

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.004

石墨矿石品位对其动力学特性的影响研究^{*}

叶海旺^{1a,1b}, 李兴旺^{1a}, 雷涛^{1a,1b}, 王其洲^{1a,1b}, 余梦豪^{1a}, 严立德^{1a},
韦文蓬^{1a}, 王炯辉², 赵明生³, 余红兵³, HASSAN A M Abdelkader^{1a}

(1. 武汉理工大学 a. 资源与环境工程学院; b. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 武汉 430070;
2. 五矿勘查开发有限公司, 北京 100044; 3. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002)

摘要: 为探究石墨矿石品位与其动力学特性关联, 揭示石墨矿石品位对岩石动力学特性的影响规律, 选取 1.57%、5.19%、10.79%、12.65% 和 19.50% 五种品位的石墨矿石试样开展等幅冲击荷载作用下的 SHPB 试验研究, 分析试样峰值强度(σ_d)、动弹性模量(E_d)、峰值应变(ε_d)以及能耗密度(A_{SE})随石墨矿石品位的变化规律。研究结果表明: 不同品位石墨矿石动力学特性的改变是石墨矿石矿物组成和石墨鳞片嵌布特征变化共同作用的结果; 随着石墨矿石品位的增加, 试样动力学特性发生了明显弱化, 但弱化程度存在限度, 具体表现为: σ_d 、 E_d 和 A_{SE} 与石墨矿石品位之间存在良好的负指数型函数拟合关系(相关性系数 R^2 分别为 0.977、0.930 和 0.973), 三者均随石墨矿石品位的增加而以愈渐平缓的趋势逐渐降低, 并最终趋于某稳定值; ε_d 随石墨矿石品位的增加表现为初期近似线性增加, 品位达到 12.65% 时出现明显跃增, 之后开始缓慢减小的阶段性特征, 但 ε_d 减小的程度很小, 总体上可认为 ε_d 随石墨矿石品位增加仍呈现较好的弱幂函数递增规律(R^2 为 0.810), 说明试样动力学特性随石墨矿石品位增加而弱化的总体趋势并未改变。

关键词: 石墨矿; 矿石品位; 动力学特性; 能耗密度; SHPB 试验

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0025-07

Study on Effect of Graphite Ore Grade on its Dynamic Mechanical Properties

YE Hai-wang^{1a,1b}, LI Xing-wang^{1a}, LEI Tao^{1a,1b}, WANG Qi-zhou^{1a,1b}, YU Meng-hao^{1a}, YAN Li-de^{1a},
WEI Wen-peng^{1a}, WANG Jiong-hui², ZHAO Ming-sheng³, YU Hong-bing³, HASSAN A M Abdelkader^{1a}

(1. a. School of Resources and Environment Engineering; b. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Minmetals Exploration and Development Co., Ltd., Beijing 100044, China;
3. Poly Xinlian Blasting Engineering Limited Company, Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to reveal the influence law of graphite ore grade on its dynamic mechanical properties, SHPB tests were carried out on graphite ore samples with five grades of 1.57%, 5.19%, 10.79%, 12.65% and 19.50% under the action of constant amplitude impact loads. Based on the analysis of microscopic fabric characteristics of the graphite ore, the peak strength(σ_d), dynamic elastic modulus(E_d), peak strain(ε_d) and energy consumption density(A_{SE}) of the samples were analyzed. The results show that the change of the dynamic mechanical properties of the

收稿日期: 2022-06-05

作者简介: 叶海旺(1971-), 男, 教授、博士、博导, 主要从事采矿、爆破、安全等方面的教学和科研工作, (E-mail) yehaiwang369@hotmail.com。

通讯作者: 雷涛(1983-), 男, 讲师、博士、硕导, 主要从事采矿、爆破、数字化矿山等方面的教学和科研工作, (E-mail) leitao539@163.com。

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2020YFC1909602、2021YFC2902901); 湖北省重点研发计划(编号: 2021BCA152)

graphite ores with different grades is the result of the change of mineral composition and graphite flake distribution characteristics. With the increase of graphite ore grade, the dynamic mechanical properties of the sample are obviously weakened, but there is a limit of the weakening degree. The σ_d , E_d , and A_{SE} have a good negative exponential function fitting relationship with graphite grade (correlation coefficients R^2 is 0.977, 0.930 and 0.973, respectively). With the increase of graphite ore grade, the σ_d , E_d , and A_{SE} decrease gradually in a gentle trend and eventually reach a stable value. However, with the increase of graphite ore grade, the ε_d increases approximately linearly at the initial stage. When the grade reaches 12.65%, the ε_d increases significantly, and then decreases slowly, but the decrease degree of ε_d is very small. On the whole, it still shows a good increasing law of weak power function (R^2 is 0.810) for ε_d with the increase of graphite ore grade, indicating that the general weakening trend of the dynamic mechanical properties of the samples with the increase of graphite ore grade has not changed.

