

微观负泊松比锚杆锚固结构面峰前循环剪切疲劳损伤特性研究

黄曼^{1,2}, 郭志炜^{1,2}, 洪陈杰³, 陶志刚³, 黄颢^{1,2}, 张贺^{1,2}

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴文理学院 浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室, 浙江 绍兴 312000; 3. 中国矿业大学(北京) 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 微观负泊松比(2G-NPR)锚杆抗剪切的支护性能已得到验证, 但其在疲劳荷载下的损伤行为仍需进一步研究。通过室内峰前循环试验, 比较 PR 钢(Q235 钢)和 2G-NPR 钢锚固结构面的剪切力学特性, 并探讨不同法向应力、粗糙度、剪切幅值和速率对 2G-NPR 钢锚固结构面剪切疲劳损伤特性的影响。结果表明: (1) 随着法向应力的增加, PR 钢锚固结构面的抗剪强度在循环次数增加后显著下降, 而 2G-NPR 钢锚固结构面的抗剪强度逐步提升, 体现了负泊松比效应对提升抗剪疲劳性能的重要性; (2) 2G-NPR 钢锚固结构面的峰值和残余抗剪强度随剪切速率和法向应力增加显著提高, 受粗糙度和剪切幅值影响较小; 峰前剪切刚度随粗糙度、剪切速率和法向应力增加而增大, 剪切幅值影响较小; 锚杆挠曲角随粗糙度、剪切幅值和速率增加而增大; (3) 2G-NPR 锚杆在不同循环次数下的剪切力与轴向力比值均低于 PR 锚杆, 表明其在抵抗剪切变形时能够有效承受轴向力, 确保岩体的支护效果。上述研究可为 2G-NPR 锚杆在微震区岩体支护工程中的应用提供一定参考。

关键词: 岩石力学; 峰前循环荷载; 2G-NPR 钢; 锚固结构面; 剪切特性; 能量吸收特性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)03-0543-14

Study on the pre-peak cyclic shear fatigue damage characteristics of 2G-NPR bolted rock joints

HUANG Man^{1,2}, GUO Zhiwei^{1,2}, HONG Chenjie³, TAO Zhigang³, HUANG Jin^{1,2}, ZHANG He^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 3. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The shear support performance of 2G-NPR bolts has been verified; however, their damage behavior under fatigue loading remains to be further explored. Through laboratory pre-peak cyclic loading tests, the shear mechanical properties of PR steel(Q235 steel) and 2G-NPR steel bolted rock joints were compared, exploring the effects of different normal stresses, roughness, shear amplitudes, and rates on the shear fatigue damage characteristics of 2G-NPR steel bolted rock joints. The results show that: (1) As the normal stress increases, the shear strength of PR steel bolted rock joints exhibits a marked decrease after an initial increase in the number of cycles, whereas the shear strength of 2G-NPR steel bolted rock joints gradually increases. This trend underscores the significant role of

收稿日期: 2024-07-05; **修回日期:** 2024-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42272333, 42377154)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 42272333 and 42377154)

作者简介: 黄曼(1983-), 男, 博士, 2005年毕业于长安大学土木工程专业, 现任教授, 主要从事岩体结构面力学性质等方面的教学与研究工作。

E-mail: hmcad@126.com. 通讯作者: 洪陈杰(1994-), 男, 现为博士研究生。E-mail: hongchenjie66@163.com

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0522

the negative Poisson's ratio effect in enhancing the shear fatigue performance of the 2G-NPR steel bolts. (2) The peak and residual shear strengths of 2G-NPR steel bolted rock joints significantly increase with higher shear rates and normal stresses, but are less affected by changes in joint surface roughness and shear amplitude. Additionally, the pre-peak shear stiffness of these joints increases with roughness, shear rate, and normal stress, while shear amplitude has only a minor effect. The flexural angle of the anchor rod increases with the roughness, shear amplitude, and shear rate. (3) The ratio of shear force to axial force of 2G-NPR anchor bolts is consistently lower than that of PR anchor bolts under different cyclic loading conditions, indicating that the 2G-NPR bolts can effectively withstand axial force during shear deformation, thus maintaining the stability and support effectiveness of the rock mass. This research offers a valuable reference for the application of 2G-NPR anchor bolts in rock mass support engineering, particularly in regions prone to microseismic activity.

Key words: rock mechanics; pre-peak cyclic loading; 2G-NPR steel; bolted rock joints; shear characteristics; energy absorption characteristics

1 引言

锚杆支护在矿山、水利工程及边坡防护等岩体工程领域中广泛应用^[1]。其基本原理是将锚杆固定在稳定的岩体中,通过注浆固化等工艺使其与岩体牢固结合,依靠锚杆和周围岩体的抗剪强度传递结构间的力^[2]。工程实践中发现:锚杆在支护岩体时常受到拉力和剪力的共同作用^[3-4]。这种复合应力状态易使岩体结构面处的锚杆发生拉剪破坏,从而导致工程岩体失稳^[5]。因此,研究锚固结构面的剪切特性对于提高岩体工程的稳定性具有重要意义。

目前,国内外专家学者已开展了诸多有关锚固结构面剪切力学特性的研究。Z. Zhao 等^[6]建立了剪切力作用下锚固结构面的弹塑性结构力学模型,发现锚杆锚固角度为 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,其抗剪作用最佳。刘泉声等^[7]发现锚杆锚固能显著提高岩石的抗剪强度,且提升幅度与岩石硬度呈正相关。C. H. Liu 和 Y. Z. Li^[8]研究发现锚固结构面中锚杆的剪切力和轴力贡献比随着锚杆锚固角度增加而增加,但随着结构面膨胀角和摩擦角的增加而减少。Y. Li 和 C. Liu^[9]研究了锚固角度、灌浆强度对锚固结构面中锚杆抗剪力的影响。上述研究对象为锚杆锚固下平直岩石结构面,但自然结构面大多是具有粗糙度的,粗糙度的变化将对锚固结构面的剪切特性和锚杆变形受力特征产生影响^[10]。为此,蒋宇静等^[11]通过试验和数值模拟对比研究了全锚和端锚 2 种方式在不同粗糙度条件下对岩石结构面剪切力学特性的影响。X. Wu 等^[12]通过室内试验发现锚杆锚固粗糙岩石结构面的剪切力学特性受结构面粗糙度变化影响显著。上述研究对于揭示单调荷载下锚杆在工程岩体支护中的剪切力学特性和变形特征具有重要意

义,但对于动态荷载下的锚杆支护剪切力学特性仍然缺乏深入了解。

工程岩体受到地震、采矿爆破、水位升降等因素的影响时,结构会受到动态载荷的作用^[13-14]。为此,吴泽坤等^[15]通过现场试验发现 BFRP 抗浮锚杆在循环荷载作用下的破坏形式主要表现为锚杆与锚固界面的剪切滑移破坏及杆体纤维丝拔断破坏。X. Wu 等^[16]研究了在不同粗糙度锚固结构面下,循环剪切荷载对锚杆的影响。上述研究中所加载的动态荷载接近或超过岩体结构面的极限承载能力,而在实际工程中存在微震、采矿扰动等现象,例如,三峡库区蓄水引起的水位波动导致微震活动频繁,最终引发了库区边坡滑坡^[17]。这些情况下,循环剪切荷载明显小于岩体结构面可承受的极限剪切荷载^[18-19],这一种循环加载被称为“峰前循环剪切作用”。刘新荣等^[18-20]通过剪切试验与 PFC2D 数值模拟,分析了二阶起伏体均质砂岩在峰前循环加载下的剪切特性,探讨了软弱层结构面的累积损伤机制;何 刘等^[21]研究了充填结构面,分析了结构面维持和结束峰前循环阶段的临界条件;M. Kou 等^[22]研究了含多尺度微凸体的结构面在峰前循环剪切下剪切特性。然而,上述研究均针对未锚固岩体结构面,现阶段关于峰前循环荷载下锚固岩体结构面的剪切疲劳特性研究仍较少。

传统钢筋锚杆支护系统难以应对动态荷载引发的深部岩体大变形,易导致巷道变形及支护失效^[23]。在长期受到动态荷载作用的复杂应力环境下,为了提高锚杆支护系统的性能,学者们研发了多种吸能锚杆。如 D-bolt 锚杆^[24]、TCC 锚杆^[25]及 MCBcone bolt^[26]等。但这些吸能锚杆材料普遍具有泊松比效应,在小变形条件下易发生颈缩和断裂。M. H. He 等^[27-28]针对此问题开展了深入研究,研发

出一种具有负泊松比效应(1G-NPR)的宏观复合结构锚杆,其具有优异的抗拉和抗剪性能,并已经广泛应用到隧道、边坡支护中^[29-30]。在宏观 NPR 复合结构锚杆的研究基础上,何满潮等将微量元素和钢材冶炼结合,研发出了微观负泊松比锚杆(2G-NPR 锚杆)。陶志刚等^[31]和 M. C. He 等^[32]分别开展了单调荷载加载下的 2G-NPR 钢锚固结构面直剪试验,研究了其破坏机制吸能特性。M. C. He 等^[33]通过现场试验,发现传统钢筋锚杆支护的巷道无法抵御爆炸冲击荷载,而 2G-NPR 锚杆支护的巷道能承受 3 级矿震冲击,展现出其高恒定阻力能力。但上述研究大都是针对单调荷载和高动载条件下进行的,对 2G-NPR 钢锚固结构面在峰前循环荷载下的剪切疲劳特性有待进一步探索。

鉴于以上认识,本文通过室内峰前循环剪切试验,对比了 PR 钢(Q235 钢)和 2G-NPR 钢锚固结构面的剪切力学特性,并研究了不同法向应力、粗糙度、剪切幅值及速率下 2G-NPR 钢锚固结构面的剪切疲劳损伤特性。研究成果可为其在微震区节理岩体加固支护工程中的应用提供一定参考。

