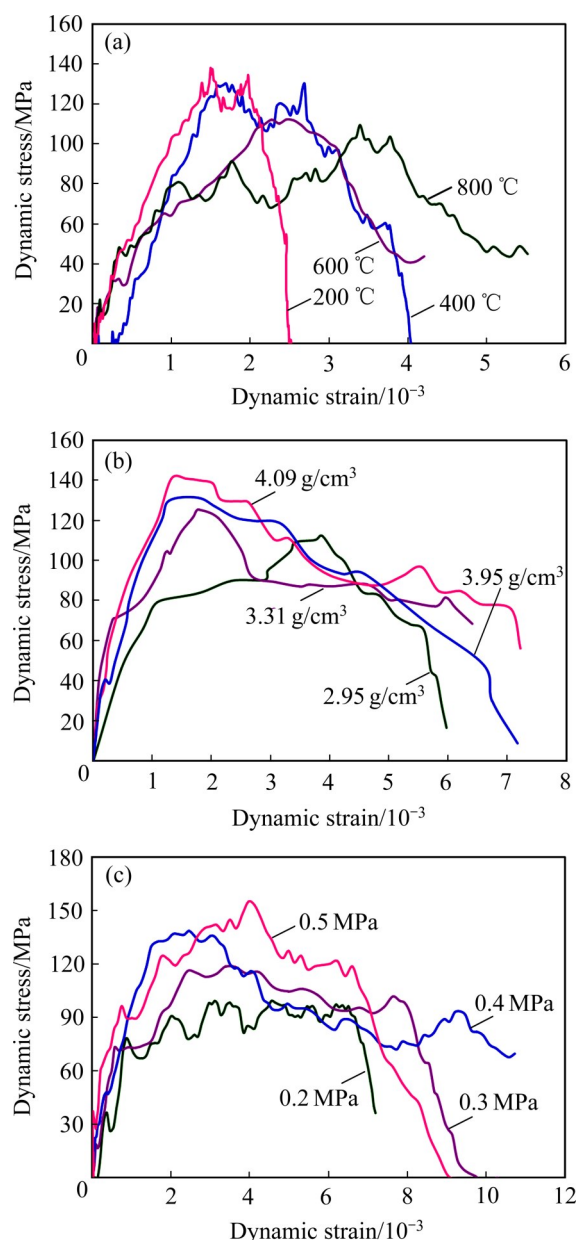


图3 高温处理后含铜矽卡岩的动态应力-应变曲线

Fig. 3 Dynamic stress-strain curves of copper-bearing skarn after high temperature treatment: (a) Different heat treatment temperatures ($\bar{\rho}=4.25 \text{ g/cm}^3$, $p=0.2 \text{ MPa}$); (b) Different densities ($\theta=600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=0.2 \text{ MPa}$); (c) Different dynamic load impact pressures ($\theta=600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\bar{\rho}=4.25 \text{ g/cm}^3$)

碎后仍存在短暂的适应停滞期,从而产生一种能短时间抵抗峰值荷载的现象。分析图3中三组典型曲线的演化形式可见,曲线的光滑度明显不够,都呈振荡起伏状态。通过分析试验过程中监测到的应力波形态及岩样自身结构特征,究其原因有二:一是试验冲击过程中,由于入射杆、透射杆在子弹头的撞击下产生了颤振,从而造成监测到的入射应力

波、反射应力波、透射应力波起伏振荡;二是高温处理后岩样内部产生了不规则裂隙,影响了应力波传递的规律,同时冲击过程中岩样内部松动碎块之间的压密、摩擦、破碎等历程也会产生微型应力波,从而干扰试验过程中监测到的相关应力波。

进一步分析高温处理后含铜矽卡岩动态压缩应力-应变曲线的一般特征,可将其具体分成似直线段、非线性上凸段、类平台段、峰后下降段共四个阶段。选取具有代表性,热处理温度 $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冲击气压 0.2 MPa 、密度约 3.75 g/cm^3 的含铜岩样的动态应力-应变曲线为基线展开分析,如图4所示。

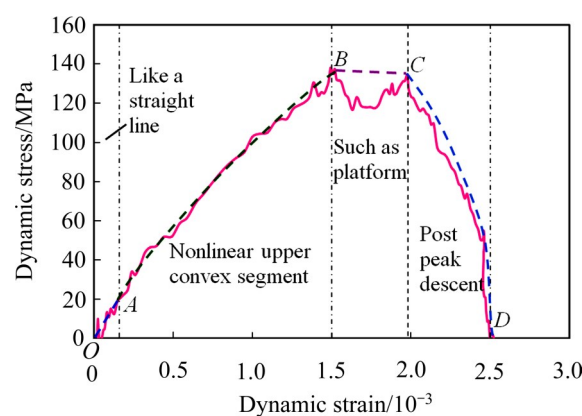


图4 高温处理后含铜矽卡岩的动态应力-应变曲线一般特征

Fig. 4 General characteristic of dynamic stress-strain curves of copper-bearing skarn after high temperature treatment

似直线段(OA段):该段曲线近似呈直线段,且对应斜率较大,即该段曲线呈陡增趋势,说明加热后的含铜矽卡岩受冲击荷载作用时,内部的微裂纹、裂隙来不及压密便直接产生了弹性变形。同时,由于岩样产生了热损伤,内部微裂纹极易产生扩展、贯通,能产生的弹性变形量较小,从而导致弹性阶段对应的曲线较短。

非线性上凸段(AB段):该段曲线为应力-应变曲线的主体曲线,揭示含铜矽卡岩内部微裂纹处于非稳定状态,随着冲击荷载的增加不断萌发、扩展,驱使岩样产生塑性变形,但此阶段岩样内部的微裂纹未大量贯通,没有形成宏观的破裂面,体现为曲线呈非线性上升趋势。

类平台段(BC段):该段曲线近似呈平台状,其不但揭示了矩形冲击应力波的不足,也反映冲击荷

载达到峰值时含铜矽卡岩虽然破碎了,但碎块未及脱离母体,再加上冲击荷载作用时间短的特点,使碎块承受峰值应力的能力产生了短暂的适应停滞期,体现在应力-应变曲线上便呈短暂的类平台趋势发展。

峰后下降段(CD段):该段曲线呈非线性下降趋势,岩样内部的微裂纹贯通形成了宏观破裂面,含铜矽卡岩岩样逐渐失去抵抗外界冲击荷载的能力。

2.2 动态峰值应力

高温处理后含铜矽卡岩的动态峰值应力可直接反映其抵抗外界冲击荷载的能力,图5所示分别为动态峰值应力随热处理温度、岩样密度及冲击气压增加而变化的规律。

如图5(a)所示,随热处理温度的升高,动态峰值应力呈对数函数趋势降低。由于含铜矽卡岩内部蕴藏着多种铜伴生矿物,高温条件下,部分不耐高温的物质会变质,甚至产生气体逸出岩样,从而导致岩样内部产生一定的孔隙。热处理温度越高,岩样内部各微元体的活跃性越大,不耐高温矿物的流失越快,再加上高温作用会导致岩样内部原有微裂纹附近不稳定晶体之间的化学键断裂,产生热损伤效应,从而导致岩样内部萌发的微裂纹进一步增多,最终降低了岩样的完整性及均质性,体现为含铜矽卡岩抗外界冲击荷载的能力降低。

经回归拟合试算得,随岩样密度或冲击气压的增大,含铜矽卡岩的动态峰值应力都呈对数函数的形式增加,如图5(b)和(c)所示。密度越大,表征内部的致密性越好,间接揭示密度越大的含铜矽卡岩的致密性越好,对外界冲击荷载的缓冲延让性也越强,不但提高了岩样对外界冲击荷载的适应性,还提升了岩样抗外界冲击荷载的能力。动载冲击气压越大,表征施加于含铜矽卡岩岩样入射端的能量越大,由于冲击荷载作用的时间极短,冲击过程中岩样对冲击荷载的适应性也相对增强,间接表现为抗外界冲击荷载能力随冲击气压增大而增大,也造成测得岩样的动态峰值应力呈增大的现象。

