

深部含结构面岩体动力扰动破坏特性试验研究

梁志强¹, 孙恬², 杨林¹, 贾鹏飞¹, 何本国²

(1. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明 650041;

2. 东北大学 深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:深埋隧道的稳定性受原生结构面、高应力环境、爆破损伤和动力扰动等多因素共同影响,不同扰动方向下岩体的失稳机理尚不明确。以钻爆法隧道开挖过程中发生的结构面控制型岩爆为工程背景,依据现场实测地应力为不同结构面倾角下的静态及扰动真三轴试验,系统分析含结构面岩石在不同扰动方向下的力学性质、裂纹演化及破坏模式。结果表明,中间主应力方向扰动使峰值强度降低1.32%~7.41%,并增强剪切破坏,而最小主应力方向扰动则更易促使裂纹扩展与聚集,使峰值强度降低4.61%~11.11%,并诱发张拉破坏。结构面倾角与动力扰动共同控制岩石的储能与失稳特征:倾角为60°的试样虽更易失稳但岩爆效应较弱,倾角为80°的试样失稳阈值较高但可释放大量动能易诱发强烈岩爆。除倾角为60°外,含结构面试样普遍具有更高的储能极限和更大的破坏难度。

关键词:扰动真三轴;深埋隧道;结构面;岩爆;破坏特性

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2026)02-0039-13

随着地下工程规模不断扩大和埋深持续增加,深部硬岩隧道动力灾害问题日益突出^[1-3]。川藏铁路、雅砻江流域水电等重大深埋工程均面临复杂地质环境与极端工程挑战^[4-5]。深埋开挖后,岩体处于三高应力状态并储存大量初始能量,若受到扰动将释放和转移能量,极易诱发破坏^[6-7]。特别是在深埋隧洞中,更易发生岩爆等地质灾害^[8],并显著改变其发生的频率和程度,对施工安全造成严重威胁^[9-12]。隧道施工方法对动力扰动效应具有重要影响,钻爆法作为深埋硬岩隧道中普遍采用的开挖方式,其爆破荷载及应力波作用不仅会对围岩产生瞬态动力扰动,还会改变局部应力分布与能量释放路径,从而显著增加岩爆发生的风险^[13-15]。

除高地应力与扰动因素外,结构面也是控制深部岩体失稳的重要条件^[16-20]。天然节理、裂隙和断层在深部岩体中广泛发育,不仅削弱岩体整体强度,还在动力扰动作用下形成应力集中区,进一步促进隧道围岩失稳并诱发岩爆灾害^[1,21-23]。研究表明,结构面受扰动影响区域更容易发生结构面型岩爆^[24-26]。在掌子面(爆破源)处,强扰动波可直接触发硬岩破裂;而远离掌子面时,冲击波虽已衰减为弱动力扰动(见图1),但在高切向应力作用下仍可能诱发结构面型岩爆。值得注意的是,扰动方向对岩体的应力路径及能量演化具有显著影响,可能决定破坏由稳定向失稳转化的临界条件。然而,动力扰动对岩爆的具体影响仍不明确。相邻隧道爆破会扰动最小主应力(σ_3)方向的硬岩,而工作面爆破则使动力波沿中间主应力(σ_2)方向传播。不同方向的动力扰动对结构面岩石系统的影响迄今仍缺乏研究。同时,大多数强烈岩爆与结构面倾角密切相关^[27]。为深入理解并有效防控上述动力灾害,有必要综合考虑动力扰动与结构面对深部岩体破坏性能的耦合作用,这对揭示深部岩爆形成机理及防控规律具有重要启示。

收稿日期:2026-03-25 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20260058

基金项目:国家自然科学基金青年资助项目 A类(52525808)

作者简介:梁志强(1984—),男,高级工程师,研究方向为铁路工程施工及管理。E-mail:364046624@qq.com

梁志强,孙恬,杨林,等.深部含结构面岩体动力扰动破坏特性试验研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2026,39(2):39-51.

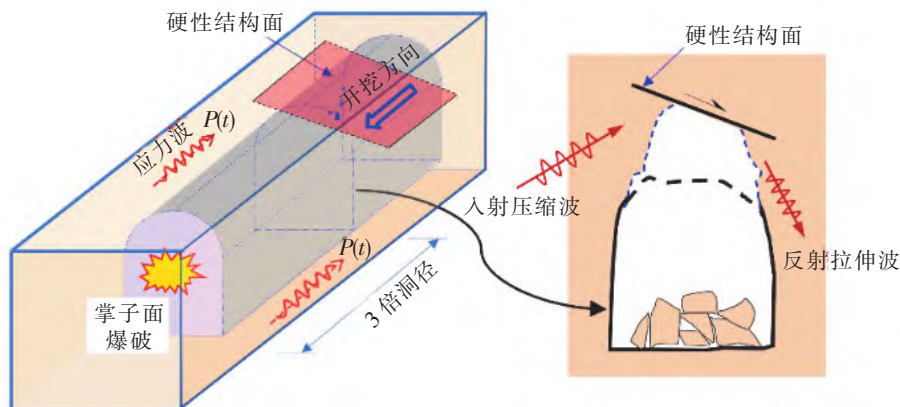


图 1 远场爆破产生动态扰动触发节理控制岩爆的示意图

近年来,大量学者针对动力扰动下的完整和结构面岩石开展了一系列室内岩爆试验^[28-31]。Luo et al^[32]在动静耦合条件下开展真三轴压缩试验,模拟 3 种不同类型弱扰动的动态诱发岩石破坏,研究了岩石动力学损伤机理及声发射特性。Su et al^[33]利用真三轴岩爆试验机系统研究了弱动力扰动对含结构面花岗岩岩爆的影响,结果表明,弱动力扰动降低了应力水平,使岩爆更易发生,并改变了声发射与能量释放特征;同时,结构面类型改变了扰动对构造岩爆的影响,其暴露状态与倾角对岩爆强度与危险性具有显著控制作用。刘岩鑫等^[34]利用高压伺服动真三轴试验机开展了弱动力扰动下的岩爆模型试验。结果表明弱动力扰动可降低岩爆发生所需的应力水平并扩大破坏范围;在高应力下施加扰动会加速岩爆发生并使其更为剧烈,而在低应力下施加扰动则导致岩爆过程相对缓慢且剧烈程度较弱。颜晓阳^[35]开展了静力与弱动力扰动荷载下深埋隧洞结构面型岩爆的孕育特征及机理研究,揭示了结构面出露条件与倾角对岩爆孕育过程、声发射演化及能量释放的影响,发现弱动力扰动能够促进结构面型岩爆发生,但其促进作用因结构面类型不同而异。此外,提出了结构面型岩爆的倾向性判据,为深埋隧洞岩爆预测提供了科学依据。

