

真三轴条件下含隐伏结构面岩体的岩爆特征研究

李群^{1,2,3}, 胡子浩¹, 李示波¹, 梁鹏^{1,2}, 韩强^{1,2}, 杨思浩¹, 刘紫琼¹

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063000; 2. 河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 河北唐山 063000;
3. 华北理工大学建筑工程学院, 河北唐山 063000)

摘要: 含结构面岩体岩爆是损害人员和财产安全的重要灾害之一。基于真三轴单面临空加载岩爆试验, 联合声发射监测、三维扫描技术, 研究了隐伏贯通结构面参数对花岗岩的岩石强度、岩爆特征和破坏形态的影响, 分析了结构面抗剪强度与岩爆坑体积之间的关系。研究表明: 含不同结构面的岩石抗压强度均有折减; 结构面倾角于 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内时, 其减弱岩石强度的能力先增大后减小, 结构面倾角改变, 岩爆位置及损伤程度随之改变; 结构面长度增加, 岩石峰值应力减小, 较短的结构面导致岩石发生局部剪切破坏或劈裂破坏, 而较长的结构面则引发整体剪切破坏或滑移破坏; 注浆可使含结构面岩石抗压强度提升11.6%左右, 结构面注浆能够减少剪切作用下结构面位置岩块变形和位移; 结构面的存在可使岩石屈服阶段时间占比增加1%~14%, 使岩石破坏过程能量“徒增期”个数扩增, 且结构面注浆可提升岩体在失稳阶段的持续时间; 隐伏贯通结构面的抗剪强度和岩爆剧烈程度存在反比关系, 结构面抗剪强度越高, 岩样分形维数越低, 岩爆坑体积越小, 岩爆剧烈程度减弱。含隐伏结构面岩石的岩爆发生机制主体分为剪切滑移型和张拉-剪切混合型2种。研究成果可为地下开采时在高应力情况下含隐伏贯通结构面岩体的工程灾害防控与治理提供参考。

关键词: 岩爆; 隐伏贯通结构面; 注浆; 岩爆坑

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)03-0623-17

True-triaxial study on the rockburst characteristics of rock mass with a hidden structural plane

LI Qun^{1,2,3}, HU Zihao¹, LI Shibo¹, LIANG Peng^{1,2}, HAN Qiang^{1,2}, YANG Sihao¹, LIU Ziqiong¹

(1. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063000, China;
2. Mine Green Intelligent Mining Technology Innovation Center of Hebei Province, Tangshan, Hebei 063000, China;
3. School of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: Rockburst of rock mass containing structural plane is one of the important disasters that damage personnel and property safety. The true triaxial single-side aerial loading rockburst test were conducted, combined acoustic emission monitoring and three-dimensional scanning technology. The effects of parameters for hidden structural plane on rock strength, rockburst characteristics and failure forms of granite are studied. The relationship between the

收稿日期: 2024-10-11 修回日期: 2025-01-09 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20240484

基金项目: 国家自然科学基金项目(52074123); 河北省自然科学基金项目(E2024209024); 唐山市应用基础研究科技计划项目(24130212C)

通信作者: 胡子浩(1997—), 男, 安徽省滁州市人, 硕士研究生, 从事岩石力学方面的研究。

E-mail: huzihao2021@163.com Tel: 18455050868

引用格式: 李群, 胡子浩, 李示波, 等. 真三轴条件下含隐伏结构面岩体的岩爆特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(3): 623-639.

LI Qun, HU Zihao, LI Shibo, et al. True-triaxial study on the rockburst characteristics of rock mass with a hidden structural plane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 623-639.

shear strength of structural plane and the volume of rockburst pit is analyzed. The results show that the compressive strength of rocks with different structural planes is reduced. For 30° – 60° of the structural plane, the ability of structural planes to weaken rock strength increases first and then decreases. With the change of structural plane angle, the location of rockburst and the degree of rock damage change accordingly. The increase of the length of structural plane, with the peak stress of rock decreases. Localized shear failure or splitting failure in rock is induced by shorter structural planes, global shear failure or slip failure in rock is triggered by longer structural planes. The compressive strength of rock is enhanced by approximately 11.6% due to structural plane grouting, the deformation and displacement of rock blocks at structural planes under shear loading are reduced by structural plane grouting; The proportion of rock yield stage time increases by 1%–14% when the rock contains structural planes. Grouting is demonstrated to extend the instability stage duration. An inverse correlation is identified between the shear strength of hidden structural planes and rockburst intensity. The higher shear strength of structural plane is, the smaller rockburst pit volume becomes and the reduced the rockburst intensity occurs. Rockburst mechanisms in rock with hidden structural planes are classified into shear-slip type and tensile-shear composite type. These findings provide theoretical support for disaster prevention and mitigation in underground engineering involving hidden structural planes under high-stress conditions.

Key words: rockburst; hidden penetrating structural surfaces; grouting; rockburst pit

岩体经过地质活动,内部常孕育几何参数不等的结构面,结构面的存在影响岩体变形和强度性质,导致工程施工时围岩可能发生变形破坏^[1].岩爆是地下工程中常见的灾害,其常导致设备损坏、人员伤亡.深入研究岩爆灾害相关资料,发现其演化过程受岩体结构面影响^[2].目前,深部围岩隐伏贯通式结构面普遍存在并难以观测,开挖卸荷时,高应力下含隐伏结构面岩体的稳态状态被破坏,导致围岩失稳产生岩爆等灾害更为剧烈,破坏模式更加复杂^[3].例如,锦屏二期特大岩爆事故发生后暴露了与施工方向平行的结构面存在^[4].因此,研究含隐伏贯通结构面岩体岩爆破坏力学特性及破坏规律,对研究地下工程岩爆灾害的预防和治理具有一定的科学工程价值和参考意义.

近年来,国内外学者们对含结构面岩体岩爆破坏方式和作用机制开展了相关研究.文献[5]进行了双轴压缩试验,结果表明结构面的存在对岩爆发生起到较为重要的作用,总结出4种岩爆演化模式.文献[6]研究了含结构面试块的真三轴试验,得到了不同结构面倾角及不同岩性下岩体的岩爆特征与破坏机制.文献[7]设计了4种结构面的岩爆试验,结合数值模拟得到不同结构面围岩体在开挖过程中的破坏模式和规律.文献[8]分析了深部隧道结构面引起的岩爆机制.文献[9]基于中国西南深部隧道微震检测信息及构造面和岩爆

特征,发现节理倾角会改变岩爆风险.文献[10]监测了结构面岩爆振动,分析结果表明结构面强度的弱化是岩爆发生的必要条件,发现即时型岩爆或迟滞型岩爆发生的主要根源为结构面强度弱化时空差异.文献[11]通过数值模拟方法研究了围岩存在结构面时的破坏特征变化情况,结果发现围岩板裂化破坏和剪切滑移导致的岩爆均受结构面影响.文献[12]对锦屏二级水电站输水隧洞施工时发生的几起典型岩爆进行分析,发现结构面长度越长,岩爆程度越剧烈.文献[13]分析了中国西南部某铁路隧道发生的40起岩爆事件,发现结构面与主应力夹角越小,结构面滑移型岩爆发生的倾向性越大.

已有研究多聚焦于出露结构面岩体的岩爆演化过程及破坏特征.然而岩体工程中存在诸多隐伏结构面,如梨树沟铁矿因巷道顶板围岩内部隐藏的原生节理及次生结构面较发育,开采时发生了重大冒顶片帮事故;石屏一矿因工作面存在隐伏结构面,施工时发生了较大顶板事故.因此,含隐伏结构面岩体岩爆破坏力学特性以及破坏规律亟待研究^[14].为了预防岩爆发生,地下工程常采用结构面注浆加固岩体,对隐伏贯通结构面在注浆条件下的岩爆破坏机制尚不清楚.

本文通过改变隐伏贯通结构面参数,开展真三轴卸荷-加载岩爆模拟试验,分析岩体岩爆破坏

方式和应力-应变演化特征的差异性,并结合不同注浆材料,探寻隐伏贯通结构面注浆对实际工程的影响.并借助声发射信号演变情况跟踪岩石渐进破裂过程中的声发射演化特征.依据岩爆碎屑分形维数值表征岩石岩爆损伤变量,通过三维扫描技术将岩爆坑体积转换成点云数据,采用八叉树结构对岩爆坑的三维坐标进行量化处理,从而探究不同隐伏结构面下岩体岩爆损伤演化特征.

1 试验介绍

1.1 试验设备

本次试验采用华北理工大学研发的真三轴伺服试验系统,如图 1 所示.该系统主要由真三轴岩爆机框架、三向独立加载系统、全数字伺服控制系统、高精度传感器技术、高速摄像系统、声发射联合检测系统等多种系统组成.加载系统支持轴向静态最大单点垂直荷载 3 200 kN,水平向静态最大单点垂直荷载 2 400 kN,并且支持单面临空下三向五面加载,能够准确还原开挖卸荷后巷道围岩产生的自发型岩爆,联合声发射系统全面记录试块破坏情况.选用先临 Einscan-Pro 三维扫描仪对岩爆试验后试块的岩爆坑进行扫描处理,得出相应体积,结合结构面特性进行分析.



图 1 真三轴伺服试验系统及监测、扫描系统

Fig. 1 True triaxial servo test system with monitoring and scanning capabilities

1.2 岩样制备

花岗岩分布广泛,其变形及强度特征具有很强的代表性,故本项目岩石试样制备选用花岗岩.试验选取的花岗岩岩样均来自同一片区域,从而保证岩样有相似的内部构造,减弱因性质差异和材料的离散化导致的试验结果差异性.对所选岩样进行切割打磨,严格遵守国际岩石力学协会标准,加工成尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm、垂直度与平行度小于 0.02 mm 的光滑立方体试块.经过基本力学试验测得完整岩石的平均密度为 2 592 kg/m³,单轴抗压强度为 170 MPa,平均

纵波波速为 5 300 m/s.试块内部采用水刀切割出不同产状的结构面,厚度保持在 2 mm.岩样如图 2 所示,其中 l 为结构面长度, α 为结构面角度, σ_1 , σ_2 , σ_3 分别为岩样所受不同方向的主应力.

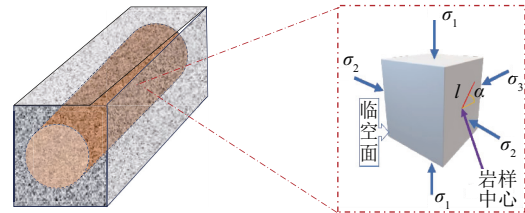


图 2 岩样示意

Fig. 2 Schematic of rock samples

试验采用正交设计分组,且每组试验重复 3 次,取试验结果的平均值.参考文献[15]的试验,具体设计见表 1 及图 3.