Key words: graphite ore; ore grade; dynamic mechanical properties; energy consumption density; SHPB test

岩石在动荷载作用下的力学响应特性是研究矿山开采、岩土爆破、水电工程施工、边坡防护等工程的基础^[1]。受岩石物理化学性质(如含水率、氧化性等)、矿物成分及比例(如矿物类型、矿石品位等)、原生结构与缺陷(如层理、裂隙、节理等)以及赋存环境(如酸碱环境、高低温环境)等诸多因素的影响,岩石的性质千差万别,给各类工程活动的设计和施工带来了巨大难度。因此,为明确各类因素对岩石动力学特性的影响规律,进而更合理地指导工程实践活动,众多学者借助室内试验、数值模拟技术等手段开展了大量研究。

针对岩石的物理化学性质,Cheng Zhen 研究了不同含水量页岩的动力学特性^[2],指出含水量是影响岩石动态抗压强度应变率效应的重要因素。针对岩石的结构与缺陷,杜超超研究了层理角度对岩石动力学特性的影响^[3];李地元研究了含预制裂隙岩石的动力学特性及破坏规律^[4];谢晓峰和吴拥政分别就岩石动力学特性的形状效应和尺寸效应开展 SHPB 试验研究^[5,6],揭示了岩石试件横截面形状和轴向长度对其动力学性质的影响规律;罗忆基于颗粒流数值模拟方法^[7],研究了节理对岩石动力学特性的弱化机理。针对岩石的赋存环境,Lin Yun 研究了化学腐蚀作用对岩石动态抗拉强度的弱化规律^[8];杜彬研究了酸性环境干湿循环作用对红砂岩动力学特性的影响规律^[9],为复杂环境因素下岩石动力响应和相关工程设计提供了参考;此外,随着现代岩土工程领域的日益拓展,高低温作用^[10,11,12]、冻融循环作用等环境因素对岩石动力学特性的影响也逐渐成为岩石动力学领域的研究热点^[13,14,15]。

上述研究表明,针对岩石物理化学性质、原生结构与缺陷、赋存环境变化等因素的研究已经较为深入和广泛,但截至目前,针对矿石品位对岩石动力学特性的影响规律的研究却鲜有涉及。黑龙江萝北某

露天晶质石墨矿在爆破开挖过程中发现,不同品位的矿岩区域在爆破作用下呈现的破碎块度分布情况存在较大差异。究其原因,是石墨矿石品位的变化导致了岩石性质的改变,进而影响了其在相同爆破参数作用下的破碎效果。因此,为了明确不同品位石墨矿石在爆炸荷载作用下力学响应特性的差异,为矿山优化爆破参数、改善爆破效果提供理论依据,开展石墨矿石品位对其动力学特性的影响规律的研究极为必要。鉴于此,通过矿山现场取样,选取不同品位石墨矿石试样开展等幅冲击荷载作用下的 SHPB 试验研究,分析相同动载作用下试样峰值强度(σ_d)、动弹性模量(E_d)、峰值应变(ε_d)以及能耗密度(A_{SE})随石墨矿石品位的变化规律,建立石墨矿石品位与其动力学特性关联,以期为今后该矿山的高效合理开采提供理论指导。

1 不同品位石墨矿石 SHPB 冲击试验

1.1 试样制备及加工

本次试验所用的岩石材料取自黑龙江萝北某石墨矿,为减小离散性和各向异性对岩石力学性质的影响,同一品位的试样取自同一大块岩样。根据国际岩石力学学会的建议,岩石材料 SHPB 试验的试样长径比在 0.5 ~ 1.0 之间较为合适,本次试验选择长径比为 1.0。将试样加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱体,加工合格的部分试样如图 1 所示。