综上所述,目前动力扰动诱发深部岩体岩爆的研究取得了不少成果,但仍存在两大问题:含结构面岩体在深部高应力与动力扰动耦合作用下的破坏机制研究不足,难以准确揭示结构面对岩爆发生与演化的控制作用;实验室层面针对不同扰动条件的系统研究仍然不足,尤其是缺少对不同扰动方向作用下能量演化规律的实验验证。因此,本研究依据隧道开挖过程中发生的结构面控制型岩爆,取样含有结构面的围岩,制作成不同倾角的含天然硬性结构面的岩石试样,制定不同扰动条件的真三轴试验,从应力、应变、裂纹特征、能量演化等不同角度分析结构面及扰动条件对岩石破裂的影响。通过区分不同扰动方向的作用,揭示各条件下破坏模式与能量转化的差异机制,不仅能够深化对深部硬岩破裂机理的认识,也能为岩爆灾害的预测与防控提供更为可靠的理论支撑。该研究有助于加深深部岩体力学理论认识、提升重大深埋工程的施工安全性与稳定性。

1 工程背景

以中国西南部某深埋硬岩隧道为工程背景,该隧道全长 26 462 m,最大埋深约 1 809 m。隧址区断裂构造发育,主要受典型“Y”字型构造体系控制。其中隧道进口段围岩挤压破碎严重、碎裂岩化明显、节理发育。区域地应力环境表现为 NW-NWW 向主应力,与隧道轴线呈小角度相交。实测最大主应力方向为 N41°~71.8°W,强度范围 15~35 MPa。

目前隧道开挖段平均埋深约 400 m,采用钻爆法施工。如图 2 所示,受深部高应力环境和钻爆法施工扰动



图 2 隧道岩爆爆坑

的共同作用,隧道内发生多起岩爆,主要分布在掌子面前方 1~10 m 范围内,且多出现在左拱肩位置,呈现典型的结构面控制型岩爆破破坏特征。钻爆法开挖过程中形成的动力扰动方向对岩体破坏有显著影响,尤其在 σ_2 方向和 σ_3 方向扰动条件下的破裂行为差异明显。针对这一现象,在现场取样基础上,开展静态及不同扰动条件下的真三轴试验,系统研究含结构面岩体在不同扰动方向下的力学响应与破裂机制。

2 动力扰动花岗岩破坏特性

深部岩体在开挖过程中常处于动静组合应力状态,开挖边界围岩除承受高静应力外,还会受到钻爆开挖、机械振动及相邻岩爆等动力扰动影响^[5,36-38]。随着开挖推进,岩体所处的应力状态与扰动效应不断变化,潜在安全隐患难以预测。探究含结构面岩石在不同应力条件下的扰动响应,对围岩稳定性具有重要意义。针对钻爆法开挖,开展了静态真三轴、不同扰动方向以及峰后扰动的真三轴动力扰动试验,获取了花岗岩试样在不同扰动条件下的力学特性,并揭示了钻爆法施工扰动作用下硬岩的破坏特征。

2.1 动力扰动试验设备及方案

2.1.1 试验设备

试验采用东北大学自主研发的高压硬岩宽频低幅值面扰动刚性真三轴试验仪。该设备为“三刚”型加载模式,配备自平衡压力室,伺服控制系统最大轴向载荷为 2 000 kN,最大横向载荷为 3 000 kN;主机频率范围 0~20 Hz,面扰动频率范围 100~500 Hz,动态荷载幅值 0.1~100 MPa。可进行真三轴加卸载全应力-应变过程、三向主应力转换及高压硬岩低频扰动真三轴模拟等多种试验。该设备可从室内试验的角度模拟岩体高地应力状态及开挖爆破、机械振动和地震波等动态应力作用。

2.1.2 花岗岩组成成分

选取代表性花岗岩试样制备厚度为 0.03 mm 的薄片,并在 Axioskop-40 偏光显微镜下放大 40 倍进行扫描。如图 3 所示,试样均为花岗结构、块状构造,主要由石英(Qtz)、斜长石(Pl)、钾长石(Kfs)及黑云母(Bt)组成,并伴有少量白云母和金属矿物。石英为他形粒状,不同部位的石英粒径略有差异:在完整岩体中为 1.5~4.5 mm,岩体-结构面交接处为 1.0~3.5 mm,结构面内部为 1.0~4.0 mm。主要矿物成分见表 1。

