

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.018

高、低品位铁矿石动态拉伸力学特性试验研究*

高常胜¹, 张钧鹏², 邓皓泽¹, 李宗武¹, 陈宏灏¹, 李 冬¹

(1. 鞍钢集团矿业公司 弓长岭有限公司 井采分公司, 辽阳 111008;

2. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在采矿过程中, 矿石通常发生拉伸破坏, 为探究高、低品位铁矿石的动态拉伸力学特性, 采用分离式霍普金森杆(SHPB)系统和超高速数字图像相关(DIC)技术, 对品位在 60% 以上的富铁矿石和品位在 10% 到 20% 之间的贫铁矿石进行动态劈裂试验, 分析其破坏过程、应变分布、动态拉伸强度及能量吸收特性。结果表明: 高品位铁矿石裂纹扩展集中于试样中心, 破坏形式以中心主裂纹贯穿为主, 动态拉伸强度和加载率随冲击气压升高显著增大; 低品位铁矿石因内部节理发育, 裂纹沿弱面分散扩展, 动态拉伸强度和加载率受节理分布影响显著, 规律性较弱。能量分析表明: 高品位铁矿石能量吸收率高于低品位, 其破坏由矿物颗粒强度主导, 而低品位铁矿石受节理面强度控制。对高品位铁矿石与低品位铁矿石各项数据对比后发现, 在相同冲击气压的作用下高品位铁矿石的加载率、动态拉伸强度、最大拉伸应变和吸收能均高于低品位铁矿石。铁矿石岩性和品位对其力学性能有显著影响, 实验结果可为铁矿石爆破开采参数优化及损伤控制提供理论依据。

关键词: 动态拉伸力学特性; 铁矿石; SHPB 系统; 裂纹扩展; 数字图像相关(DIC)技术

中图分类号: TD411 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)02-0179-09

Experimental Study on Dynamic Tensile Mechanical Properties of High and Low Grade Iron Ores

GAO Chang-sheng¹, ZHANG Jun-peng², DENG Hao-ze¹, LI Zong-wu¹, CHEN Hong-hao¹, LI Dong¹

(1. Underground Mining Branch, Gongchangling Co., Ltd., Mining Company of Ansteel Group, Liaoyang 111008, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: During the mining process, tensile failure represents a predominant mode of ore fragmentation. This research systematically examines the dynamic tensile mechanical properties of both high-grade (Fe > 60%) and low-grade (Fe 10 ~ 20%) iron ores through the combined application of Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) testing and Ultra-high-speed Digital Image Correlation (DIC) techniques for dynamic splitting tests. The analysis focused on failure mechanisms, strain field evolution, dynamic tensile properties, and energy absorption capacity. Results reveal that high-grade iron ore specimens experience localized crack propagation at their geometric center, predominantly

收稿日期 (Date of reception): 2025-05-28

网络首发日期 (Published online): 2026-06-15

作者简介: 高常胜 (1974-), 男, 辽宁丹东人, 采矿工程师, 弓长岭井下铁矿矿长, 主要从事采矿技术方面的研究工作, (E-mail) gghfx912@tom.com。

通信作者: 张钧鹏 (2002-), 男, 江西上饶人, 硕士研究生在读, 主要从事工程爆破和岩石动力学方面的研究, (E-mail) 2895390356@qq.com。

基金项目: 赋存复杂矿体无切割自由面爆破落矿技术研究 (2024-科 A13)

About the author: GAO Chang-sheng (1974-), male, born in Dandong city, Liaoning province, mining engineer and the mine manager of Gongchangling underground iron mine, mainly engaged in mining technology, (E-mail) gghfx912@tom.com.

Corresponding author: ZHANG Jun-peng (2002-), male, born in Shangrao city, Jiangxi province, postgraduate student, mainly engaged in engineering blasting and rock dynamics, (E-mail) 2895390356@qq.com.

Fund Programs: Research on Blasting Ore-drawing Technology without Free Cutting Face for Complex Ore Bodies (2024-Science A13)

failing through the formation of a dominant central fracture. A strong positive correlation was observed between increasing impact pressure and improvements in both dynamic tensile strength and loading rate. In contrast, low-grade iron ores exhibit dispersed crack propagation along pre-existing internal joints due to their structural heterogeneity. The dynamic tensile strength and loading rate exhibit less predictable trends in these specimens, which are predominantly governed by joint network characteristics. Energy dissipation analysis indicates superior energy absorption capacity in high-grade ores, where failure mechanisms are primarily determined by mineral grain strength, while low-grade ore failure is dictated by joint plane integrity. Comparative analysis reveals that under identical impact pressure conditions, high-grade iron ores exhibit superior mechanical performance compared to low-grade specimens, with higher loading rates, dynamic tensile strength, peak tensile strain capacity, and energy absorption. This study confirms the substantial influence of both lithological characteristics and ore grade classification on mechanical properties. These findings establish a theoretical framework for optimizing blasting parameters and implementing effective damage mitigation strategies in iron ore mining operations.