2.3 动态变形模量演化规律

分析高温处理后含铜矽卡岩动态变形模量的变化规律,可间接揭示含铜矽卡岩的变形性质,也可

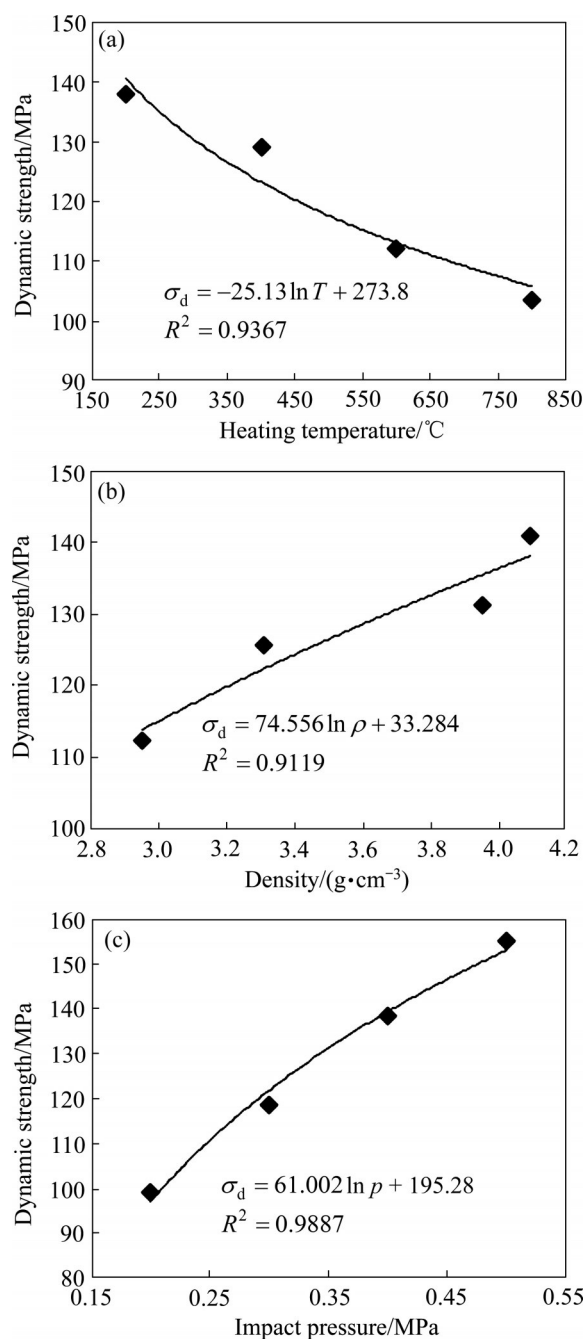


图5 高温处理后含铜矽卡岩的动态峰值应力变化规律

Fig. 5 Change rules of dynamic peak stress of copper-bearing skarn after high temperature treatment: (a) Different heat treatment temperatures ($\bar{\rho}=4.25 \text{ g/cm}^3$, $p=0.2 \text{ MPa}$); (b) Different densities ($\theta=600^\circ\text{C}$, $p=0.2 \text{ MPa}$); (c) Different dynamic load impact pressures ($\theta=600^\circ\text{C}$, $\bar{\rho}=4.35 \text{ g/cm}^3$)

间接推导热处理温度、岩样密度、冲击气压对含铜矽卡岩变形规律的影响程度。目前,由于国内外对岩石动态变形模量的计算方法无明确规定,故参考静载试验中割线模量的计算方法来确定含铜矽卡岩的动态变形模量。基于含铜矽卡岩动态压缩应力-

应变曲线一般特征的分析,发现峰值荷载前似直线段曲线较短,非线性上凸段为主体曲线,说明塑性变形是含铜矽卡岩的主体变形,因此,为表征峰值荷载前整个阶段含铜矽卡岩的变形特性,选取动态压缩应力-应变曲线的峰值应力点与曲线原点的连线斜率作为含铜矽卡岩的动态变形模量。图6所示为热处理温度不同、岩样密度不同、动载冲击气压不同时含铜矽卡岩动态变形模量的变化规律。

如图6(a)所示,动态变形模量随热处理温度的升高呈指数函数的形式降低,说明一定荷载作用下岩样压缩变形的增量随热处理温度的升高而增大。热处理温度的升高,一是使岩样产生了相应的热损伤效应,二是促使岩样内部不耐高温的矿物气化流失,二者共同作用导致岩样内部的裂隙率增大。同时,加热产生的热能部分转化为岩样内部微裂纹萌发、扩展、贯通所需的能量,也导致岩样内部的微裂纹数量增多。因此,热处理过程会促使含铜矽卡岩的破坏特性由强脆性向流塑性转变,体现为峰值应力前的动态压缩应力-应变曲线逐渐减缓,对应的动态变形模量也逐渐减小。

经回归拟合计算分析高温处理含铜矽卡岩的动态变形模量随岩样密度或冲击气压的变化规律,发现其曲线呈指数函数的趋势增加,如图6(b)和(c)所示。这一现象说明岩样密度或冲击气压的增大在一定程度上增强了岩样的脆性性质。岩样内部含铜矿物越多,矽卡岩与铜矿物微元体之间的连接越容易产生畸变,产生局部脱离,从而造成含铜矽卡岩在冲击荷载作用下的动态变形能力减弱,表现为岩样的脆性增强,动态变形模量增大。冲击气压越大,岩样承受的冲击荷载越大,组成岩样的微元体伴随的能量也就越大,同时由于冲击荷载作用的时间极短,岩样内部的能量无法得以全部转移,相应的变形也难以全部实现。冲击气压越大,这种现象越严重。因此,组成含铜矽卡岩微元体的变形量随冲击气压的增大而逐渐减小,导致岩样整体的变形能力减弱、脆性增强,体现在动态变形模量的变化特征便呈指数函数的趋势增大。

3 损伤历程及破坏模式

3.1 损伤演化规律

通过分析岩石的损伤演化规律,可间接揭示其

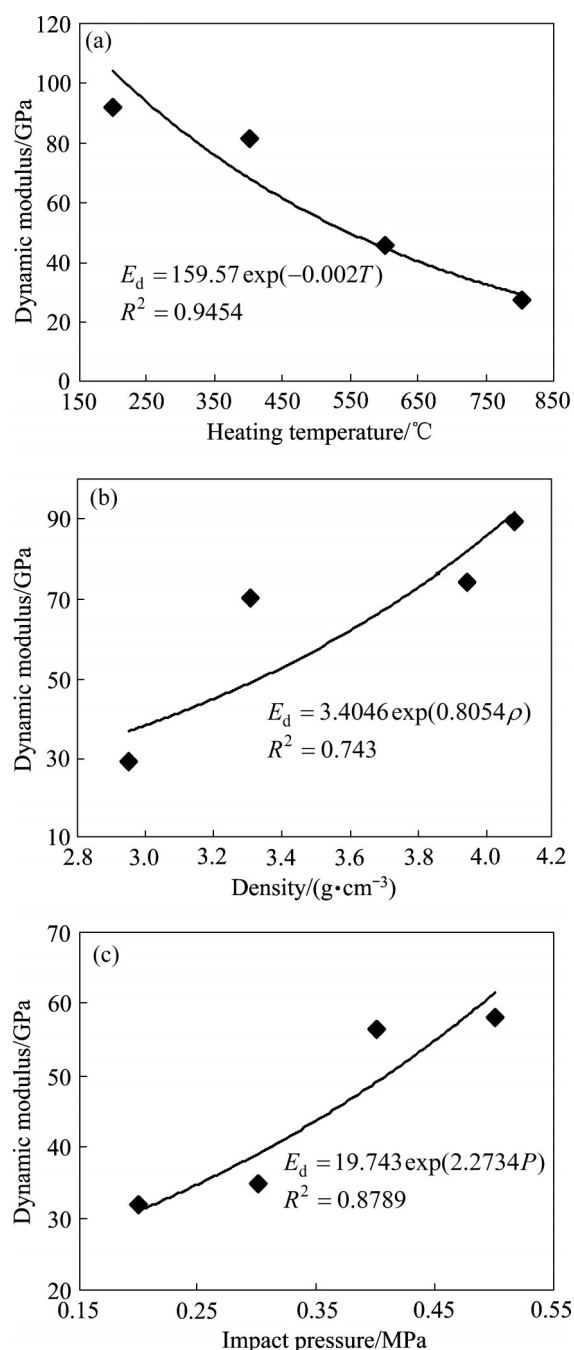


图6 高温处理含铜矽卡岩的动态变形模量变化规律

Fig. 6 Change rules of dynamic modulus of deformation of copper-bearing skarn after high temperature treatment: (a) Different heat treatment temperatures ($\bar{\rho}=4.25 \text{ g/cm}^3$, $p=0.2 \text{ MPa}$); (b) Different densities ($\theta=600^\circ\text{C}$, $p=0.2 \text{ MPa}$); (c) Different dynamic load impact pressures ($\theta=600^\circ\text{C}$, $\bar{\rho}=4.35 \text{ g/cm}^3$)