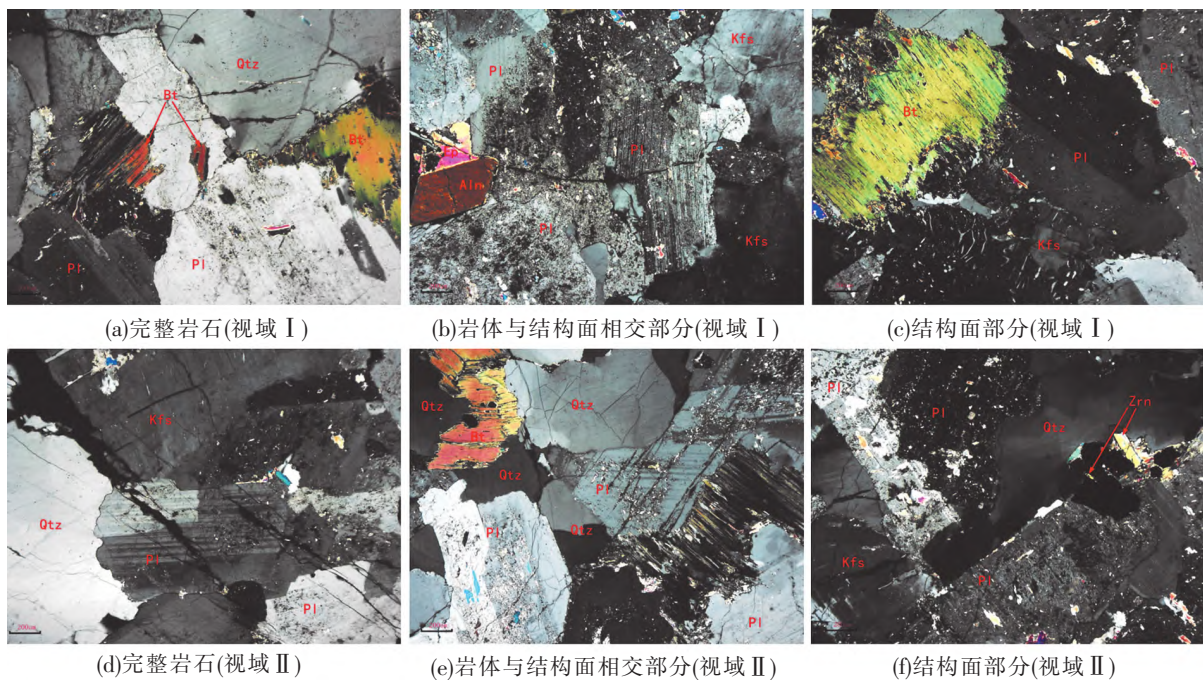


图3 岩石试样地质显微镜观察结果

表 1 矿物主要成分

扫描部分	石英	斜长石	钾长石	黑云母	白云母	金属矿物
图 3(a)、图 3(d)	30	50	10	5	—	<5
图 3(b)、图 3(e)	35	45	10~15	5	—	<5
图 3(c)、图 3(f)	35	40	15	5	<5	<5

2.1.3 岩样制备

试验所用花岗岩试样取自隧道现场爆堆岩块,按 ISRM 建议方法切割为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的长方体。试样两端平整度误差不超过 $\pm 0.01\text{ mm}$,垂直度误差控制在 0.02 mm 以内,表面粗糙度满足 $Ra = 1.6$ 。岩石密度范围为 $2.62 \sim 2.64\text{ g/cm}^3$,在最大主应力(σ_1)、 σ_2 、 σ_3 方向的纵波波速范围分别为 $3\ 660 \sim 3\ 760$ 、 $3\ 610 \sim 3\ 730$ 、 $3\ 590 \sim 3\ 690\text{ m/s}$ 。依据结构面与最大主应力法线方向的夹角($\leq 90^\circ$),将结构面倾角分为 0° 、 30° 、 60° 、 80° 、 90° 。每种试样均取自同一结构面的大块岩样,并保证结构面走向垂直向下延伸,以确保岩样的一致性。加工成形的岩石试样如图 4 所示。

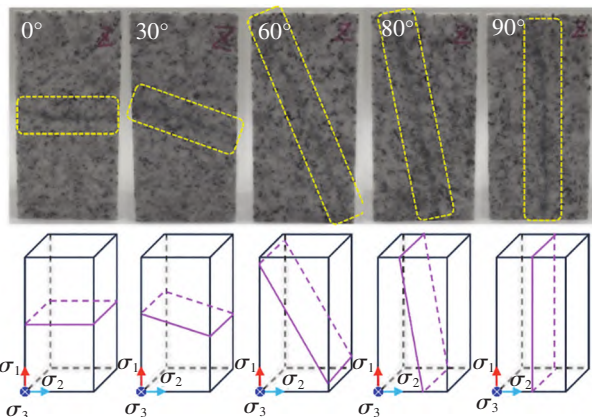


图 4 不同结构面倾角岩样

2.1.4 试验方案

基于岩爆现场实测,预设原位应力 σ_2 、 σ_3 分别为 20、5 MPa。具体而言,原位应力测量表明 σ_2 约为 20 MPa,方向平行于隧道轴线,开挖后变化不大;岩爆缺口的最大深度达 5 m,根据 Kirsch^[39]解算 σ_3 约为 5 MPa。据此设计了如图 5 所示花岗岩试样静态和动态扰动真三轴加载路径。

(1)静态真三轴试验。如图 5(a)所示,先将试样三向加载至初始地应力状态, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 的加载速率分别为 1.25、2.5、2.5 kN/s,保持 σ_2 和 σ_3 恒定,在 σ_1 方向继续加载,当达到裂纹损伤应力(σ_{cd})时,为了完整捕捉到岩石峰后应力-应变曲线,将加载方式由力控制转为 σ_1 方向的位移控制,加载速率设为 0.015 mm/min,直至试样发生破坏,得到全应力-应变曲线并记录峰值强度(σ_p)。

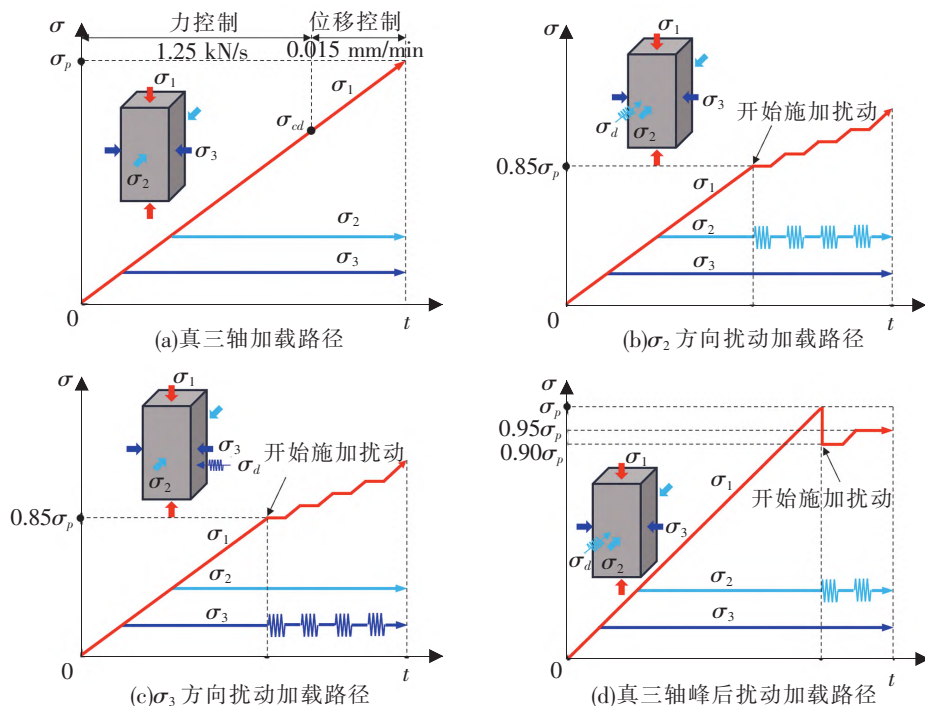


图 5 动力扰动真三轴加载路径

(2)不同扰动方向真三轴试验如图5(b)、图5(c)所示,在保持前述试验相同的初始加载条件下,将 σ_1 加载至接近 $0.85\sigma_p$ 后停止,三向应力维持恒定。在 σ_2 方向施加动态扰动 σ_d ,扰动频率为20 Hz、幅值为2 MPa,若试样未出现明显变形或破坏,则在 σ_1 方向增加5 MPa并继续扰动,直至试样破坏,卸载并取出试样观察破坏模式。相同加载条件下,在 σ_3 方向施加扰动,直至试样破坏。