表 1 试验分组设计

Table 1 Experimental grouping design

岩样编号	结构面角度/(°)	结构面长度/mm	注浆情况
N			
H-0-30	0	30	环氧树脂
G-0-50	0	50	硅酸盐水泥
H-30-20	30	20	环氧树脂
B-30-30	30	30	不
B-30-50	30	50	不
G-30-50	30	50	硅酸盐水泥
G-45-20	45	20	硅酸盐水泥
B-45-30	45	30	不
H-45-50	45	50	环氧树脂
G-60-30	60	30	硅酸盐水泥
B-60-20	60	20	不
H-60-50	60	50	环氧树脂
H-90-20	90	20	环氧树脂
G-90-30	90	30	硅酸盐水泥
B-90-50	90	50	不

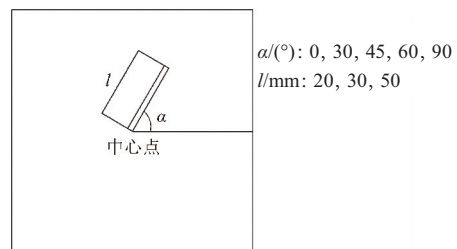


图 3 岩样设计

Fig. 3 Design drawing of rock samples

表 1 中,N 组为完整岩石试样;B 组设计为无注浆试样,试样的结构面角度 α 分别为 0°,30°,45°,60°,90°,长度 l 分别为 20,30,50 mm.隧洞中,岩体中的结构面(如断层、节理等)往往不会恰好位于岩体的中心,因此,将预制结构面中心置于岩样中心以外的位置,可以更真实地模拟实际地质条件,使试验结果更具代表性和实用性,设计结构面起点位于岩样中心位置.工程中常选取水泥、

高分子有机材料、树脂等材料注浆充填,为模拟真实工况,本试验采用硅酸盐水泥与环氧树脂注浆,经测得硅酸盐水泥的抗压强度和抗拉强度分别为 40.3,7.1 MPa,环氧树脂的抗压强度和抗拉强度分别为 18.3,34.1 MPa,其力学性能符合工程所需.注浆时预先使用热熔胶密封结构面一侧,另一侧边注浆边开启震动台震动,直至结构面内部密实,养护 28 d 后去除热熔胶.G 组设计为结构面注入普通硅酸盐水泥,结构面角度和长度变化范围与 B 组相同;H 组设计为结构面中充填环氧树脂,结构面角度和长度变化范围与 B 组相同. B, G, H 这 3 组兼有结构面角度、长度相同的试块,方便对比分析.试块编号的意义:字母 B 为不注浆, G 为硅酸盐水泥, H 为环氧树脂;中间数字为结构面角度;末尾数字为结构面长度.

1.3 加载方案

选取真三轴岩爆机器 Z 向为最大主应力 σ_1 方向, Y 向为中间主应力 σ_2 方向, X 向为最小主应力 σ_3 方向,应力加载方向如图 4a 所示.为模拟巷道含结构面围岩发生自发型岩爆真实情况及寻求注浆对于隐伏贯通结构面岩体岩爆影响,考虑到地下深部巷道围岩真实受力情况,设计真三轴单面卸荷-三向五面加载试验.参考相关试验研究^[16]拟定岩样初始地应力数值,最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 、最小主应力 σ_3 分别设定为 50, 30, 5 MPa.

具体加载设置:参照地下工程施工真实情况,采用恒位移速率 0.3 mm/min 对岩样加载至设定的初始地应力,并保持 300 s 模拟围岩初始状态;为了固定岩样防止向临空面移动,先将 Z 轴轴压以恒位移加载速率 0.3 mm/min 加载至 50 MPa,再同步以 0.3 mm/min 加载速率将 Y 轴和 X 轴轴压分别加载至 30, 5 MPa;卸载 X 轴向一个面作为临空面,保持围压不变恒载 300 s;最后对 σ_1 方向继续以 0.3 mm/min 速率加载直至试块破坏.真三轴加载应力路径如图 4b 所示,图中 σ 为应力, t 为时间.

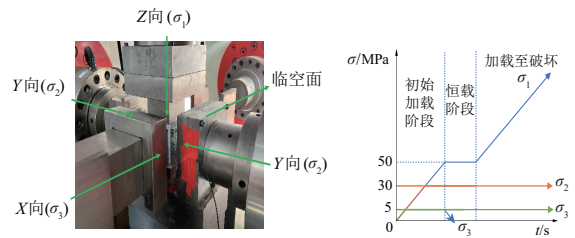


图 4 加载状态及应力路径
Fig. 4 Rock loading state and stress path

2 隐伏结构面参数对岩石力学特征及岩爆破坏形态影响

试验设计的全部岩样沿 σ_1 方向的应力-应变 (σ_1 - ϵ_1) 曲线如图 5 所示,岩样沿 σ_1 方向的峰值应力与应变对比数据见表 2.

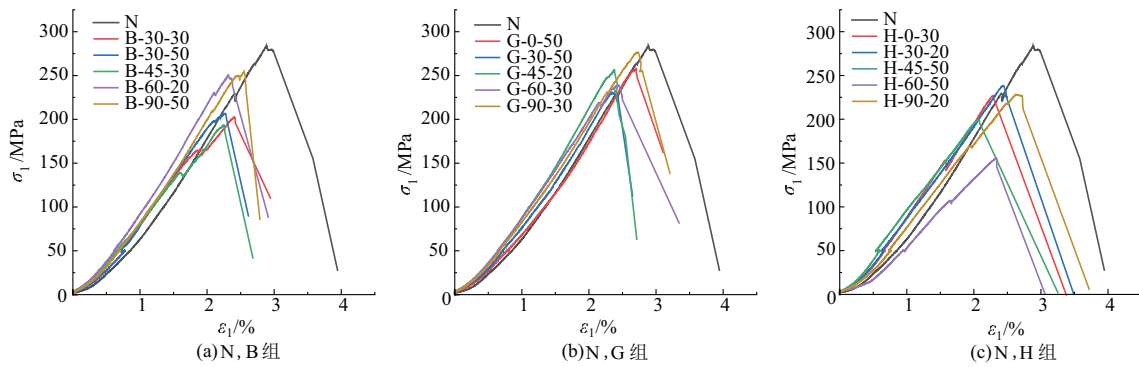


图 5 不同结构面岩石和完整岩石沿 σ_1 方向的应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves in the σ_1 direction of rocks with different structural surfaces and intact rocks

表 2 试样峰值应力、应变及对比数据

Table 2 Peak stress, strain, and comparative data of specimens

岩样编号	峰值应力/ MPa	与完整岩样峰值应力 的比值/%	峰值应变/ %	岩样编号	峰值应力/ MPa	与完整岩样峰值应力 的比值/%	峰值应变/ %
N	278		3.9	H-45-50	199	71	3.2
B-30-30	201	72	2.9	H-60-50	155	55	3.0
B-30-50	206	74	2.6	H-90-20	199	71	3.7
B-45-30	193	69	2.6	G-0-50	257	92	3.1
B-60-20	250	90	2.9	G-30-50	230	82	2.6
B-90-50	254	91	2.7	G-45-20	256	92	2.7
H-0-30	226	81	3.3	G-60-30	238	85	3.3
H-30-20	238	85	3.4	G-90-30	276	99	3.2

由试验结果分析可知,不同隐伏结构面参数的岩样和完整岩样在破坏时沿 σ_1 方向的应力-应变曲线演化模式大致相同,对比文献[15]列举的岩石岩爆过程划分,二者岩石破坏过程与结果相似,故将本文岩样试验过程划分为裂隙压密阶段、线弹性阶段、屈服阶段、塑性变形阶段和岩爆弹射5个阶段。

2.1 倾角对岩石力学特性及岩爆破坏形态影响

2.1.1 倾角对岩石力学特性影响

不同结构面倾角岩样的应力-应变曲线对比情况如图6所示.由图6可见,相较完整岩样的应力-应变曲线,B-30-30,B-45-30岩样的结构面倾角由 30° 增至 45° ,岩样沿 σ_1 方向的峰值应力分别为完

整岩样的72%和69%;H-45-50,H-60-50岩样的结构面倾角由 45° 增至 60° ,岩样沿 σ_1 方向的峰值应力分别为完整岩样的71%和55%;G-60-30,G-90-30岩样的结构面倾角由 60° 增至 90° ,岩样沿 σ_1 方向的峰值应力分别为完整岩样的85%,99%.同参数下结构面倾角由 30° 增至 45° 时,岩样沿 σ_1 方向的极限抗压强度折减3%, σ_1 方向峰值应变由2.9%降至2.7%;同参数下倾角由 45° 增至 60° ,岩样沿 σ_1 方向的极限抗压强度提高21%, σ_1 方向峰值应变增至2.9%;当相同参数下结构面倾角超过 60° 时,结构面削弱岩石抗压强度的效果减弱,当结构面角度为 90° 时,岩样抗压强度为完整岩石的91%,抗压强度受结构面影响较小。

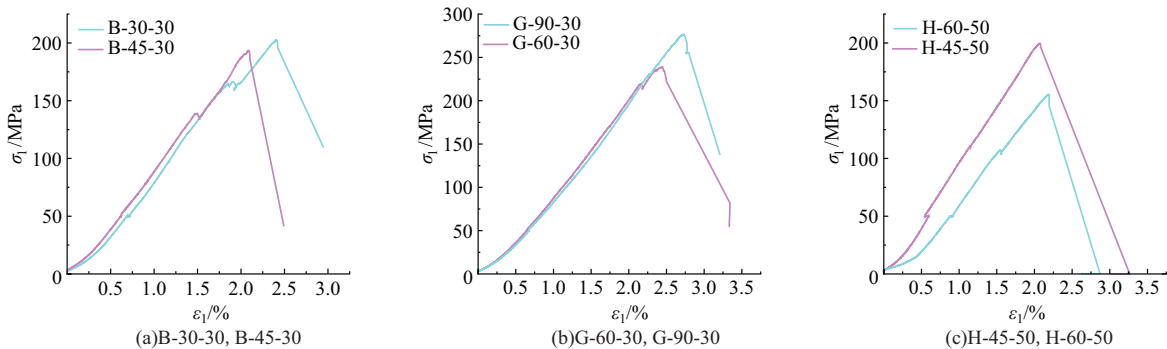


图6 不同结构面倾角岩样的应力-应变曲线对比

Fig. 6 Comparison of stress-strain of rock samples with different inclination angles of structural surfaces