2 试验方法

2.1 试样准备

为研究 2G-NPR 钢锚固结构面在峰前循环荷载下的剪切特性,采用水泥砂浆制备类岩石结构面。试样制备过程步骤如图 1 所示:3D 打印结构面轮廓板(选择 N. Barton^[34]提出的轮廓线,其 JRC 分别为 0, 6, 10)、组装钢模具、涂抹脱模剂、制备类岩石材料、置入钢模具中并振捣、脱模进行养护。试件

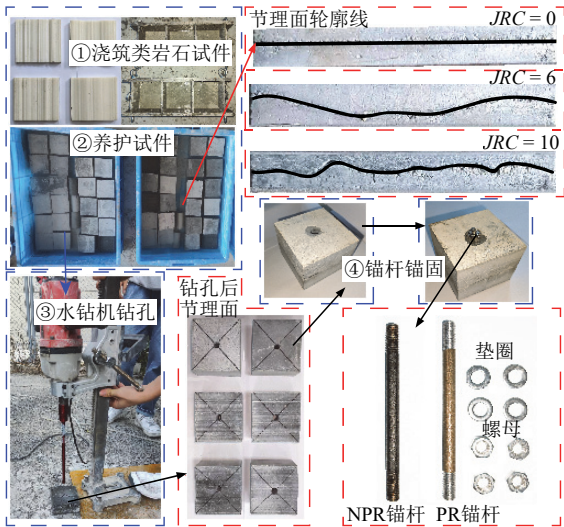


图 1 结构面试样制备及锚固
Fig.1 Production process of bolted rock joints

养护 28 d 后安装锚杆,具体流程包括:垂直于试件钻取孔径为 12 mm 的孔洞,清理孔壁后安装锚杆并灌注水泥砂浆进行锚固,水灰比取 0.25,灌注水泥浆后的试件在室内养护 14 d。最终加工成型的试样尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm。

参照杜时贵等^[35]提出的类岩石浇筑方法,本研究试件按 52.5 普通硅酸盐水泥:水:ISO 标准砂:微硅粉:减水剂(质量比)为 67:20:45:7:1 的配合比混合搅拌制得。为了确定类岩石结构面的基本力学参数,制作了 3 块直径为 50 mm,高径比 2:1 的标准试件,并在 MTS 刚性试验机上进行了单轴压缩试验。试验旨在测定类岩石材料的单轴抗压强度、弹性模量、黏聚力、泊松比等基本力学参数(见表 1)。试验中使用了 2 种不同类型的锚杆:2G-NPR 锚杆(杆体材料为 2G-NPR 钢)和 PR 锚杆(杆体材料为 Q235 钢)。2 种锚杆的杆体直径均为 8 mm,长度为 112 mm,两端预留出 6 mm 用于安装垫圈和螺母。

表 1 类岩石结构面力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock joints

抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	黏聚力/ MPa	泊松比	内摩擦 角/(°)
55.9	8.50	0.21	0.20	31.7

为测试锚杆杆体材料的性能,采用 60 t 微机控制电子万能材料试验机进行了拉拔试验。试验结果如图 2 所示,PR 锚杆杆体材料的拉伸曲线存在明显的屈服平台,抗拉屈服强度为 346 MPa,最大抗拉强度为 529 MPa,最大力总延伸率为 18.10%。而 2G-NPR 锚杆杆体材料的拉伸曲线没有屈服平台,在锚杆杆体拉断后,2G-NPR 锚杆杆体材料断面无明显颈缩现象,抗拉屈服强度为 602 MPa,最大抗拉强度为 770 MPa,最大力总延伸率为 31.70%,具有高恒阻、高延伸率等力学特性。

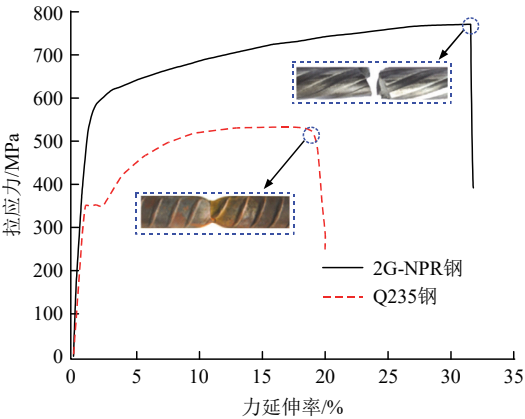
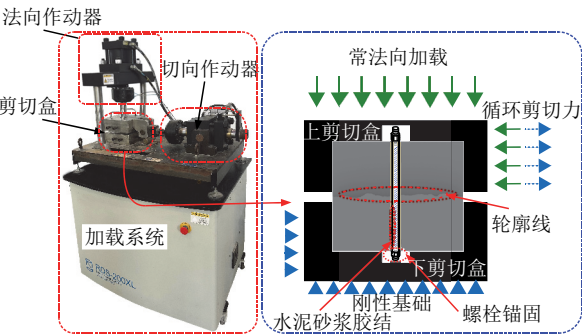


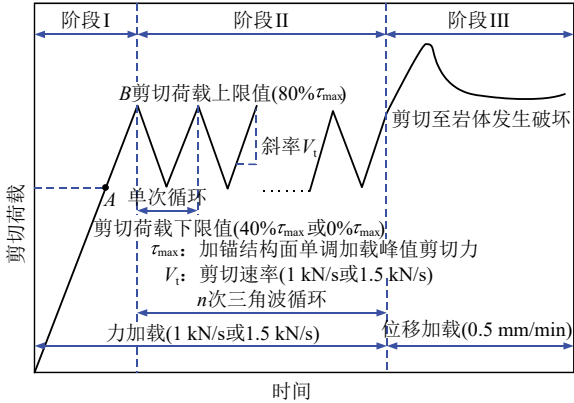
图 2 锚杆杆体材料静力拉伸试验
Fig.2 Static tensile test curves of bolt body material

2.2 试验方案

如图 3(a)所示,使用美国 GCTS 公司研发的 RDS-200XL 型岩石直剪仪进行锚固结构面在峰前循环荷载下的剪切试验。该设备采用刚性伺服控制系统,通过连接计算机编程实现不同阶段的荷载(位移)加载,其轴(切)向最大位移行程和试验力分别为 25 mm 和 150 kN,其位移计精度为 0.001 mm。



(a) 试验设备和加载示意图



(b) 峰前循环剪切加载流程示意图

图 3 峰前剪切循环试验

Fig.3 Pre-peak cyclic shear test

试验采用恒定法向应力边界条件,施加的法向应力分别为 2, 4, 10 MPa。试验时,以恒定速率为 1.2 MPa/min 将待测试件的法向应力加载至设定值。之后加载切向荷载,图 3(b)可分为 3 个不同的阶段,阶段 I: 采用力控制方式,以 1.0 kN/s(或 1.5 kN/s)的恒定速率逐渐增加至峰前循环荷载加载开始前的剪切力, B 点处, $\tau_{\max}$ 的 80%。阶段 II: 加载波形设置为三角波,采用荷载控制方式,从 B 点开始,以与阶段 I 相同的剪切速率逐渐减小剪切力,直至达到 A 点处, $\tau_{\max}$ 的 40%(或 0%),然后以相同速率匀速增加至 $\tau_{\max}$ 的 80%,此时剪切幅度为 40%(或 80%)。重复进行剪切荷载的加卸载直达到设定的循环次数。阶段 III: 采用位移控制的方式,以 0.5 mm/min 的剪切速率施加单调剪切荷载至岩体发生破坏(剪切位移达到 10 mm 时停止)。

本次试验综合考虑了不同法向应力、JRC(结构面粗糙度)、剪切幅值及速率下锚固结构面的剪切疲劳损伤机制。表 2 设计了 9 组试验工况,又对每组工况进行了不同循环次数下的剪切试验。如表 3 为在进行锚固结构面峰前循环剪切试验前,先进行直剪试验得到不同工况下的锚固结构面峰值剪切应力 $\tau_{\max}$,用于确定峰前循环试验加载的剪切力上下限值。

表 2 峰前循环加载试验方案

Table 2 Pre-peak cycle loading test plans

工况	锚杆材质	剪切速率/ (kN · s ⁻¹)	剪切 幅值/%	法向应 力/MPa	JRC	循环剪切 次数/次
1 [#]	Q235	1.0	40	10	10	
2 [#]	Q235	1.0	40	2	10	
3 [#]	2G-NPR	1.0	40	2	0	
4 [#]	2G-NPR	1.0	40	2	6	50
5 [#]	2G-NPR	1.0	40	2	10	100
6 [#]	2G-NPR	1.0	40	4	10	150
7 [#]	2G-NPR	1.0	40	10	10	200
8 [#]	2G-NPR	1.5	40	4	10	
9 [#]	2G-NPR	1.0	80	2	6	

表 3 单调荷载加载下锚固结构面峰值抗剪强度

Table 3 Shear strength of bolted rock joints under direct shear

编号	锚杆材质	法向应力/ MPa	JRC	峰值剪切 应力/MPa
Case 1	Q235	10	10	9.03
Case 2	Q235	2	10	3.99
Case 3	2G-NPR	2	0	3.86
Case 4	2G-NPR	2	6	4.00
Case 5	2G-NPR	2	10	4.26
Case 6	2G-NPR	4	10	6.16
Case 7	2G-NPR	10	10	10.40

3 峰前循环荷载下锚固结构面剪切疲劳特性

3.1 锚固结构面剪切力学性质

图 4 为不同法向应力下锚固结构面在峰前循环荷载下的剪切应力(法向位移) - 剪切位移曲线,对应工况 1[#], 2[#], 5[#], 7[#]。剪切应力 - 剪切位移曲线可分为 5 个阶段:弹性阶段、循环阶段、屈服阶段、软化阶段和残余阶段。由于试验所选岩石岩性较软,锚杆未被剪断,因此不存在明显的塑性强化阶段。弹性阶段:结构面压密,锚杆主要发挥销钉作用,剪切应力呈线性增长。随着剪切位移增大,开始出现剪缩现象。此阶段主要由结构面界面摩擦力、锚杆抗剪力共同抵抗剪切作用。循环阶段:循环荷载的加载会使锚固结构面上下盘的接触磨损加剧,累计剪切位移增大,锚杆受到反复的拉剪作用,剪缩