内部劣化特征。高温处理含铜矽卡岩的动态峰值应力可直接反映岩样抵抗外界冲击荷载的能力,也可间接揭示其内部微裂纹发育的程度,因此,在KACHANOV^[39]和RABOTNOV^[40]提出采用有效承

截面积与无损状态下横截面积比、有效应力、Cauchy应力定义损伤因子的基础上,采用动态压缩应力与动态峰值应力的比值定义含铜矽卡岩的损伤变量也能较好地反映岩样内部的损伤劣化规律,其计算公式如下:

$$D_d' = \frac{\sigma + \sigma_\theta}{\sigma_0} \quad (2)$$

式中: σ_0 为不加热常温条件下岩样的动态峰值应力; σ_θ 为热处理温度为 θ 时岩样动态峰值应力的降低值,该值由同一冲击气压下常温和热处理温度为 θ 时动态峰值应力的差值决定; σ 为冲击过程中热处理温度为 θ 的岩样承受的动态压缩应力。

式(2)中定义的损伤变量虽然可反映高温处理后的含铜矽卡岩受冲击荷载作用时的损伤演化规律,但在揭示含铜矽卡岩损伤机理方面存在不足,如不能解释岩样内部微裂纹扩展的方向等。为弥补这一不足,在式(2)的基础上引入生物种群数量增长模型,结合连续因子、应变等效原理及统计损伤理论^[41-43],提出以下假设:

1) 含铜矽卡岩是连续的、均质的、各向同性的;

2) 冲击荷载作用时岩样形成的主破裂面(最终扩展成宏观破裂面导致岩样破坏)仅由横截面积相等的损伤微元体和无损微元体组成,且无损微元体可向损伤微元体不可逆转化;

3) 损伤微元体数量增加的规律类似于生物种群数量的增长模型,逐代繁衍;

4) 忽略热损伤效应导致岩样产生的微量纵向应变。

基于上述假设,可将含铜矽卡岩的损伤变量方程表示为:

$$D_d = \frac{NS_0}{MS_0} = \frac{N}{M} \quad (3)$$

式中: N 为组成主裂隙扩展面的有损微元体数量; M 为组成主裂隙扩展面的无损微元体和有损微元体数量之和; S_0 为微元体的横截面积。

再者,基于假设条件(3),将含铜矽卡岩损伤微元体数量的增加看成某生物种群数量增长的过程,将岩石的动态压缩应变类比于生物种群增长模型中的时间,热处理温度、岩样密度、冲击荷载认为是生物所处的环境因素,岩样宏观破裂面形成时包含微元体总数量认为是种群的环境容纳量,因

此,可将含铜矽卡岩内部损伤微元体数量的增长率表示为:

$$\frac{dN}{d\varepsilon} = rN \left(1 - \frac{N}{M} \right) \quad (4)$$

式中: r 为自然增长率; ε 为对应的动态压缩应变。

应用微分方程的分离变量法求解式(4),得到 N 的表达式如下:

$$N = \frac{M}{1 + Ce^{-r\varepsilon}} \quad \left(C = \frac{M - N_0}{N_0} \right) \quad (5)$$

式中: N_0 为岩石损伤微元体的初始数量。

由式(3)和(4)可推出损伤变量 D_d 的微分表达式如下:

$$\frac{dD_d}{d\varepsilon} = \frac{1}{M} \frac{dN}{d\varepsilon} = r \frac{N}{M} \left(1 - \frac{N}{M} \right) \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),然后利用微分方程的分离变量法求解损伤变量 D_d 表达式如下:

$$\begin{cases} D_d = \frac{1}{1 + e^{\beta - r\varepsilon}} \\ \beta = \ln \left(\frac{M}{N_0} - 1 \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: β 反映含铜矽卡岩岩样的热损伤程度。

由式(7)可知,分析含铜矽卡岩损伤演化规律的前提便是确定参数 β 和 r 。故,将式(7)改写成含铜矽卡岩动态压缩应变相关的函数形式如下:

$$Y = \ln \left(\frac{1}{D_d} - 1 \right) = \beta - r\varepsilon \quad (8)$$

基于含铜矽卡岩的动态压缩应力-应变曲线特征、动态峰值应力与温度之间关系的拟合公式,结合式(2)便可计算出 Y 的值,随后采用线性关系式拟合 Y 和 ε 之间的关系,由拟合公式的系数项、常数项便可确定损伤变量的相关参数 β 、 r 。试验后针对热处理温度不同、岩样密度不同、冲击气压不同时各选取一组典型的数据推演损伤变量的相关参数,见表2所示。

将表2中的数据代入式(6),绘制高温处理后含铜矽卡岩的动态损伤变量-动态压缩应变关系曲线如图7所示。

图中显示,高温处理后含铜矽卡岩受冲击荷载作用时动态损伤变量 D_d 随动态压缩应变呈“S”型曲线形式增加,且值处于 0~1 之间;随热处理温度、岩样密度、冲击气压的改变损伤变量-应变曲线的形式虽然存在差异,但整体的变化趋势不变。该现象表征高温处理后含铜矽卡岩受冲击荷载作用

表2 高温处理后含铜矽卡岩受冲击荷载作用时的损伤变量方程参数 β 和 r 赋值表

Table 2 Damage variable equation parameters β and r of copper-bearing skarn under impact load after high temperature treatment

$\rho/$ (g·cm ⁻³)	$\theta/^\circ\text{C}$	P/MPa	Damage variable parameter	
			β	r
4.25	200	0.2	1.4648	2.5397
	400		1.4086	2.9628
	600		1.1456	1.5163
	800		0.8492	0.7301
4.09	600	0.2	1.6925	1.5217
3.95			1.5042	1.4424
3.31			0.7845	2.3936
2.95			0.7251	1.1735
4.35	600	0.2	2.2269	0.7339
		0.3	1.8387	1.4971
		0.4	2.2237	3.6705
		0.5	1.3747	2.6384

时内部损伤经历的缓慢增加—快速增加—减速增加—宏观破坏四个阶段, 且不随环境条件的改变而改变。图7中还显示损伤变量 D_d 的初始值大于零, 其原因是由于热处理过程导致含铜矽卡岩内部产生热损伤, 初始值越大说明岩样产生的热损伤程度越大。图7(a)中, 随热处理温度的升高, 损伤变量 D_d 的初始值逐渐增大, 且达到最大值1时所对应的动态压缩应变也逐渐增大, 揭示了高温加热处理过程不但劣化了含铜矽卡岩的内部结构, 还减弱了含铜矽卡岩的脆性性质。同理, 图7(b)和(c)中, 岩样密度或冲击气压越大时, 损伤变量 D_d 达到最大值1时所对应的动态压缩应变越小, 说明随岩样密度或冲击气压的增大, 含铜矽卡岩抗动态变形的能力相应增大, 间接反映其对冲击荷载的适应性增强。基于此, 动态损伤变量—动态压缩应变曲线揭示的动态损伤力学规律与含铜矽卡岩的动态峰值应力、动态变形模量揭示的规律一致, 定量反映了含铜矽卡岩内部结构的损伤演化机制。