(3)峰后扰动真三轴试验如图5(d)所示,在相同初始加载条件下,将 σ_1 加载到 σ_d 时,将加载方式转为 σ_1 方向的位移控制,加载速率为0.015 mm/min,加载至 σ_p 后,再将 σ_1 方向位移控制转为力控制,并卸载至 $0.90\sigma_p$,同时在 σ_2 方向施加频率为20 Hz、幅值为2 MPa的扰动,最大扰动时间为5 min。若试样未发生破坏,则将 σ_1 增加至 $0.95\sigma_p$,继续在相同条件下施加扰动,直至试样破坏。最后卸载并取出试样以观察其破坏模式。

2.2 静态真三轴压缩下花岗岩破坏特性

图6展示了真三轴压缩条件下不同结构面倾角花岗岩试样的应力-应变曲线及破坏模式,图6中红色实线标记的贯通拉剪裂纹为主要裂纹,黄色实线标记的未贯通拉剪裂纹和拉裂纹为次要裂纹。当结构面倾角为 0° 时,试样发生剪切破坏,形成3条主要裂纹,且主要裂纹周围分布多条次要裂纹;倾角为 30° 时,出现2条主要裂纹,呈“V”字型分布;倾角为 60° 时,在结构面附近集中发育大量短拉剪倾斜裂纹,形成由左上至右下的剪切带;倾角为 80° 时,仅出现1条主要裂纹和2条次要裂纹,其中主要裂纹倾角为 80° ;倾角为 90° 时,试样破坏表现为1条主要裂纹和1条次要裂纹,主要裂纹倾角约为 87° 。

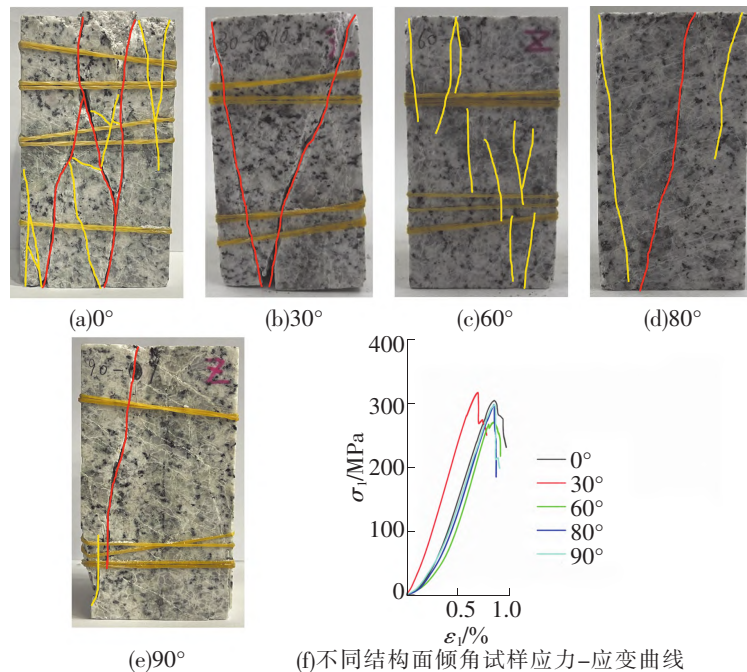


图6 工程现场花岗岩试样静荷载压缩真三轴应力-应变曲线及破坏模式

图7给出了不同结构面倾角花岗岩试样的强度变化规律,结果表明,试样强度随结构面倾角增大呈整体“U”型演化趋势,其中在倾角为 60° 时强度最低,对试样的削弱作用最为显著。

2.3 不同扰动方向下花岗岩破坏特性

图8展示了花岗岩试样在 σ_2 方向扰动下的应力-应变曲线及破坏模式。结构面倾角为 0° 时,试样发生剪切破坏,形成2条主要裂纹;倾角为 30° 时,出现4条主要裂纹和1条次要裂纹;倾角为 60° 时,仅出现1条由左上至右下贯穿的主要裂纹;倾角为 80° 时,形成2条主要裂纹并呈“V”型分布,且动力扰动促使主要裂纹周围形成更多次要裂纹;倾角为 90° 时,试样破坏表现为2条主要裂纹。

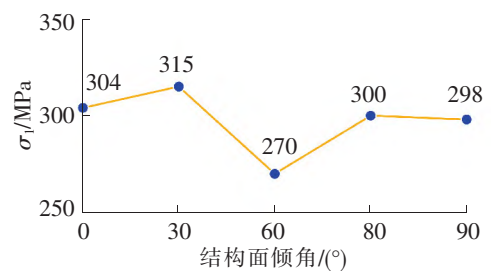


图7 不同结构面倾角花岗岩试样的强度

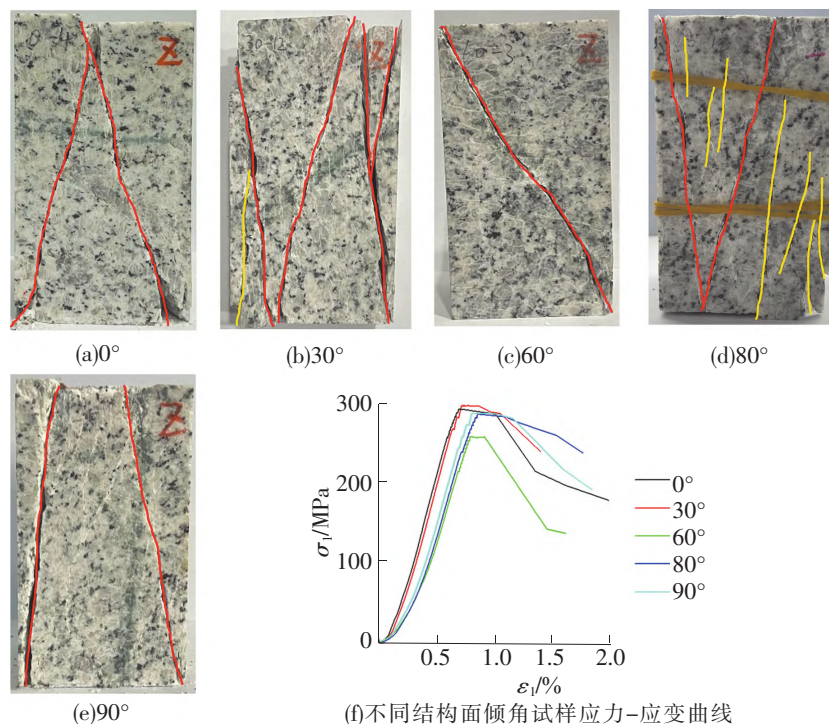


图 8 工程现场花岗岩试样 σ_2 方向扰动下应力-应变曲线及破坏模式

图 9 展示了花岗岩试样在 σ_3 方向扰动下的应力-应变曲线及破坏模式。结构面倾角为 0° 时, 出现 2 条主要裂纹和 1 条由右上至左下贯穿的次要裂纹; 倾角为 30° 时, 出现 2 条主要裂纹和 2 条次要裂纹; 倾角为 60° 时, 仅有 1 条由右上至左下贯穿的主要裂纹; 倾角为 80° 时, 出现 3 条主要裂纹和 2 条次要裂纹; 倾角为 90° 时, 表现为 3 条主要裂纹和 1 条次要裂纹。