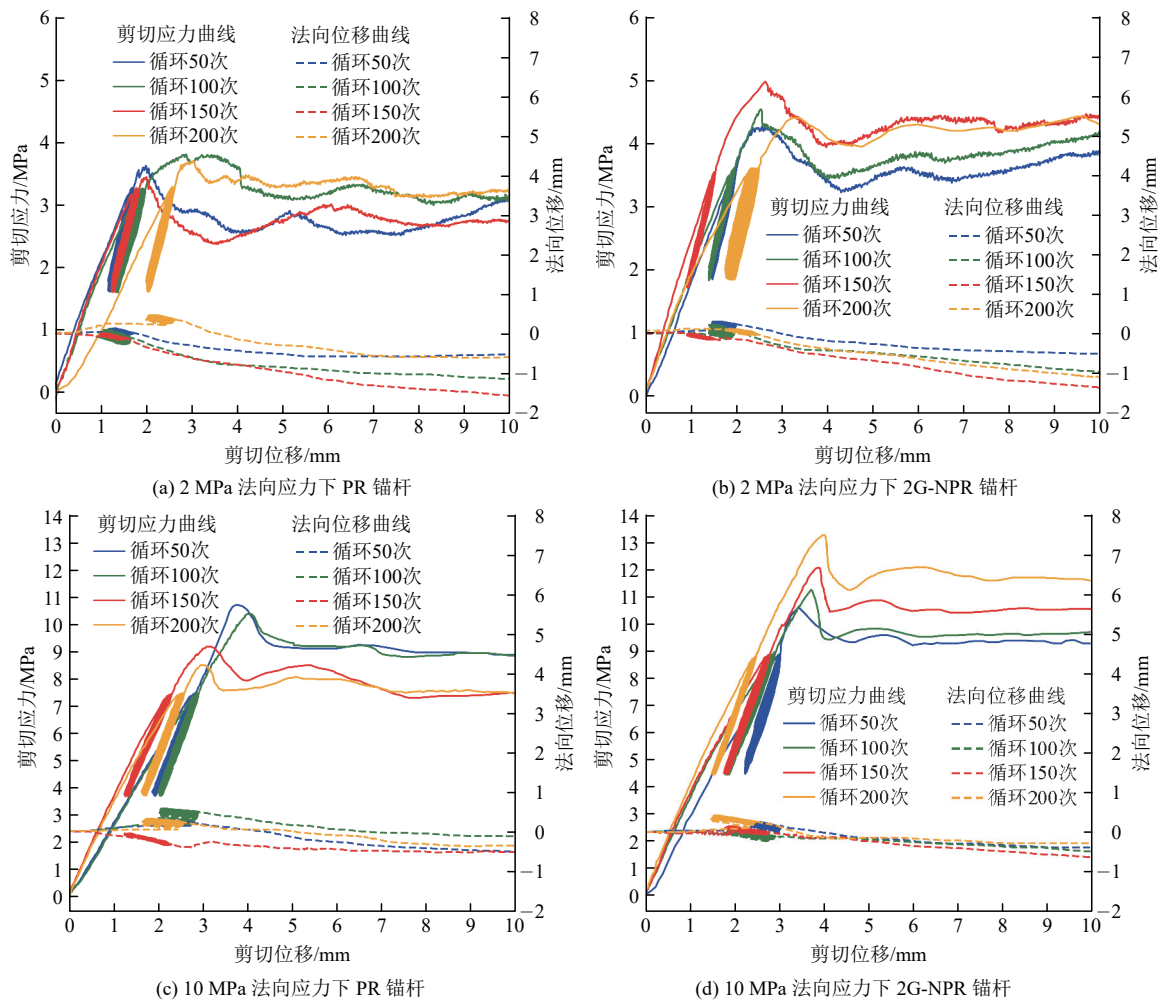


图4 PR/2G-NPR 钢锚固结构面在峰前循环荷载作用下的剪切应力(法向位移)-剪切位移曲线

Fig.4 Shear stress(normal displacement)-shear displacement curve of PR/2G-NPR steel bolted rock joints under pre-peak cyclic loading

现象愈发明显。剪切应力(法向位移)-剪切位移曲线呈“滞回环状”。屈服阶段: 结构面出现微裂纹, 锚杆开始屈服, 随剪切位移增加法向位移负增长(剪胀), 剪切应力出现非线性增长并逐渐逼近峰值。软化阶段: 剪切应力-剪切位移曲线呈现明显的应力下降。这主要是由于钢筋锚杆开始屈服以及结构面不规则起伏体被剪断导致的(见图5)。残余阶段: 锚固岩体发生破裂, 但锚杆仍作为承载主体, 保持一定的抗剪力。

图4(a), (c)展示了不同法向应力下 PR 钢锚固结构面在受峰前循环荷载作用的剪切应力(法向位移)-剪切位移曲线, 对应工况 1#, 2#。从图中可以看出, 在低法向应力下, 随循环次数增加, 其峰值剪切应力改变不大。在高法向应力下, 随循环次数增加, 峰值剪切应力显著减小。这是由于在高法向应力下, PR 锚杆在每次循环中承担了更大的剪切荷载, 其耐疲劳性相对较差。随着循环次数的增加, 累计剪切位移增大, PR 钢锚固结构面的粗糙度损伤劣化加剧, 最终导致循环后锚固结构面的剪切性能显著下降。

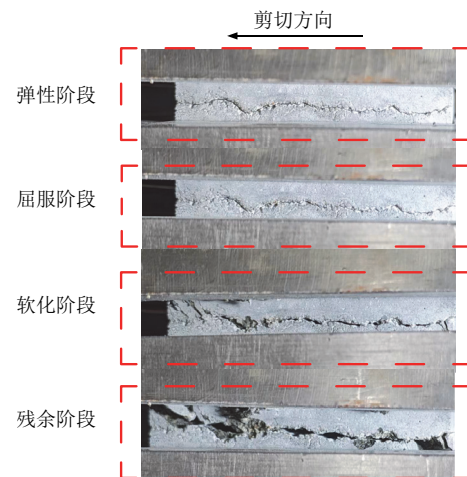


图5 不同阶段结构面侧面损伤图

Fig.5 Side view of rock joint damage

图4(b), (d)展示了不同法向应力下 2G-NPR 钢锚固结构面在受峰前循环荷载作用的剪切应力(法向位移)-剪切位移曲线, 对应工况 5#, 7#。低法向应力下, 2G-NPR 钢锚固结构面的峰值剪切应力大于 PR 钢锚固结构面且随循环次数增加其变化不大。

高法向应力下,随循环次数增加,2G-NPR 钢锚固结构面峰值剪切应力持续增大。探究其原因,高法向应力下,当进入循环阶段时,锚杆已经受到了较大的拉力,循环阶段中锚杆承受的循环剪切荷载将更大,导致锚杆往复剪切位移更大,锚杆受到更大的拉剪作用。随着循环次数的增加,2G-NPR 锚杆的负泊松比效应更显著,减少了局部应力集中,从而在一定程度上提高了其耐疲劳性。

3.2 剪切变形损伤特征

锚杆锚固结构面剪切变形损伤特征如图 6 所示。图 6(a)展示了相同循环次数,不同法向应力下结构面变形损伤图。高法向应力下,每次循环加载中锚杆承担的剪切荷载较大,锚杆与岩壁的挤压作用剧烈,岩体结构面内裂缝发育较快,随剪切位移增大,裂缝将发育贯通。裂缝方向并非与剪切方向平行,而是垂直于剪切方向,这是由于采用的结构面轮廓为二维形貌,其在裂缝贯通方向几近光滑平面,因此岩体内应力更容易沿此方向释放。图 6(b)展示了相同法向应力,不同循环次数下,结构面变形损伤图。循环阶段内往复加载的剪切荷载导致了上下结构面的来回错动,使上下结构面产生白色磨损区域(见图 6 中虚线框),随循环次数增加,结构

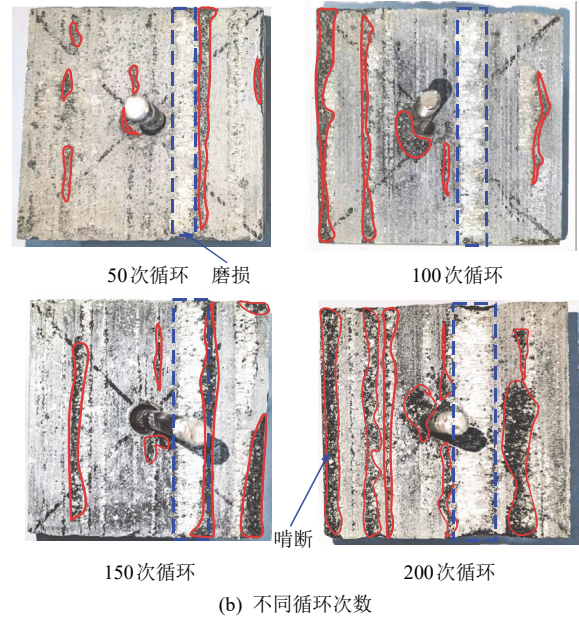
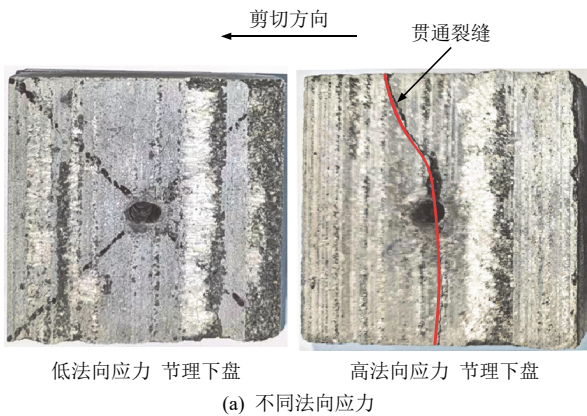