3.2 损伤历程

高温处理后含铜矽卡岩受冲击荷载作用时, 外表面裂纹起裂位置、扩展方向、贯通形式以及破碎岩块的运动形态等也可揭示其损伤破坏的机制, 图

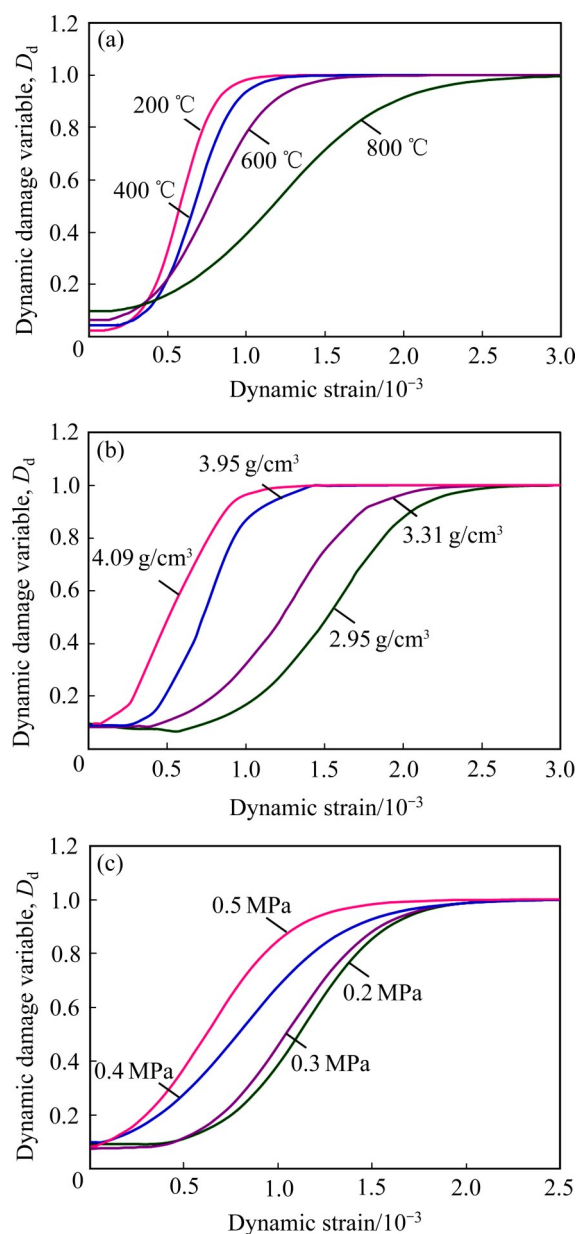


图7 高温处理后含铜矽卡岩的动态损伤变量—动态压缩应变曲线

Fig. 7 Dynamic damage variable—dynamic compression strain curves of copper-bearing skarn after high temperature treatment: (a) Different heat treatment temperature ($\bar{\rho}=4.25$ g/cm³, $p=0.2$ MPa); (b) Different density ($\theta=600$ °C, $p=0.2$ MPa); (c) Different dynamic load impact pressure ($\theta=600$ °C, $\bar{\rho}=4.35$ g/cm³)

8所示为冲击气压不同时一组岩样的损伤破坏历程。

图8中显示, 冲击荷载作用下含铜矽卡岩岩样外表面裂纹起裂于入射杆侧, 且沿着冲击应力波传播方向向透射杆侧扩展, 最后贯通形成的破裂面主要有三种状态: 一是沿着岩样轴向贯通形成纵向破

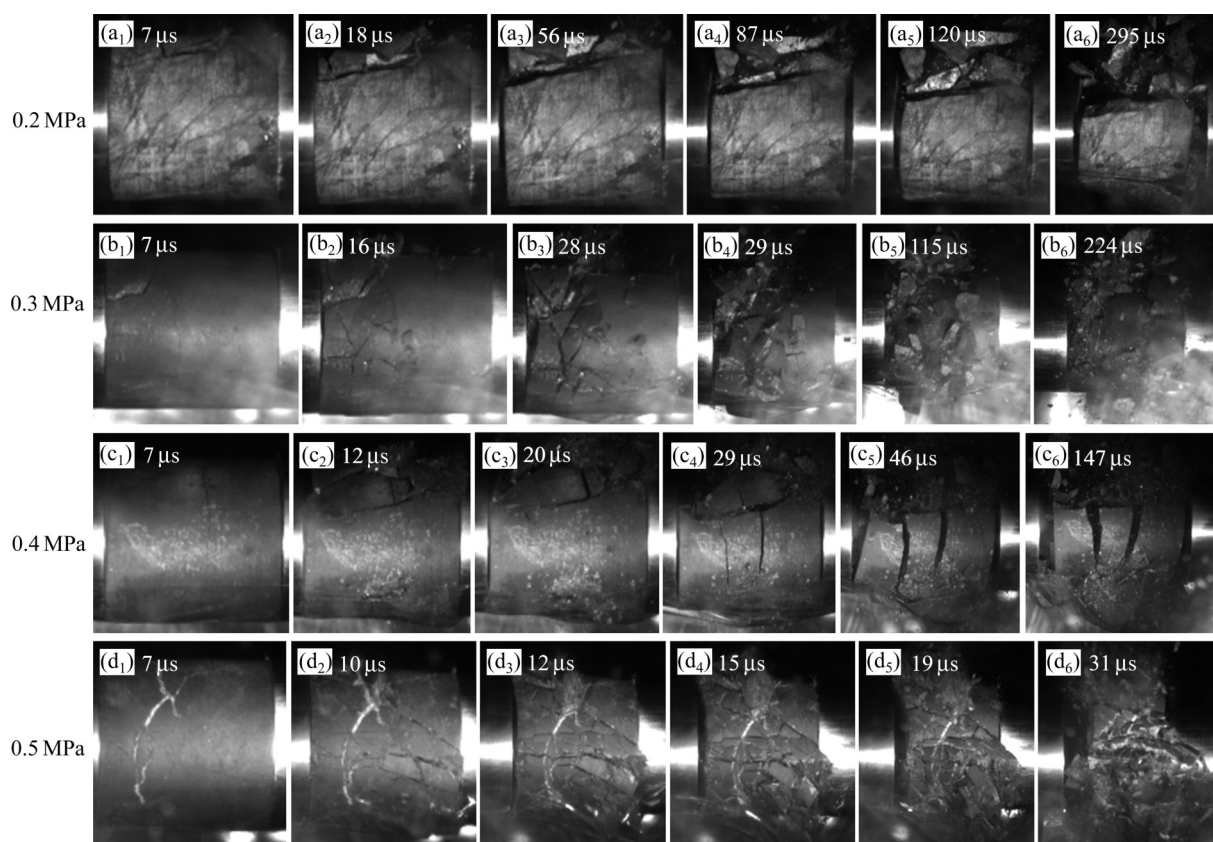


图8 冲击过程中含铜矽卡岩的损伤破坏历程

Fig. 8 Dynamic damage-fracture process of copper-bearing skarn under impact load (Heat treatment temperature is 600 °C, and average density is 4.35 g/cm³; Left is incident bar, right is transmission bar)

裂面,如图8(a)和(d)所示;二是垂直岩样轴向贯通形成横向离层平行破裂面,如图8(c)所示;三是形成的破裂面与岩样轴向斜交,如图8(b)所示。裂纹起裂于入射杆侧是因为施加冲击荷载时入射杆与岩样接触面之间产生了摩擦效应,局部应力集中现象的出现导致该位置率先产生了压碎型裂纹。纵向破裂面的形成是由于冲击应力波在含铜矽卡岩内部传播时产生了垂直岩样轴向的拉伸应力效应,其驱使裂纹沿岩样轴向扩展、贯通,形成破裂面。横向离层平行破裂面的形成归究于应力波穿过岩样向透射杆传播时,在岩样内部产生了沿波传递方向的拉伸应力效应,即应力波透过岩样时转换为拉伸应力波,导致岩样发生离层破裂。斜交破裂面的产生是因为岩样入射端内部本来就存在较复杂的微裂纹,阻碍冲击应力波的传递,使其不能及时透过岩样传入入射杆内,从而导致压剪效应的产生,体现在岩样破碎程度上便是入射端远大于透射端。进一步分析冲击过程中入射杆、透射杆和岩样两端面的接触

情况,可发现入射杆率先脱离岩样,透射杆脱离时间滞后,且前者脱离间隙大于后者。这也是造成上述三种主要破裂面形成的主要原因,即试验中加载应力波传递的时候会产生不同的应力效应,如纵向拉伸、横向拉伸、压剪等效应。分析破碎岩块运动的方向,不难发现其沿冲击应力波传递的方向快速弹射,可推测粉末性碎块是由于破碎岩块之间或其与透射杆之间的多次撞击形成的,这也揭示冲击应力波透过岩样的瞬间便转换成了拉伸应力波,带动岩块沿应力波传递的方向继续运动。

3.3 破坏模式

岩石的破坏形态可有效反映其承受的荷载历程及所处的物理力学环境,也可揭示岩石内部结构变化的过程,解释其损伤破坏的机制。高温处理后含铜矽卡岩于冲击荷载作用下发生破坏的主要影响因素是热处理温度、岩样密度及动载冲击气压,针对其图9分别列出了三种条件下含铜矽卡岩岩样典型