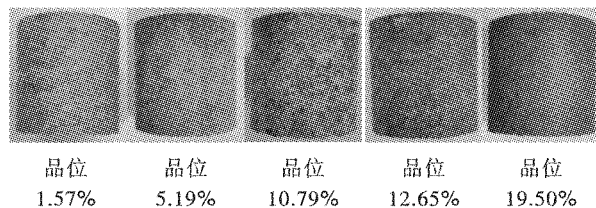


图 1 部分石墨矿石试样

Fig. 1 Part of graphite ore sample

根据石墨矿石品位化验结果以及试样数量和质量等现实条件,本次试验选取了5种品位(1.57%、5.19%、10.79%、12.65%、19.50%)的试样进行试验。从图1可以看出,随着石墨矿石品位的增加,试样颜色逐渐由灰白色向灰黑色转变,试验所选试样表面无明显裂隙、微孔洞等原生缺陷发育,减少了其他因素对试验结果的影响。同时,为减小试验数据的离散性,每种品位准备5个试样开展平行试验,选择其中离散性较小的3个数据分析试验结果。

1.2 试验设备

本次试验采用的 SHPB 试验系统如图2所示,该测试系统主要由气压调节装置、发射腔、子弹、入射杆、透射杆、SHPB 操作台、动态应变仪、数据采集与分析系统、增压泵以及高速摄影系统等组成。入

射杆和透射杆由 18Ni 制成,弹性模量为 190 GPa,纵波波速为 4900 m/s,入射杆与透射杆的长度均为 2000 mm,直径均为 50 mm。子弹长度为 400 mm,直径为 50 mm。

1.3 试验方案

试验前,为减少杆件与试样接触面之间的摩擦效应,在试样与杆件接触端均匀涂抹黄油,并保证试样与杆件紧密接触,之后通过 SHPB 操作台将子弹回到发射腔,以保证每次冲击试验的子弹从同一位置射出。试验中,通过施加 0.4 MPa 的冲击气压完成不同品位试样的动态冲击试验。试验后,采用三波法处理试验数据,对入射杆和透射杆的应变信号进行统计、分析和计算,获得不同品位试样在等幅冲击荷载作用下的动力学参数和能量分布参数。

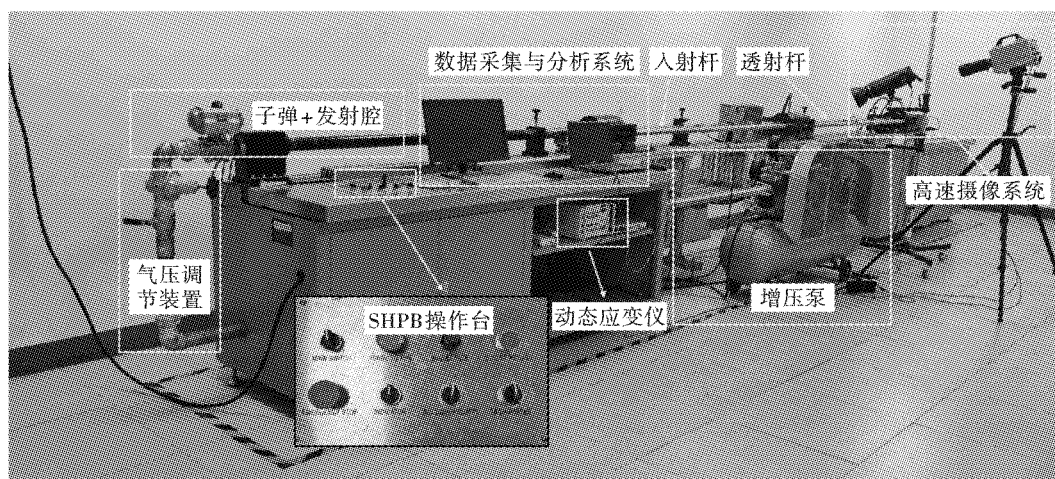


图2 SHPB 试验系统

Fig. 2 SHPB test system

2 试验结果分析

表1为不同品位石墨矿石试样在等幅冲击荷载作用下的动力学参数和能量分布参数。图3为不同品位试样典型的冲击波形,图4为不同品位试样典型的能量时程曲线,结合表1和图4可以看出,在 0.4 MPa 的冲击气压下,入射波电压峰值大致相等,入射波的能量稳定在 630 ~ 670 J 之间,个别入射波能量低于 620 J 或高于 680 J,但均在可接受范围之内,说明本次试验实现了对试样的等幅冲击加载作用。此外,也不难发现,试样品位不同,其对应的反射波和透射波电压信号存在明显差异:品位越低的试样,透射波电压峰值越高,反射波电压峰值越低。这是不同品位试样在相同冲击荷载作用下响应特征差异的具体体现,从侧面证明了石墨矿石品位对岩石动力学特性具有重要影响。