图 6 2G-NPR 钢锚固结构面损伤图

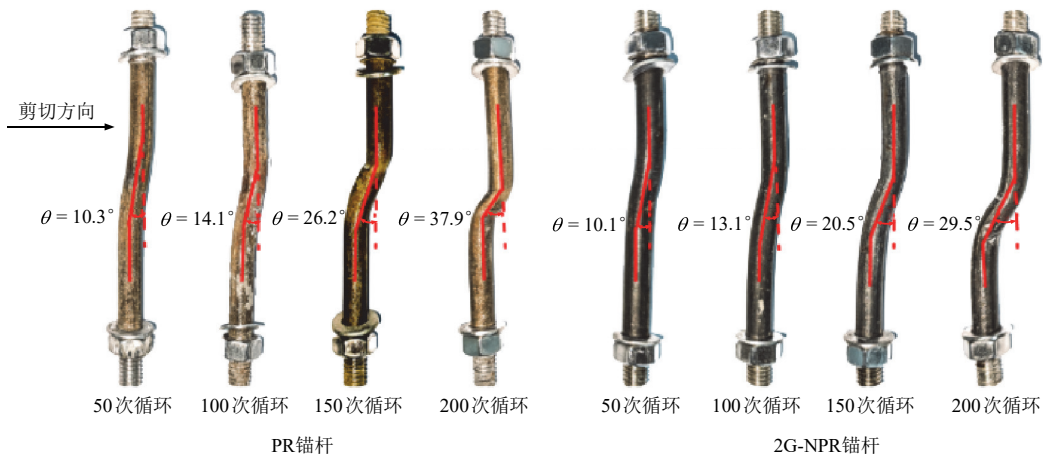
Fig.6 Damage diagram of 2G-NPR steel bolted rock joints

面上白色磨损区域越大。循环次数越多,在接下来的单调剪切中发生啃断的区域面积(见图 6 中实线区域)也将越大,结构面粗糙度劣化进一步加剧。

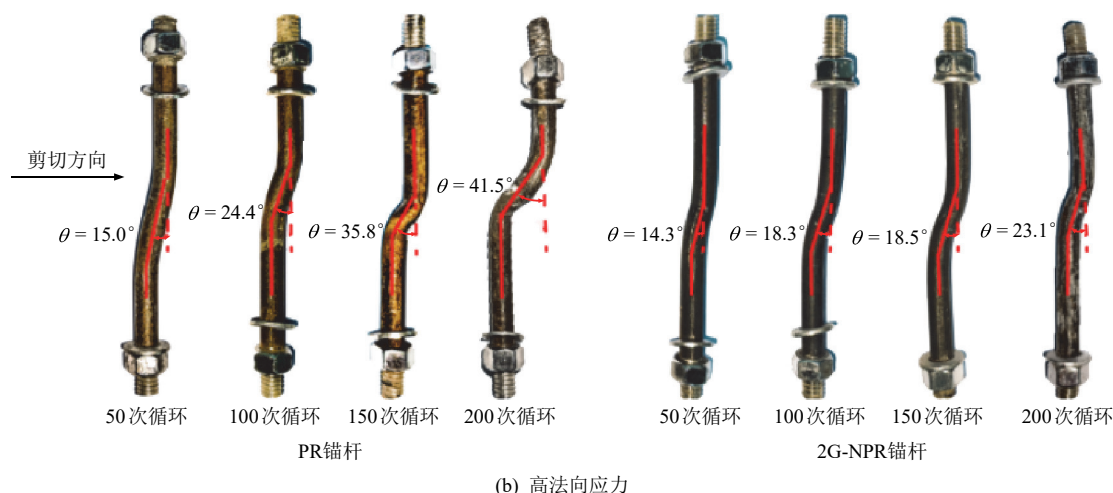
图 7 展示了不同材质锚杆的屈服形态对比,以工况 1#, 2#, 5#, 7#为例。相同因素下,2G-NPR 钢锚固结构面的锚杆挠曲角都小于 PR 钢锚固结构面锚杆挠曲角。这表明,2G-NPR 钢锚固结构面在峰前循环荷载下,结构面上下盘的错动更小,节理面疲劳损伤劣化更小,表现出更高的结构稳定性。在低法向应力下,当循环次数从 50 增加至 100 次、从 100 增加至 150 次以及从 150 增加至 200 次时,2G-NPR 锚杆挠曲角分别增大了 29.70%, 95.24%和 180.95%,而 PR 锚杆挠曲角则增大了 33.02%, 147.17%和 257.55%。在高法向应力下,当循环次数从 50 次到 200 次时,2G-NPR 锚杆挠曲角增大 27.97%, 29.37%和 61.54%,而 PR 锚杆挠曲角增大



(a) 不同法向应力



(a) 低法向应力



(b) 高法向应力

图 7 不同锚杆屈服形态图

Fig.7 Yielding morphology diagram of different steel bolts

62.67%, 138.67%和 176.67%。这说明随循环次数增加, 2G-NPR 锚杆和 PR 锚杆的挠曲角差值逐渐增大, 且法向应力越大, 这一差值越明显, 进一步验证了 2G-NPR 锚杆的耐疲劳性。

3.3 锚固韧性

韧性是用来描述材料在受到应力或变形时吸收能量并发生塑性变形的能力。韧性结合了锚杆的强度和延展性, 是衡量锚杆抵抗断裂能力的重要指标。从剪切能损失做功的角度来进一步探究循环荷载下锚固结构面试件的韧性^[36-38]。剪切功表示了锚固结构面在剪切变形过程中, 施加剪切力对其所作的能量变化。参考孙杰豪等^[39]对剪切力做功的判定方法, 以剪切峰值点作为划分依据, 如图 8 所示。A 点表示岩石受剪切力到达最大点(u_p, τ_p), 而 B 点表示剪切位移的终点(u_r, τ_r)。S₁ 为峰前剪切 - 位移曲线, $u = u_p$ 和坐标轴所围成的面积, 代表锚固结构面试件实际的峰前剪切吸收能量值。图 8 中阴影面积为峰后剪切 - 位移曲线, $u = u_p$, $u = u_r$ 和坐标轴所围成的面积代表锚固结构面试件实际的峰后剪切吸收能量值。

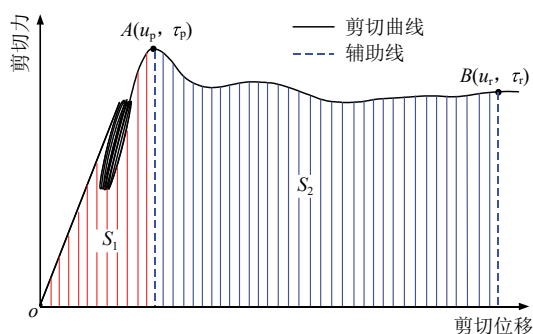
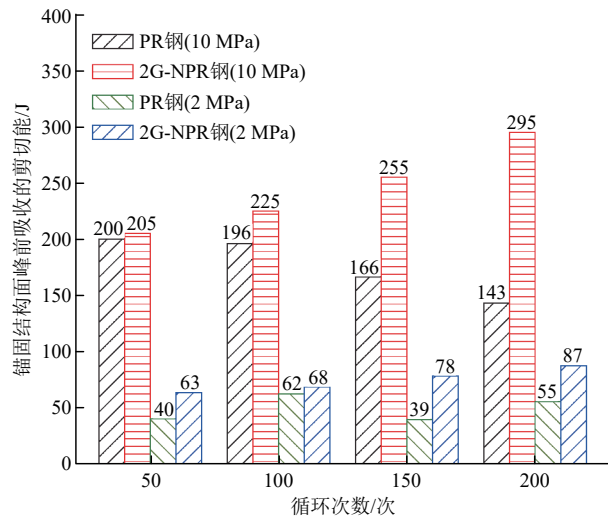


图 8 锚固结构面吸收剪切能示意图

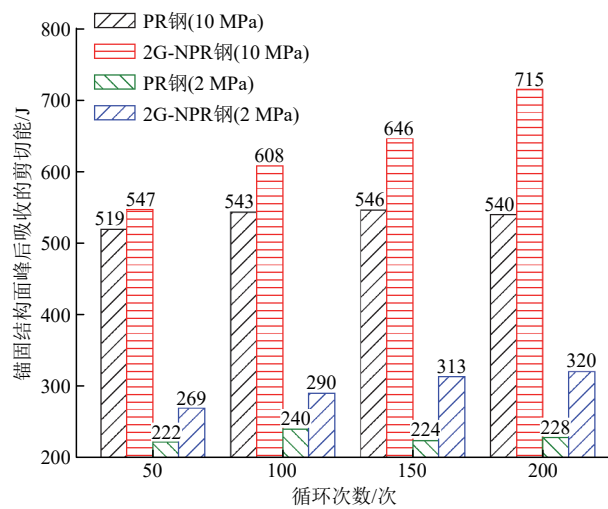
Fig.8 Bolted joint shear energy absorption schematic

图 9(a)展示了峰前循环荷载下锚固结构面峰前吸收的剪切能。低法向应力下, 随循环次数增加, 2G-NPR 钢锚固结构面峰前吸收的剪切能增加, 而 PR 钢锚固结构面峰前吸收的能量变化不大, 两者间的差值较小。但在高法向应力下, 随循环次数增加, 2G-NPR 钢锚固结构面峰前吸收的能量增加, 而 PR 钢锚固结构面峰前吸收的能量显著减少, 两者吸收能量的差值随着循环次数增加显著增大。循环次数为 200 次时, 2G-NPR 钢锚固结构面的峰前剪切能吸收量几近是 PR 锚杆的 2 倍。这表明在高法向应力下, 随循环次数的增加, 2G-NPR 锚杆可以更好的发挥其吸能特性, 提高了试件的峰值抗剪强度。