图9 高温处理后含铜矽卡岩的最终破坏特征

Fig. 9 Final failure characteristic of copper-bearing skarn after high temperature treatment: (a₁) $\bar{\rho}=4.25 \text{ g/cm}^3$, $p=0.2 \text{ MPa}$, $200 \text{ }^\circ\text{C}$; (a₂) $\bar{\rho}=4.25 \text{ g/cm}^3$, $p=0.2 \text{ MPa}$, $400 \text{ }^\circ\text{C}$; (a₃) $\bar{\rho}=4.25 \text{ g/cm}^3$, $p=0.2 \text{ MPa}$, $600 \text{ }^\circ\text{C}$; (a₄) $\bar{\rho}=4.25 \text{ g/cm}^3$, $p=0.2 \text{ MPa}$, $800 \text{ }^\circ\text{C}$; (b₁) $\theta=600 \text{ }^\circ\text{C}$, $p=0.2 \text{ MPa}$, 4.09 g/cm^3 ; (b₂) $\theta=600 \text{ }^\circ\text{C}$, $p=0.2 \text{ MPa}$, 3.95 g/cm^3 ; (b₃) $\theta=600 \text{ }^\circ\text{C}$, $p=0.2 \text{ MPa}$, 3.31 g/cm^3 ; (b₄) $\theta=600 \text{ }^\circ\text{C}$, $p=0.2 \text{ MPa}$, 2.95 g/cm^3 ; (c₁) $\theta=600 \text{ }^\circ\text{C}$, $\bar{\rho}=4.35 \text{ g/cm}^3$, 0.2 MPa ; (c₂) $\theta=600 \text{ }^\circ\text{C}$, $\bar{\rho}=4.35 \text{ g/cm}^3$, 0.3 MPa ; (c₃) $\theta=600 \text{ }^\circ\text{C}$, $\bar{\rho}=4.35 \text{ g/cm}^3$, 0.4 MPa ; (c₄) $\theta=600 \text{ }^\circ\text{C}$, $\bar{\rho}=4.35 \text{ g/cm}^3$, 0.5 MPa

的破坏形态。

由图9可知, 含铜矽卡岩破碎岩块主要呈长条状、三棱锥状或粉末状, 且其块度随热处理温度、

冲击气压的增大而减小, 随岩样密度的减小呈减小趋势。长条状岩块的出现是因为冲击过程中岩样产生了拉伸破坏, 是冲击应力波在岩样内部传递产生

了沿岩样轴向或垂直岩样轴向的拉伸应力效应所致。三棱锥状碎块的出现表明岩样产生了压剪破坏,是冲击应力波传递受阻产生压剪效应所致。粉末状碎屑的形成表明,含铜矽卡岩受冲击荷载作用破碎成岩块后,在冲击应力波的驱使下岩块会继续运动消耗自身伴随的动能,从而导致岩块之间发生摩擦和撞击,产生了二次破坏。热处理温度升高、冲击气压增大都导致颗粒状碎块数量增多,表明其增强了含铜矽卡岩内部微裂纹的发育程度,劣化了岩样内部结构,揭示岩样以压剪破坏为主。岩样密度增大,长条状岩块的体积相应增大,数量相应减少,表明岩样以拉伸破坏为主,间接反映岩样密度增大时岩样致密性在一定程度上增大,内部微裂纹的发育难度也相应增大。基于此,可认为高温处理后含铜矽卡岩的破坏模式复杂多变,且以拉伸破坏和压剪破坏为主,以混合型摩擦破坏为辅。

4 破碎分形特征

4.1 破碎块度的分布规律

岩石破碎后的块度与其受力状态、内部原始裂纹形态及初始损伤程度等都密不可分,热处理温度、岩样密度、冲击气压不同时必导致岩石破碎后块度的分布规律不同,其特征也可反映高温处理后含铜矽卡岩的动态损伤破坏机理。以破碎岩块最长边的长度为标量进行粒径分级,然后统计各粒径及最小粒径以下碎块质量的累积值,绘制二者的关系曲线,如图10所示。

图10中显示,热处理温度、岩样密度、冲击气压不同时三组曲线的变化特征存在差异,说明三因素对高温处理后含铜矽卡岩的损伤破坏机理影响程度不同。当碎块粒径小于20 mm时,可发现冲击气压改变时碎块的累积质量分数相应较大且随碎块粒径的增大相应增速较快,岩样密度改变时次之,热处理温度改变时最小,该现象表征冲击气压是导致高温处理后含铜矽卡岩损伤破坏的最主要因素。进一步分析图10中曲线的变化趋势可知,热处理温度不同时,碎块累积质量分数随碎块粒径增加而变化的趋势最相似,冲击气压不同时次之,岩样密度不同时曲线的相似性最差,且产生了一定的突变现象。这说明热处理对岩样整体的损伤效应是均一的,但岩样内部成分的不均匀性及冲击应力波产生

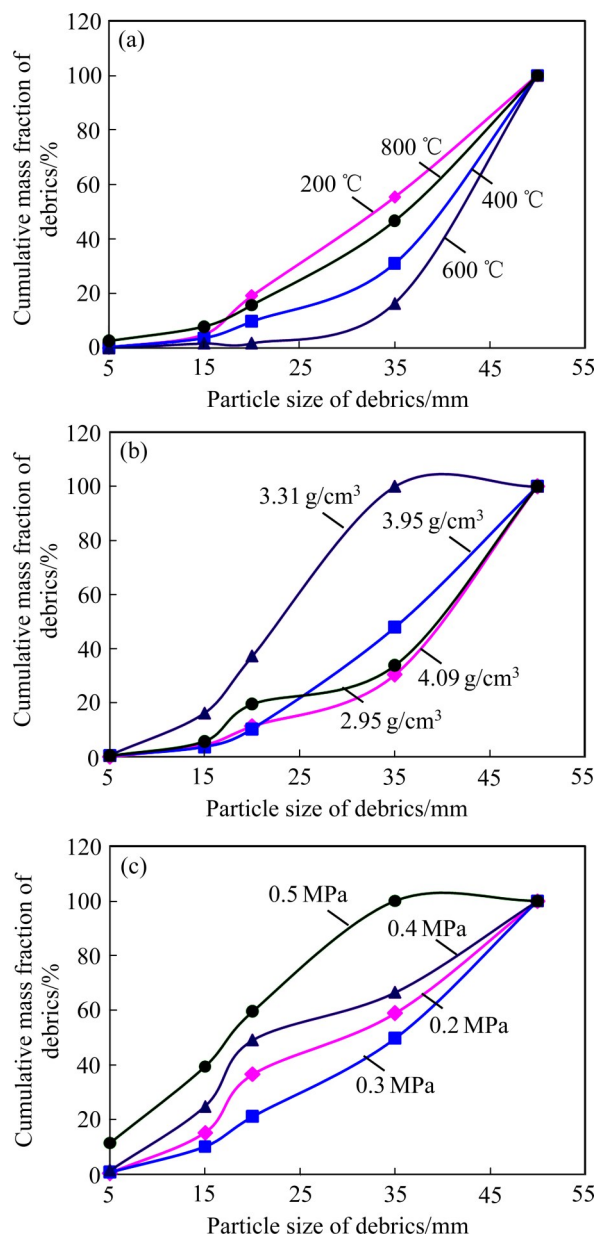


图10 高温处理后含铜矽卡岩碎块块度的分布规律

Fig. 10 Distribution rules of block degree of rock fragments of copper-bearing skarn after high temperature treatment: (a) Different heat treatment temperatures; (b) Different densities; (c) Different dynamic load impact pressures

的局部应力集中是造成岩样损伤破坏特征离散的主要因素。

4.2 碎块分形维数的确定

含铜矽卡岩受高温处理后,由于热损伤效应的作用,其内部结构产生了劣化,此时再承受冲击荷载作用便易产生宏观破坏,且破碎的岩块形态错综

复杂。分形理论在一定程度上可反映碎块之间的相似规律, 进一步揭示含铜矽卡岩内部结构的演化规律, 因此, 确定试验后碎块的分形维数非常重要。目前, 具有代表性岩石碎块分布统计函数为G-G-S分布, 由其建立含铜矽卡岩碎块质量与尺寸之间的定量关系, 推演高温处理后含铜矽卡岩受冲击荷载作用后碎块分形维数的确定方法, 更能揭示含铜矽卡岩破碎情况复杂多变背后的内在规律。