Key words: dynamic tensile mechanical properties; iron ore; SHPB system; crack propagation; digital image correlation(DIC) technology

矿山开采过程中采用爆破作为主要的破岩方式,在采矿过程中由于矿石抗拉强度远低于抗压强度,在受动态荷载作用时通常会发生拉伸破坏,而这种破坏通常矿岩的岩性和荷载加载的率有强相关性。因此,研究不同矿岩在不同动荷载作用下的动态拉伸力学特性,为矿山高效、安全和精准爆破能够提供一定的参考依据。

由于直接拉伸方法测试岩石动态拉伸力学性能较为困难,因此最简单而有效的方法为对圆盘型试件开展间接动态拉伸试验以得到试样的动态拉伸力学性能^[1]。对巴西圆盘试件的静态拉伸力学性能的研究已经非常成熟^[2-5],同时在此基础上发展出了使用分离式霍普金森杆(SHPB)对圆盘型试件进行动态拉伸力学测试的方法。徐胜男等对双椭圆缺陷夹角不同的花岗岩试件进行了动态劈裂拉伸实验^[6],研究了双椭圆缺陷夹角、缺陷间距与花岗岩破坏形态及能量之间的关系;袁琪等结合 XRD 和 PFC 技术对不同温度的煤样进行不同加载速率的动态拉伸试验^[7],发现煤样的抗拉强度与耗散能随温度的升高而减小,抗拉强度、入射能与耗散能随冲击速度的增大而增大,且热处理后煤样的速率依赖性减弱;段继超等结合 DIC 和裂纹分析工具对不同干湿循环等级的石灰岩试样开展动态劈裂试验^[8],发现随着干湿循环次数的增加,岩样承载能力下降,其发生破坏时所需吸收能减小,同时分形维数明显增大;杨国梁等结合 DIC 对冻融循环次数不同的砂岩试件进行动态劈裂试验^[9],发现不同冻融循环作用下冻结砂岩与普通砂岩的动态拉伸曲线有着相似的应力发展特点,但峰值应力与冻融循环次数之间呈现出先增大后减小的趋势;缪逢晨等结合数值计算和实验室实验的方法重点分析大理岩劈裂过程中

的裂纹扩展机制以及能量演化特征^[10],发现在一定应变率内大理岩的动态拉伸强度与应变率呈线性正相关,随着弹速的增加,系统内能和动能均增大,在试样破坏的瞬间系统内能降至最低;郑翔等结合 XRD 对经过不同 PH 值的酸溶液腐蚀后的煤样进行动态拉伸试验^[11],发现煤的动态拉伸强度表现出显著的速率依赖性,而酸腐蚀会削弱这种速率效应,酸性越强,削弱作用越显著,酸对煤的损伤表现在其对煤中无机矿物及小分子有机物的去除作用,将导致煤力学性能下降;平琦等对煤矿砂岩进行动态劈裂试验^[12],发现砂岩试件拉伸应力强度与吸收能量随平均应变率增加近似对数关系增加,表现出显著的应变率相关性;杨仁树等结合 DIC 对红砂岩、灰砂岩和花岗岩分别进行动态劈裂实验^[13],详细阐述了 3 种岩石的拉伸应变场和剪切应变场的动态演化规律,不同冲击速度和不同加载率下 3 种岩石的动态拉伸强度、拉伸敏感系数和破坏形态的变化规律,以及波阻抗对岩石动态拉伸力学性能的影响。除实验室试验外,部分学者也采用理论分析和数值计算的方法对岩石的动态拉伸力学性能进行了相关研究^[14-18]。

以上研究针对岩石在不同环境、不同加载率等预制条件下展开了研究,但多集中于岩石而非金属矿矿石,在金属矿山采矿时爆炸应力波直接作用于矿石,同样的炸药单耗下,矿石岩性不同会导致采矿时的周围损伤和破碎块度均不同,铁矿石相对其他种类矿石较为特殊,其含金属成分较高且通常品位变化较大,不同采场的矿石可能其品位、岩性变化很大,因此有必要对不同品位的铁矿石开展动态劈裂试验以探究其动态拉伸力学特性及受力后的应变随品位、岩性和不同受力情况变化的规律,从而对不同

采场的炸药单耗选取提供一定的依据。

1 实验概述

1.1 试样制备

实验材料取自辽宁辽阳市某铁矿的铁矿石,高品位铁矿石含铁量在 60% 以上且无明显节理裂隙,低品位铁矿石含铁量在 10% 到 20% 之间且节理裂隙较为发育,根据相关地质资料高品位铁矿石为受热液作用形成的蚀变岩,致密块状,中、细粒结构,有部分绿泥石混入;低品位铁矿石为岩浆岩中的磁铁矿石岩,有部分花岗岩混入。根据国际岩石力学学会 (ISRM) 的建议^[19],将两种铁矿石取芯,切样并加工为 $\phi 50 \times 25$ mm 的圆柱体试样。为减小摩擦效应的影响对试样端部和四周进行打磨,将试样端面不平行度与不垂直度控制在 0.02 mm 之内,使用白哑光漆和黑斑贴纸对加工好的试样表面进行制斑处理,散斑大小、密度和不规则度等满足数字图像相关计算要求^[20],加工好的高品位、低品位以及制斑后的试样如图 1 所示。

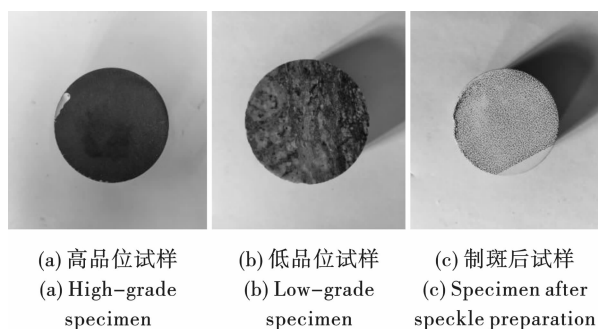


图 1 不同品位试样及制斑后试样

Fig. 1 Samples of different grades and spot-prepared samples

1.2 试验方案

不同品位铁矿石的动态劈裂试验借助图 2 所示的 SHPB 系统和超高速数字图像相关试验系统 (DIC) 完成。SHPB 系统由发射装置、子弹、测速装置、入射杆、透射杆、吸能杆、预应力 (轴压) 加载装置和数据采集装置 (应变片、桥盒、超动态应变仪) 组成。其中,子弹、入射杆、透射杆和吸能杆直径均为 50 mm,长度分别为 400 mm、3000 mm、2500 mm 和 1000 mm。杆件与子弹材质为低碳弹簧钢,弹性模量为 206 GPa,密度为 7740 kg/m³,弹性波速为 5140 m/s,泊松比为 0.35。通过控制子弹在杆件中的位置或者发射装置气压来控制子弹的速度,应力波在杆件中传播产生应变信号被应变片捕捉并通过超动态应变仪采集。根据一维应力波传播理论和应力均匀性假定^[21],在满足应力平衡且试件高径比始