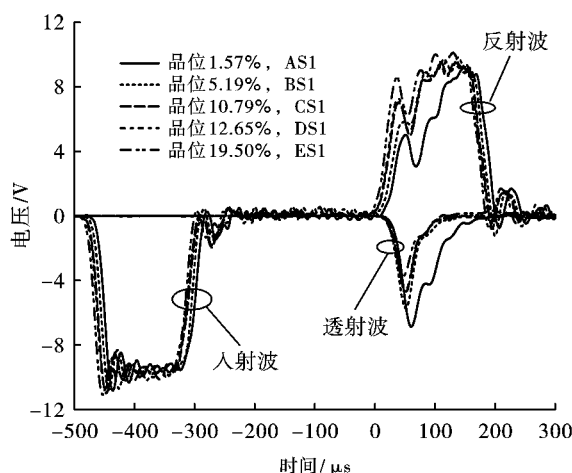


图3 不同品位试样典型冲击波形

Fig. 3 Typical impact waveform of samples with different grades

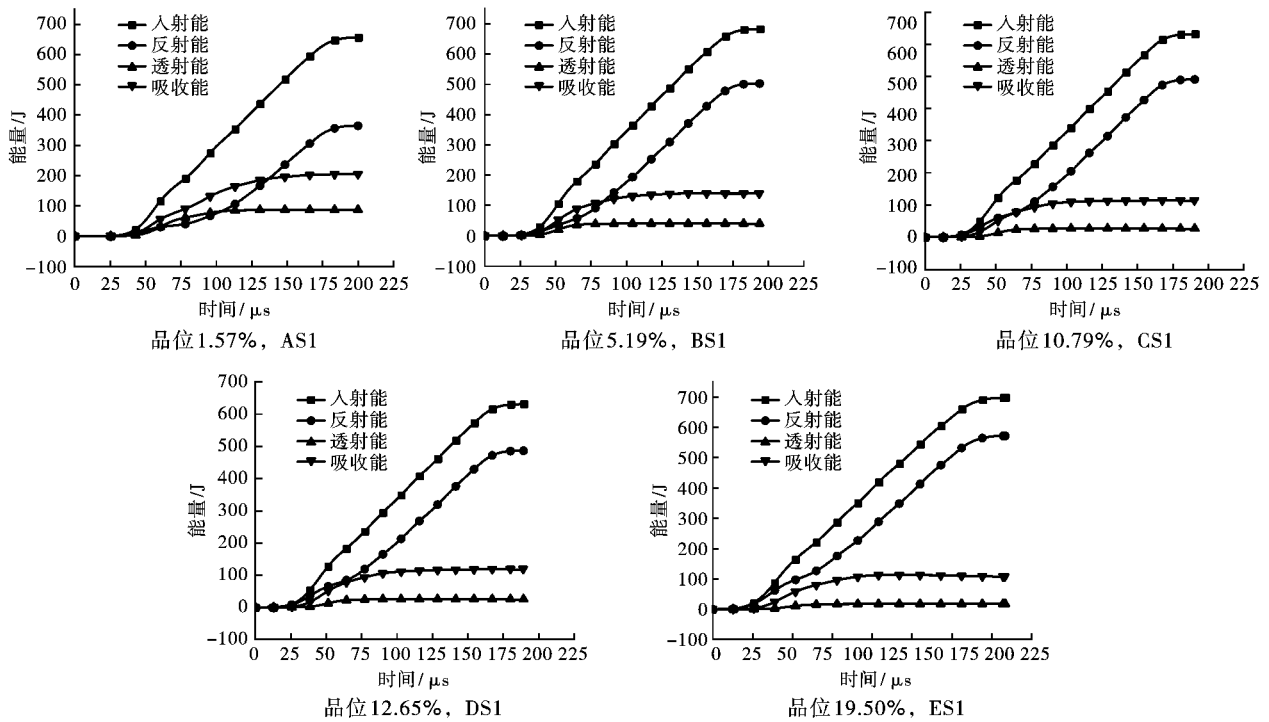


图 4 不同品位试样能量时程曲线

Fig. 4 Energy time-history curves of samples with different grades

表 1 试样动力学参数及能量分布参数

Table 1 Dynamic parameters and energy distribution parameters of the sample

石墨 品位/ %	试样 编号	入射 能/J	反射 能/J	透射 能/J	吸收 能/J	能耗密度 $A_{se}/$ ($J \cdot cm^{-3}$)	均值/ ($J \cdot cm^{-3}$)	峰值 强度 $\sigma_d/$ MPa	均值/ MPa	峰值 应变 ε_d	均值	动弹性 模量 E_d/GPa	均值/ GPa
	AS1	655.797	364.371	86.787	204.639	2.085		228.80		0.00468		57.474	
1.57	AS2	648.925	340.958	77.329	230.638	2.350	2.258	218.82	222.473	0.00570	0.00492	48.259	55.780
	AS3	617.769	284.850	103.455	229.464	2.338		219.80		0.00439		61.607	
	BS1	682.716	503.100	40.318	139.298	1.420		182.91		0.00553		46.934	
5.19	BS2	660.817	475.264	40.046	145.507	1.483	1.473	183.12	182.533	0.00589	0.00605	43.999	45.003
	BS3	658.607	468.641	41.257	148.709	1.516		181.57		0.00675		44.076	
	CS1	631.215	490.342	26.477	114.396	1.166		151.30		0.00687		25.906	
10.79	CS2	662.935	524.279	26.218	112.438	1.146	1.176	152.29	150.195	0.00680	0.00694	28.946	27.300
	CS3	630.869	486.103	25.344	119.422	1.217		147.00		0.00714		27.048	
	DS1	630.476	496.530	18.712	115.234	1.174		138.59		0.00861		22.906	
12.65	DS2	644.690	501.816	21.257	121.617	1.239	1.190	143.69	140.493	0.00879	0.00855	23.152	22.976