G-G-S分布函数的表达式如下^[44-45]:

$$y = \left(\frac{r}{r_m} \right)^b \quad (9)$$

式中: r 、 r_m 分别是岩样碎块粒径和碎块最大粒径; b 为回归系数。

由式(9)可推演岩样碎块累积质量与碎块总质量的比值同样满足G-G-S分布, 即

$$\frac{M_r}{M_T} = \left(\frac{r}{r_m} \right)^b \quad (10)$$

式中: M_r 为粒径小于 r 的岩样碎块累计质量; M_T 为碎块的总质量。

基于TURCOTTE^[46]的研究成果, 可得岩石碎块的数量正相关于碎块粒径分形维数方的倒数, 同时考虑碎块质量的增量也正相关于碎块数量增量的结论, 再结合式(9)和(10)求导后的关系, 可得下列各参量之间的关系:

$$\begin{cases} dM_r \propto r^{b-1} dr \\ dM_r \propto r^3 dN_r \\ N_r \propto r^D \end{cases} \quad (11)$$

式中: N_r 为岩样碎块的数量; D 为岩样碎块的分形维数。

将式(11)进一步化简, 得回归系数 b 和岩样碎块分形维数 D 之间的关系式如下:

$$b = 3 - D \quad (12)$$

将式(12)代入式(9), 同时等号两端取对数, 得

$$\ln \left(\frac{M_r}{M_T} \right) = (3 - D) \ln \left(\frac{r}{r_m} \right) \quad (13)$$

基于式(13), 分析试验后含铜矽卡岩碎块的相应参数并计算出式(13)等号两端各参量, 然后线性拟合 $\ln(M_r/M_T)$ 和 $\ln r$ 关系式, 取其斜率便可计算出相应的分形维数。

4.3 碎块分形维数特征

高温处理后含铜矽卡岩受冲击荷载作用时内

部原损伤的结构继续恶化, 再结合内部微裂纹的萌发、扩展以及贯通, 最终导致岩样的破碎与分形。碎块分形维数 D 的大小可反映含铜矽卡岩破碎的程度, 图11和12所示分别为热处理温度、岩样密度、冲击气压不同时含铜矽卡岩的典型 $\ln(M_r/M_T) - \ln r$ 曲线($y-x$ 曲线)和碎块分形维数的变化规律。

由图11可见, 三组典型的 $\ln[M_r/M_T]$ 和 $\ln r$ 数据

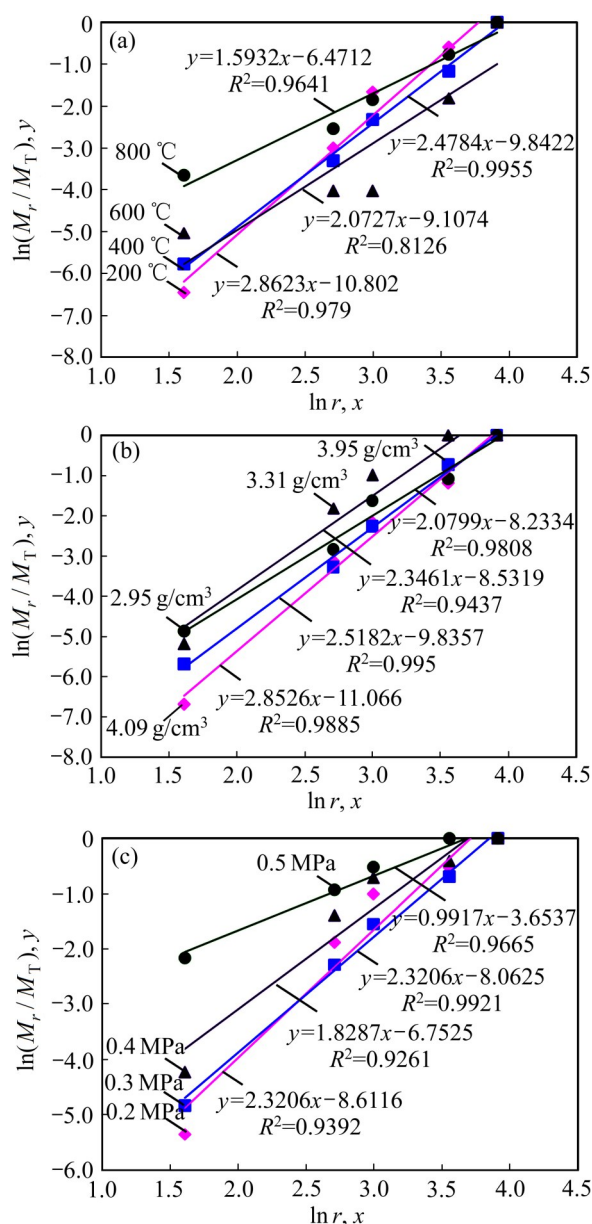


图11 高温处理后含铜矽卡岩典型的 $\ln(M_r/M_T) - \ln r$ 曲线

Fig. 11 Typical curves of $\ln(M_r/M_T) - \ln r$ of copper-bearing skarn after high temperature treatment: (a) Different heat treatment temperatures; (b) Different densities; (c) Different dynamic load impact pressures

对应的散点图的线性拟合相关系数 R^2 值的范围为0.8126~0.9955,且多数 R^2 值都大于0.95,说明由试验产生的破碎岩块统计的质量、粒径数据具有很好的线性相关性,也表明高温处理后含铜矽卡岩破坏后的碎块尺度分布具有幂律特征,满足块度分布公式(9)。基于此,高温处理后含铜矽卡岩动态破坏对应的碎块分形维数可由图11中相应线性拟合公式的系数项间接推演获取。

图12所示为高温处理后含铜矽卡岩碎块分形维数随热处理温度升高、岩样密度增大、冲击气压增加而变化的规律。由图12(a)和(c)可见,碎块分形维数随热处理温度、冲击气压的增加都呈增大的趋势,但随岩样密度的增大却呈减小的趋势(见图12(b))。通过拟合岩样碎块分形维数与热处理温度、岩样密度、冲击气压之间的关系,得其呈二次多项式关系。进一步,结合高温处理后含铜矽卡岩受冲击荷载作用时发生宏观破坏的特征,即破碎岩块块度随热处理温度、冲击气压的增大而减小,随岩样密度减小而减小的结论,可知碎块分形维数越大,岩样破碎程度越高,抗冲击荷载的能力越低;反之,分形维数越小,岩样破碎的程度越低,抗冲击荷载能力越高。因此,分形维数可作为描述高温处理后含铜矽卡岩破碎特征的定量指标,不但可反映含铜矽卡岩破碎程度的大小,还可间接揭示其抗外界冲击荷载能力的大小。

5 结论

1) 热处理温度、岩样密度、冲击气压不同时,含铜矽卡岩的变形趋势基本一致,即动态压缩应力-应变曲线先后经历似直线段、非线性上凸段、类平台段、峰后下降段四个阶段。

2) 高温处理后含铜矽卡岩的动态峰值应力、动态变形模量随热处理温度的升高分别呈对数函数趋势、指数函数趋势减小,却随岩样密度的增大、冲击气压的增加分别呈对数函数趋势、指数函数趋势增大。