对比(B-30-30,B-45-30),(H-45-50,H-60-50),(G-60-30,G-90-30)这3组岩样的应力-应变曲线发现,只改变结构面倾角情况下,当倾角处于 $30^\circ\sim 45^\circ$, $45^\circ\sim 60^\circ$ 范围内时,结构面抗压强度均呈减弱趋势;当倾角处于 $60^\circ\sim 90^\circ$ 范围内时,结构面抗压强度呈增强趋势.分析认为,当结构面倾角处于 $30^\circ\sim 45^\circ$, $45^\circ\sim 60^\circ$ 范围内时,岩石在高应力加载下,结构面部分岩块在剪切力作用下,更易于沿结构面衍生扩展裂纹;而结构面倾角到达 90° 后,高应力作用下岩样经历压密阶段,结构面趋于闭合,结构面尖端与岩块内部因剪切作用产生的衍生裂纹连接减弱,使得岩样内部结构面在主应力投影面的有效应力增加,减弱了因结构面存在而削弱岩石抗压强度的效果.基于统计学中独立样本 T 检验,对倾角为 $30^\circ\sim 60^\circ$ 的结构面岩爆破坏程度(下文中以岩爆坑体积数值体现)与角度的相互作用关系做进一步显著性检验,分析得 30° 倾角对应的双尾显著性数值为0.042,该值小于0.05,存在显著性; 45° 倾角对应的双尾显著性数值为0.016,该值小于0.05,显著性较高; 60° 倾角对应的双尾显著性数值为0.003,该值小于0.05,显著

性较高,可见当结构面倾角处于 $30^\circ\sim 60^\circ$ 范围内时,对岩石抗压强度等性能影响较大。

2.1.2 倾角对岩石岩爆破坏形态影响

图7为N组及B组部分含隐伏结构面岩样岩爆破坏形状.图7a为完整岩石中间主应力方向和卸荷面的破坏形态,由于 σ_1 方向应力大小超过岩样极限抗压强度,加上围压的束缚作用,临空面约束力降低,导致岩样临空面出现岩爆破坏,岩样内部在高应力情况下由于剪切作用,隐伏结构面方向形成由上至下2条贯通剪切裂纹,并因为剪切-张拉作用出现岩板劈裂现象,生成劈裂裂纹。

图7b,7c展示了结构面长度为30mm条件下,倾角分别为 30° 和 45° 无注浆结构面岩样的岩爆破坏形态,当隐伏结构面倾角为 30° 时,岩样破坏时临空面出现横向“V”型岩爆坑,坑面相对平整,结构面顶端显现剪切裂纹,结构面靠近临空面上部分岩块生成明显的张拉裂纹,结构面接近 σ_3 方向由于剪切-张拉作用形成从上到下的劈裂裂纹.倾角为 45° 的岩样岩爆破坏时,临空面出现典型“V”型岩爆坑,且 45° 角结构面岩石的岩爆现象更加剧烈,沿结构面生成“Z”字形剪切裂纹,整个

结构面上部岩块因剪切作用向下滑移. 图 7d, 7e 所示为相同参数下结构面倾角为 30° 和 90° 无注浆结构面岩样岩爆破坏形态, 图 7d 结构面与上、下主应力面生成“Y”字形裂纹, 临空面显现台阶状岩爆坑, 坑面平整度较低, 且临空面留有部分未破坏岩块; 图 7e 岩样岩爆破坏时临空面出现浅“V”型岩爆坑, 坑面平整度较高, 结构面衍生贯通裂纹至岩样底部, 中间主应力方向所在岩样面相较倾角为 30° 的结构面出现更多剪切及张拉裂纹.

结果表明, 结构面倾角改变, 岩爆坑破坏位置

及程度随之改变. 初步分析认为, 隐伏结构面与临空面交接处完整度减弱, 剪切-张拉裂纹变多, 倾角增大, 结构面上部岩块发生剪切滑移. 结合具体工程施工, 当发现隧洞岩壁结构面与主应力倾角处于 30° 至 60° 范围时, 应立即暂停施工, 采取注浆、加强支护等措施; 发现含隐伏结构面岩壁表面存在明显破坏痕迹, 并且结构面与主应力角度介于 30° 至 60° 范围时, 发生岩爆破坏程度相较无结构面岩壁岩爆破坏程度更为剧烈, 碎石辐射范围更广, 应提高警戒范围.

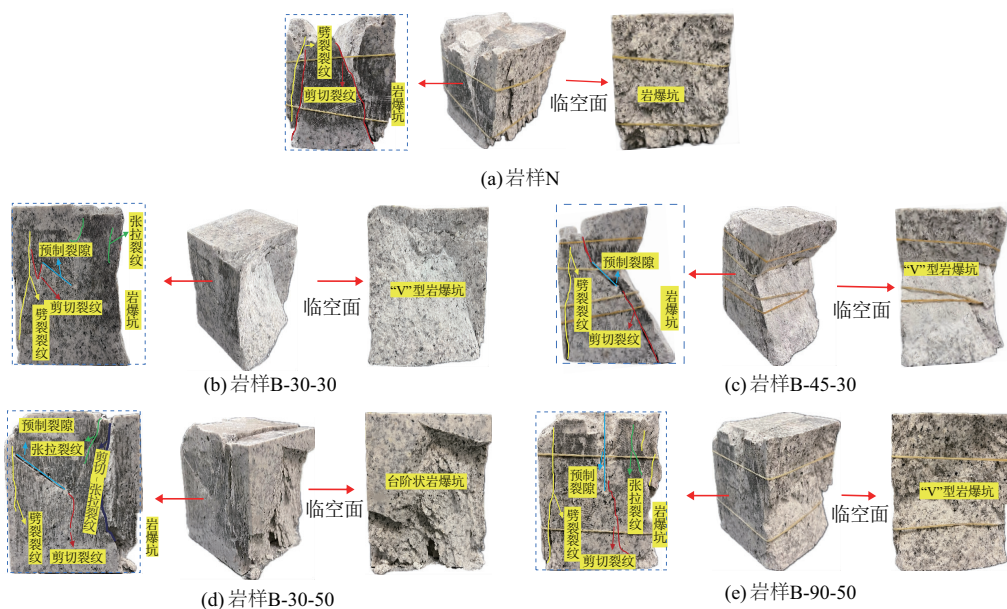


图 7 完整岩石及 B 组部分含结构面岩石岩爆破坏形态

Fig. 7 Rockburst damage patterns of intact rocks and rocks with partial structural surfaces of group B

2.2 长度对岩石力学特性及岩爆破坏形态影响

2.2.1 长度对岩石力学特性影响

不同结构面长度岩样的应力-应变情况对比如图 8 所示.

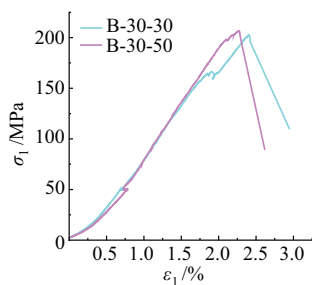


图 8 不同结构面长度岩样的应力-应变情况对比

Fig. 8 Stress-strain comparison of rock samples with different lengths of structural surfaces

参照图 5、图 8 和表 2 数据, 编号为 N 的岩样的 σ_1 峰值及对应的应变分别为 278 MPa, 3.9%; B-30-30 岩样的 σ_1 峰值及对应的应变分别为 201 MPa, 2.9%; B-30-50 岩样的 σ_1 峰值及对应的应变分别为

206 MPa, 2.6%. 比较 3 块岩样的力学特性发现, 当 B-30-50 岩样结构面长度增长 33% 时, 其峰值应力提升 5 MPa, 约为 B-30-30 岩样峰值应力的 2.4%, 与 N 岩样峰值应力比值为 1.8%, 但对应的 B-30-50 岩样的应变相较 B-30-30 岩样降低了 0.3%.

结果表明, 隐伏结构面长度增加, 岩石峰值应力随之减小, 从而使岩样应变也随之降低. 初步分析认为, 隐伏结构面长度改变会影响岩爆试验下岩样的极限抗压强度和应变, 其中结构面长度对含隐伏结构面岩石的抗压强度影响较弱, 影响岩石应变能力较强.

2.2.2 长度对岩石岩爆破坏形态影响

图 9 展示了 B 组部分含结构面岩石的岩爆破坏形态. 对比图 9a 与图 7b 可见, 结构面倾角同为 30° , 在 2 种岩样最小主应力面和结构面夹角位置, 由于边缘剪切应力和岩样内部张拉应力的联合作用, 生成了张拉裂纹和由上至下的劈裂裂纹, 沿结构面衍生出剪切裂纹. 结构面长度为 30 mm 时, 岩爆坑较

为平整,形状为“V”型岩爆坑;结构面长度增长至 50 mm 时,临空面出现了台阶状岩爆坑,岩爆坑左上部分岩块比较完整,坑面存在不同深度坑洞,结构面靠

近临空面的岩块因为剪切-张拉作用发生严重滑移现象.

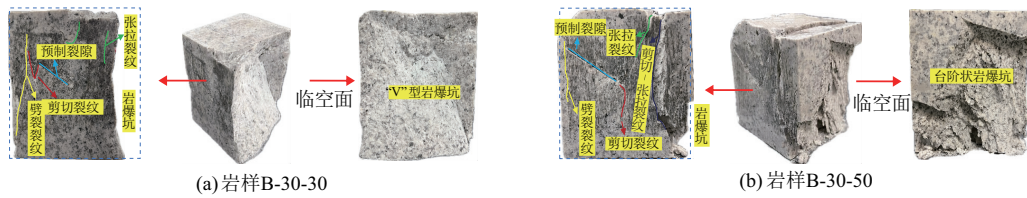


图 9 B 组部分含结构面岩石岩爆破坏形态

Fig. 9 Rockburst damage patterns of some structural surfaces of group B rocks

结果表明,较短的结构面可能导致岩体发生局部剪切破坏或劈裂破坏,而较长的结构面则更可能引发整体剪切破坏或滑移破坏.因为结构面长度影响岩体完整性,伴随结构面长度增长,结构面的尖端更容易产生应力集中,从而导致岩体内部裂纹更容易扩展并相互连接,使岩样易于在较低的应力水平下发生剪切或滑移破坏.结合具体工程施工,当发现隧洞岩壁存在较长隐伏结构面时,表明该处发生剪切滑移破坏的可能性较大,应立即停止作业,采取结构面注浆以及重点加强结构面上部岩体支护的措施以防发生安全事故;若已经存在破坏迹象,则可以加钢拱架支撑岩壁,提高结构面抗剪强度,防止裂隙衍生贯通.