	DS3	649.688	518.255	18.029	113.404	1.156		139.20		0.00826		22.870	
	ES1	697.281	571.682	17.649	107.950	1.100		119.43		0.00830		19.293	
19.50	ES2	679.341	541.318	23.606	114.417	1.166	1.112	140.58	129.747	0.00695	0.00803	22.906	20.845
	ES3	626.925	501.401	20.464	105.060	1.071		129.23		0.00883		20.337	

2.1 应力应变曲线特征

根据试验数据,每种品位选取一个试样绘制动态应力应变曲线,如图 5 所示。根据图 5,可将试样的动态应力应变曲线大致分为 4 个阶段:

(1) 压密阶段($d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$): 曲线有一定的下

凹特征,这是由于压杆与试样间逐渐压密,同时试样内部微裂纹闭合导致的结果,但与静力学试验相比,这一过程极为短暂。

(2) 弹性变形阶段($d^2\sigma/d\varepsilon^2 = 0$): 应力应变曲线近似呈直线,此时作用在试样上的应力不足以使

试样发生裂纹的拓展演化或孕育,所以这一阶段曲线的斜率基本上没有发生变化,此时曲线的斜率可作为试样的动弹性模量。

(3) 裂纹演化阶段 ($d^2\sigma/d\varepsilon^2 < 0$): 应力应变曲线呈缓慢上升趋势,应力上升趋势越来越缓,应变明显增大。说明试样内部的微裂纹在冲击荷载作用下开始不断拓展延伸,并同时有新的微裂纹开始萌生。当应力达到 σ_d 后,原有裂纹快速拓展,新裂纹大量产生,并与主裂纹贯通,试样内部出现破裂面,试样开始发生宏观破坏。

(4) 卸载阶段 ($d\sigma/d\varepsilon < 0$): 应力应变曲线呈负斜率下降,应力逐渐减小,应变持续增加,此时试样已经发生宏观破坏,试样内部不能继续储存能量,破碎试样迅速变形,形成不同的破碎块度。

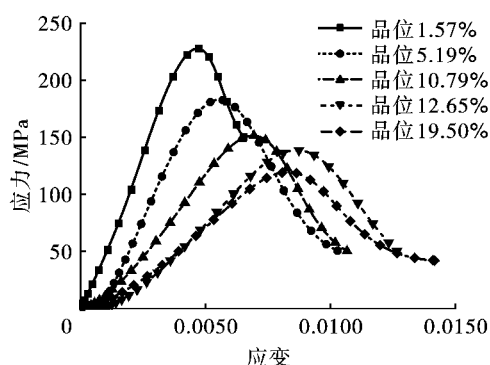


图5 动态应力应变曲线

Fig. 5 Dynamic stress-strain curve

2.2 σ_d 随石墨矿石品位变化规律

如表1所示,在相同的冲击荷载作用下,随着石墨矿石品位的增加, σ_d 呈现良好的递减规律。根据刘冰的研究结论^[16],矿石品位对岩石力学强度具有重要影响。对于晶质石墨矿石来说,一方面,由于石墨鳞片的存在,矿物颗粒胶结面间的胶结力会发生显著下降,随着石墨矿石品位的增加,石墨鳞片的数量相应增加,会进一步加剧这种作用。另一方面,石墨矿石的伴生矿物,如石英、长石、云母等,其强度一般高于石墨,随着石墨含量的增加,其相应伴生矿物的含量逐渐减少,因此矿石的强度会进一步发生弱化。