3) 基于生物种群增长理论推演了高温处理后含铜矽卡岩的动态损伤变量方程,并基于试验数据分析了动态损伤变量-应变曲线的变化规律,推测含

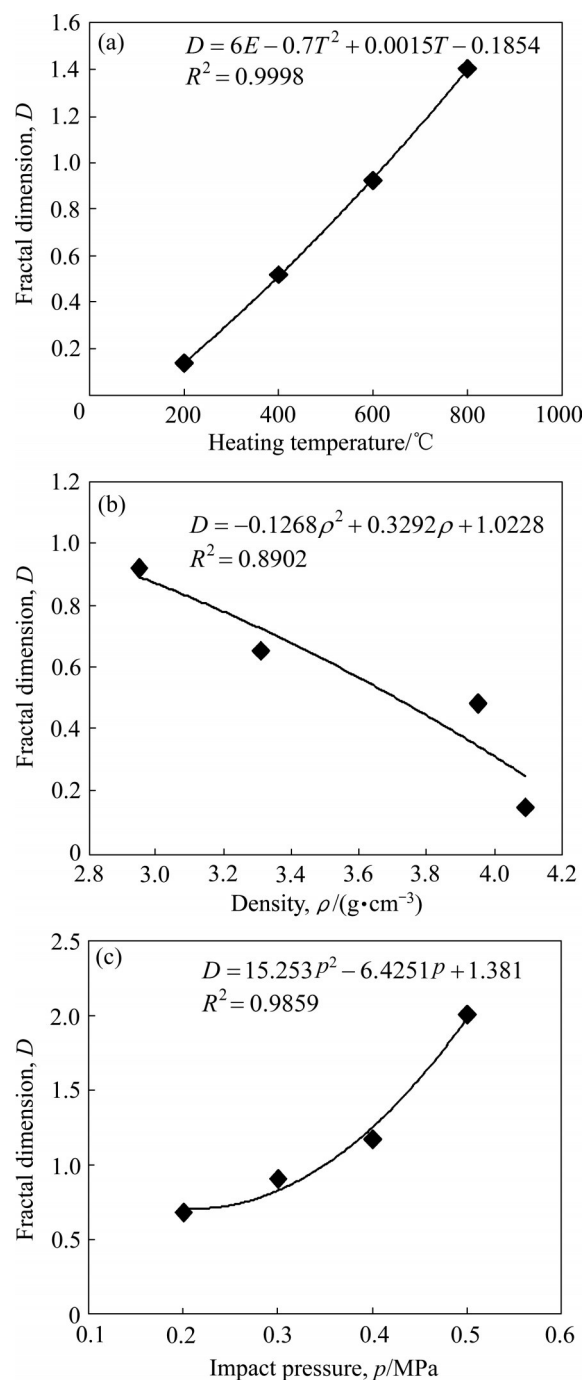


图12 高温处理后含铜矽卡岩碎块分形维数的变化规律
Fig. 12 Change rules of fractal dimension of rock fragments of copper-bearing skarn after high temperature treatment: (a) Different heat treatment temperatures; (b) Different densities; (c) Dynamic load impact pressures

铜矽卡岩于冲击荷载作用下内部损伤先后经历缓慢增加-快速增加-减速增加-宏观破坏四个阶段。

4) 冲击过程中裂纹起裂于含铜矽卡岩岩样的入射端,通过后续扩展、贯通形成纵向、横向离层平

行、斜交三种破裂面,最终导致岩样的破坏模式以拉伸破坏和压剪破坏为主,以混合型摩擦破坏为辅。

5) 冲击荷载作用下含铜矽卡岩碎块分形维数随热处理温度的升高、冲击气压的增大而增大,随岩样密度的增大而减小,且都呈二次多项式关系。同时,碎块分形维数的特征与碎块块度随热处理温度、岩样密度、冲击气压变化而变化的规律相呼应,揭示分形维数可间接用来表征高温处理后含铜矽卡岩的破碎特性。

REFERENCES

- [1] 平琦,吴明静,袁璞,等.冲击荷载作用下高温砂岩动态力学性能试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4): 782-792.
PING Qi, WU Ming-jing, YUAN Pu, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of high temperature sandstone under impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 782-792.
- [2] WANG C, ZHAN S F, XIE M Z, et al. Damage characteristics and constitutive model of deep rock under frequent impact disturbances in the process of unloading high static stress[J]. Complexity, 2020, 2020: 1-15.
- [3] 谢广祥,王磊.采场围岩应力壳力学特征的岩性效应[J].煤炭学报,2013,38(1): 44-49.
XIE Guang-xiang, WANG Lei. Lithologic effect on the mechanical characteristics of mining-induced stress shell[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 44-49.
- [4] 罗生银,窦斌,田红,等.自然冷却后与实时高温下花岗岩物理力学性质对比试验研究[J].地学前缘,2020,27(1): 178-184.
LUO Sheng-yin, DOU Bin, TIAN Hong, et al. Comparative experimental study on physical and mechanical properties of granite after natural cooling and under real-time high temperature[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 178-184.
- [5] 张蓉蓉.不同温度处理后深部砂岩动态力学及损伤特性试验与分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S2): 3879-3890.
ZHANG Rong-rong. Test and analysis of dynamic mechanics and damage characteristics of deep sandstone after different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 3879-3890.
- [6] 平琦,苏海鹏,马冬冬,等.不同高温作用后石灰岩物理与动力特性试验研究[J].岩土力学,2021,42(4): 932-942, 953.
PING Qi, SU Hai-peng, MA Dong-dong, et al. Experimental study on physical and dynamic mechanical properties of limestone after different high temperature treatments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 932-942, 953.
- [7] LONG L J, LIU D Y, WANG D, et al. Mechanical properties of sandstone subjected to coupling of temperature-seepage-stress[J]. DYNA, 2021, 96(3): 309-315.
- [8] LIU Lei, MENG Xiang, QIN Hao, et al. Experimental research on the influence of temperature on the static properties of skarn[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6636775.
- [9] WU Y, LI X Z, HUANG Z, et al. Effect of temperature on physical, mechanical and acoustic emission properties of Beishan granite, Gansu Province, China[J]. Natural Hazards, 2021, 107(2): 1577-1592.
- [10] 杨福见,胡大伟,周辉,等.动载扰动后花岗岩物理力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6): 1459-1467.
YANG Fu-jian, HU Da-wei, ZHOU Hui, et al. Physical and mechanical properties of granite after dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1459-1467.
- [11] GONG F Q, WU W X, ZHANG L. Brazilian disc test study on tensile strength-weakening effect of high pre-loaded red sandstone under dynamic disturbance [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 2899-2913.
- [12] 吕晓聪,许金余,赵德辉,等.冲击荷载循环作用下砂岩动态力学性能的围压效应研究[J].工程力学,2011,28(1): 138-144.
LÜ Xiao-cong, XU Jin-yu, ZHAO De-hui, et al. Research on confining pressure effect of sandstone dynamic mechanical performance under the cyclical impact loadings[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 138-144.
- [13] 刘少赫,许金余,王鹏,等.围压条件下砂岩循环冲击损伤的力学与超声分析[J].振动与冲击,2015,34(1): 190-194.
LIU Shao-he, XU Jin-yu, WANG Peng, et al. Mechanical and ultrasonic analysis on damage of sandstone under cyclical impact loading with confining pressure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(1): 190-194.
- [14] 许金余,吕晓聪,张军,等.循环冲击作用下围压对斜长角闪岩动态特性的影响研究[J].振动与冲击,2010,29(8): 60-63, 72, 242.
XU Jin-yu, LÜ Xiao-chong, ZHANG Jun, et al. Research on dynamic mechanical performance of amphibolite under