图 9(b)展示了峰前循环荷载下锚固结构面峰后吸收的剪切能。2G-NPR 钢锚固结构面峰后的吸收能量显著高于 PR 钢锚固结构面, 表现出更优异的能量吸收特性。这是由于 2G-NPR 微钢具有较高的位错密度和较低的层错能^[40], 形成大量的共格孪晶结构, 孪晶界面能够有效阻碍位错运动, 提高材料强度。试件发生破坏后, PR 钢锚固结构面峰后吸收的剪切能随循环次数增加基本保持不变, 而 2G-NPR 钢锚固结构面峰后吸收的剪切能则显著增大。低法向应力下, 随着循环次数从 50 次增加到 200 次, 2G-NPR 钢锚固结构面实际吸收的剪切能分别增加了 7.80%, 16.36%和 18.96%。高法向应力下, 2G-NPR 钢锚固结构面实际吸收的剪切能分别增加了 11.15%, 18.10%和 30.71%。这是因为峰前循环荷载会激活 2G-NPR 微钢中的共格孪晶结构, 同时孪晶畴在适应变形过程中会重新取向, 减少了应力集中现象, 进而提升材料的韧性。



(a) 锚固结构面峰前吸收的剪切能



(b) 锚固结构面峰后吸收的剪切能

图9 锚固结构面吸收剪切能

Fig.9 Shear energy absorbed by bolted joints

以上说明试件发生破坏后, PR 锚杆对残余抗剪强度的提高有限, 但 2G-NPR 锚杆仍能继续提高试件的残余抗剪强度。从吸收总能量的角度来看, 2G-NPR 钢锚固结构面吸收的剪切能随着法向应力和循环次数的增加而增大, 表现出更好的锚固韧性。

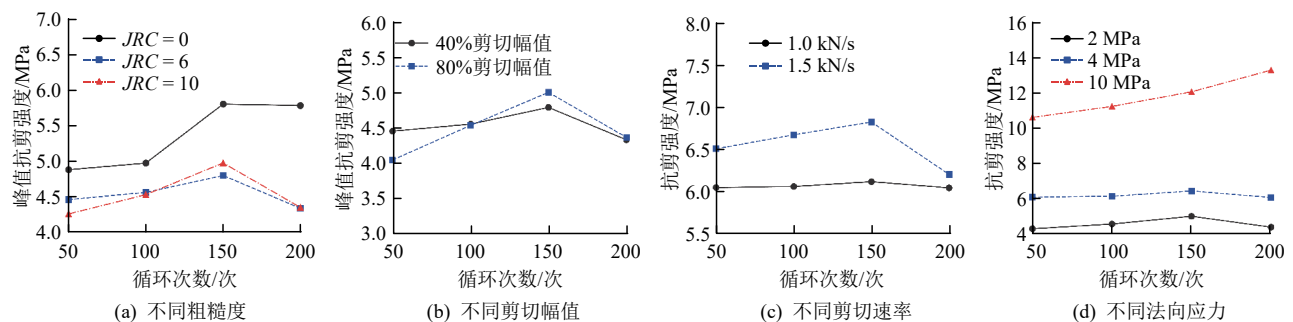


图10 不同影响因素下 2G-NPR 钢锚固结构面的抗剪强度

Fig.10 Shear strength of 2G-NPR steel bolted rock joints under different influencing factors

4 不同因素下 2G-NPR 钢锚固结构面疲劳损伤特性

4.1 峰值抗剪强度

图 10(a)统计在不同粗糙度下 2G-NPR 钢锚固结构面的峰值抗剪强度。分析 3 组曲线, 相同循环次数下, 平直结构面($JRC = 0$)的峰值抗剪强度都大于粗糙结构面($JRC = 6$, $JRC = 10$)。而 $JRC = 6$ 与 $JRC = 10$ 的结构面峰值抗剪强度相近。这说明相较于锚杆发挥的抗剪力, 粗糙度的变化对 2G-NPR 钢锚固结构面峰值抗剪强度影响较小。随循环次数增加, 平直结构面呈先上升后平缓的趋势, 当循环次数从 50 次到 200 次时, 峰值抗剪强度分别增大 1.91%, 18.80%和 18.36%, 而粗糙结构面则呈先上升后下降的趋势, 以 $JRC = 10$ 的锚固结构面为例, 当循环次数从 50 次到 200 次, 峰值抗剪强度增大 6.34%, 16.71%和 2.16%; 图 10(b)统计了不同剪切幅值下 2G-NPR 钢锚固结构面的峰值抗剪强度。两者间的峰值抗剪强度差值不大, 但随循环次数增加, 高剪切幅值下锚固结构面的峰值抗剪强度的改变量更大, 每 50 次循环两者的平均变化量分别为 0.53 和 0.26 MPa; 图 10(c)统计了不同加载速率下 2G-NPR 钢锚固结构面的抗剪强度。相同循环次数下, 加载速率较大的锚固结构面峰值抗剪强度更大, 两者间的峰值抗剪强度最大差值达到了 0.71 MPa; 图 10(d)统计了不同法向应力下 2G-NPR 钢锚固结构面的峰值抗剪强度。相同循环次数下, 随法向应力增加, 锚固结构面的峰值抗剪强度增加。高法向应力下锚固结构面的峰值抗剪强度随着循环次数的增加而增大, 峰值抗剪强度分别增大 5.92%, 7.38%和 10.25%。

综上所述, 2G-NPR 钢锚固平直结构面的抗剪强度大于粗糙结构面, 且随着循环次数的增多, 呈

增大趋势。因为锚固结构面的抗剪力主要由上下盘界面摩擦力和锚杆抗剪力所提供。相比于粗糙结构面, 平直结构面界面摩擦力较小, 锚杆在剪切一开始便成为了抗剪主体, 进而结构面峰值抗剪强度相对更高。随循环次数增加, 2G-NPR 钢锚固粗糙结构面的峰值抗剪强度变化不大。说明 2G-NPR 钢锚固后延缓了岩体结构面在循环剪切过程中疲劳损伤, 减少了粗糙度劣化, 且在达到峰值抗剪强度时, 是由锚杆提供的抗剪力起主导作用。对于未加锚结构面, 较大剪切幅值会导致结构面疲劳损伤效应显著加强, 抗剪强度显著减小。而对于 2G-NPR 钢锚固结构面来说, 剪切幅值的增大对峰值抗剪强度变化不大, 这说明在 2G-NPR 钢在高剪切幅值下仍能使岩体结构面保持良好的抗疲劳性能。因此, 结构面粗糙度和剪切幅值对于峰值抗剪强度的影响较小。相同循环次数下, 随剪切速率和法向应力的提高其峰值抗剪强度增大。说明剪切速率和法向应力的增大有助于激发锚杆的负泊松比效应, 从而提高了岩体结构面的抗疲劳损伤能力。

4.2 残余抗剪强度

图 11(a)统计了不同粗糙度下 2G-NPR 钢锚固结构面的残余抗剪强度。相同循环次数下, 平直结构面的残余抗剪强度均大于粗糙结构面, 最大差值达到了 1.60 MPa。随循环次数增加, 平直结构面的残余抗剪强度呈更明显的增加趋势, 每 50 次循环平均变化量达到了 0.66 MPa。图 11(b)统计了不同剪切幅值下 2G-NPR 钢锚固结构面的残余抗剪强度。较少循环次数下, 幅值的改变对其残余抗剪强度无明显的影响, 两者间的残余抗剪强度差值仅 0.07 MPa。随循环次数增加, 高剪切幅值下的锚固结构面残余抗剪强度明显更小。图 11(c)统计了不同剪切速率下 2G-NPR 钢锚固结构面的残余抗剪强度。相同循环

次数下, 高剪切速率的锚固结构面残余抗剪强度更大, 两者间的最大差值达到了 1.36 MPa。图 11(d)统计了不同法向应力下 2G-NPR 钢锚固结构面的残余抗剪强度。相同循环次数下, 法向应力越大, 锚固结构面的残余抗剪强度越大。低法向应力下, 随循环次数的增多残余抗剪强度呈现出缓慢增大的趋势, 而在高法向应力下, 呈现出较快的增大趋势, 每 50 次循环后两者的平均变化量分别为 0.27 和 0.80 MPa。

综上所述, 2G-NPR 钢锚固平直结构面的残余抗剪强度大于粗糙结构面, 其原因同节 4.1 中峰值抗剪强度。在较大循环次数下, 高剪切幅值的 2G-NPR 钢锚固结构面残余抗剪强度更小。这是因为在高剪切幅值下 2G-NPR 钢锚固结构面在软化阶段累积的磨损、挤压和啃断损伤效应加剧。高法向应力下, 其残余抗剪强度呈明显的增加趋势。相同循环次数下, 随着剪切速率、法向应力的增大, 2G-NPR 钢锚固结构面的残余抗剪强度增大。

4.3 峰前剪切刚度

剪切应力 - 位移曲线中屈服阶段曲线斜率即峰前剪切刚度。图 12(a)统计了不同粗糙度下 2G-NPR 钢锚固结构面的峰前剪切刚度。相同循环次数下, 平直和粗糙度较小结构面的峰前剪切刚度较小, 随循环次数增加, 粗糙度大的结构面峰前剪切刚度显著减小, 循环次数从 50 增至 100 次、从 100 增至 150 次及从 150 增至 200 次时, 剪切刚度分别减小了 35.39%, 31.78% 和 66.28%; 图 12(b)统计了不同剪切幅值下 2G-NPR 钢锚固结构面的峰前剪切刚度。两条曲线近似呈水平状, 且之间距离很接近, 最大差值仅有 $0.06 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$, 说明剪切幅值变化对峰前剪切刚度无影响; 图 12(c)统计了不同剪切速率下 2G-NPR 钢锚固结构面的峰前剪切刚度。相同循环次数下, 高剪切速率下的锚固结构面峰前剪切刚度