绘制 σ_d 随石墨矿石品位变化的曲线,如图6所示。使用负指数型函数对数据进行拟合,得到

$$\sigma_d = 131.99e^{12.19x} + 115.07 \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (R^2 = 0.977) \quad (1)$$

根据式(1),随着石墨矿石品位的增加, σ_d 逐渐降低,但降低的趋势逐渐变缓,之后 σ_d 将逐渐趋于某一稳定值。这表明石墨含量的增加弱化了试样的

动态抗压强度,但其弱化程度会随石墨含量的增加而逐渐降低。

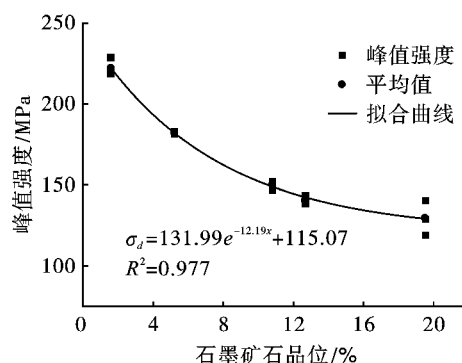


图6 σ_d 随石墨矿石品位变化曲线

Fig. 6 Variation curve of σ_d with graphite ore grade

2.3 E_d 随石墨矿石品位变化规律

E_d 是岩石在动载作用下抗变形能力的量度,图7给出了 E_d 随石墨矿石品位变化的曲线。由于试样本身的差异,同一品位试样的 E_d 有一定离散性,但整体上,随着石墨矿石品位的增加, E_d 逐渐减小,且减小的趋势逐渐变缓,这一规律与 σ_d 随石墨矿石品位的变化规律类似。

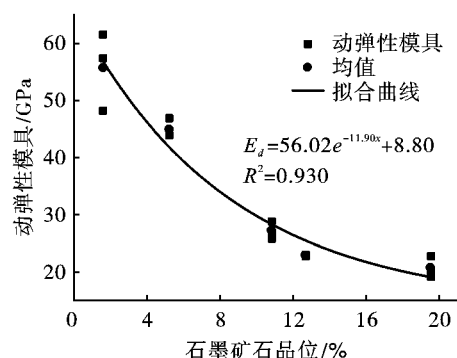


图7 E_d 随石墨矿石品位变化曲线

Fig. 7 Variation curve of E_d with graphite ore grade

对二者之间的关系进行拟合,得到

$$E_d = 56.02e^{-1.90x} + 8.80 \quad (0 \leq x \leq 1)$$

$$(R^2 = 0.930) \quad (2)$$

根据式(2), E_d 随石墨矿石品位增加呈负指数性函数降低,这表明石墨矿伴生矿物的抗变形能力明显高于石墨,石墨含量的增加弱化了试样抗变形的能力,但弱化程度随石墨含量增加而逐渐降低,之后 E_d 将逐渐趋于某一稳定值。这一规律与 σ_d 随石墨矿石品位的变化规律是极为吻合的。

2.4 ε_d 随石墨矿石品位变化规律

ε_d 反映了试样达到峰值应力时的极限变形程度,是对岩石弹塑性性质的客观表述。图8给出了

ε_d 随石墨矿石品位变化的曲线。如图 8 所示,随着石墨矿石品位的增加, ε_d 呈现先增加后减小的趋势,这与图 5 中应力应变曲线所表现出的规律是一致的。具体表现为:

(1) 当石墨矿石品位为 1.57 ~ 10.79% 时, ε_d 随石墨矿石品位增加近似线性增加。品位由 1.57% 增加至 5.19% 和由 5.19% 增至 10.79% 时, ε_d 均值分别增加了 0.00113 和 0.00089,此时,试样的弹性较为明显,三种品位试样的应力应变曲线没有出现明显的压密阶段。

(2) 当石墨矿石品位由 10.79% 增加至 12.65% 时, ε_d 均值增加了 0.00161,增幅约为前一阶段的两倍,说明此时试样的弹塑性发生了明显变化,试样的弹性开始减弱,塑性开始增强,这种品位的试样出现了明显的压密阶段。