终为 0.5 的前提下,可采用下式计算拉伸应力

$$\sigma_{yy}(t) = \frac{AE\varepsilon_t}{A_0} \quad (1)$$

式中: σ_{yy} 为试样动态拉伸强度; A 、 E 分别为杆件横截面积和弹性模量; ε_t 为透射杆应变。

超高速数字图像相关试验系统 (DIC) 由高速相机、照明系统、触发和同步控制系统和计算分析系统组成。子弹撞入射杆产生的入射脉冲信号由前端的应变片连接超动态应变仪转化为电压信号触发高速相机工作,相机触发延时设置为 300 μ s,高速相机同步触发闪光灯工作。根据冲击气压分别将高品位试样和低品位试样分为三组,高品位试样的冲击气压分别设置为 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa,低品位试样的冲击气压分别设置为 0.2 MPa、0.25 MPa、0.3 MPa,记录每一次冲击时超动态应变仪采集的数据。用高速相机记录每一次冲击的图像,进行计算分析得出应变云图。高品位和低品位的每个冲击气压进行 5 次重复试验并选取实验结果最接近平均值的试样进行分析,在入射杆前贴圆形橡胶片整形器形成正弦波加载。

1.3 动态应力平衡验证和加载率确定

SHPB 得出准确的结果前提条件为试样达到动态应力平衡状态,典型试样应力平衡验证如图 3 所示,由图 3 可以看出透射波与入射波 + 反射波基本重合,表明试样在冲击加载过程中试样处于动态平衡状态。各试样每次受冲击时动态受力平衡均得到验证。加载率是确定岩石材料动态拉伸强度的重要参数之一,加载率可以通过岩石材料的动态拉伸应力—时程曲线确定,典型试样的加载率确定曲线如图 3 所示,可以看出在达到峰值应力前,应力—时程曲线中存在近似线性增长变化的阶段,将该近似线性阶段的由最小二乘法拟合出的直线的斜率定义为加载率 $\dot{\sigma}$,本文所有试样的加载率均由此方法获得。

2 实验结果分析

2.1 破坏过程及破坏形式

不同品位的铁矿石在受冲击后的破坏过程和破坏形式有很大的不同,借助超高速摄像机记录其动态拉伸破坏过程,帧率为 34 008 fps,拍摄频率为 29.4 μ s/frame,图像分辨率为 768 pixel $\times$ 768 pixel,不同品位铁矿石的破坏过程图如图 4 所示,冲击气压为 0.2 MPa,上方为高品位铁矿石,下方为低品位铁矿石。使用 VIC-2D 软件进行分析处理,选择圆盘整个圆形面 (AOI 区域) 进行计算分析,软件会自动计算可计算的部分,并在 AOI 区域沿加载方向和

垂直加载方向布置 $P_0 \sim P_4$ 共 5 个测点,如图 4 所

示,子区大小和步长设置为 29 和 7。

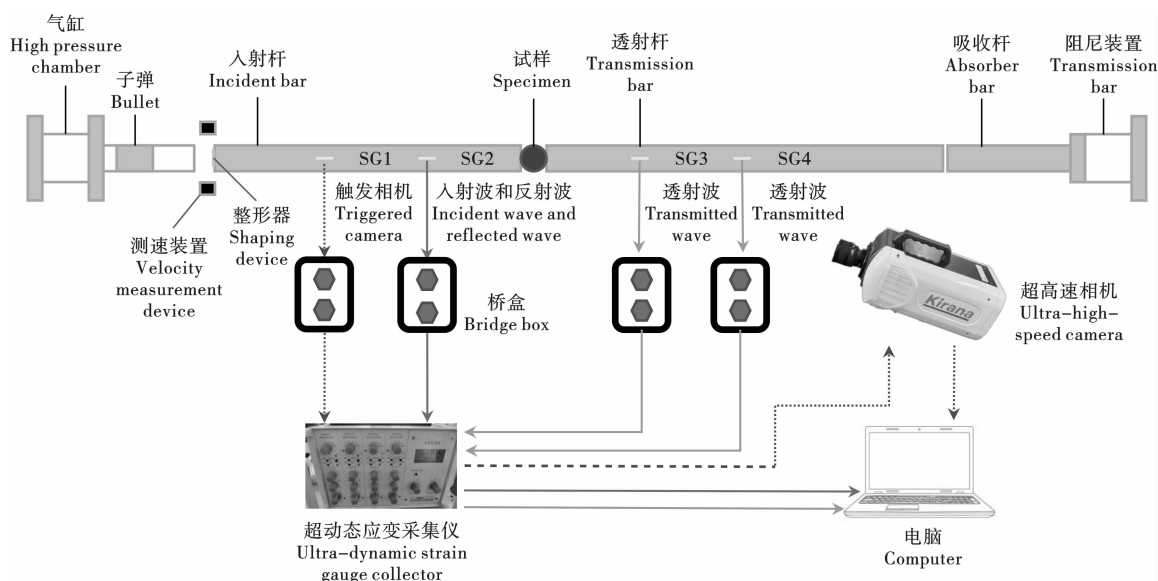


图 2 分离式霍普金森杆及超高速相机系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of split Hopkinson pressure bar (SHPB) and ultra-high-speed camera system

