2020 年 11 月 November 2020

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-39627

承压注浆加固含弱面岩体时的 岩-浆抗剪强度耦合机理



王 春^{1,2,3}, 王怀彬¹, 熊祖强^{1,3}, 王 成¹, 程露萍¹, 李雪峰¹, 展帅菲¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 焦作 454003;

2. 河南理工大学 深井瓦斯抽采与围岩控制技术国家地方联合工程实验室, 焦作 454003;

3. 河南理工大学 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 焦作 454003)

摘 要:采用不同强度的水泥砂浆块模拟均质性较好岩性不同的岩体,开展承压注浆加固含弱面岩体时的岩-浆 抗剪强度耦合机理研究,探索承压注浆加固效果的评价机制。结果表明:承压注浆加固可有效提高含弱面岩体的 抗剪强度,并延缓含弱面岩体宏观破坏的发生;含弱面岩体抗剪强度随法向应力的增大呈线性趋势增加,随着注 浆材料强度的增强呈对数函数趋势增加,且抗剪强度参数(τ、c、φ)都随注浆材料强度和岩体基体强度比值的增大 呈先增大后减小的趋势变化;含弱面岩体黏聚力随注浆材料强度、岩体基体强度的增加呈线性增加,内摩擦角却 随注浆材料强度的增加而减小,随岩体基体强度的增加维持稳定。试验验证了基于岩-浆抗剪强度耦合机理建立 的承压注浆加固含弱面岩体效果评价准则能有效判定承压注浆加固的最优效果,可用于指导含弱面岩体注浆加固 控制工程。

关键词:承压注浆;含弱面岩体;抗剪强度;耦合机理;评价准则 文章编号:1004-0609(2020)-11-2758-15 中图分类号:O319.56

文献标志码:A

随着人类经济的发展,各种资源的需求不断增长, 尤其是矿产、空间等资源需求的突飞猛进。实现矿产 资源安全高效地开采、建立地下空间工程等不免是解 决上述问题的途径,但都与岩体工程的开挖息息相关。 岩体是一种天然地质体,在漫长的岁月中经历了复杂 的地质作用,同时还时常承受工程开挖扰动的影响, 其内部形成了大量的节理、裂隙、结构面等^[1-4]。在开 挖岩体工程时,若不采取合理的支护方式或加固措施, 围岩不可避免的会发生坍塌等破坏现象^[5-7]。

针对上述问题,国内外学者提出了大量围岩控制 的方法,注浆加固即是典型的代表之一,可改变裂隙 岩体的物理力学性质^[8-10]。基于注浆加固可有效改善 裂隙岩体的强度特征,大量学者们开展了该领域的研 究,研究成果较为客观。赵庆彪等^[11]和 ZHU 等^[12]分 别开展了裂隙含水层注浆加固时浆液扩散机理的研 究,发现浆液在垂直裂隙上近似呈圆环形扩散。李相 辉等[13]和刘泉声等[14]针对非均质断层破碎带研究得 出浆液在松散型、软弱型、密实型断层破碎带介质中 以渗透、压密、劈裂等形式为主进行扩散。李术才 等[15-16]研究发现岩石承载力越低、越破碎,注浆加固 后的强度增加越明显,且当岩石孔隙率越低、致密度 越高时,注浆加固后的岩体塑性增强,反之刚性增强。 王志等[17-18]研究含裂隙岩石注浆加固后的弯曲疲劳 性能发现疲劳荷载作用下,裂纹于浆体周围开始萌发, 注浆后的岩体发生疲劳破坏的主要影响因素是岩体所 处的应力环境。张宵等[19]提出了关键孔注浆的方法, 有效解决了高压裂隙涌水封堵难的问题。陈兴年等[20] 探讨了挤压注浆与压密注浆的区别,认为前者以均质 浆体替换岩土体达到加固目的,后者是在岩土体中形 成高强度的骨架。李鹏等[21-22]基于模型试验进一步探 讨了劈裂注浆法,提出了主、次生劈裂压力值的界定 方法。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904093);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)资助项目(192102310247);深井瓦斯抽采与围岩控制技术国家地方联合工程实验室开放研究基金资助项目(SJF201803);青年创新探索性基金资助项目(NSFRF180321);河南省高校重点科研资助项目(18A440014);河南理工大学博士基金资助项目(672707)