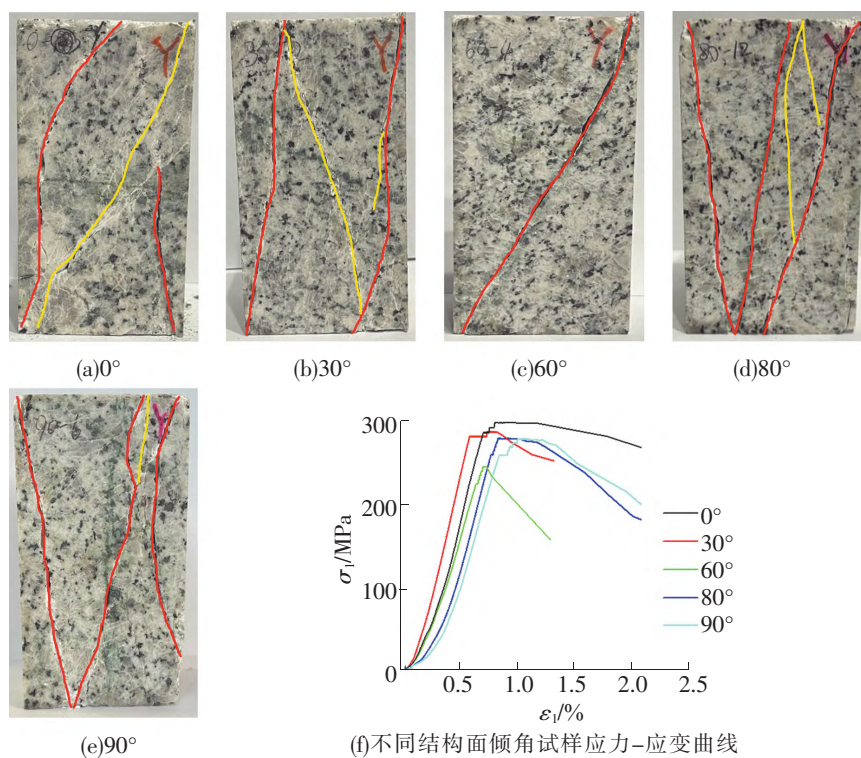


图 9 工程现场花岗岩试样 σ_3 方向扰动破坏应力-应变曲线及破坏模式

对比可见,动力扰动条件下剪切裂纹更加显著,微裂纹数量明显增加,岩石整体性降低,裂纹面伴随大量白色粉末,显示出更剧烈的剪切破坏,扰动对主要裂纹的形成具有显著促进作用。 σ_2 与 σ_3 方向扰动均在 σ_2 方向形成贯通裂纹,尤其 σ_3 方向扰动更易诱发裂纹萌生、扩展和聚集,主裂纹附近产生的细小裂纹甚至可促使相邻主裂纹连接。应力-应变曲线亦表明,相较静载条件,扰动条件下峰后曲线下降速率减缓,试样在峰值强度后变形显著增大,三向承载力略有降低,破坏模式呈现由脆性向延性的转变。

如表 2 所示,不同荷载条件下结构面花岗岩试样的强度对比结果表明:在动力扰动与硬性结构面共同作用下,各倾角试样强度均有不同程度下降,扰动显著加速了破坏过程并降低强度。 σ_3 方向扰动导致的强度下降幅度在各结构面倾角下均大于 σ_2 方向扰动,且强度变化趋势与 σ_2 方向扰动相似,定量验证了 σ_3 方向扰动对强度的削弱作用更为显著。动态扰动在 σ_3 方向使试样峰值强度平均降低约 8.58%,约为 σ_2 方向扰动的 2 倍,且在 σ_3 方向扰动诱发宏观开裂所需时间通常更短,显示 σ_3 方向扰动对结构面花岗岩的影响明显强于 σ_2 方向。同时, σ_2 方向扰动会加速剪切破坏,而 σ_3 方向扰动则可以促进拉伸破坏。

表 2 不同加载条件下结构面花岗岩试样强度对比

结构面 倾角/(°)	静态 强度/MPa	σ_2 方向动态扰动			σ_3 方向动态扰动		
		峰值强度/MPa	扰动持续时间/s	强度下降/%	峰值强度/MPa	扰动持续时间/s	强度下降/%
0	304	300	283	1.32	290	57	4.61
30	315	295	300	6.35	280	10	11.11
60	270	250	247	7.41	240	35	11.11
80	300	290	34	3.33	275	75	8.33
90	298	290	40	2.68	275	26	7.72

此外,与静态真三轴条件相同,在动力扰动条件下结构面倾角为 60°的试样强度最低,且相较静态真三轴条件其强度下降幅度最大,表明在动力扰动作用下此类试样危险性最高,最易失稳。因此,在实际工程中分析岩爆案例及制定防控措施时,应重点关注结构面倾角对岩体稳定性的影响,并结合围岩结构特征合理选择支护方式。

如图 10 所示,通过测量不同加载条件下结构面倾角为 80°的试样破裂面倾角可知, σ_2 方向扰动下破裂角约为 76°,而 σ_3 方向扰动下约为 82°,相差 6°,表明扰动方向对岩石破坏模式具有显著影响: σ_2 方向扰动更易诱发剪切破坏,而 σ_3 方向扰动不仅增大了主要裂纹角度,还产生 2 条竖向裂纹,更有利于张拉破坏的形成。