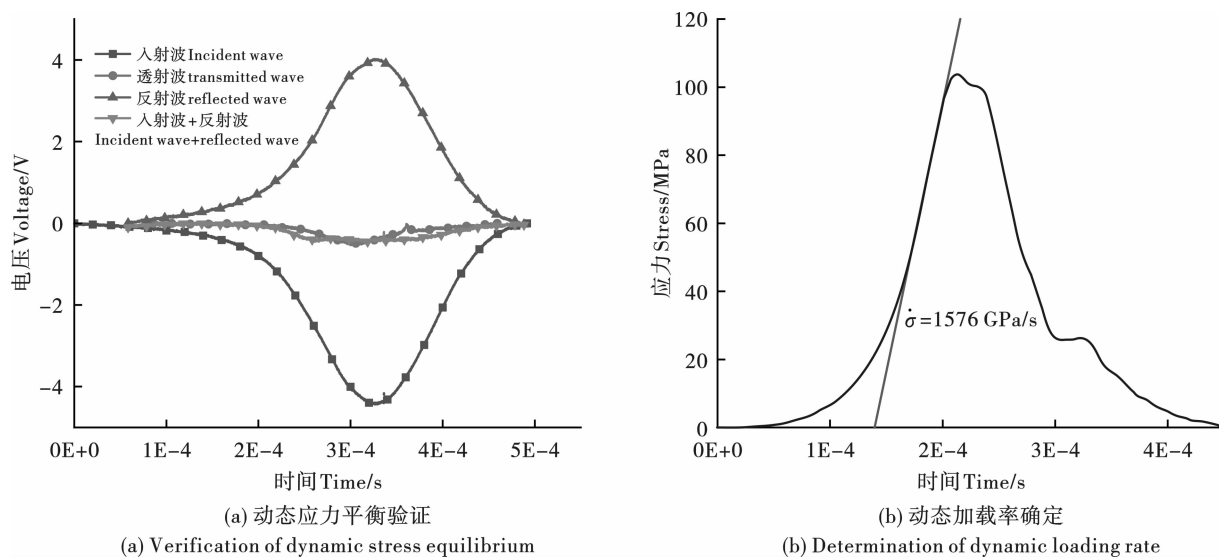


图 3 动态应力平衡验证及加载率确定图

Fig. 3 Dynamic stress equilibrium verification and loading rate characterization diagram

高品位铁矿石受冲击时,主裂纹先从试样中心生成并逐渐扩大直到将试样分为两半,此时试样上半部分继续承压生成一条次生裂纹;低品位铁矿石受冲击时,主裂纹随试样内部节理处的弱面生成直到贯穿试样,之后上半部分继续承压并生成一条次生裂纹。高品位铁矿石的裂纹扩展速度大于低品位铁矿石的裂纹拓展速度,这是由于低品位铁矿石节理发育,应力波传播速度低于高品位铁矿石,故裂纹发育速度低于高品位铁矿石。冲击后,高品位铁矿石试样大部分只有中心产生一条主裂纹,上半部分生成一条次生裂纹,而低品位铁矿石的破坏形式则

受其内部的节理影响而无统一破坏形式,破坏形式随节理不同有很大不同。从不同品位铁矿石岩性分析,高品位铁矿石的动态抗拉强度受节理影响小,动态拉伸力学性质由其矿物组成形式与成分决定;低品位铁矿石的动态抗拉强度受节理面影响大,动态拉伸强度受其矿物组成与成分影响但由节理面决定。

2.2 应变云图分析

使用 VIC—2D 软件计算不同冲击气压的高品位、低品位铁矿石的应变,篇幅原因不一列出,规律相近,只取代表性试样的应变云图。图 5、图 6 分

别为高品位和低品位铁矿石在冲击气压为 0.2 MPa 时的 Von Mises 应变云图,紫色区域为低应变区域,红色区域为高应变区域,其他颜色分别表示不同程度的应变区域。从图 5 可以看出,受冲击后高品位铁矿石的高应变先从右侧与透射杆接触部分开始,而后蔓延到试样中心位置,在试样发生拉伸性破坏后(中心主裂纹贯穿试样),试样两侧与入射杆和透射杆接触位置还有部分残留并且上部试样开始出现高应变并出现次生裂纹,这说明高品位铁矿石在受拉伸破坏时先生成贯穿中心的主裂纹而后剩余部分仍会继续承压,根据图 7 对比不同冲击气压的破坏形态发现有一定的规律性。从图 6 可以看出,受冲

击后低品位铁矿石高应变先从上部的节理面开始,而后与其他节理面产生的高应变相互交融贯通,中心主裂纹沿左向右拓展后沿节理面分叉,裂纹沿试样内部节理面生成,主破坏发生后上半部分继续承压并出现高应变。这说明低品位铁矿石的组成矿物本身的动态抗拉强度大于其内部节理面的动态抗拉强度,其节理面成为弱面,故破坏沿弱面产生,低品位铁矿石的动态抗拉强度实际上是由其内部的节理面的动态抗拉强度决定的^[20],但其内部的节理面分布极不规律,根据图 7 对比不同冲击气压的破坏形态发现无一定的规律性。