(3) 当石墨矿石品位由 12.65% 增至 19.50% 时, ε_d 均值降低了 0.00052,降幅仅为 6.08%,说明此时试样的塑性较前一阶段出现了很小程度的减弱,但也存在明显的压密段。

进一步分析认为,石墨矿石品位的变化对试样的弹塑性性质有重要影响,石墨含量增加过程中,存在一个临界品位点,在临界品位点前,由于石墨性质较软,试样塑性随石墨矿石品位的增加逐渐增强, ε_d 逐渐增大;过了临界点后,随着石墨含量的增加,试样的均质性和密实性有所增强,所以其塑性反而有所减弱, ε_d 有一定减小,但其减弱程度并不足以逆转 σ_d 和 E_d 随石墨矿石品位增加而下降的趋势, ε_d 随石墨矿石品位增加总体上仍呈现出较好的弱幂函数递增规律(相关性系数 R^2 为 0.810),说明试样动力学特性随石墨矿石品位增加而弱化的总体趋势并未改变,所以此时 σ_d 和 E_d 仍然呈现缓慢减小的趋势。

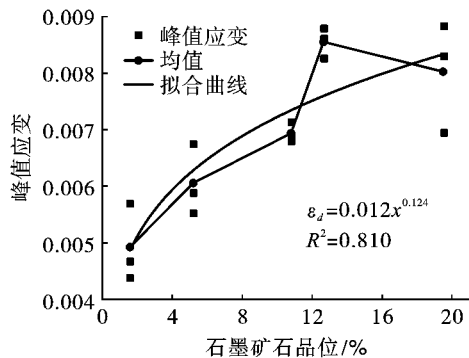


图 8 ε_d 随石墨矿石品位变化曲线

Fig. 8 Variation curve of ε_d with graphite ore grade

2.5 A_{SE} 随石墨矿石品位变化规律

试样在冲击荷载作用过程中发生破碎,其吸收

的能量主要转化为破碎耗散能、块体动能、热能以及声能等。根据文献[17]的研究结果,一般 90% 以上的吸收能量耗散于岩石试样的断裂破坏,因此,可用吸收能近似替代破碎耗散能。为了分析冲击荷载下岩石试样的能量特性,定义能耗密度 A_{SE} 表示破碎单位体积岩石耗散的能量

$$A_{SE} = \frac{W_L}{V_s} \quad (3)$$

式中: W_L 表示试样的吸收能; V_s 表示试样体积。

根据表 1 的数据,随着石墨矿石品位的增加, A_{SE} 也呈现递减的趋势。说明石墨矿石品位对 A_{SE} 也具有重要影响。值得注意的是,石墨矿石品位由 10.79% 增至 12.65% 时, A_{SE} 有小幅增加,其均值由 1.176 增至 1.190,根据峰值应变的变化结果可知,石墨矿石品位为 12.65% 时, ε_d 出现陡增,试样极限变形程度最大,需要消耗更多的能量用于试样的变形破碎,所以此时 A_{SE} 出现了很小幅度的增加。

绘制 A_{SE} 随石墨矿石品位变化的曲线,如图 9 所示。对二者之间的关系进行拟合,得到

$$A_{SE} = 1.88e^{-32.11x} + 1.13 \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (R^2 = 0.973) \quad (4)$$

根据拟合公式(4)可知, A_{SE} 随石墨矿石品位的变化规律与 σ_d 随石墨矿石品位的变化规律一致。结合 σ_d 随石墨矿石品位变化规律,在相同的冲击荷载作用下, σ_d 越大,破碎单位体积岩石消耗的能量越多,反之亦然。这一规律符合实际情况,也进一步说明了式(1)的合理性。式(1)和式(4)的拟合度均达到了 0.97 以上,二者可相互印证其正确性。

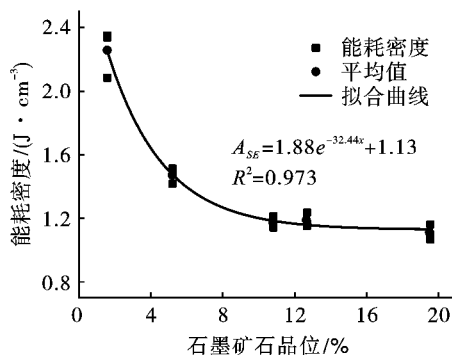


图 9 A_{SE} 随石墨矿石品位变化曲线

Fig. 9 Variation curve of A_{SE} with graphite ore grade

3 结论

(1) 坚硬矿物和软弱矿物含量的此消彼长以及由石墨鳞片诱发的岩石内部弱面结构数量和尺度的

扩增,是造成石墨矿石力学性能随其品位增加而弱化的本质原因。

(2) 石墨矿石动力学参数随其品位的变化规律: σ_d 、 E_d 和 A_{SE} 随石墨矿石品位增加呈负指数型函数递减规律, ε_d 随石墨矿石品位增加呈弱幂函数递增规律。