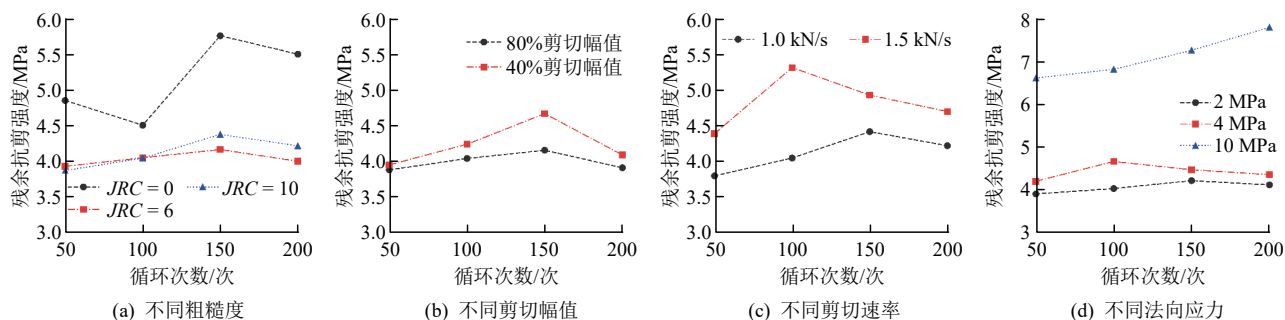


图 11 不同影响因素下 2G-NPR 钢锚固结构面的残余抗剪强度

Fig.11 Residual shear strength of 2G-NPR steel bolted rock joints under different influencing factors

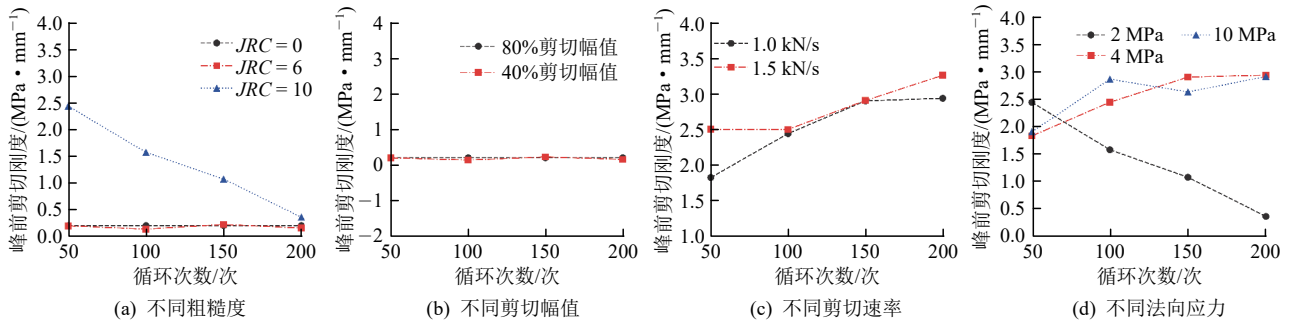


图 12 不同影响因素下 2G-NPR 钢锚固结构面的峰前剪切刚度

Fig.12 Pre-peak shear stiffness of 2G-NPR steel bolted rock joints under different influencing factors

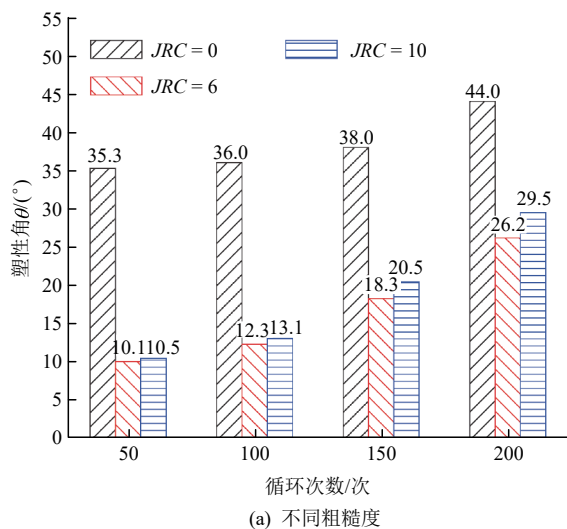
更大, 随循环次数增加, 两者的剪切刚度都呈增长趋势; 图 12(d)统计了不同法向应力下 2G-NPR 钢锚固结构面的峰前剪切刚度。随循环次数增加, 低法向应力下的锚固结构面剪切刚度下降明显, 当循环次数从 50 增至 100 次、从 100 增至 150 次及从 150 增至 200 次时, 剪切刚度分别减小了 35.39%, 31.78% 和 66.28%。而在较高法向应力下, 剪切刚度呈增长的趋势。以法向应力加载 4 MPa 为例, 当循环次数从 50 增至 100 次、从 100 增至 150 次及从 150 增至 200 次时, 剪切刚度分别增大了 33.57%, 18.72% 和 1.26%。

综上所述, 剪切幅值的变化对 2G-NPR 钢锚固结构面的峰前剪切刚度没有显著影响。这是因为在岩体破坏发生前, 锚杆的抗剪力起到了主导作用, 而粗糙度的疲劳损伤效应较小。同时, 2G-NPR 钢具有高延展性和强韧性, 使得剪切幅值的增加对其抗剪力的影响较小。随循环次数增加, 低法向应力下粗糙度大的 2G-NPR 钢锚固结构面峰前剪切刚度显著减小, 而平直和粗糙度较小的 2G-NPR 钢锚固结构面则无明显变化。这是因为粗糙度较大的结构面由于其表面不规则起伏更大, 受到的疲劳损伤更显著,

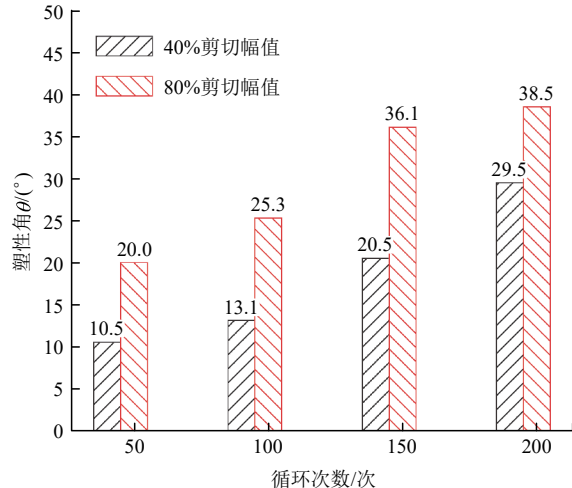
接触磨损更严重。相同循环次数下, 随剪切速率、法向应力的增大, 2G-NPR 钢锚固结构面的峰前剪切刚度增大。

4.4 锚杆挠曲角

图 13(a)统计了不同粗糙度下 2G-NPR 钢锚固结构面中锚杆的挠曲角。相同循环次数下, 平直结构面中的锚杆挠曲角最大。在粗糙结构面中($JRC = 6$ 与 $JRC = 10$), 随着结构面粗糙度的增大, 锚杆的挠曲角增大。当循环次数为 50 次、100 次、150 次及 200 次时, 锚杆的挠曲角分别增大了 3.96%, 6.50%, 12.02% 和 12.60%; 图 13(b)统计了不同剪切幅值下 2G-NPR 钢锚固结构面中锚杆的挠曲角。增大剪切幅值会增大 2G-NPR 钢锚固结构面中锚杆的挠曲角, 当循环次数从 50 次到 200 次时分别增大了 90.47%, 93.13%, 76.10% 和 30.51%; 图 13(c)统计了不同加载速率下 2G-NPR 钢锚固结构面中锚杆的挠曲角。提高剪切速率会增大锚固结构面中锚杆的挠曲角, 当循环次数从 50 次到 200 次时分别增大了 60.00%, 65.88%, 19.37% 和 17.03%; 图 13(d)统计了不同法向应力下 2G-NPR 钢锚固结构面中锚杆的挠曲角。当循环次数较多时, 高法向应力下 2G-NPR



(a) 不同粗糙度



(b) 不同剪切幅值

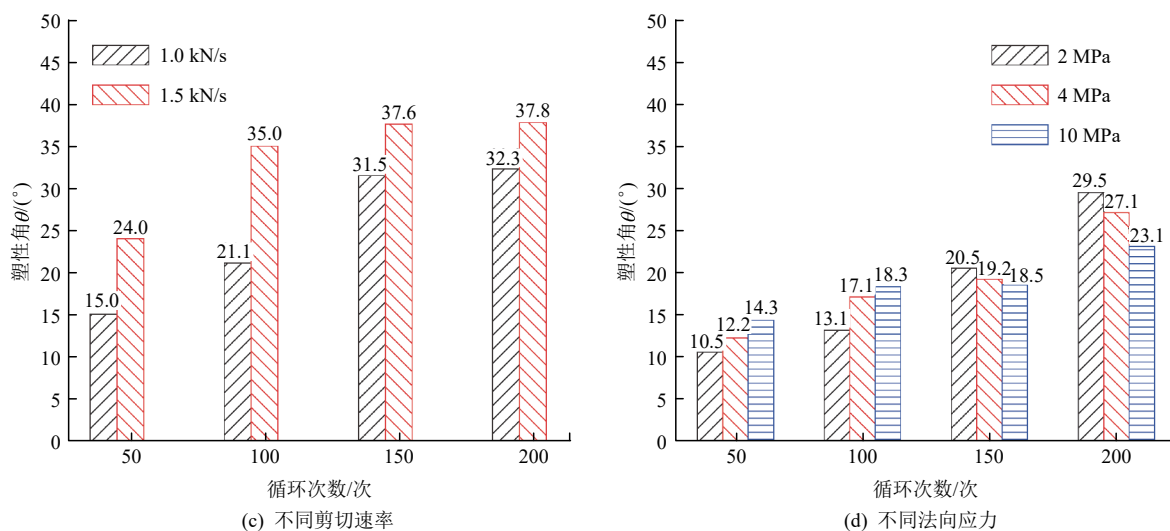


图 13 不同影响因素下 2G-NPR 钢锚固结构面中锚杆挠曲角

Fig.13 Anchor bolt deflection angle in 2G-NPR steel bolted rock joints under different influencing factors

钢锚固结构面中的锚杆挠曲角较小; 当循环次数较少时, 高法向应力下的锚杆挠曲角反而较大。

综上所述, 随结构面粗糙度、剪切幅值、剪切速率、循环次数增大, 2G-NPR 锚杆的挠曲角均增大。这是因为在相同循环下, 结构面粗糙度越大其磨损更严重, 表现为更大的白色磨损区域, 同时啃断现象显著(见图 14), 发生啃断的区域面积随粗糙度增大而变大, 结构面损伤显著, 导致锚杆承受更大的剪切力, 从而产生了更大的塑性变形(剪切幅值、剪切速率同理); 循环次数越多, 结构面上白色磨损区域越大(见图 6 中蓝色虚线框), 结构面粗糙度劣化加剧, 使得锚杆需承受更大剪切力, 从而使锚杆塑性变形增大。当循环次数较多时, 高法向应力下, 2G-NPR 钢锚固结构面中的锚杆挠曲角较小; 当循环次数较少时, 在高法向应力下的锚固结构面中, 锚杆挠曲角反而较大。这说明 2G-NPR 锚杆在高法向应力和较多循环次数下仍能维持较好的耐疲劳特性。