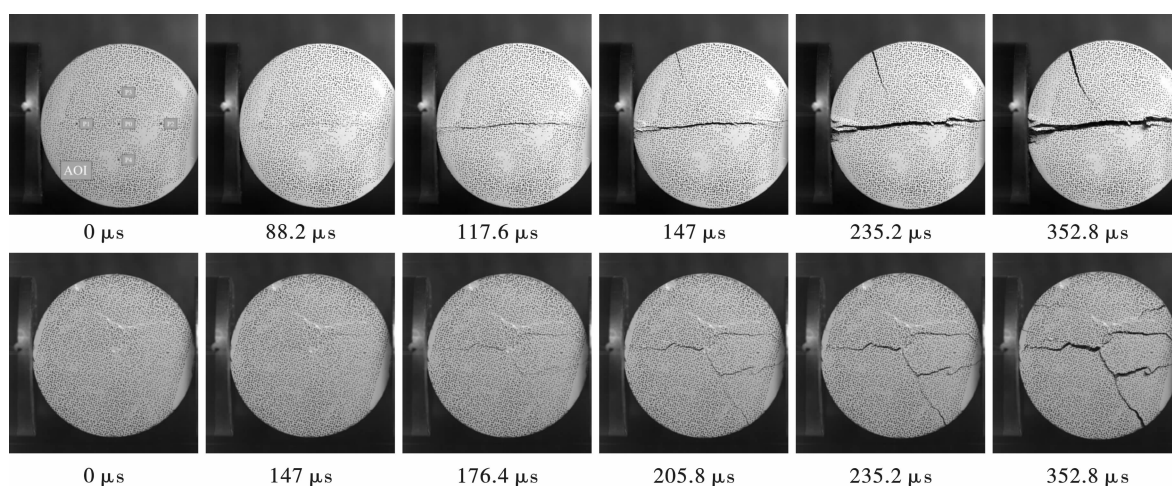


图 4 不同品位铁矿石破坏过程及破坏形式

Fig. 4 Failure process and modes of different grades of iron ore

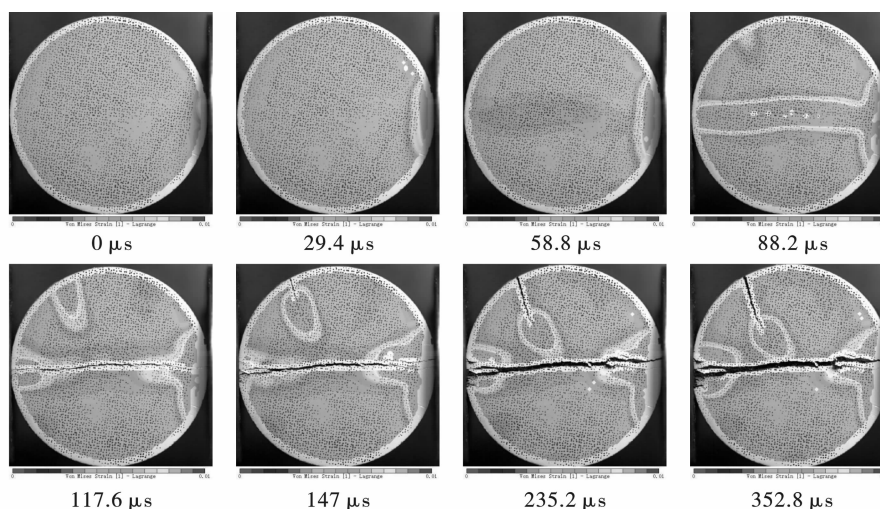


图 5 高品位铁矿石动态拉伸 Von Mises 应变云图

Fig. 5 Von Mises strain contour of high-grade iron ore under dynamic tensile loading

提取 P_0 测点的最大拉伸应变数据绘制最大拉伸应变—冲击气压图,如图 7 所示,图中高品位铁矿石的应变取值范围为 $-0.01 \sim 0.01$,低品位铁矿石

的应变取值范围为 $-0.001 \sim 0.001$,云图为达到最大拉伸应变时刻的 e_{yy} 应变云图。由图 7 可以看出高品位铁矿石 P_0 测点处的最大拉伸应变随冲击气

压变化呈现一定的线性变化特征,不同冲击气压间最大拉伸应变增幅相近,破坏形式均为沿中心拉伸破坏;低品位铁矿石 P_0 测点出的最大拉伸应变随冲击气压的变化呈现非线性变化的特征,不同冲击气压间的最大拉伸应变增幅大,破坏模式为沿中心和沿节理面拉伸破坏,说明低品位铁矿石的破坏模式受节理面影响大。相比同一冲击气压的高品位铁矿石最大拉伸应变与低品位铁矿石的最大拉伸应变,

高品位铁矿石的最大拉伸应变总是大于低品位铁矿石的最大拉伸应变,但最大拉伸应变的增幅低品位铁矿石远大于高品位铁矿石。相同冲击气压作用下,高品位铁矿石的能量集中作用在中心部分的裂纹拓展;低品位铁矿石吸收的能量会被其内部的节理面分散,只有部分能量作用于试样中心部分裂纹拓展,故其中心部分拉伸应变小于高品位铁矿石中心部分拉伸应变。

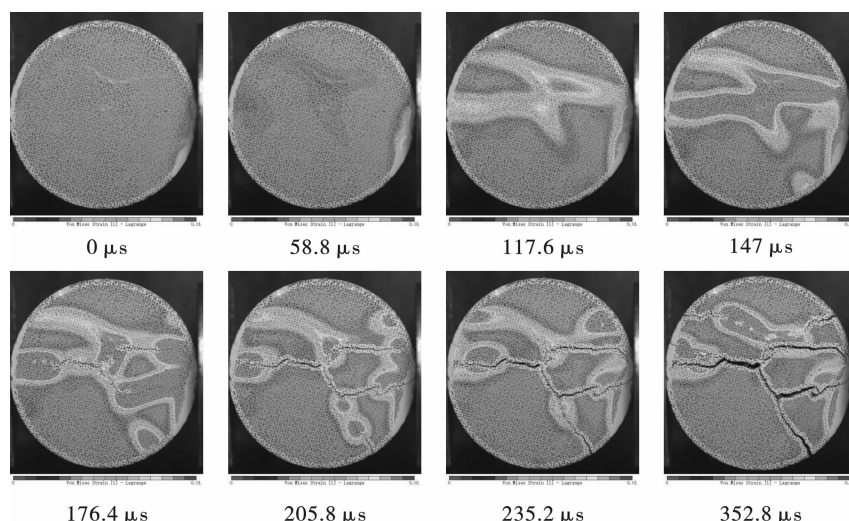


图6 低品位铁矿石动态拉伸 Von Mises 应变云图

Fig. 6 Von Mises strain contour of low-grade iron ore under dynamic tensile loading