升含结构面岩体的强度,且采用硅酸盐水泥注浆比环氧树脂增强岩体强度的效果明显.对岩样注浆试验结果不同的原因进行分析可知,注浆材料的强度和黏结性能会影响填充效果和岩样的抗压强度.对结构面注浆可以改善岩石的整体连续性,缓解地下高应力状态下施工开采导致的结构面尖端应力集中现象,提升岩体稳定性和承载能力,降低岩壁出现岩爆现象的概率.

2.3 注浆对隐伏结构面力学特性及岩爆破坏形态影响

2.3.1 注浆对岩石力学特性影响

为了探究注浆对含隐伏结构面岩体岩爆试验力学性质及岩爆特征的影响,试验分别采用普通环氧树脂与硅酸盐水泥注浆.岩爆试验后岩样沿 σ_1 方向的应力-应变曲线如图 5 所示,含隐伏结构面岩样的峰值应力、应变与完整岩样的对比数据见表 2.不同注浆结构面岩样的应力-应变曲线对比如图 10 所示.

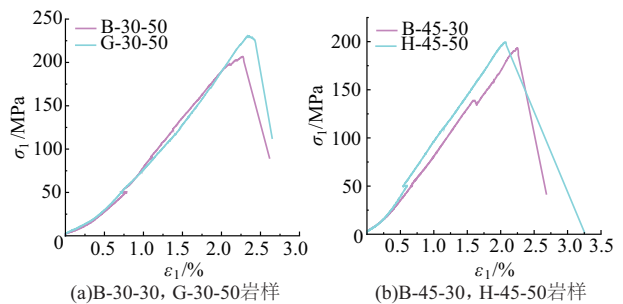


图 10 不同注浆结构面岩样的应力-应变曲线对比

Fig. 10 Stress-strain comparison of rock samples with different grouted structural surfaces

根据图 5、图 10 及表 2 试验数据,对比 G-30-50 岩样与 B-30-50 岩样的试验结果,硅酸盐水泥注浆结构面使得岩石沿 σ_1 方向的峰值应力提升了 24 MPa,占 B-30-50 岩样峰值应力的 11.7%,但对应变无影响.根据上文分析,当结构面长度增长,岩石抗压强度会减弱,H-45-50 岩样相较 B-45-30 岩样,结构面长度增加 20 mm,岩石抗压强度应降低,但其 σ_1 方向的峰值应力提升了 6 MPa,占 B-45-30 岩样峰值应力 3%,表明环氧树脂注浆有提高结构面岩体抗压强度的能力.

2.3.2 注浆对岩石岩爆破坏形态影响

图 11a,11b 展示了完整岩石及 B 组部分岩样的岩爆破坏形态,图 11c,11d 展示了分别采用硅酸盐水泥和环氧树脂对结构面注浆岩样的岩爆破坏形态.对比图 11a,11b,11c,相较于完整岩石岩爆后的形状,保持结构面几何参数相同条件下,采用硅酸盐水泥对结构面注浆的岩样发生的岩爆现象更加剧烈,岩爆坑表面形状与完整岩样岩爆坑相似,呈深窝状.

结果表明,对结构面注浆会影响岩样的强度特性,采用硅酸盐水泥和环氧树脂对结构面注浆,可提

未注浆岩样结构面尖端衍生的剪切裂纹贯穿至临空面,在岩石内部剪切-张拉作用下沿 σ_3 方向上岩板劈裂现象更显著;对比未注浆岩样结构面压密情况,注浆结构面部分扩张程度增大.因剪切作用使部分岩块滑移,结构面注浆整体被破坏,部分硅酸盐水泥遗留在结构面中.结构面注浆硅酸盐水泥后,岩样的峰值强度有所增强,且结构面长度越长,增强效果越明显.结构面注浆环氧树脂的岩样在发生岩爆

时声音较大,由于树脂抗压强度较低,所以树脂注浆对于岩样的强度影响较小,但由于树脂延展性较高,可减缓结构面尖端的应力集中,使得岩石内部结构面周围的剪切裂纹减少,张拉作用下产生的裂纹增多,结构面压密程度高于水泥注浆。

试验结果表明,结构面注浆会影响岩样的岩爆破坏方式和破坏形态,硅酸盐水泥注浆下岩样岩爆更加剧烈,环氧树脂注浆下岩样岩爆破坏面损伤程度较小,岩石内部剪切效果较明显。分析原因可能为,硅酸盐水泥注浆降低了岩爆试验过程中结构面

的压密消耗时间,减少了剪切作用下结构面位置岩块的变形和位移;相反,环氧树脂由于自身抗剪能力较强,可缓解岩样在剪切-张拉作用下的扩展,导致岩石内部消耗能量变多,从而使岩石内部破坏明显,岩石岩爆破坏后很大程度保存了结构面部分的完整性。实际工程中,采用硅酸盐水泥注浆含隐伏贯通结构面岩体,应在岩壁外围加大防护措施;相反,对于采用环氧树脂注浆的含隐伏结构面岩体,当出现明显破坏时就应迅速远离。

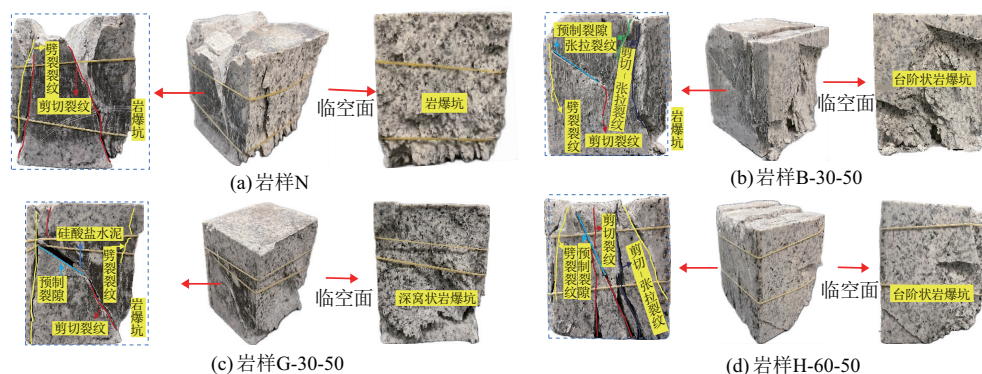


图 11 完整岩石及部分 B 组、结构面注浆岩样岩爆破坏形态

Fig. 11 Rockburst damage patterns in intact rock and some group B, grouted structural face rock

为探究不同隐伏结构面参数对岩样力学特性的影响,基于统计学主成分分析法对结构面所有参数进行分析。对结构面角度、长度、注浆 3 个因子进行公因子方差分析,得到倾角公因子方差为 0.594、长度公因子方差为 0.481、注浆公因子方差为 0.118。公因子方差越大,影响程度越高。主成分分析法提取结果为:倾角成分矩阵大小为 0.771,长度成分矩阵大小为 0.694,注浆成分矩阵大小为 0.344。成分矩阵数值越大,对岩体力学特性的影响能力越强。主成分分析结果表明影响隐伏结构面力学特性的主要参数是结构面的角度和长度,其中角度对含隐伏结构面岩样力学特性影响最大。

2.4 典型结构面岩爆案例

锦屏二级工程掌子面桩号 SK9+258 排水洞附近曾发生极强岩爆灾害^[4],岩爆产生的冲击作用瞬间破坏周围隧洞所有支护系统,造成隧道掘进设备损坏、值班室门板断裂,岩爆发生后洞段塌方总量多达 400 m³ 左右。图 12 展示了岩爆坑及揭露的结构面^[17],该结构面倾角为 50°,表面比较光滑且无填充,与本研究的 45°倾角结构面相仿,岩爆破坏后均出现了“V”型岩爆坑。基于上文结构面角度对岩体力学性质及岩爆破坏形态影响分析,在 30°~60°倾角范围内,结构面长度越长,越容易发生应变型岩

爆,岩爆破坏程度也越剧烈。

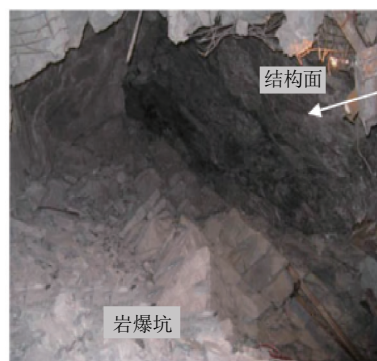


图 12 现场岩爆坑及结构面

Fig. 12 Diagram of on-site rockburst crater and structural surfaces

3 含隐伏结构面岩石岩爆试验声发射特性分析

3.1 声发射振铃计数分析

声发射(AE)振铃计数指声发射信号波形超过预置阈值电平的次数,而振铃计数的累计则称为振铃总计数,表示在整个检测过程中信号波形超过阈值电平的总次数,反映了声发射活动的总强度。以完整岩石与 B-30-50, G-30-50, H-45-50 这 4 种不同工况下岩样岩爆试验过程 AE 振铃计数演化曲线为例

进行分析,结果如图 13 所示,由于声发射监测和试验保持同步,故图中曲线包含岩样加载过程中的应力曲线和 AE 振铃计数演化曲线.依据前文所述岩样岩爆破坏阶段将曲线划分为压密阶段(I段)、线弹性变形阶段(II段)、屈服阶段(III段)、塑性变形阶段

(IV段)、岩爆弹射阶段(V段)这 5 个阶段,以便于观察比较岩样每个阶段的振铃计数特征.所有工况下试样 AE 振铃计数演化过程中的屈服阶段分析见表 3.