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-08-28

通信作者: 王 春, 讲师, 博士; 电话: 15716363691; E-mail: wczy115728@163.com

综上所述,注浆扩散机理、注浆加固效果、注浆 方法等方面已展开了大量研究,但涉及岩体内部裂隙、 结构面形状对注浆加固效果及岩-浆耦合机理方面的 研究不足。目前,仅少部分学者尝试了该方面的探索 性研究。韩立军等^[23]、李晓锋等^[24]、TIAN等^[25]研究 了锯齿形结构面注浆加固后的力学特性,得出注浆加 固后结构面的残余强度、剪切强度峰值等明显提高。 徐志伟等^[26]、王刚等^[27]、余凯等^[28]基于结构面的形状 及面积等修正了剪切强度准则,减少了裂隙岩体抗剪 强度预测的误差。而涉及含弱面岩体注浆加固后岩-浆抗剪强度耦合机理的研究还未开展。因此,立足于 直接剪切试验原理,探索岩-浆抗剪强度耦合机理, 推演含弱面岩体注浆加固效果的评价机制,对指导含 弱面岩体注浆加固控制工程方面具有深远意义。

1 实验

1.1 试验方案

岩石是地质作用的产物,其具有不连续性、各向 异性、不均匀性等特征,为确保承压注浆加固含弱面 岩体直接剪切试验中所采用的试件各向均质,采用同 种环境下预制和养护的水泥砂浆块,模拟岩石试件并 开展岩-浆抗剪强度耦合机理研究。试验设备采用 RMT-150B型电液伺服岩石力学试验系统,载荷施加 分两个阶段进行,先采用 0.5 MPa/s 的速率施加轴向 荷载至设定值,然后在确保轴向荷载一定的前提下, 以 0.02 mm/s 的位移加载速率施加横向荷载,直至试 件发生宏观破坏。直接剪切试验分 4 组进行,首先进 行注浆材料和水泥砂浆块直接剪切试验,然后开展弱 面未注浆加固剪切试验,最后开展弱面承压加固剪切 试验,具体试验方案见表 1。

1.2 试件制备

1) 注浆材料:试验选用的注浆材料是自行研制的 新型无机双液注浆材料,其具有快凝、早强、高渗透 性等特征。研制的注浆材料成分简单,主要由 A、B 两种无机材料混合制成。无机材料 A 的主要成分是超 细硫铝酸盐水泥,无机材料 B 的主要成分为硬石膏和 生石灰,两种无机材料的辅助成分分别是一定比例的 添加剂。试验前通过研制无机材料 A、B 的成分比例, 混合制成试验所需的一定强度的注浆材料。 2) 注浆材料试件和水泥砂浆块试件制备:根据 试验要求,选用正方体试件模具制作边长为10 cm的 正方体试件,首先采用 JJ-5型水泥胶砂搅拌机均匀搅 拌制作试件的原材料,然后浇筑于试件模具中,待12 h 后取出并置于温度为20℃、相对湿度大于95%的标 准养护箱中养护28 d,制成的标准试件照片如图1 所 示。

3) 弱面剪切试验试件制备:选取养护 28 d 且单 轴抗压强度不同的水泥砂浆块,采用金刚石切割机 沿试件中心线进行水平切割,然后将切割的砂浆块置 于自制的注浆模具中,采用承压注浆的方法,以压力 5 MPa 将注浆材料注入预制 3 mm 厚的弱面中,12 h 后取出试件仍置于温度为 20 ℃、相对湿度大于 95% 的标准养护箱中养护 28 d,制成的标准试件照片如图 2 所示。



图1 注浆材料试件和水泥砂浆块试件照片

Fig. 1 Photos of grouting material specimen and cement mortar block specimen: (a) Grouting material specimen; (b) Cement mortar block specimen

2760

表1 承压注浆加固含弱面岩体时的岩-浆抗剪强度耦合机理研究试验方案

Table 1 Experiment scheme of coupling mechanism of rock-pulp shear strength in process of confined grouting reinforcement forweak-faced rock mass

Test group	Specimen group No.	Specimen strength/MPa	Grouting material strength/MPa	Normal stress/MPa				
Direct shear test for	a		9.3	0.93	1.40	1.86	2.33	2.79
	b		12.7	1.27	1.91	2.54	3.18	3.81
	c		14.7	1.47	2.21	2.94	3.68	4.41
grouting material	d		17.5	1.75	2.63	3.50	4.38	5.25
	e		23.2	2.32	3.48	4.64	5.80	6.96
	A2A	7		0.70	1.05	1.40	1.75	2.10
Direct Sheer test for	B2B	10		1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
cement mortar blocks	C2C	13		1.30	1.95	2.60	3.25	3.90
	D2D	16		1.60	2.40	3.20	4.00	4.80
	E2E	26		2.60	3.90	5.20	6.50	7.80
	A1A	7		0.70	1.05	1.40	1.75	2.10
Shear test for	B1B	10		1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
without grouting	C1C	13		1.30	1.95	2.60	3.25	3.90
reinforcement	D1D	16		1.60	2.40	3.20	4.00	4.80
	E1E	26		2.60	3.90	5.20	6.50	7.80
	Aa		9.3					
	Ab		12.7					
	Ac	7	14.7	0.70	1.05	1.40	1.75	2.10
	Ad		17.5					
-	Ae		23.2					
	Ba		9.3					
	Bb		12.7					
	Bc	10	14.7	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
	Bd		17.5					
-	Be		23.2					
	Ca		9.3					
Shear test for	Cb		12.7					
weak surface	Cc	13	14.7	1.30	1.95	2.60	3.25	3.90
reinforcement	Cd		17.5					
-	Ce		23.2					
	Da		9.3					
	Db		12.7					
	Dc	16	14.7	1.60	2.40	3.20	4.00	4.80
	Dd		17.5					
	De		23.2					
	Ea		9.3					
	Eb		12.7					
	Ec	26	14.7	2.60	3.90	5.20	6.50	7.80
	Ed		17.5					
	Ee		23.2					