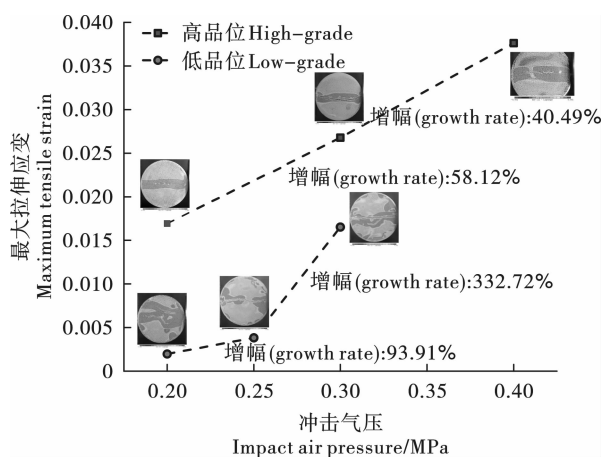


图7 最大拉伸应变随冲击气压变化规律

Fig. 7 Variation of maximum tensile strain with impact air pressure

2.3 应力-时程曲线特性分析

图8为不同品位铁矿石动态拉伸应力-时程曲线,定义应力随时间上升段中曲线段转变到直线段的点为应力-时程曲线拐点,拐点出现前应力随时间增长率缓慢升高,此时试样未被破坏,拐点出现后试样受拉应力作用起裂,此时对应的应力大小为出现张拉性裂纹所需的损伤应力,拐点出现后试样应

力随时间增长率几乎不变,此时试样裂纹拓展。高品位铁矿石集中在 $100 \sim 125 \mu s$ 出现拐点,对应的应力大小在 $15 \sim 20 \text{ MPa}$ 之间;低品位铁矿石集中在 $200 \mu s$ 左右出现拐点,对应的应力大小在 $5 \sim 10 \text{ MPa}$ 之间,高品位铁矿石出现损伤的时间早于低品位铁矿石而损伤应力大小大于低品位铁矿石,从上文的 Von Mises 应变云图可以看出低品位铁矿石受冲击时冲击的能量会分散至各个节理面释放而高品位铁矿石会集中至试样中心部位释放,由于高品位铁矿石的能量释放更集中,故其出现损伤应力所需的时间更短,低品位铁矿石节理面的动态抗拉强度低于高品位铁矿石矿物本身的动态抗拉强度,故低品位铁矿石出现损伤的损伤应力值小。定义应力-时程曲线在第一次上升段的最高点为其动态抗拉强度,在之后的下降段第二次上升的最高点称为二次峰值,可以看出无论是高品位铁矿石还是低品位铁矿石的应力-时程曲线都会出现二次峰值,这是因为在受冲击时试样产生拉伸破坏后剩余试样继续承压。高品位和低品位铁矿石二次峰值大小均随冲击气压的增大而减小,说明随着冲击气压的增大试样被破坏的程度随之增大,剩余试样的承压能力减

小;高品位铁矿石应力-时程曲线的拐点、动态抗拉强度点和二次峰值点出现时间整体早于低品位铁矿石,这是冲击能量作用方式的不同导致的。

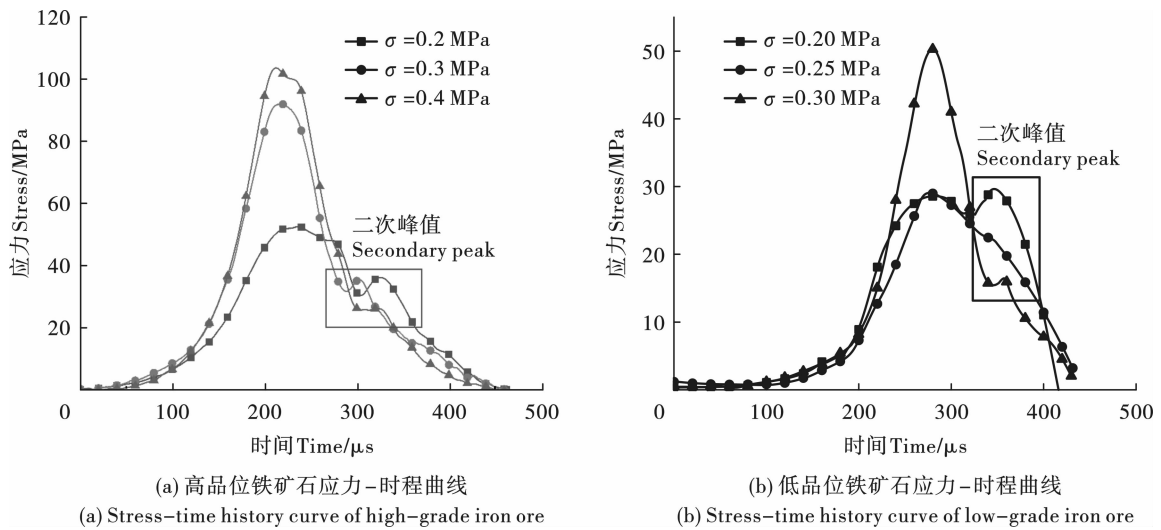


图 8 不同品位铁矿石应力-时程曲线
Fig. 8 Stress-time curves of different grades of iron ore

2.4 动态拉伸强度与能量分析

表 1 为不同冲击气压不同铁矿石的加载率、抗拉强度、吸收能和能量吸收率数据。分析表 1 数据,高品位铁矿石的加载率与所受冲击气压成正比,而低品位铁矿石加载率不与其所受冲击气压成正比。高品位铁矿石无节理面,不同试样之间岩石力学性质差异不大,可视为各向同性的均质体,裂纹的拓展速度受岩性的影响小受冲击气压的影响大;低品位铁矿石试样矿物颗粒间的强度大于节理面的强度,使其破坏受节理面控制,而其内部节理面发育,不同试样间节理面强度不同,在受冲击时入射波与