5 讨 论

岩体结构面抗剪强度符合莫尔 - 库仑强度准则:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ 为岩体抗剪强度, c 为黏聚力, σ 为法向应力, φ 为内摩擦角。

由工况 1[#], 2[#], 5[#], 6[#], 7[#] 的试验结果拟合得出不同循环次数下 2G-NPR 锚杆锚固结构面剪切强度与法向应力之间的关系如表 4 所示。结果表明, 随循环次数增加, 2G-NPR 锚杆锚固结构面的内摩擦角从 38.31° 增加到了 44.78°, 提高了 16.89%, 而 PR 锚杆锚固结构面的内摩擦角从 41.02° 减小到了 30.96°, 降低了 24.52%。这是因为 PR 锚杆耐疲劳特性较差, 高循环次数会加剧其剪切性能劣化; 而 2G-NPR 锚杆因其负泊松比效应, 具有较好的耐疲劳特性, 从而提升了锚杆的锚固效果。

表 4 莫尔 - 库仑准则剪切强度拟合结果

Table 4 Fitting results for shear strength by Mohr-Coulomb failure criterion

锚杆材质	拟合公式	R^2	循环次数/次	内摩擦角/(°)
Q235 钢	$\tau = 0.87\sigma + 1.87$	0.99	50	41.02
	$\tau = 0.82\sigma + 2.15$	0.99	100	39.35
	$\tau = 0.72\sigma + 2.00$	0.99	150	35.75
	$\tau = 0.68\sigma + 2.48$	0.99	200	30.96
2G-NPR 钢	$\tau = 0.79\sigma + 2.78$	0.98	50	38.31
	$\tau = 0.85\sigma + 2.75$	0.98	100	40.36
	$\tau = 0.93\sigma + 2.69$	0.99	150	42.92
	$\tau = 0.99\sigma + 1.88$	0.99	200	44.78

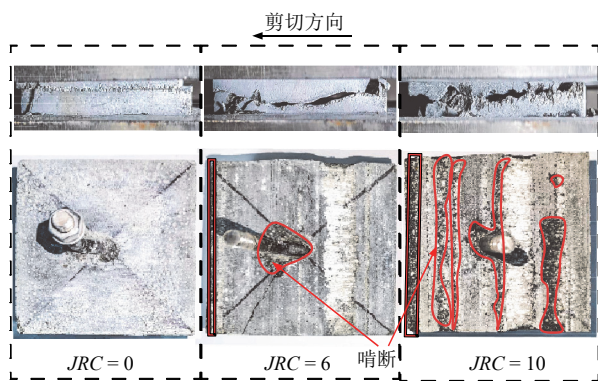


图 14 不同粗糙度锚固结构面破坏图

Fig.14 Failure patterns of bolted joints under different JRC

为进一步探究峰前循环荷载下 2G-NPR 锚杆的剪切贡献。结合 H. Jalalifar 等^[41-42]的研究, 锚杆的剪切贡献由其轴力和剪力共同提供, 其剪切贡献可以表示为

$$R = R_c + R_f = F_s - N \tan \varphi \quad (2)$$

$$R_c = N_0 \sin \theta + Q_0 \cos \theta \quad (3)$$

$$R_f = (N_0 \cos \theta - Q_0 \sin \theta) \tan \varphi \quad (4)$$

式中: R 为锚杆剪切贡献值; R_c , R_f 分别为锚杆直接和间接提供的横向抗剪力; F_s 为锚固结构面剪切力; N 为试验时施加的法向力; φ 为锚固结构面内摩擦角; N_0 , Q_0 分别为锚杆的轴力与剪力。

当锚杆失效时, 其在结构面相交处所受到的剪切力 Q_0 和轴力 N_0 应满足以下关系:

$$\left(\frac{N_0}{N_f}\right)^2 + \left(\frac{Q_0}{Q_f}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

式中: N_f , Q_f 分别为锚杆所能承受的极限轴力和剪力, $N_f = A_b \sigma_f$, $Q_f = A_b \tau_f$ 。其中, σ_f , τ_f 分别为锚杆拉伸屈服应力和剪切屈服应力; A_b 为锚杆横截面积。根据 Tresca 准则可得

$$\tau_f = \sigma_f / 2 \quad (6)$$

根据上述公式计算得出锚杆的 N_0 , Q_0 及 R , 具体见表 5。在相同法向应力条件下, 2G-NPR 锚杆的剪切贡献始终高于 PR 锚杆, 充分证明了负泊松比效应在提升结构面抗剪性能方面的关键作用。此外,

表 5 锚杆贡献的轴向力和剪切力的统计数据

Table 5 Statistics of the bolt contribution and the axial and shear forces at failure

锚杆材质	法向应力/MPa	循环次数/次	剪切贡献值 R/kN	轴力 N_0/kN	剪力 Q_0/kN	Q_0 / N_0
Q235 钢	2	50	18.6	4.00	17.44	4.36
		100	21.5	8.10	16.99	2.10
		150	19.9	9.36	16.78	1.79
		200	22.9	14.91	15.45	1.04
	10	50	20.0	6.57	17.20	2.62
		100	21.6	10.45	16.57	1.59
		150	19.6	11.30	16.40	1.45
		200	16.8	10.10	16.64	1.65
2G-NPR 钢	2	50	26.5	13.80	15.77	1.14
		100	28.3	15.54	15.25	0.98
		150	31.1	18.35	14.22	0.77
		200	24.8	13.81	15.76	1.14
	10	50	26.8	16.33	14.98	0.92
		100	27.5	15.51	15.26	0.98
		150	27.7	14.64	15.53	1.06
		200	31.7	18.36	14.22	0.77

与 PR 锚杆相比, 2G-NPR 锚杆在不同法向应力下的剪切贡献均随循环次数的增加保持持续上升, 进一步验证了负泊松比效应在增强结构面抗剪疲劳能力的重要性。对于抗剪强度远低于抗拉强度的锚杆而言, 尽可能地发挥其轴力, 才能达到更好的支护效果。根据统计的轴向力 N_0 和剪切力 Q_0 , 2G-NPR 锚杆在不同循环次数下的 Q_0 / N_0 比均低于 PR 锚杆, 这说明 2G-NPR 锚杆在抵抗剪切变形时可以完全承受其轴向力, 从而保证岩体的支护效果。

6 结 论

本文通过峰前循环荷载下锚固结构面剪切试验, 对比探究了 2G-NPR 钢和 PR 钢锚固岩体结构面抗剪性能, 并分析了不同影响因素下 2G-NPR 钢锚固结构面的疲劳损伤特性, 得到如下结论:

(1) 低法向应力下, 2G-NPR 钢和 PR 钢锚固结构面的峰值抗剪强度随循环次数增加变化不大; 而高法向应力下, 2G-NPR 钢锚固结构面的抗剪强度随循环次数增加而增大, 而 PR 钢锚固结构面则显著减小。2G-NPR 钢的负泊松比效应有效分担了高应力下结构面有效抵抗了峰前疲劳损伤。从总能量吸收的角度分析, 2G-NPR 钢锚固结构面吸收的剪切能随着法向应力和循环次数的增加而增大, 相较于 PR 钢锚固有着更好的锚固韧性。

(2) 2G-NPR 钢锚固结构面的峰值抗剪强度随剪切速率和法向应力的提高显著增大, 受粗糙度和剪切幅值影响较小。残余抗剪强度随剪切速率和法向应力的增加而增大, 随剪切幅值的增加而减小, 受粗糙度影响较小。峰前剪切刚度随粗糙度、剪切速率和法向应力的增加而增大, 受剪切幅值影响较小。2G-NPR 锚杆的挠曲角随粗糙度、剪切幅值、剪切速率和循环次数的增加而增大。

(3) 相同法向应力下, 2G-NPR 锚杆的剪切贡献始终高于 PR 锚杆, 体现出负泊松比效应在提升结构面抗剪性能中的关键作用。不同法向应力下, 2G-NPR 锚杆的剪切贡献随循环次数增加均保持上升趋势, 表明负泊松比效应对增强结构面抗剪疲劳能力的重要性。2G-NPR 锚杆在不同循环次数下的 Q_0 / N_0 比均低于 PR 锚杆, 表明其在抵抗剪切变形时可以完全承受轴向力, 保证岩体的支护效果。

本研究初步调查了 2G-NPR 钢锚固结构面的剪切疲劳损伤特性。然而, 由于采用的类岩石试件强度较低且尺寸较小, 导致锚杆未能充分发挥其极限抗剪承载力。此外, 由于未对锚杆在剪切过程中的

微应变进行监测, 负泊松比效应的作用机制尚不明确。为进一步深入研究, 应选用硬度更高、尺寸更大的岩石试件, 并结合锚杆应变监测技术, 全面分析 2G-NPR 钢锚固结构面的剪切疲劳损伤机制。

参考文献(References):