- cyclical impact loadings at different confining pressures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 9(8): 60–63, 72, 242.
- [15] CHEN Y L, WU H S, PU H, et al. Investigations of damage characteristics in rock material subjected to the joint effect of cyclic loading and impact [J]. *Energies*, 2020, 13(9): 2154.
- [16] 杨圣奇, 田文岭, 董晋鹏. 高温后两种晶粒花岗岩破坏力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(2): 281–289.
- YANG Sheng-qi, TIAN Wen-ling, DONG Jin-peng. Experimental study on failure mechanical properties of granite with two grain sizes after thermal treatment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(2): 281–289.
- [17] TIAN W L, YANG S Q, HUANG Y H, et al. Mechanical behavior of granite with different grain sizes after high-temperature treatment by particle flow simulation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(4): 1791–1807.
- [18] 顾超, 许金余, 孟博旭, 等. 高温作用后2种层理砂岩的动态力学试验及细观分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(9): 2710–2720.
- GU Chao, XU Jin-yu, MENG Bo-xu, et al. Dynamic mechanical behavior and mesoscopic analysis of two layered sandstone after high temperature[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2710–2720.
- [19] TAN L H, REN T, YANG X H, et al. A numerical simulation study on mechanical behavior of coal with bedding planes under coupled static and dynamic load[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(5): 791–797.
- [20] 武仁杰, 李海波, 李晓峰, 等. 不同冲击载荷下层状千枚岩压缩力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S2): 3304–3312.
- WU Ren-jie, LI Hai-bo, LI Xiao-feng, et al. Dynamic mechanical properties of layered phyllite subject to different impact loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S2): 3304–3312.
- [21] 尹士兵, 李夕兵, 王斌, 等. 高温后砂岩动态压缩条件下力学特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(5): 777–784.
- YIN Tu-bing, LI Xi-bing, WANG Bin, et al. Mechanical properties of sandstones after high temperature under dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(5): 777–784.
- [22] PING Q, ZHANG C L, SUN H J, et al. Dynamic mechanical properties and energy dissipation analysis of sandstone after high temperature cycling [J]. *Shock and Vibration*, 2020: 8848595.
- [23] 李明, 茅献彪, 曹丽丽, 等. 高温后砂岩动力特性应变率效应的试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3479–3488.
- LI Ming, MAO Xian-biao, CAO Li-li, et al. Experimental study of mechanical properties on strain rate effect of sandstones after high temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3479–3488.
- [24] 李庆森, 杨圣奇, 陈国飞. 高温后节理砂岩强度及变形破坏特性[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(4): 651–657.
- LI Qing-sen, YANG Sheng-qi, CHEN Guo-fei. Strength and deformation properties of post-high-temperature joint sandstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(4): 651–657.
- [25] LI X, YAO W, WANG C L. The influence of multiple dynamic loading on fragmentation characteristics in dynamic compression tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(3): 1583–1596.
- [26] RAE A S P, KENKMANN T, PADMANABHA V, et al. Dynamic compressive strength and fragmentation in felsic crystalline rocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(10): e2020JE006561.
- [27] PING Q, ZHANG C L, SU H P, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties and energy evolution characteristics of limestone specimens subjected to high temperature[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020: 8875568.
- [28] 纪杰杰, 李洪涛, 吴发名, 等. 冲击荷载作用下岩石破碎分形特征[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(13): 176–183, 214.
- Ji Jie-jie, LI Hong-tao, WU Fa-ming, et al. Fractal characteristics of rock fragmentation under impact load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(13): 176–183, 214.
- [29] 侯文光, 秦金辉. 动载荷下含水率对黄砂岩的分形特征及比表面能的影响[J]. *武汉工程大学学报*, 2021, 43(3): 307–312.
- HOU Wen-guang, QIN Jin-hui. Influence of water content on fractal characteristics and specific surface energy of yellow sandstone under dynamic loading[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2021, 43(3): 307–312.
- [30] 刘石, 许金余, 白二雷, 等. 基于分形理论的岩石冲击破坏研究[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(5): 163–166.
- LIU Shi, XU Jin-yu, BAI Er-lei, et al. Research on impact fracture of rock based on fractal theory[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(5): 163–166.
- [31] XU X L, ZHANG Z Z. Fractal characteristics of rock fracture surface under triaxial compression after high temperature[J]. *Advances in Materials Science and*

- Engineering, 2016, 2016: 1–10.
- [32] MENG Q B, WANG C K, LIU J F, et al. Physical and micro-structural characteristics of limestone after high temperature exposure[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(3): 1259–1274.
- [33] 宋 力, 胡时胜. SHPB数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 368–373.
- SONG Li, HU Shi-sheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 368–373.
- [34] XIAO P, LI D Y, ZHAO G Y, et al. Mechanical properties and failure behavior of rock with different flaw inclinations under coupled static and dynamic loads[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 2945–2958.
- [35] 李地元, 胡楚维, 朱泉企. 预制裂隙花岗岩动静组合加载力学特性和破坏规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1081–1093.
- LI Di-yuan, HU Chu-wei, ZHU Quan-qi. Experimental study on mechanical properties and failure laws of granite with an artificial flaw under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1081–1093.
- [36] 王 春, 程露萍, 唐礼忠, 等. 高轴压和围压共同作用下受频繁冲击时含铜蛇纹岩能量演化规律[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 55–68.
- WANG Chun, CHENG Lu-ping, TANG Li-zhong, et al. Energy evolution law of copper-bearing serpentine received frequent impact under common action of high axial compression and confining pressure[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5): 55–68.
- [37] WANG F, KONIETZKY H. Thermal cracking in Granite during a heating-cooling cycle up to 1000 °C : Laboratory testing and real-time simulation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(3): 1411–1428.
- [38] KANG F C, JIA T R, LI Y C, et al. Experimental study on the physical and mechanical variations of hot granite under different cooling treatments[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1316–1328.
- [39] KACHANOV L M. Introduction to continuum damage mechanics[M]. Dordrecht: Mechanics of Elastic Stability, 1986.
- [40] RABOTNOV Y N. Creep ruptures. In: Applied mechanics, processing of the 12th international congress of applied mechanics[M]. Berlin: Standford-Springe-Verlag, 1969.
- [41] KACHANOV M. On the time to failure under creep condition[J]. Izvestilla Akadenukk Tekhnology Nauk, 1958, 8: 26–31.
- [42] JEAN L. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1985, 107(1): 83–89.
- [43] 王 春, 唐礼忠, 程露萍, 等. 三维高静载频繁动态扰动时岩石损伤特性及本构模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2286–2296, 2305.
- WANG Chun, TANG Li-zhong, CHENG Lu-ping, et al. Damage characteristics and constitutive model of rock under three dimensional high static load and frequent dynamic disturbance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2286–2296, 2305.
- [44] 黄凤雷, 杨 军, 金乾坤. 岩石爆破理论模型和计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- HUANG Feng-lei, YANG Jun, JIN Qian-kun. Theoretical model and calculation of rock blasting[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [45] 谢 磊, 李庆华, 徐世烺. 冲击荷载下免蒸养活性粉末混凝土分形特征研究[J]. 工程力学, 2021, 38(3): 169–180.
- XIE Lei, LI Qing-hua, XU Shi-lang. Experimental study on fractal characteristics of steam free reactive powder concrete under impact load[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(3): 169–180.
- [46] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1986, 91(B2): 1921–1926.

Dynamic mechanical characteristic and damage-fracture behavior of deep copper-bearing skarn after high temperature treatment

WANG Chun^{1,3}, XIONG Hong-wei¹, SHU Rong-hua^{2,4}, XUE Wen-yue¹, HU Man-gu¹,
ZHANG Pan-long¹, LEI Bin-bin¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,
Ganzhou 341000, China;

3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization,
Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

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

Abstract: To explore the dynamic mechanical characteristics and damage failure behavior of the rock after heat treatment, a dynamic impact study was conducted on copper-bearing skarn under the influence of three factors: density, heat treatment temperature and impact pressure. The results show that the influences of the "three factors" on the trend of the constitutive curves of copper-bearing skarn were not obvious, and cannot change the approximate straight stage, nonlinear upward convex stage, plateau-like stage and post-peak stage of the dynamic compression stress-strain curves. However, the dynamic compressive strength and deformation modulus of copper-bearing skarn decrease with the increase of heat treatment temperature, but increase with the increase of sample density. Based on the biological population theory, the damage variables reflected the thermal damage degree is defined and it is found that the internal damage of rock samples have experienced four stages successively: slow increase-rapid increase-deceleration increase-macroscopic failure. Then, by capturing the damage history of rock sample during the impact process and analyzing the shapes and fractal dimension behaviors of rock fragments, it is found that the cracks initiate from the incident end of rock sample, and the changed rules of fractal dimension corresponded to the variation of the fragmentation with the change of heat treatment temperature, density and impact pressure. Finally, combined with the internal fracture surfaces of rock and the fragments which are mostly shown as long strip, triangular pyramid and powder shape, it could be obtained that the failure modes of copper-bearing skarn after heat treatment are complex and variable, which are mainly tensile and compression-shear failure and supplemented by mixed friction failure. Based on the conclusions, it could be speculated that the heat treatment temperature and dynamic disturbance promote the dynamic strength degradation and damage failure degree of deep ore rocks, and the increase of sample density is beneficial to improve the ability to resist external impact loads, which could provide theoretical references for the exploitation and utilization of deep resources and the formulation of surrounding rock state control scheme.

Key words: high temperature treatment; copper-bearing skarn; dynamic mechanical characteristic; damage-fracture behavior; fractal dimension

Foundation item: Projects(51904093, 52074101) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(202102310217) supported by the Development and Promotion of Special (Science and Technology) Project of Henan Province, China; Project(GJJ200856) supported by the Science and Technology Research Project of Education Department of Jiangxi Province, China

Received date: 2021-06-15; **Accepted date:** 2021-09-26

Corresponding author: SHU Rong-hua; Tel: +86-15273118371; E-mail: srh1025@jxust.edu.cn

(编辑 李艳红)