节理面角度不同,裂纹的拓展速度随岩性的变化大,在受冲击时的破坏响应规律更多地取决于试样内部节理面的发育程度。相同冲击气压条件下,高品位铁矿石的加载率与抗拉强度明显大于低品位铁矿石,这是由于高品位铁矿石受冲击时能量集中于中心裂纹的拓展和微裂纹的生成,而低品位铁矿石会裂纹会随节理面产生拓展且无微裂纹生成;高品位铁矿石的动态抗拉强度是矿物颗粒间的动态抗拉强度,而低品位铁矿石的动态抗拉强度是节理面的动态抗拉强度,故相差较大。

表 1 不同冲击气压不同铁矿石加载率与动态抗拉强度、吸收能关系

冲击气压 Impact air pressure/ MPa	高品位试样 High-grade specimen				低品位试样 Low-grade specimen			
	加载率 Loading rate/ (GPa · s ⁻¹)	动态抗拉强度 Dynamic tensile strength/MPa	吸收能 Absorbed energy/J	能量吸收率 Energy absorption rate	加载率 Loading rate/ (GPa · s ⁻¹)	动态抗拉强度 Dynamic tensile strength/MPa	吸收能 Absorbed energy/J	能量吸收率 Energy absorption rate
0.20	499.55	52.62	204.42	34.95%	333.29	29.66	75.51	18.53%
0.25	—	—	—	—	301.92	29.06	62.11	7.31%
0.30	1055.43	92.14	470.34	30.45%	671.18	50.29	221.53	16.04%
0.40	1379.94	104.09	729.72	30.35%	—	—	—	—

受冲击荷载岩石的破坏总是伴随着能量的输入、聚集、耗散和释放^[22],当子弹撞击入射杆时产生应力波沿入射杆向后传播,形成弹性应变能入射能 E_i ;当应力波传至试件时,部分能量沿入射杆返回,

形成反射能 E_r ;部分能量透过试件沿投射杆继续传播,形成透射能 E_t ;剩余的能量作用于岩石的变形和破坏,即为吸收能 E_s 。能量计算方法如下式所示^[23]

$$E_j = A_0 E_0 C_0 \int \varepsilon_j^2 dt, j = i, r, t \quad (2)$$

$$E_s = E_i - E_r - E_t \quad (3)$$

式中: A_0 为杆件横截面积; E_0 为杆件弹性模量; C_0 为杆件内波速; $\varepsilon_{i,r,t}$ 分别为入射波, 反射波和透射波。岩石在动态荷载加载过程中储存的能量可分为两个部分: 一部分为可逆的弹性应变能; 一部分为不可逆的吸收能^[24], 定义吸收能与入射能的比值为能量吸收率, 计算后不同冲击气压的不同品位试样能量分析见表1。加载率升高意味着破坏过程中试样裂纹拓展速度变快并产生更多的微裂纹, 导致试样动态抗拉强度增大, 从而需要吸收更多的能量达到破坏, 通过分析表1数据可知无论是高品位还是低品位铁矿石动态抗拉强度与加载率成正比, 吸收能与动态抗拉强度成正比, 动态抗拉强度和吸收能都有明显的率效应, 随加载率的变化而变化。对比分析高品位和低品位铁矿石的各项数据, 相同冲击气压下高品位铁矿石的各项数据均高于低品位铁矿石。对比加载率可知高品位铁矿石受冲击后的裂纹拓展速度大于低品位铁矿石的裂纹拓展速度, 根据上文的 Von Mises 应变分析高品位铁矿石裂纹拓展集中于中心位置而低品位铁矿石的裂纹拓展分散到节理弱面中的, 高品位裂纹拓展的能量集中而低品位的裂纹拓展能量分散, 故同样的冲击气压高品位铁矿石的加载率高于低品位铁矿石。抗拉强度和吸收能的差异则说明高品位铁矿石的动态抗拉强度大于低品位铁矿石的动态抗拉强度, 且在加载过程中有更多的微裂纹生成。能量吸收率的差异则说明, 高品位铁矿石在加载过程中生成微裂纹吸能而低品位铁矿石在加载过程中能量只沿节理弱面释放, 节理弱面吸能能力低而微裂纹拓展能吸收更多的能量。综上, 高品位铁矿石的动态拉伸破坏由矿物颗粒间的强度决定, 有率相关性; 低品位铁矿石的动态拉伸破坏由节理面的强度决定, 有率相关性。在面对不同品位的铁矿石采矿作业时着重分析其岩性和节理面的强度, 这对不同采场炸药单耗的确定和周围采场的损伤控制有重要意义。

3 结论

本文通过动态劈裂试验系统研究不同岩性、品位铁矿石的动态拉伸力学特性, 揭示了二者破坏机制与力学性能的差异。

(1) 高品位铁矿石因结构致密、节理不发育, 动态拉伸破坏表现为中心主裂纹快速扩展, 动态抗拉强度、加载率及能量吸收率均显著高于低品位铁矿

石, 且随冲击气压升高呈线性增长趋势。低品位铁矿石因内部节理发育, 裂纹沿弱面分叉扩展, 力学参数离散性大, 其动态抗拉强度主要由节理面强度决定, 能量吸收能力较弱。

(2) 试验表明, 铁矿石的岩性特征(矿物组成、节理分布)对其动态拉伸响应具有决定性影响。在受动载时, 不同岩性铁矿石起裂时间不同, 且能量作用在拉伸破坏上的方式不同, 而在发生拉伸破坏后, 剩余试样均会继续承压。

(3) 研究结果可为金属矿山爆破设计中炸药单耗优化及破碎块度预测提供重要参考。未来需进一步结合多尺度数值模拟及现场试验, 深化不同岩性铁矿石的动态力学行为与工程应用关联性研究。

参考文献 (References)