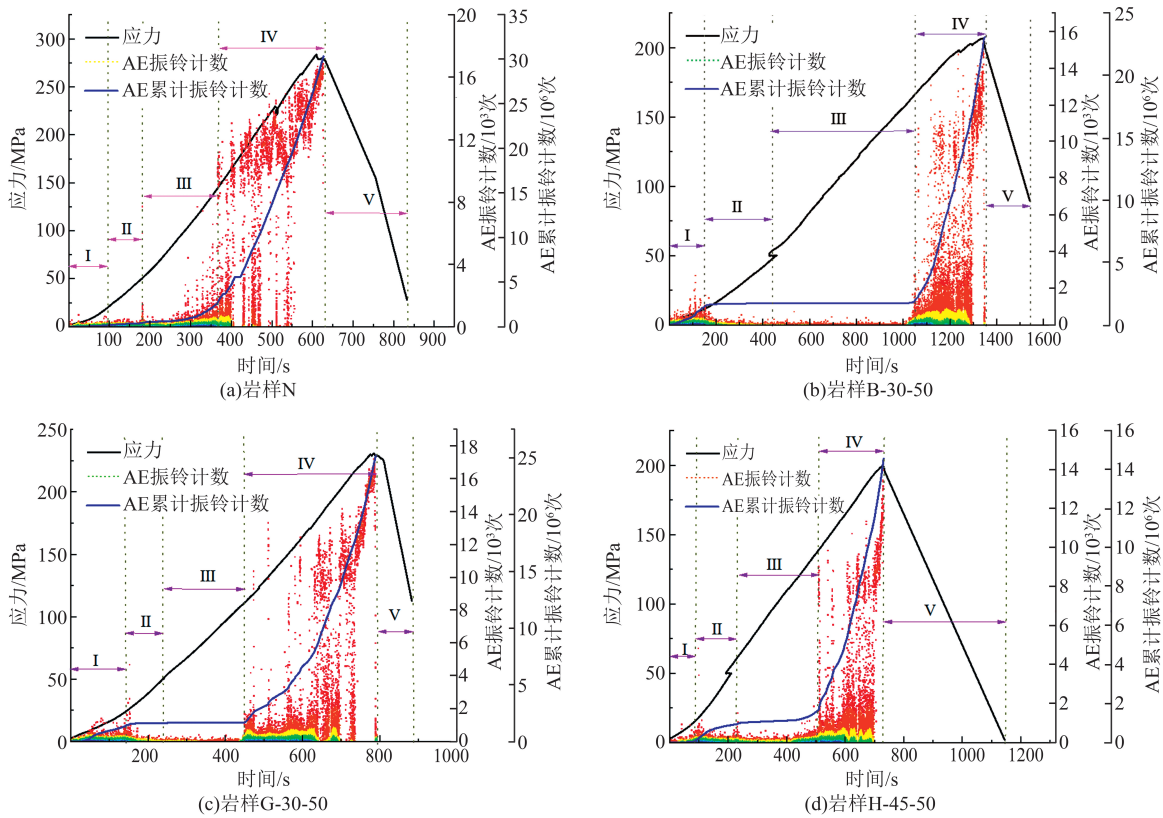


图 13 不同结构面岩石和完整岩石的 AE 振铃计数

Fig. 13 AE ringing count plots for rocks with different structural surfaces and intact rocks

由图 13 可见,完整岩样与含隐伏贯通结构面岩样岩爆试验 AE 振铃计数演化过程有明显区别,结构面几何参数和注浆情况对岩石岩爆破坏演化影响较为明显.对于完整岩样,从压密阶段 I 到线弹性变形阶段 II,再到屈服阶段 III,AE 振铃计数密度呈递增趋势;压密阶段经历时间最短,AE 振铃计数较密,即岩石内部出现多处微小裂纹;塑性变形阶段的 AE 振铃计数发生大幅上升,直至发生岩爆.结合图 13 和表 3 分析可知,在岩样岩爆破裂演化过程中,含隐伏贯通结构面岩样与完整岩样的屈服阶段所占时间有较大区别.对结构面以及注浆对屈服演变时间的影响进行分析认为:随着结构面角度和长度增长,屈服阶段所占时间随之增加,例如岩样 B-30-30 的 III 阶段历时 375 s,占总演化过程时间的 21%;结构面长度增加至 50 mm,岩样 B-30-50 的 III 阶段历时 563 s,占总演化过程经历时间的比例增长至 30%;结构面角度增大到 45°,岩样 B-45-30 的 III 阶段历时 200 s,但占总演化过程经历时间的比例提升 33%.采用硅

酸盐注浆后,G-30-50 岩样 III 阶段历时缩减至 200 s,占总演化过程时间的 23%.由上文分析可知,结构面倾角处于 30°~60°范围时,倾角增加,岩石抗压强度更低,更快发生破坏,相较于 B-30-50 岩样,H-45-50 岩样 III 阶段历时 290 s,时间缩短了 273 s.

隐伏贯通结构面的存在及其倾角与长度的改变,对岩爆试验过程中岩样的屈服阶段影响较大.岩石内部沿结构面发生剪切滑移耗散能量,致使岩石失稳破裂阶段 AE 振铃计数密度较高,岩爆破坏更加迅速.结构面注浆后岩样在试验过程中的屈服阶段时间和无注浆含结构面岩样差距较大,这表明在岩爆演化过程中未注浆含隐伏结构面岩体初步破坏时的现象难以被发现,相反,注浆后岩体在岩爆演化过程中的破坏表现更明显,岩爆破坏能更容易被发现和避免.注浆能提高岩石的完整性,且硅酸盐水泥和环氧树脂本身具有一定强度和黏聚力,能改变岩样内部结构面部分应力分布,减弱结构面尖端的应力集中现象,从而削弱因结构面尖端与岩体生成的

裂隙互相贯通所产生的更大范围灾害. 这些差异可能导致注浆含隐伏贯通结构面岩体的岩爆破坏模式发生变化, 由脆性破坏转变为塑性破坏.

表 3 AE 振铃计数下屈服阶段分析
Table 3 Plastic deformation analysis
under AE ringer counting

岩样编号	屈服阶段历时/s	屈服阶段历时占比/%
N	160	19
B-30-30	375	21
B-30-50	563	30
B-45-30	200	33
B-60-20	350	31
B-90-50	315	36
H-0-30	290	25
H-30-20	220	20
H-45-50	290	26
H-60-50	200	22
H-90-20	240	21
G-0-50	320	32
G-30-50	200	23
G-45-20	300	22
G-60-30	330	30
G-90-30	280	29

3.2 声发射能量分析

声发射能量是指声波在介质中传播的过程中所携带的能量, 也常用来监测材料或者结构中由于内部应力变化或者损伤快速释放能量, 产生瞬态弹性

波的过程. 对比岩样 N, B-30-50, G-30-50, H-45-50 的岩爆试验过程声发射能量变化情况, 如图 14 所示. 由图 14 可见, 岩样 N 压密阶段(I段)无明显能量波动, 从弹性变形阶段(II段)和屈服阶段(III段)开始有少量绝对能量涌现, 因岩石完整度较高, 内部压缩变形程度较弱, 所以仅有少量裂纹衍生, 产生微量能量. 塑性变形阶段(IV段)随着应力增大, 绝对能量呈上升趋势, 累计绝对能量由 0.2×10^{-11} J 骤增至 2.25×10^{-11} J, 在应力跌落时对应较高绝对能量诞生, 伴随岩爆弹射阶段(V段)开始, 绝对能量的释放达到峰值 2.47×10^{-11} J, 岩样发生岩爆现象.

绝对能量的释放反映在累计能量曲线上形成转折点, 当绝对能量超过 1.5×10^{-9} J, 累计绝对能量形成明显转折点, 即称为“徒增期”, 徒增期可反映出在试验过程中岩石内部发生了明显破坏现象. 完整岩样 IV 阶段演变过程中累计绝对能量经历 6 个徒增期(如图 14a 所示), 对应 6 次绝对能量骤增, 即岩样内部因剪切-张拉作用瞬间形成贯通裂隙, 释放应变能. 岩样 B-30-50 的声发射能量演变情况如图 14b 所示, 徒增期减少至 2 个, 且 IV 阶段消耗时间减少(表明结构面具有促进岩石失稳变形的能力), 累计绝对能量曲线斜率增高, 应变能迅速释放.

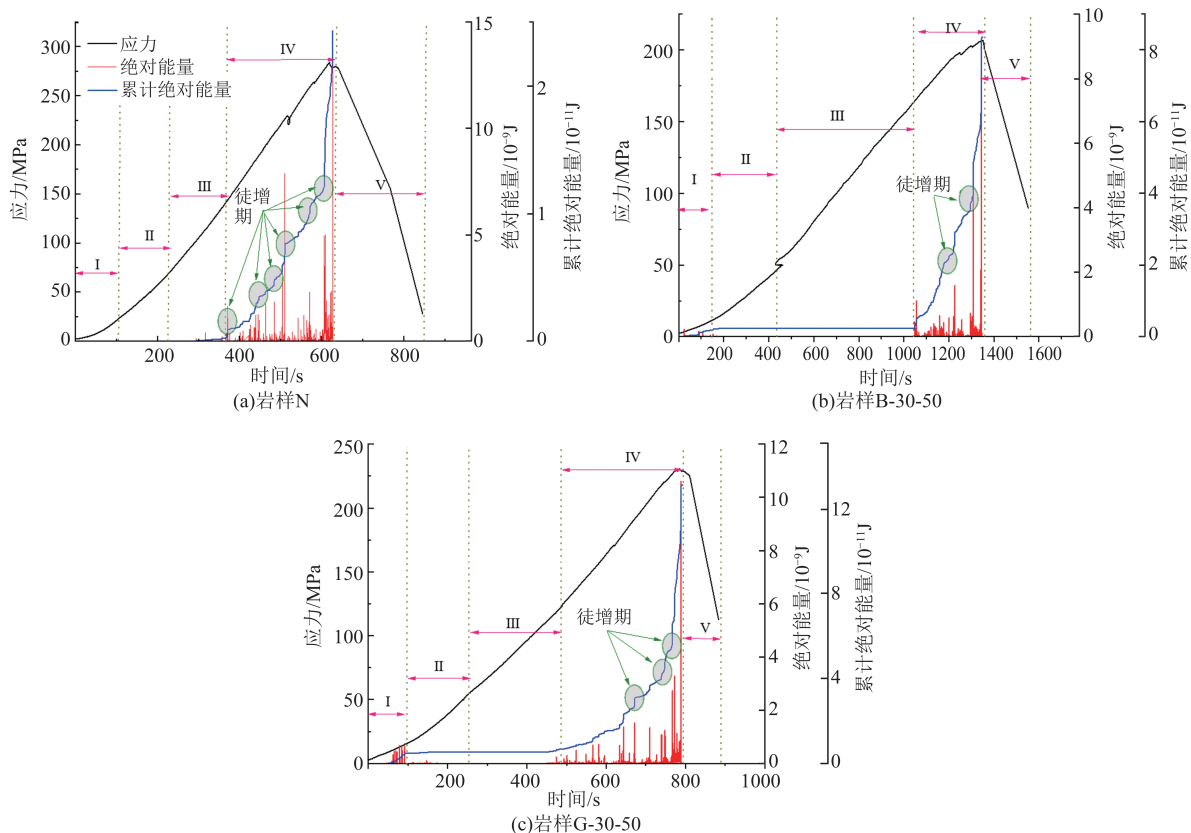


图 14 含不同结构面岩样和完整岩石声发射能量分析

Fig. 14 Plot of acoustic emission energy analysis for different structural surfaces and intact rocks

结构面注浆对声发射能量演化也存在一定影响,图 14c 展现了硅酸盐水泥注浆结构面的声发射能量变化过程曲线,与 B-30-50 岩样相比,徒增期个数增至 3 个.水泥注浆结构面Ⅳ阶段历时多于完整岩样,累计绝对能量曲线斜率最小,究其原因是因为注浆导致Ⅳ阶段岩石内部多次出现了新裂纹或原有裂纹迅速扩展.