(3) 石墨矿石动力学参数 σ_d 、 E_d 、 A_{SE} 和 ε_d 最后都会逐渐趋近于某稳定值,说明石墨矿石品位增加对其动力学特性的弱化程度存在限度。

参考文献 (References)

- [1] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 18-19.
- [1] LI Xi-bing. Fundamentals and applications of rock dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2014: 18-19. (in Chinese)
- [2] CHENG Zhen, SHENG Mao, LI Gen-sheng, et al. Dynamic failure behavior of shale with different water content under confining pressure[C]//54th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2020.
- [3] 杜超超, 温森, 孔庆梅. 一维动静组合加载下复合岩样动态力学特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(21): 168-178, 206. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2021. 21. 023.
- [3] DU Chao-chao, WEN Sen, KONG Qing-mei. One-dimensional dynamic mechanical properties test of dynamic and static combination loading composite sample study[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(21): 168-178, 206. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2021. 21. 023. (in Chinese)
- [4] 李地元, 万千荣, 朱泉企, 等. 不同加载方式下含预制裂隙岩石力学特性及破坏规律试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 1025-1035. DOI: 10. 13545/j. cnki. jmse. 2021. 0187.
- [4] LI Di-yuan, WAN Qian-rong, ZHU Quan-qi, et al. Experimental study on mechanical properties and failure law of rock with prefabricated cracks under different loading Modes[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(5): 1025-1035. DOI: 10. 13545/j. cnki. jmse. 2021. 0187. (in Chinese)
- [5] 谢晓锋, 陶明, 吴秋红, 等. 不同形状砂岩的动态力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(9): 2441-2448.
- [5] XIE Xiao-feng, TAO Ming, WU Qiu-hong, et al. Dynamic mechanical properties of sandstone with different shapes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(9): 2441-2448. (in Chinese)
- [6] 吴拥政, 孙卓越, 付玉凯. 三维动静加载下不同长径比煤样力学特性及能量耗散规律[J/OL]. 岩石力学与工程学报. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jmse.2021.0920>.
- [6] WU Yong-zheng, SUN Zhuo-yue, FU Yu-kai. Mechanical properties and energy dissipation of coal samples with different aspect ratios under THREE-DIMENSIONAL Dynamic and static loading[J/OL]. Journal of Rock Mechanics and Engineering. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jmse.2021.0920>. (in Chinese)
- [7] LIN Yun, ZHOU Ke-ping, LI Jie-lin, et al. Weakening laws of mechanical properties of sandstone under the effect of chemical corrosion[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2020, 53(4): 1857-1877.
- [8] 罗忆, 曾英翎, 王刚, 等. 基于颗粒流的节理岩体动态力学特性研究[J]. 爆破, 2020, 37(4): 18-24, 68.
- [8] LUO Yi, ZENG Fu-ling, WANG Gang, et al. Study on dynamic mechanical properties of jointed rock mass based on particle flow[J]. Blasting, 2020, 37(4): 18-24, 68. (in Chinese)
- [9] 杜彬. 酸性环境干湿循环作用下红砂岩动态力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [9] DU Bin. Dynamic mechanical properties of red sandstone under dry and wet cycling in acidic environment[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] 刘磊, 李睿, 秦浩, 等. 高温后深部砂卡岩动力学特性及微观破坏机制研究[J/OL]. 岩土工程学报: 1-11. [2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20211228.1543.013.html>.
- [10] LIU Lei, LI Rui, QIN Hao, et al. After high temperature deep skarn dynamics characteristic and the micro failure mechanism study[J/OL]. Journal of Geotechnical Engineering: 1-11. [2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20211228.1543.013.html>. (in Chinese)
- [11] 平琦, 张传亮, 孙虹键. 不同高温循环作用后砂岩动力特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 1015-1024. DOI: 10. 13545/j. cnki. jmse. 2021. 0139.
- [11] PING Qi, ZHANG Chuan-liang, SUN Hong-jian. The dynamic characteristics of sandstone after high temperature cycle test study[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 42(5): 1015-1024. DOI: 10. 13545/j. cnki. jmse. 2021. 0139. (in Chinese)