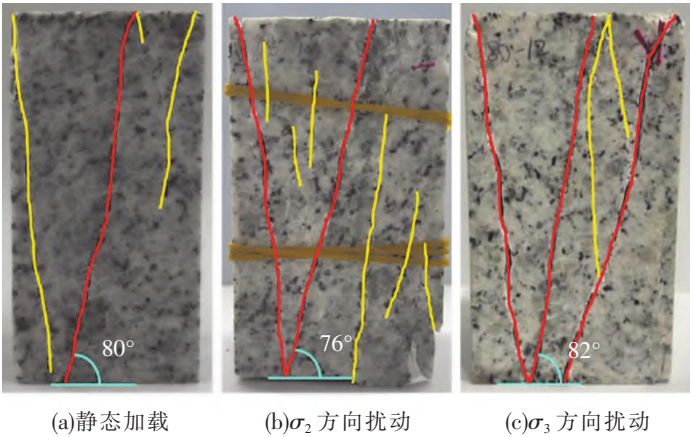


图 10 破裂面倾角试验结果

2.4 花岗岩真三轴峰后扰动破坏特性

图 11 展示了完整花岗岩及不同结构面花岗岩试样在峰后扰动下的应力-应变曲线及其破坏模式,相应的实验结果列于表 3。

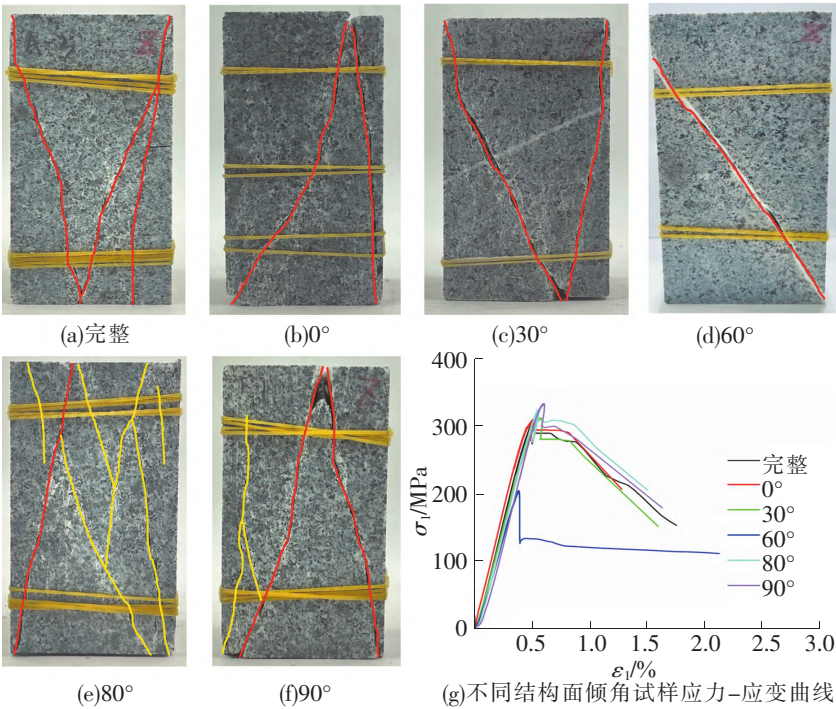


图 11 工程现场花岗岩试样峰后扰动破坏应力-应变曲线及破坏模式

表 3 峰后扰动下花岗岩试样的实验结果

结构面倾角/(°)	峰值强度/MPa	峰后 90% σ_p	峰后 95% σ_p	抗扰动能力
无	308	未扰坏	破坏(扰动 0 s)	较强
0	310	未扰坏	破坏(扰动 118 s)	较强
30	312	破坏(扰动 268 s)	—	一般
60	202	破坏(未扰)	—	较弱
80	325	未扰坏	破坏(扰动 46 s)	较强
90	333	破坏(扰动 220 s)	—	一般

完整试样以及结构面倾角为 0°和 30°的试样破裂块度较完整,几乎无次要裂纹,在峰后 90% σ_p 条件下可抵抗较长时间扰动,其中完整试样和结构面倾角为 0°的试样在长时间扰动后仍保持稳固,表现出良好的稳定性,仅在应力增至 95% σ_p 时才发生不同程度破坏;完整岩石开始失稳、变形急剧增加并在无扰动情况下发生破坏,而结构面倾角为 0°的试样在扰动 118 s 后才发生破坏;结构面倾角为 30°的岩石在峰后 90% σ_p 条件下经 268 s 扰动后破坏,具备一定抗扰动能力,但稳定性一般。结构面倾角为 60°的试样在达到 σ_p 后,在 σ_1 方向卸荷至 90% σ_p 的过程中即发生沿结构面滑移破坏,稳定性极差。结构面倾角为 80°的试样在峰后 90% σ_p 处经 5 min 扰动后仍保持稳固,将应力增至 95% σ_p 并扰动 46 s 后破坏,产生 1 条主要裂纹并伴随大量次要裂纹,表明扰动促进了裂纹扩展,岩体几何中心部位破裂程度较高并出现大量碎屑,而远离中心部位块度相对完整。结构面倾角为 90°的试样在峰后 90% σ_p 经 220 s 扰动后破坏,主要裂纹呈倒“V”形,次要裂纹较少,表明扰动主要促进了主要裂纹的发展,其峰后抗扰动能力与倾角为 30°的试样接近,稳定性一般。

3 能量特征

岩石破坏实质上是外界能量输入、内部能量储存与不可逆能量耗散共同作用的结果。在深部高应力条件下,工程开挖会导致能量瞬时释放,极易诱发脆性岩体开裂、片帮及岩爆等灾害。因此,从能量角度研究真三轴应力状态下深部硬岩的破裂演化与能量特征具有重要意义。考虑到岩石加载到峰后临界状

当施加载荷时, U_e 储存在岩体中, 峰值后扰动产生的 U_k 进一步储存在岩体中, 因此定义岩石储能极限为 $U_u = U_e + U_k$ 。研究表明, 结构面倾角显著影响岩石的储能极限及破坏特征。除倾角为 60° 的试样外, 含结构面试样的储能极限均显著高于完整试样, 表明其在峰值应力后具有更强的储能能力, 破坏难度更大。然而, 储能越多, 破坏时释放的能量和破坏程度也越高, 岩爆危险性随之增加。相较之下, 倾角为 60° 的试样储能极限最小, 在相同应力条件下最易失稳, 但破坏时释放的动能有限, 岩爆效应较弱; 而倾角为 80° 的试样虽然失稳门槛较高, 但储能极限大, 一旦外部输入能量超过其储能阈值将释放大量动能, 可能诱发强烈岩爆。