图 2 弱面未注浆加固试件和弱面承压注浆加固试件照片

Fig. 2 Photos of weak-faced specimen without grouting reinforcement and confined grouting reinforcement for weak-faced specimen: (a) Weak surface without grouting; (b) Weak surface grouting reinforcement (no polished); (c) Weak surface grouting reinforcement (polished)

2 承压注浆加固含弱面岩体实验原理

2.1 试验假设条件

直接剪切试验可较直观、准确地得到岩石材料的

剪切参数,但仍面临剪切破坏面上应力状态复杂和剪 切应变无法准确测算的难题。基于上述难题,为更准 确分析岩石剪切试验数据,获得符合实际的剪切参数, 在开展承压注浆加固含弱面岩体剪切特性试验研究 时,建立的假设条件如下:

前切试验过程中,岩体弱面的厚度不发生变化;

2) 剪切试验过程中, 岩体弱面的粗糙度一致;

3) 横向施加荷载时,岩样仅沿横向荷载的方向产 生位移;

4) 岩样各受力面上的力分布均匀,即正应力、剪 应力的方向不变,且均匀分布在受力面上。

5) 剪切试验过程中,试件的剪切面积不变。

2.2 试验原理

开展承压注浆加固含弱面岩体时的岩-浆抗剪强 度耦合机理试验研究时,先将试件安装在直接剪切盒 中,然后以 0.5 MPa/s 的速率施加轴向荷载,然后维 持轴向荷载不变的条件下以 0.02 mm/s 的速率施加剪 切荷载,试验过程中试件受力示意图见图 3。



图 3 试验加载时试件受力示意图

Fig. 3 Stress schematic diagram of specimen under test loading: (a) Complete specimen; (b) Specimen with weak surface

根据莫尔−库仑强度理论,岩石的抗剪强度可用 式(1)表示:

 $\tau = \sigma \tan \phi + c \tag{1}$

式中: τ 为抗剪强度; c 为内聚力; ϕ 为内摩擦角; σ 为作用在剪切面上的正应力。

基于假设条件(5),认为试验过程中试件的剪切面 积不发生变化,故作用在剪切面上的正应力、切应力 可计算为

$$\sigma = \frac{F_{\text{ax}}}{A} \tag{2}$$

$\tau = \frac{F_{\rm h}}{A}$	(3)

式中: *F*_{ax} 为试件承受的轴向载荷; *F*_h 为试件承受的横向载荷; *A* 为试件的剪切面积, 即为试件的横截面积。

3 实验结果

3.1 剪切变形特征

当应力环境一定时承压加固含弱面岩体的剪切变 形特征主要受含弱面岩体、注浆材料、裂隙结构面力 学结构特征的共同影响。图4所示为法向应力1.4 MPa 时在上述 3 种因素影响下的一组典型的剪切应力--剪 切位移曲线。



图 4 法向应力为 1.4 MPa 时不同材料试件的剪切应力−剪 切位移曲线

Fig. 4 Shear stress-shear displacement curves of different materials specimen at normal stress of 1.4 MPa

由图 4 可知,在剪切载荷施加初期,弱面未注浆 加固时剪应力增大速率最快,水泥砂浆块的剪应力增 大速率最慢,且水泥砂浆块的剪应力-位移曲线初始 阶段呈下凸趋势,而其余三者的变化趋势近似呈直线。 弱面未注浆加固时试件的剪应力与弱面的摩擦因数、 施加的法向应力有关,当二者为定值时,剪应力增加 速率与剪切载荷施加速率一致,呈线性增加。由于注 浆材料的粒度小于水泥材料,且制成的水泥试件孔隙 度远大于注浆材料试件的,导致剪切荷载施加初期水 泥砂浆块内部的裂隙被压密,曲线呈下凸趋势变化, 而注浆材料试件内部孔隙少,压密空间有限,近似呈 直线趋势变化。