- [1] JIANG Y J, ZHANG S H, LUAN H J, et al. Numerical modelling of the performance of bolted rough joint subjected to shear load[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(5): 140.
- [2] 程良奎, 张作幅, 杨志银. 岩土加固技术[M]. 北京: 地震出版社, 1994: 22 - 31.(CHENG Liangkui, ZHANG Zuomei, YANG Zhiyin. *Geotechnical reinforcement technology*[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1994: 22 - 31.(in Chinese))
- [3] LI C C. Field observations of rock bolts in high stress rock masses[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(4): 491 - 496.
- [4] 刘才华, 李育宗. 考虑横向抗剪效应的节理岩体全长黏结型锚杆锚固机制研究及进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(8): 1 856 - 1 872.(LIU Caihua, LI Yuzong. Research progress in bolting mechanism and theories of fully grouted bolts in jointed rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(8): 1 856 - 1 872.(in Chinese))
- [5] LI W T, LI X M, MEI Y C, et al. A numerical simulation approach of energy-absorbing anchor bolts for rock engineering[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 158: 105188.
- [6] ZHAO Z, SUN W, CHEN S, et al. Coupling model of jointed rock mass and rock bolt in offshore LPG underground storage[J]. *Energy Science and Engineering*, 2020, 8(5): 1 468 - 1 483.
- [7] 刘泉声, 雷广峰, 彭星新, 等. 白砂岩、大理岩及花岗岩加锚剪切力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增 2): 4 007 - 4 015.(LIU Quansheng, LEI Guangfeng, PENG Xingxin, et al. Study on shear mechanical properties of sandstone, marble and granite after anchoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Supp.2): 4 007 - 4 015.(in Chinese))
- [8] LIU C H, LI Y Z. Analytical study of the mechanical behavior of fully grouted bolts in bedding rock slopes[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50: 2 413 - 2 423.
- [9] LI Y, LIU C. Experimental study on the shear behavior of fully grouted bolts[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 1 123 - 1 134.
- [10] 蒋宇静, 张孙豪, 栾恒杰, 等. 恒定法向刚度边界条件下锚固节理岩体剪切特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(4): 663 - 675.(JIANG Yujing, ZHANG Sunhao, LUAN Hengjie, et al. Experimental study on shear characteristics of bolted rock joints under constant normal stiffness boundary conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(4): 663 - 675.(in Chinese))
- [11] 蒋宇静, 张孙豪, 栾恒杰, 等. 锚固方式对岩石节理宏观剪切特性的影响及其机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(8): 1 301 - 1 315.(JIANG Yujing, ZHANG Sunhao, LUAN Hengjie, et al. Study of the effect of anchorage modes on the macro and micro shear characteristics of rock joints and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(8): 1 301 - 1 315.(in Chinese))
- [12] WU X, JIANG Y, LI B. Influence of joint roughness on the shear behaviour of fully encapsulated rock bolt[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51: 953 - 959.
- [13] 周友华, 胡奉湘, 饶云阶, 等. 地震应力产生传递与集中机制的研究[J]. *国际地震动态*, 2004, (11): 8 - 14.(ZHOU Youhua, HU Fengxiang, RAO Yunjie, et al. Researches on the mechanisms for the transform and concentration of seismic stresses[J]. *World Earthquake Dynamics*, 2004, (11): 8 - 14.(in Chinese))
- [14] 李华东, 姜永玲, 邓 辉. 列车振动荷载作用下某岩质边坡应力应变动力响应分析[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(3): 42 - 48.(LI Huadong, JIANG Yongling, DENG Hui. Dynamic response analysis of a rock slope under train vibration load[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2011, 38(03): 42 - 48.(in Chinese))
- [15] 吴泽坤, 白晓宇, 孙 淦, 等. 多循环荷载下 BFRP 抗浮锚杆锚固性能现场试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(9): 2 314 - 2 328.(WU Zekun, BAI Xiaoyu, SUN Gan, et al. Field test of anchorage performance of BFRP anti-floating anchor under multiple cyclic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(9): 2 314 - 2 328.(in Chinese))
- [16] WU X, ZHENG H, JIANG Y, et al. Effect of cyclic shear loading on shear performance of rock bolt under different joint roughness[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(3): 1 969 - 1 980.
- [17] 杨忠平, 来云亮, 刘树林, 等. 频发微震下上覆软弱岩体边坡动力稳定及失稳模式[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(12): 2 297 - 2 306.(YANG Zhongping, LAI Yunliang, LIU Shulin, et al. Dynamic stability and failure mode of slopes with overlying weak rock mass under frequent micro-seismic actions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(12): 2 297 - 2 306.(in Chinese))
- [18] 刘新荣, 邓志云, 刘永权, 等. 峰前循环剪切作用下岩石节理损伤特征与剪切特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(12): 2 664 - 2 675.(LIU Xinrong, DENG Zhiyun, LIU Yongquan, et al. An experimental study on the cumulative damage and shear properties of rock joints under pre-peak cyclic shear loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(12): 2 664 - 2 675.(in Chinese))
- [19] HE L, ZHAO Z, LIU L, et al. Asperity degradation characteristics and mechanical behavior of rock joints subjected to pre-peak cyclic loading[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022, 40(2): 617 - 634.
- [20] 刘新荣, 许 彬, 周小涵, 等. 软弱层峰前循环剪切宏观累积损伤机制研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(5): 1 291 - 1 303.(LIU Xinrong,

- XU Bin, ZHOU Xiaohan, et al. Investigation on macro-meso cumulative damage mechanism of weak layer under pre-peak cyclic shear loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(5): 1 291 – 1 303.(in Chinese))
- [21] 何 刘, 赵志明, 潘 岳, 等. 连续充填型结构面峰前循环破坏特征及再载强度特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(10): 2 027 – 2 037.(HE Liu, ZHAO Zhiming, PAN Yue, et al. Experimental study on the damage properties and reloading strength characteristics of continuous in filled rock joints under pre-peak cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(10): 2 027 – 2 037.(in Chinese))
- [22] KOU M, LIU X, TANG S, et al. Experimental study of the prepeak cyclic shear mechanical behaviors of artificial rock joints with multiscale asperities[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 120: 58 – 74.
- [23] HE M C, WANG Q. Excavation compensation method and key technology for surrounding rock control[J]. *Engineering Geology*, 2022, 307: 106784.
- [24] LIC C, DOUCET C. Performance of D-bolts under dynamic loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45: 193 – 204.
- [25] WU X, JIANG Y, WANG G, et al. Performance of a new yielding rock bolt under pull and shear loading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 3 401 – 3 412.
- [26] CAI M, CHAMPAIGNE D. Influence of bolt-grout bonding on MCB conebolt performance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49: 165 – 175.
- [27] HE M H, WANG Q, WU Q Y. Innovation and future of mining rock mechanics[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(1): 1 – 21.
- [28] 陶志刚, 郭爱鹏, 何满潮, 等. 微观负泊松比锚杆静力学特性及其工程应用研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(3): 808 – 818.(TAO Zhigang, GUO Aipeng, HE Manchao, et al. Static characteristics and engineering applications of micro negative Poisson's ratio bolt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(3): 808 – 818.(in Chinese))
- [29] 陶志刚, 丰于翔, 赵 易, 等. 穿断层隧道 NPR 锚索支护体系抗震特性振动台试验研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(4): 939 – 949.(TAO Zhigang, FENG Yuxiang, ZHAO Yi, et al. Shaking table test on anti-seismic characteristics of NPR anchor cable support system for tunnel crossing faults [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(4): 939 – 949. (in Chinese))
- [30] 陈泓蓉, 龙建辉, 张吉宁, 等. 基于 NPR 锚索监测的顺层岩质边坡多阶变形规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(7): 1 763 – 1 774.(CHEN Hongrong, LONG Jianhui, ZHANG Jining, et al. Research on multistage deformation law of bedding rock slopes based on NPR anchor cable monitoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(7): 1 763 – 1 774.(in Chinese))
- [31] 陶志刚, 任树林, 何满潮, 等. 地下工程微观 NPR 锚杆静力拉伸及锚固抗剪力学特性[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 683 – 694.(TAO Zhigang, REN Shulin, HE Manchao, et al. Static tensile and bolting shear mechanical properties of micro-NPR bolt steel in underground engineering[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 683 – 694. (in Chinese))
- [32] HE M C, REN S, GUO L, et al. Experimental study on influence of host rock strength on shear performance of Micro-NPR bolt steel bolted rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 159: 105236.
- [33] HE M C, GUO A, MENG Z, PAN Y, et al. Impact and explosion resistance of NPR anchor cable: Field test and numerical simulation[J]. *Underground Space*, 2023, 10: 76 – 90.
- [34] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. *Engineering Geology*, 1973, 7(4): 287 – 332.
- [35] 杜时贵, 黄 曼, 罗战友, 等. 岩石结构面力学原型试验相似材料研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(11): 2 263 – 2 270.(DU Shigui, HUANG Man, LUO Zhanyou, et al. Similar material study of mechanical prototype test of rock structural plane[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(11): 2 263 – 2 270.(in Chinese))
- [36] WU X, JIANG Y, LI B. Influence of joint roughness on the shear behaviour of fully encapsulated rock bolt[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51: 953 – 959.
- [37] WU X, ZHENG H, JIANG Y, et al. Effect of cyclic shear loading on shear performance of rock bolt under different joint roughness[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(3): 1 969 – 1 980.
- [38] 邓明科, 刘华政, 马福栋, 等. 聚乙烯醇纤维改性高延性混凝土双面剪切试验及剪切韧性评价方法[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(2): 461 – 471.(DENG Mingke, LIU Huazheng, MA Fudong, et al. Double shear experiment of highly ductile concrete modified by polyvinyl alcohol and shear toughness evaluation method[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 37(2): 461 – 471.(in Chinese))
- [39] 孙杰豪, 郭保华, 田世轩, 等. 峰前循环剪切作用下岩石节理剪切力学特性[J]. *岩土力学*, 2022, 43(增 2): 52 – 62.(SUN Jiehao, GUO Baohua, TIAN Shixuan, et al. Shear mechanical properties of rock joints under pre-peakcyclic shearing condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Supp.2): 52 – 62.(in Chinese))
- [40] HE M, HU J, CHENG T, et al. Dynamic properties of micro-NPR bolt material and its controlling effect on surrounding rock mass with impact disturbances[J]. *Underground Space*, 2024, 15: 331 – 352.
- [41] JALALIFAR H, AZIZ N. Analytical behaviour of bolt-joint intersection under lateral loading conditions[J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 2010, 43: 89 – 94.
- [42] LI X, AZIZ N, MIRZAGHORBANALI A, et al. Behavior of fiber glass bolts, rock bolts and cable bolts in shear[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 2 723 – 2 735.