- [1] None. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1978, 15 (3): 99-103.
- [2] 王启智, 贾学明. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度——第一部分: 解析和数值结果 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002 (9): 1285-1289.
- [2] WANG Qi-zhi, JIA Xue-ming. Determination of elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks using flattened Brazilian disc (FBD) specimens-part I: Analytical and numerical results [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002 (9): 1285-1289. (in Chinese)
- [3] 王启智, 吴礼舟. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度——第二部分: 试验结果 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004 (2): 199-204.
- [3] WANG Qi-zhi, WU Li-zhou. Determination of elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks using flattened Brazilian disc (FBD) specimens-part II: Experimental results [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004 (2): 199-204. (in Chinese)
- [4] 陈沙, 岳中琦, 谭国焕. 基于数字图像的非均质岩土工程材料的数值分析方法 [J]. 岩土工程学报, 2005 (8): 956-964.
- [4] CHEN Sha, YUE Zhong-qi, TAN Guo-huan. Digital image-based numerical analysis method for heterogeneous geotechnical materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005 (8): 956-964. (in Chinese)
- [5] LI D, WONG L N Y. The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2013, 46 (2): 269-287. DOI:10.1007/s00603-012-0257-7.

- [6] 徐胜男,彭麟智,王 煦,等. 动态劈裂拉伸实验下含双椭圆缺陷花岗岩的动态断裂行为[J]. 科学技术与工程,2025,25(6):2218-2226.
- [6] XU Sheng-nan, PENG Lin-zhi, WANG Xu, et al. Dynamic fracture behavior of granite containing double elliptical flaws under dynamic splitting tensile loading[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2218-2226. (in Chinese)
- [7] 袁 琪,韩文梅,郑 翔,等. 高温对煤的动态拉伸力学性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025,46(2):197-207.
- [7] YUAN Qi, HAN Wen-mei, ZHENG Xiang, et al. Effect of high temperature on dynamic tensile mechanical properties of coal[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025,46(2):197-207. (in Chinese)
- [8] 段继超,宗 琦,高朋飞,等. 冲击荷载作用下干湿循环石灰岩拉伸破坏特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2024,43(24):204-215,233.
- [8] DUAN Ji-chao, ZONG Qi, GAO Peng-fei, et al. Experimental study on tensile failure characteristics of limestone under wet-dry cycles subjected to impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024,43(24):204-215, 233. (in Chinese)
- [9] 杨国梁,尚 卓,邹泽华,等. 冻融循环下砂岩的动态劈裂特性与应变演变机理[J]. 矿业科学学报,2024, 9(2):199-208.
- [9] YANG Guo-liang, SHANG Zhuo, ZOU Ze-hua, et al. Dynamic splitting characteristics and strain evolution mechanism of sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(2): 199-208. (in Chinese)
- [10] 缪逢晨,王志亮,孙 盼,等. 锦屏大理岩动态劈裂拉伸破坏及能量演化特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2024,51(2):155-162.
- [10] MIAO Feng-chen, WANG Zhi-liang, SUN Pan, et al. Analysis of dynamic splitting tensile failure and energy evolution characteristics of jinping marble[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024,51(2):155-162. (in Chinese)
- [11] 郑 翔,韩文梅. 酸腐蚀对煤动态拉伸强度及能量耗散影响的试验研究[J]. 煤炭工程,2024,56(1):177-182.
- [11] ZHENG Xiang, HAN Wen-mei. Experimental study on the effects of acid corrosion on the dynamic tensile strength and energy dissipation of coal[J]. Coal Engineering, 2024,56(1):177-182. (in Chinese)
- [12] 平 琦,马芹永,袁 璞. 岩石试件 SHPB 劈裂拉伸试验中能量耗散分析[J]. 采矿与安全工程学报,2013, 30(3):401-407.
- [12] PING Qi, MA Qin-yong, YUAN Pu. Analysis of energy dissipation in SHPB splitting tensile tests of rock specimens[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3):401-407. (in Chinese)
- [13] 杨仁树,李炜煜,李永亮,等. 3 种岩石动态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. 煤炭学报,2020,45(9): 3107-3118.
- [13] YANG Ren-shu, LI Wei-yu, LI Yong-liang, et al. Experimental and comparative analysis of dynamic tensile mechanical properties of three types of rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(9):3107-3118. (in Chinese)
- [14] 宫凤强,李夕兵,董陇军. 圆盘冲击劈裂试验中岩石拉伸弹性模量的求解算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(4):705-713.
- [14] GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, DONG Long-jun. An algorithm for solving the tensile elastic modulus of rock in disk impact splitting test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(4):705-713. (in Chinese)
- [15] 孙 倩,李树忱,冯现大,等. 基于应变能密度理论的岩石破裂数值模拟方法研究[J]. 岩土力学,2011, 32(5):1575-1582.
- [15] SUN Qian, LI Shu-chen, FENG Xian-da, et al. Research on numerical simulation method for rock fracture based on strain energy density theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(5):1575-1582. (in Chinese)
- [16] 黄耀光,王连国,陈家瑞,等. 平台巴西劈裂试验确定岩石抗拉强度的理论分析[J]. 岩土力学,2015, 36(3):739-748.
- [16] HUANG Yao-guang, WANG Lian-guo, CHEN Jia-rui, et al. Theoretical analysis on determining rock tensile strength by platform brazilian splitting test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(3):739-748. (in Chinese)
- [17] DAI F, HUANG S, XIA K, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using Split Hopkinson Pressure Bar[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2010,43(6):657-666. DOI: 10. 1007/s00603-010-0091-8.
- [18] 潘 兵,吴大方,夏 勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. 实验力学,2010,25(2):120-129.
- [18] PAN Bing, WU Da-fang, XIA Yong. Research on quality evaluation of speckle patterns in digital image correlation method[J]. Experimental Mechanics, 2010,25(2):120-129. (in Chinese)