因此, 在隧道或地下工程开挖过程中, 应结合围岩结构面倾角的不同, 针对性地制定抗岩爆措施。为降低岩爆发生概率或减轻其烈度, 可在围岩尚未积累过多能量前采取预裂或卸能等手段, 提前释放内部应变能, 再实施喷射混凝土等支护措施, 以避免支护后出现岩爆现象。

4 破裂面粗糙度

岩石破裂面的粗糙度是影响其剪切力学行为的重要因素。Barton et al^[40] 提出的 JRC-JCS 模型可用于预测破裂面的抗剪强度, 其中节理粗糙度系数(JRC)用于定量描述岩石破裂面粗糙度。各破裂面的 JRC 值和高程差列于表 6。

表 6 破裂面 JRC 值和高程差

加载方式	结构面倾角/ $^\circ$	JRC 值	破裂面高程差/mm
无扰动	无	21.38	18.00
	0	18.56	14.07
	30	20.73	9.28
	60	11.20	8.78
	80	11.60	11.78
	90	17.18	10.13
σ_2 方向扰动	80	10.20	9.41
σ_3 方向扰动	80	16.50	14.40

结果表明, 完整试样及不同结构面倾角试样的破裂面均存在较大高程差。在静载条件下, 完整岩石破裂面高程差最大, 达 18.00 mm, 推测与拉应力作用导致的较大破裂面参差起伏有关, 计算得到 JRC 值为 21.38, 表面粗糙度较高, 抗剪能力较强。含结构面试样中, 倾角为 0° 的破裂面高程差和 JRC 值与完整试样接近, 表明结构面对其破坏影响较小, 抗剪能力依然较强; 倾角为 30° 的试样整体高程差较小, JRC 值较高, 同样表现出较强的抗剪能力; 倾角为 60° 和 80° 试样的破裂面宏观裂纹特征显示, 其为沿结构面的剪切破坏, 且 JRC 值较低, 抗剪能力明显减弱; 倾角为 90° 的试样表面粗糙度较高, 仍具有一定的抗剪能力。

以结构面倾角为 80° 的试样为例, 在 σ_2 方向扰动下, 其破裂面最大高程差和 JRC 值分别降至 9.41 mm 和 10.20, 说明扰动促进了剪切裂纹发育; 而在 σ_3 方向扰动下, 两者分别升至 14.40 mm 和 16.50, 均明显增加, 结合宏观破裂角度分析可知, σ_3 方向扰动改变了破裂模式并促进张拉破坏。

综上所述, 完整试样及结构面倾角为 0° 、 30° 的试样抗剪能力较强, 倾角为 90° 的试样抗剪能力一般, 而倾角为 60° 和 80° 的试样最弱。动力扰动方向对破坏模式影响显著: σ_2 方向扰动增强了剪切机制, 而 σ_3 方向扰动则更易诱发张拉破坏。

5 结论

依据隧道开挖过程中发生的结构面控制型岩爆灾害特征, 以现场实测地应力为试验初始应力, 开展含不同结构面倾角的岩石试样静态真三轴试验以及不同扰动条件的扰动真三轴试验, 分析含结构面岩石力学性质及破裂模式, 分析动力扰动对含结构面岩石破裂产生的影响。

(1)在隧道工作面远场爆破条件下, σ_2 方向传播的动力扰动会使峰值强度降低1.32%~7.41%,而在相邻隧道爆破(或岩爆)条件下, σ_3 方向动力扰动会使峰值强度降低4.61%~11.11%。

(2)动力扰动对深部含结构面花岗岩中主要裂纹的产生有显著促进作用, σ_2 与 σ_3 方向扰动均在 σ_2 方向形成贯通裂纹,其中 σ_3 方向扰动更易促使裂纹扩展与聚集。在各结构面倾角下, σ_3 方向扰动导致的强度下降幅度均高于 σ_2 方向,表明 σ_3 方向扰动对岩石强度削弱作用更为显著。

(3)动力扰动方向显著影响深部含结构面花岗岩的破坏模式, σ_2 方向扰动增强了剪切破坏机制,而 σ_3 方向扰动则更易诱发张拉破坏。

(4)结构面的倾角和动力扰动因素共同影响深部含结构面花岗岩的储能与破坏特征。倾角为60°的试样在相同应力条件下虽更易失稳,但岩爆效应较弱;而倾角为80°的试样虽失稳阈值较高,但在原位应力足够高时可释放大量动能,易诱发强烈岩爆。

(5)除结构面倾角为60°的试样外,含结构面试样普遍具有更高的储能极限,破坏难度更大;在隧道或地下工程中,应结合深部围岩结构面倾角及外部扰动荷载方向,针对性地采取预裂、卸能和强化支护等控制措施,以降低岩爆发生风险。

参 考 文 献

- [1]Li Hongpu, He Benguo, Feng Xiating, et al. Mechanism of axial chain rockbursts in deep tunnels: structural plane-induced stress concentration triggered by drilling and blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58: 13977-13998.
- [2]He Manchao, Wang Qi. Rock dynamics in deep mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(9): 1065-1082.
- [3]梁伟章, 赵国彦. 深部硬岩长短期岩爆风险评估研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 19-39.
- [4]兰恒星, 张宁, 李郎平, 等. 川藏铁路可研阶段重大工程地质风险分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 326-341.
- [5]李邵军, 徐怀胜, 晏飞, 等. 锦屏隧洞深部大理岩动力扰动力学特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2669-2676.
- [6]Zheng Zhi, Li Ronghua, Pan Pengzhi, et al. Excavation disturbance response of deep-buried tunnel with novel dynamic anisotropic mechanical model and failure degree index[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 158: 106429.
- [7]蔡鑫, 陈立业, 周子龙, 等. 扰动诱发高应力岩石动力响应及岩爆灾变机制[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(7): 2463-2475.
- [8]罗春, 张志强, 林迪睿, 唐泽林. 特长深埋隧道合修与分修对岩爆的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 28-37.
- [9]陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 561-569.
- [10]李立民, 唐烈先, 赵力. 超长深埋隧洞岩爆监测与预警技术应用: 以引汉济渭工程秦岭输水隧洞为例[J]. 隧道建设, 2023, 43(9): 1533-1540.
- [11]欧阳林, 张如九, 刘耀儒, 等. 深埋隧洞岩爆防控技术及典型工程应用现状综述[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(12): 161-170.
- [12]He Benguo, Liu Hanyi, Feng Xiating, et al. Effect of dynamic disturbance frequency on brittle failure of granite in deep excavation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2026, 18(2): 1002-1015.
- [13]Niu Wenjing, Wei Shuai, Feng Guangliang, et al. Influence of stress and geology on the most prone time of rockburst in drilling and blasting tunnel: 25 tunnel cases[J]. Engineering Geology, 2024, 340: 107680.
- [14]Zhang Qi, Zhang Xiaoping, Liu Quansheng, et al. Rockburst prediction and prevention in a deep-buried tunnel excavated by drilling and blasting: a case study[J]. Engineering Geology, 2024, 330: 107404.
- [15]周琳, 杨新安, 陈小军, 等. 凝灰岩力学特性与声发射特征研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2026, 39(1): 55-63.
- [16]韩世迎, 王航龙, 彭俊, 等. 结构面影响深埋隧道硬质围岩岩爆特征试验研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(6):