结果表明,隐伏贯通结构面的存在及结构面注浆改变了岩体失稳破裂阶段声发射能量变化过程,增加了声发射累计绝对能量徒增期的个数.当存在隐伏结构面时,岩石经过压密阶段及线性弹性阶段,其内部结构面经历闭合、贯通时期,结构面尖端与附近岩块衍生的裂纹相互连接,导致岩石内部整体性发生破坏,徒增期数量减少,更易发生岩爆.结构面注浆岩样徒增期增多,能量跃迁程度削弱,是因为硅酸盐水泥具有一定强度,可提高岩石整体性,使注浆结构面岩样在力学性质上接近完整岩样,且岩爆前结构面在剪切作用下耗能增多.结合实际工程,对含隐伏贯通结构面岩体注浆可在岩爆灾害演化过程中消耗能量,从而减弱岩爆产生的耗散能,降低损失.

4 含隐伏结构面岩石岩爆损伤程度分析

4.1 岩爆分形维数

岩爆碎屑由岩爆过程中产生的微观裂缝导致的宏观断裂所形成,能在一定程度上反映岩爆形成的过程、岩石微观断裂机理、能量耗散和损伤演化特征.传统岩爆破坏程度分析常采用分形几何方法,通过分形维数计算岩爆碎屑几何特征和质量特征,从而体现碎屑破碎特征,表征岩爆破坏程度^[18].

根据文献[19],采用游标卡尺对岩爆破坏中粒径大于 5 mm 的碎屑进行测量并计算分形维数,其计算公式为

$$D = 3 - \frac{1}{K}, \quad (1)$$

$$K = \frac{\lg L_{eq}}{\lg(M_{Leq}/M)}, \quad (2)$$

式中: D 为分形维数; K 为破坏程度; M_{Leq} 为粒径为 L_{eq} 的碎屑质量; M 为碎屑总质量.

所有岩爆试验岩样的分形维数计算结果见表 4.分形维数越大,说明岩样岩爆破坏程度越高,释放大量能量;分形维数较低是因为在岩爆试验中隐伏结构面的存在导致岩石内部能量耗散增多,降低了岩爆所需轴向应力,缩短了岩爆破坏所需时间.

表 4 所有岩样的分形维数计算值
Table 4 Calculated values of fractal dimension for all rock samples

岩样编号	分形维数	岩样编号	分形维数
N	1.943	G-45-20	1.898
B-30-30	1.956	G-60-30	1.912
B-30-50	1.951	G-90-30	1.901
B-45-30	1.915	H-0-30	1.959
B-60-20	1.922	H-30-20	1.927
B-90-50	1.907	H-45-50	1.889
G-0-50	1.973	H-60-50	1.860
G-30-50	1.931	H-90-20	1.918

部分岩样分形维数关系如图 15 所示.由图表数据可以看出,结构面的存在及其几何参数和注浆对岩爆剧烈程度影响明显.

对比完整岩石 N 组的分形维数 1.943、B-30-30 岩样的分形维数 1.956、B-45-30 岩样的分形维数 1.915、G-60-30 岩样的分形维数 1.912、G-90-30 岩样的分形维数 1.901,当其他参数相同时,结构面倾角增大,岩石分形维数减小.对比 B-30-30、B-30-50 岩样,结构面长度增加 20 mm,分形维数减小至 1.951. G-30-50 岩样的分形维数为 1.931,与 B-30-50 岩样的分形维数 1.951 对比发现,当采用硅酸盐水泥对结构面注浆时,岩石分形维数增大.

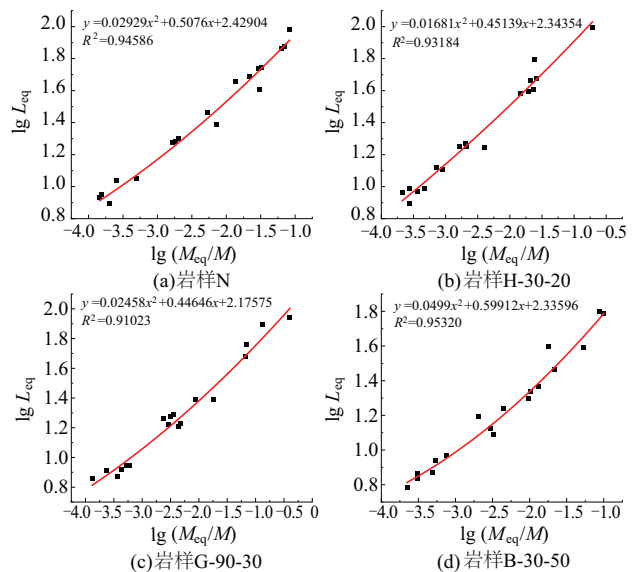


图 15 部分岩样分形维数关系
Fig. 15 Partial rock sample fractal dimension relationship diagram

结果表明,隐伏结构面倾角越大、长度越长,岩爆分形维数越低,损伤演化过程剧烈程度越弱,采用硅酸盐水泥对结构面注浆的岩样分形维数最高,采用环氧树脂对结构面注浆的岩样分形维数

最低. 结合上文分析, 在隐伏结构面倾角和长度影响下, 结构面与岩体衍生裂纹的联结能力不同, 使得岩石破碎性也各不相同, 相同试验时间内岩体损伤程度也随之不同; 注浆材料的强度和黏聚力同样影响含结构面岩体岩爆效果和损伤演化过程剧烈程度, 注浆后含隐伏贯通结构面岩石平均分形维数低于未注浆, 说明注浆可以减弱岩爆的破坏程度, 从而降低因岩爆造成的损失.

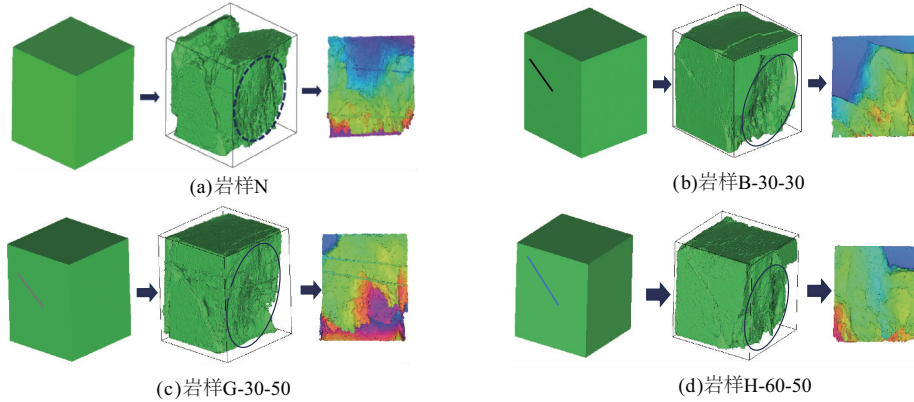


图 16 含不同结构面岩样和完整岩石岩爆坑扫描图

Fig. 16 Scan of rockburst craters with different fissures and intact rocks

原始形态下的巷道岩壁三向受力, 开挖后应力重分布, 参照弹性力学相关理论^[20], 岩体内部可

$$\sigma = \sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2, \quad (3)$$

$$\tau = \sqrt{(\sigma_1 l)^2 + (\sigma_2 m)^2 + (\sigma_3 n)^2 - (\sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2)^2}, \quad (4)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为岩石单元块的三向主应力; l, m, n 分别为三向主应力与斜截面法线的方向余弦.

岩体内部裂隙可以看作是岩体本身存在的结构面, 假设该结构面抗剪强度 τ_j 符合库伦-纳维尔强度理论, 即

$$\tau_j = \sigma \tan \varphi_j + c_j, \quad (5)$$

式中: φ_j 为该结构面的内摩擦角; c_j 为该结构面的黏聚力.

而结构面本身含一定角度, 结合试验工况分析, 由隧道应力分布相关理论得出结构面所受主应力 σ_1 的相对主应力 σ'_1 的表达式为

$$\sigma'_1 = \sigma_1 + \sigma_3 - 2(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta, \quad (6)$$

式中 θ 为隧道长半轴与水平应力的夹角, 考虑含

$$\sigma' = \sigma'_1 l^2 + \sigma'_2 m^2 + \sigma'_3 n^2 = \sigma'_1 \cos^2 \alpha, \quad (8)$$

$$\tau' = \sqrt{(\sigma'_1 \cos^2 \alpha - (\sigma'_1) \cos^4 \alpha} + \tau_j = \sigma'_1 \cos \alpha (\sin \alpha + \cos \alpha \tan \varphi_j) + c_j. \quad (9)$$

由基础力学试验测得硅酸盐水泥与环氧树脂的黏聚力分别为 4.0, 38.2 MPa. 计算得出结构面强度和三维扫描得到的岩爆坑体积数据如表 5 和图 17 所示. 根据式(9)所得的剪切强度含人工切割

4.2 结构面参数影响下的岩爆坑分析

本试验采用先临 Einscan-Pro 三维扫描仪对岩爆坑进行扫描. 通过建模还原岩石岩爆破坏状态, 对岩样岩爆破坏后的特征点进行三维扫描, 建立三维损伤模型, 得到岩爆坑体积, 便于后续结合结构面抗剪强度分析岩爆坑, 并对岩爆坑深度进行高程分析, 以更直观地体现结构面影响下岩爆坑深度的分布情况, 部分岩样扫描图如图 16 所示.

以划分为若干单元块, 内部裂隙可以看作斜截面, 其法向应力 σ 和剪切应力 τ 分别为

结构面单元体岩石所受应力情况, 夹角为水平应力方向与结构面投影在最大主应力方向的夹角.