- 1765-1776.
- [17]李明亮, 秦庆词, 李克钢, 等. 动力扰动下深部含平直型结构面巷道岩爆破破坏特征及预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(12): 3333-3348.
- [18]Li Yuzong, Yuan Liang, Zhang Qinghe. Brittle rock mass failure in deep tunnels: the role of infilled structural plane with varying dip angles[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 176: 105721.
- [19]Dai Jinhao, Gong Fengqiang, Qi Shengwen, et al. Quantitative evaluation of rockburst proneness for surrounding rocks considering combined effects of the structural plane and excavation disturbance[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105335.
- [20]单仁亮, 柏皓博, 孙鹏, 等. 深部岩体结构面动力特性与致灾效应研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(6): 24-44.
- [21]He Mingming, Ding Mingchen, Yuan Zhuoya, et al. Numerical simulation of rock bursts triggered by blasting disturbance for deep-buried tunnels in jointed rock masses[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 161: 105609.
- [22]Cheng Tai, He Manchao, Li Hongru, et al. Effects of structural plane on rockburst in tunnel: a review based on published cases[J]. Engineering Geology, 2025, 356: 108245.
- [23]Gong Hangli, Wang Gang, Luo Yi, et al. Shear fracture behaviors and acoustic emission characteristics of granite with discontinuous joints under combinations of normal static loads and dynamic disturbances[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 125: 103923.
- [24]Cheng Guangtan, Liu Xinnan, Chen Jun, et al. True triaxial test study on triggering mechanisms of structure-type rockbursts using low-strength and high-brittleness materials under unloading and dynamic disturbance[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 182: 110062.
- [25]Chang Xinke, Wu Shunchuan, Zhang Zhenrui, et al. Investigating the simulation test and acoustic emission characteristics of structural-control type rockbursts in deep underground environments[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 310: 110477.
- [26]周雄, 孟凡震, 修占国, 等. 隧道围岩结构面倾角对诱发岩爆的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(4): 94-100.
- [27]Li Ning, Zare Naghadehi Masoud, Jimenez Rafael. Evaluating short-term rock burst damage in underground mines using a systems approach[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2020, 34(8): 531-561.
- [28]Yao Zhigang, Li Ruihan, Yu Tao, et al. Experimental study on the trigger mechanism of dynamic disturbance-induced continuous rockburst[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 136: 104827.
- [29]Hu Lihua, Ma Ke, Liang Xin, et al. Experimental and numerical study on rockburst triggered by tangential weak cyclic dynamic disturbance under true triaxial conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 602-618.
- [30]吴顺川, 张侦锐, 韩龙强, 等. 含不同倾角预制结构面的深埋隧洞岩爆发生机制研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(1): 13-31.
- [31]李占金, 杨思浩, 李群, 等. 动力扰动下轴向应力对深部巷道破坏特征影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(3): 10-16.
- [32]Luo Danni, Su Guoshao, Zhang Gangliang. True-triaxial experimental study on mechanical behaviours and acoustic emission characteristics of dynamically induced rock failure[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 1205-1223.
- [33]Su Guoshao, Yan Xiaoyang, Jiang Jianqing. Influence of weak dynamic disturbances on rockburst occurring in the borehole containing a small-scale single structural plane: an experimental study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57: 5997-6030.
- [34]刘岩鑫, 蒋剑青, 苏国韶, 等. 弱动力扰动对花岗岩圆形隧洞岩爆影响的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(9): 88-99.
- [35]颜晓阳. 静力与弱动力扰动荷载下深埋隧洞结构面型岩爆孕育特征及机理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2024: 20-144.
- [36]文志杰, 黄景, 蒋宇静, 等. 动静组合循环加载试验系统研制及试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2817-2827.
- [37]Qiao Zhiqiang, Li Kegang, Li Mingliang, et al. Experimental study of rockburst in structurally controlled deep-buried roadways under static-dynamic coupling via true triaxial tests[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2026,

141: 105244.

- [38]吕振利, 孙金山, 左昌群. 爆破地震波作用下深埋圆形隧道围岩质点振动规律研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 38-44.
- [39]Kirsch E G. Die theorie der elastizit t und die bed rfnisse der festigkeitslehre[J]. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1898, 42: 797-807.
- [40]Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mechanics, 1974, 6(4): 189-236.

Experimental Study on Failure Characteristics of Deep Rock Mass with Structural Planes Under Dynamic Disturbance

LIANG Zhiqiang¹, SUN Tian², YANG Lin¹, JIA Pengfei¹, HE Benguo²

(1. China Water Resources and Hydropower Fourteenth Engineering Bureau Co. Ltd., Kunming 650041, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment,
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The stability of deep-buried tunnels is jointly affected by multiple factors, including inherent structural planes, high in-situ stress, blasting damage, and dynamic disturbances, while the instability mechanisms of surrounding rock under different disturbance directions remain unclear. Taking the structural plane-controlled rockburst during tunnel excavation by the drill-and-blast method as the engineering background, static and disturbed true triaxial tests were conducted on tunnel surrounding rocks containing natural structural planes with different dip angles, based on in-situ stress measurements. The mechanical properties, crack evolution, and failure modes of rock containing structural planes under various disturbance directions were systematically analyzed. The results show that disturbances in the σ_2 direction reduce the peak strength by 1.32%~7.41% and enhance shear failure, whereas disturbances in the σ_3 direction more readily promote crack propagation and coalescence, reducing the peak strength by 4.61%~11.11% and inducing tensile failure. The dip angle of the structural plane and the dynamic disturbance jointly govern the energy storage and instability characteristics of the rock. Specimens with a dip angle of 60° are more prone to instability but exhibit weaker rockburst effects, while those with a dip angle of 80° have a higher instability threshold but can release substantial kinetic energy, making strong rockbursts more likely. Except for the 60° case, specimens containing structural planes generally show a higher energy-storage limit and greater failure resistance.

Key words: disturbed true-triaxial test; deep-buried tunnel; structural plane; rockburst; failure characteristics