鉴于在试验过程中岩样处于理想状态, 应力重分布后结构面的三向受力为

$$\begin{aligned} \sigma'_1 &= \sigma_1 + \sigma_3 - 2(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta, \\ \sigma'_2 &= \sigma_2, \\ \sigma'_3 &= \sigma_3, \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ 分别为主应力投影在结构面上的分应力.

考虑到本试验的具体情况并参照文献[6], 含结构面围岩单面临空时, 临空面方向 σ_3 为 0, 假设结构面倾角为 α , 鉴于试验设计, 此处结构面倾角 α 的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$. 结合上述公式推导出结构面开挖时的法向应力 σ' 和剪切应力 τ' 的表达式为

结构面的等效斜截面抗剪强度, 因此式(8), (9)适用范围为含宏观贯通结构面岩体, 且只讨论硅酸盐水泥与环氧树脂注浆, 当岩体内部结构面为微小不连续结构面时, 模型将不适用.

表5 岩石结构面抗剪强度与岩爆坑体积分析
Table 5 Shear strength of rock structural surfaces and volumetric analysis of rockburst craters

岩样编号	岩爆坑体积/cm ³	结构面抗剪强度/MPa
B-30-30	91.24	33.06
B-30-50	88.47	33.14
B-45-30	60.77	39.50
B-60-20	70.87	37.26
B-90-50	55.54	40.17
G-0-50	174.29	30.08
G-30-50	83.29	33.74
G-45-20	48.17	42.55
G-60-30	57.95	39.95
G-90-30	51.91	41.22
H-0-30	144.82	30.15
H-30-20	80.78	36.95
H-45-50	46.62	73.77
H-60-50	34.63	124.26
H-90-20	65.28	38.27

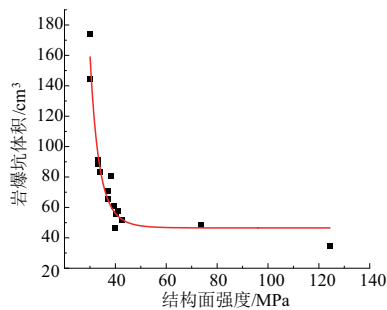


图17 不同结构面强度与岩爆坑的关系

Fig. 17 Plot of strength of different structural surfaces in relation to rockburst craters

由表5可知,结构面倾角增加,结构面抗剪强度总体呈递增状,应力增大岩石内部经历压密阶段,倾角小的结构面在高应力下闭合能力较弱,更易于发生剪切破坏;结构面长度越长,破坏过程中岩石的衍生裂纹越易于与结构面形成贯通,结构面闭合能力较强,在高剪切应力环境下岩石内部存在较高抗剪能力,从而影响结构面岩块的抗剪强度。

对比岩样 B-30-50 和 G-30-50 的结构面抗剪强度(分别为 33.14, 33.74 MPa),强度提升 1.8%,说明采用硅酸盐水泥注浆对结构面的抗剪强度影响较弱;对比 B-30-30 和 B-30-50 岩样,结构面抗剪强度增大了 0.08 MPa,增长幅度较小;对比 B-30-30 与 H-30-20 岩样结构面的抗剪强度,环氧树脂注浆结构面的抗剪强度提升 11.8%,结合前文分析认为,这是由环氧树脂的黏聚力和内摩擦角高于硅酸盐水泥所导致的。

基于以上分析可知,结构面强度和岩爆坑体

积呈反比关系,结构面倾角处于 30°~60°范围内时,岩样内部结构面倾角越大,长度越长,结构面抗剪强度越高,岩爆损伤演化程度越剧烈,损伤程度越大.结构面抗剪强度越低,加载过程中闭合时间越快,对衍生裂纹扩展影响越小,应变产生能量耗散减弱,岩爆坑体积越小,损伤程度减弱.结构面抗剪强度越高,结构面破坏所需剪应力增大,可弱化岩体岩爆破坏损伤效果,直观体现为岩爆坑体积大小呈下跌趋势。

5 讨论

本研究主要开展了真三轴单面卸荷-三向五面加载下含隐伏结构面花岗岩岩爆试验,以隧洞开挖卸荷后岩壁周围具有代表性的岩体单元模块为首要研究对象,并考虑了开挖卸荷后围岩的高应力集中及重分布特点,再现了应力集中现象引起的应变型岩爆.对于应变型岩爆,根据前述试验结果可知,无隐伏结构面花岗岩和含隐伏结构面花岗岩的岩爆发生机制存在显著差异,且不同参数隐伏结构面的影响也明显不同。

关于完整岩石应变型岩爆破坏过程的研究^[21]表明,此类岩爆的产生机制总体分为:加载初期高应力作用下岩石内部细小裂隙压密;岩石持续变形积攒大量应变能;岩石变形超过最大弹性形变后,岩石临空面位置因内部张拉作用出现小颗粒弹射;临空面部分岩块劈裂成岩板,伴随应力增大,岩板外鼓;岩板附近裂纹继续衍生贯通,直至形成连续剪切裂纹,同时岩板开始剥落,积攒的应变能瞬间释放,最终形成“V”型岩爆坑.无结构面完整岩石的岩爆破坏机制如图 18a 所示,本研究的 N 组岩样也存在相同机制及结果。

由本文所述含隐伏结构面岩石的岩爆破坏特征、声发射特征、损伤程度总结岩爆的破坏过程(见图 18b, 18c),并结合以往传统含结构面岩石的岩爆破坏研究^[22-36],发现岩爆破坏形式主要分为 2 种:剪切滑移型破坏和张拉-剪切混合型破坏.当隐伏结构面与临空面水平方向夹角较大时,结构面内部黏结性较弱,易于发生剪切滑移型岩爆破坏.具体而言,随着应力增大,含此类隐伏结构面岩体临空面先出现颗粒与小岩块弹射;岩体所受主应力方向应变超过自身弹性应变,临空面与结构面两端大量剪切裂纹衍生贯通,临空面岩板外鼓;外荷载高于岩体承受极限应力值,临空面岩板剥落,岩体储存的应变能瞬间释放造成小块岩体弹射,发生岩爆破坏.当隐伏结构面与临空面趋于平行,

且黏结度较高,发生张拉-剪切混合型岩爆破坏的可能性较高.具体而言,此类岩爆破坏同样先出现临空面小颗粒弹射;岩体主应力方向变形超过弹性形变极限值,靠近临空面位置的岩体在张拉作用下的拉裂破坏加剧,导致大块岩板外鼓;外荷载高于岩体承受极限应力值,结构面远离临空面一侧出现由上至下的贯通剪切裂纹,临空面岩板剥落,应变能释放伴随小块岩体弹射,发生岩爆

破坏.

综上所述,含隐伏结构面岩样与完整岩样应变型岩爆的破坏阶段相似,都经历了压密、线弹性、屈服、塑性变形和岩爆弹射阶段,但岩爆发生机制分别为剪切滑移破坏和张拉-剪切混合型破坏.除去岩体所受主应力及岩性影响,还包含结构面角度、长度及黏聚程度等因素.

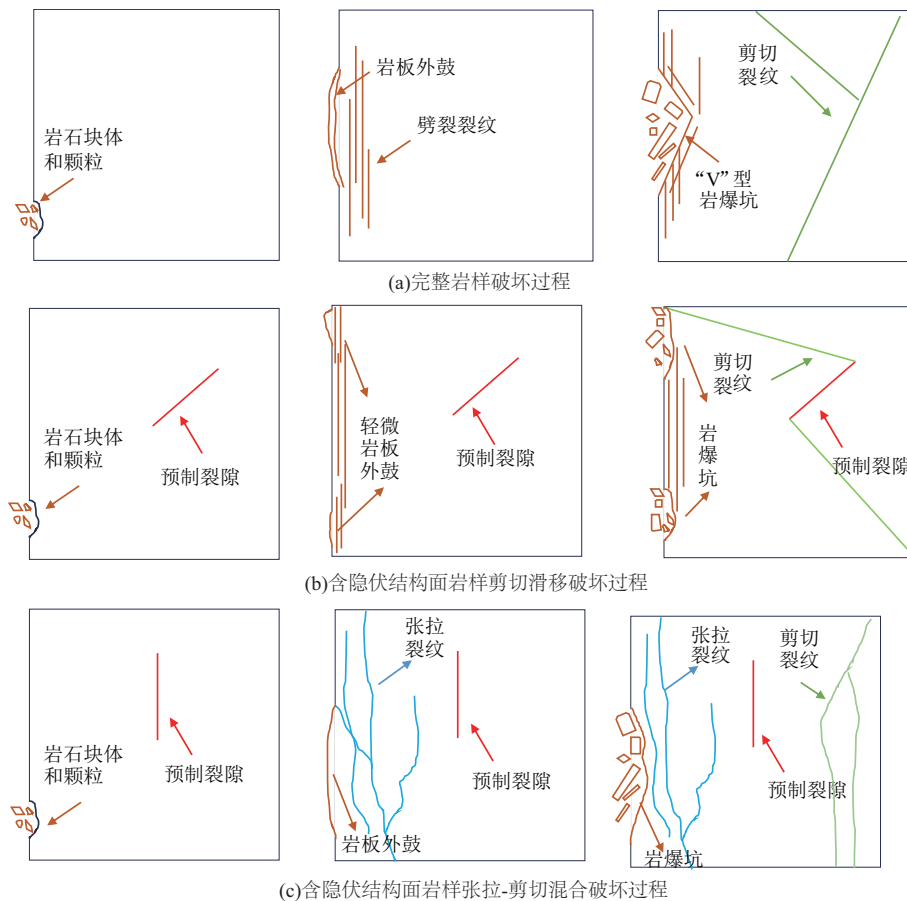


图 18 3 种岩爆发生过程示意

Fig. 18 Schematic diagrams of the three types of rockbursts

6 结 论

1) 隐伏结构面长度增长会影响岩体完整性,降低岩石强度,岩爆破坏模式从局部破坏、劈裂破坏转变为剪切或滑移破坏,减弱围岩稳定性;结构面倾角在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 范围内对岩爆试验下岩石的极限抗压强度影响最大,倾角高于 60° 后降低岩石强度的能力减弱,隐伏结构面倾角和岩爆剧烈程度关系较为密切.

2) 对隐伏结构面注浆能够提升岩体抗压强度,注浆材料的强度和黏结性影响岩体岩爆破坏模式;注浆可以缓解结构面在剪切作用下产生的尖端应力集中问题,提升含结构面岩体在岩爆破

坏前的稳定性,且能够减少剪切作用下结构面位置的岩块变形和位移.同时注浆后可以有效减弱岩爆强度及破坏程度,从而降低工程人员生命安全及财产损失.

3) 结构面的存在会增加岩体破坏过程中声发射能量的陡增期;随结构面倾角增加和长度增长,岩体屈服阶段时间占比也随之增加,从而导致岩体的岩爆破坏模式发生变化,由脆性破坏转变为塑性破坏;结构面是否注浆影响屈服阶段时间,注浆可提升含结构面岩样在失稳阶段的持续时间.

4) 结构面抗剪强度和岩爆损伤剧烈程度存在相对关系,结构面抗剪强度越高,岩爆坑体积越小,岩爆破坏剧烈程度减弱.工程施工发现,隐伏

断层存在时,可由结构面参数大致判断岩壁可能发生的岩爆剧烈程度,从而采取相应措施,减弱对人员安全的危害.含隐伏结构面岩石岩爆发生机制主体分为剪切滑移型和张拉-剪切混合型2种.

参考文献:

- [1] 胡波,张楠,刘顺桂,等.节理对岩体强度变形特性影响的模型实验[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(4):1133-1138.
HU Bo,ZHANG Nan,LIU Shungui,et al. Model experiment on the effect of joints on the strength and deformation characteristics of rock mass [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2009,40(4):1133-1138.
- [2] DAI J H,GONG F Q,XU L. Rockburst criterion and evaluation method for potential rockburst pit depth considering excavation damage effect [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2024,16(5):1649-1666.
- [3] 赵怡晴,刘佳伟,金爱兵,等.加卸荷条件下非贯通节理岩体破坏特性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(7):1893-1901.
ZHAO Yiqing,LIU Jiawei,JIN Aibing,et al. Study on the failure characteristics of non-penetrating jointed rock mass under loading and unloading conditions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2020,51(7):1893-1901.
- [4] 周雄,孟凡震,岳祝凤,等.基于GDEM的结构面型岩爆孕育演化机制[J].煤炭学报,2023,48(5):2207-2223.
ZHOU Xiong,MENG Fanzhen,YUE Zhufeng,et al. Evolution and mechanism of rockburst induced by structural plane based on GDEM [J]. Journal of China Coal Society,2023,48(5):2207-2223.
- [5] CHENG T,HE M C,LI H R,et al. Experimental investigation on the influence of a single structural plane on rockburst [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2023,132:104914.
- [6] 李育宗,袁亮,张庆贺,等.含结构面岩体岩爆特征真三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(1):120-132.
LI Yuzong,YUAN Liang,ZHANG Qinghe,et al. True triaxial experimental study on rockburst characteristics of rock mass with structural planes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(1):120-132.
- [7] WU J,ZHANG X Y,YU L Y,et al. Rockburst mechanism of rock mass with structural planes in underground chamber excavation [J]. Engineering Failure Analysis,2022,139:106501.
- [8] ZHOU H,MENG F Z,ZHANG C Q,et al. Analysis of rockburst mechanisms induced by structural planes in deep tunnels [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2015,74(4):1435-1451.
- [9] WANG J C,CHEN G Q,XIAO Y X,et al. Effect of structural planes on rockburst distribution: Case study of a deep tunnel in Southwest China [J]. Engineering Geology,2021,292:106250.
- [10] 杜岩,郑孝婷,谢谟文,等.岩爆结构面强度的弱化特征[J].工程科学学报,2018,40(3):269-275.
DU Yan,ZHENG Xiaoting,XIE Mowen,et al. Weakening characteristics of rockburst structural surface strength [J]. Chinese Journal of Engineering,2018,40(3):269-275.
- [11] 冯帆,赵兴东,陈绍杰,等.结构面位置对于深部高应力采动硬岩巷道破坏的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2588-2600.
FENG Fan,ZHAO Xingdong,CHEN Shaojie,et al. The influence of structural plane position on the failure of deep high-stress mining-induced hard rock roadway [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(8):2588-2600.
- [12] ZHANG C Q,FENG X T,ZHOU H,et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2012,45(2):275-288.
- [13] HU L,FENG X T,XIAO Y X,et al. Effects of structural planes on rockburst position with respect to tunnel cross-sections: A case study involving a railway tunnel in China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2020,79(2):1061-1081.
- [14] 杨砚,刘连生,曾鹏,等.不同倾角隐伏结构面类岩石材料动力学破坏特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(8):3178-3190.
YANG Yan,LIU Liansheng,ZENG Peng,et al. Experimental study on dynamic failure characteristics of rock-like materials with different dip angles of concealed structural planes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(8):3178-3190.
- [15] 孙飞跃,郭佳奇,刘希亮,等.真三轴单面卸荷条件下中间主应力对深埋洞室岩爆影响特征[J].煤炭学报,2024,49(增1):220-235.
SUN Feiyue,GUO Jiaqi,LIU Xiliang,et al. Influence characteristics of intermediate principal stress on rockburst of deep buried cavern under true triaxial unloading condition on single side [J]. Journal of

- China Coal Society, 2024, 49(Sup 1): 220-235.
- [16] 苏国韶, 陈智勇, 蒋剑青, 等. 不同加载速率下岩爆碎块耗能特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1481-1489.
SU Guoshao, CHEN Zhiyong, JIANG Jianqing, et al. Experimental study on energy consumption characteristics of rockburst fragments under different loading rates [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1481-1489.
- [17] 周 辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞岩爆的结构面作用机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 720-727.
ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Effect of structural plane on rockburst in deep hard rock tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 720-727.
- [18] ZHANG K, CHEN Y L, FAN W C, et al. Influence of intermittent artificial crack density on shear fracturing and fractal behavior of rock bridges: Experimental and numerical studies [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(2): 553-568.
- [19] 张 鹿. 深部强开采扰动诱发岩爆发生过程及特征研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2022.
ZHANG Lu. Research on the process and characteristics of rockburst induced by deep and strong mining disturbance [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2022.
- [20] 铁摩辛柯, 古地尔. 弹性理论(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
TIMOSHENKO S P, GOODIER J N. Theory of elasticity (Third edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [21] 罗丹旒, 苏国韶, 何保煜. 不同饱和度花岗岩的真三轴岩爆试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1331-1340.
LUO Danni, SU Guoshao, HE Baoyu. True triaxial rockburst experimental study of granite with different water saturation degrees [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1331-1340.
- [22] 何满潮, 赵 菲, 杜 帅, 等. 不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2737-2747.
HE Manchao, ZHAO Fei, DU Shuai, et al. Experimental analysis of rockburst failure characteristics under different unloading rates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2737-2747.
- [23] AKDAG S, KARAKUS M, NGUYEN G D, et al. Evaluation of the propensity of strain burst in brittle granite based on post-peak energy analysis [J]. Underground Space, 2021, 6(1): 1-11.
- [24] 李占金, 杨 铭, 程豪杰, 等. 不同扰动条件下深部岩石真三轴岩爆试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(5): 53-58.
LI Zhanjin, YANG Ming, CHENG Haojie, et al. Experimental study on true triaxial rockburst of deep rock under different disturbance conditions [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(5): 53-58.
- [25] SUN J, LIU D Q, HE P F, et al. Experimental investigation on acoustic emission precursor of rockburst based on unsupervised machine learning method [J]. Rock Mechanics Bulletin, 2024, 3(2): 2773-2304.
- [26] 马春德, 李夕兵, 陈 枫, 等. 单轴动静组合加载对岩石力学特性影响的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2004, 24(4): 1-3.
MA Chunde, LI Xibing, CHEN Feng, et al. Experimental study on the influence of uniaxial dynamic-static combined loading on rock mechanical properties [J]. Mining Research and Development, 2004, 24(4): 1-3.
- [27] 王 蒙, 朱哲明, 冯若琪. 真三轴加卸载条件下巷道周边裂隙岩体变形破坏试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 278-285.
WANG Meng, ZHU Zheming, FENG Ruoqi. Experimental study on deformation and failure of fissured rock mass around roadway under true triaxial loading and unloading conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 278-285.
- [28] 张黎明, 高 速, 王在泉, 等. 大理岩加卸荷破坏过程的能量演化特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1572-1578.
ZHANG Liming, GAO Su, WANG Zaiquan, et al. Analysis of energy evolution characteristics during the loading and unloading failure process of Dali rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1572-1578.
- [29] LEE H, JEON S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(6): 979-999.
- [30] 李振雷, 李 娜, 杨 菲, 等. 声发射梅尔倒谱系数在砂岩破裂分析的应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 714-729.
LI Zhenlei, LI Na, YANG Fei, et al. Application of mel frequency cepstral coefficients of acoustic emission in sandstone fracture analysis [J]. Journal of

- China Coal Society, 2023, 48(2): 714-729.
- [31] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846-866.
- LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of rock mechanics in deep mining based on dynamic-static combined loading tests [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 846-866.
- [32] 张鹿, 李占金, 李群, 等. 中间主应力对深部硬岩三轴卸荷破坏及能量特征影响分析[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(1): 127-132.
- ZHANG Lu, LI Zhanjin, LI Qun, et al. Analysis of the influence of intermediate principal stress on the failure and energy characteristics of deep hard rock under triaxial unloading [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(1): 127-132.
- [33] KENETI A, SAINSBURY B A. Review of published rockburst events and their contributing factors [J]. Engineering Geology, 2018, 246: 361-373.
- [34] 宫凤强, 潘俊锋, 江权. 岩爆和冲击地压的差异解析及深部工程地质灾害关键机理问题[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 933-961.
- GONG Fengqiang, PAN Junfeng, JIANG Quan. Differential analysis of rockburst and rockburst-like phenomena and key mechanism of geological disasters in deep engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 933-961.
- [35] 陈绍杰, 冯帆, 李夕兵, 等. 复杂开采条件下深部硬岩板裂化破坏试验与模拟研究进展和关键问题[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(5): 868-888.
- CHEN Shaojie, FENG Fan, LI Xibing, et al. Advances and key issues in experimental and simulation research on plate cracking failure of deep hard rock under complex mining conditions [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(5): 868-888.
- [36] 李兆霖, 周伟, 王连国, 等. 含随机裂隙岩石真三轴破裂演化数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(1): 43-51.
- LI Zhaolin, ZHOU Wei, WANG Lianguo, et al. Numerical simulation of true triaxial fracture evolution in rocks containing random fractures [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 43-51.

(责任编辑 沈春妮 仝腾)