由图 4 中还可看出,剪切峰值应力后期的剪切应 力变化趋势明显不同,弱面未注浆加固时近似恒定, 水泥砂浆块呈阶段性减小,注浆材料则骤减,呈现明 显的脆性破坏,承压注浆加固弱面时则缓慢减小,呈 塑性流动破坏特征。综上分析,承压注浆加固含弱面 岩体不但提高了含弱面岩体的抗剪强度,还改变了含 弱面岩体的破坏性质,使其破坏呈弹-脆-塑性破坏特 征,延缓了含弱面岩体的整体破坏时间。

3.2 水泥砂浆块抗剪强度特征

承压注浆加固含弱面岩体时的岩-浆抗剪强度耦 合机理试验研究,需掌握模拟岩石试件的水泥砂浆块 的抗剪强度特征,故选用边长为10 cm的正方体水泥 砂浆块开展直接剪切试验,研究抗剪强度参数与法向 应力、水泥砂浆块单轴抗压强度之间的关系,结果如 图 5 和 6 所示。



图 5 水泥砂浆块抗剪强度随法向应力变化的曲线(图中数 据表示水泥砂浆块的单轴抗压强度)

Fig. 5 Changing curves of shear strength of cement mortar block with normal stress (Data in figure representing uniaxial compressive strength of cement mortar block)

由图 5 可知,水泥砂浆块的抗剪强度随法向应力 的增加呈线性增加,符合莫尔-库仑强度理论。但是, 当水泥砂浆块的单轴抗压强度增加时,抗剪强度同样 也呈增大趋势,间接说明岩石材料的抗剪强度不仅受 法向应力的影响,更受自身材料性质的影响。

内摩擦角、黏聚力是体现岩石抗剪强度的两个重 要指标,研究其与岩石单轴抗压强度之间的关系可间 接反映岩石材料自身性质对抗剪强度的影响规律。基 于水泥砂浆块直接剪切试验数据求出对应的内摩擦角 和黏聚力,然后回归分析其与单轴抗压强度之间的关 系,结果如图6所示。由图6可知,内摩擦角、黏聚 力随水泥砂浆块单轴抗压强度的增加呈对数函数形式 增加,再次说明研究承压注浆加固含弱面岩体时的岩-浆抗剪强度耦合机理需充分考虑岩石自身的材质。



图 6 水泥砂浆块抗剪强度参数随单轴抗压强度增加而变 化的曲线

Fig. 6 Changing curves of shear strength parameters of cement mortar block with increase of uniaxial compressive strength

3.3 注浆材料抗剪强度特征

承压注浆加固含弱面岩体时,注浆材料是增强裂 隙岩体完整性的纽带,其抗剪强度特征直接影响注浆 加固的效果。因此,注浆材料的抗剪强度特征也是承 压注浆加固含弱面岩体时的岩-浆抗剪强度耦合机理 研究必须考虑的主要因素之一。开展承压注浆加固含 弱面岩体时的岩-浆抗剪强度耦合机理试验研究前, 采用边长为 10 cm 的正方体注浆材料试件进行直接剪 切试验,获取注浆材料的抗剪强度参数与法向应力、 单轴抗压强度之间的关系,见图 7 和 8。





Fig. 7 Changing curves of shear strength of grouting material with normal stress (Data in figure represent uniaxial compressive strength of grouting material)

由图 7 可知,注浆材料的抗剪强度随法向应力的 增加也呈线性趋势增加,随注浆材料单轴抗压强度的 增加呈增大的趋势发展。进一步分析发现,注浆材料 单轴抗压强度为 9.3、12.7、14.7、17.5、23.2 MPa 时, 对应的抗剪强度增加趋势线的斜率相近,说明注浆材 料的抗剪强度随单轴抗压强度的增加而变化的规律与 随法向应力增加而变化的规律相近,都是呈线性趋势 增加。

基于注浆材料直接剪切试验,借助莫尔-库伦强 度理论,算出注浆材料的内摩擦角、黏聚力,回归分 析其随单轴抗压强度增加而变化的规律(见图 8)。图 8 中显示,内摩擦角、黏聚力随单轴抗压强度的增加而 变化的趋势近似一致,且都呈对数函数增长的趋势。 取内摩擦角与黏聚力回归曲线的比值进行分析,发现 其近似为常数,说明注浆材料的抗剪强度随单轴抗压 强度的增加呈均匀性增加,即单轴抗压强度不同的注 浆材料,其抗剪强度随法向应力增加而增加的趋势线 近的斜率相近,如图 7 所示。



图 8 注浆材料抗剪强度参数随单轴抗压强度增加而变化的曲线

Fig. 8 Changing curves of shear strength parameters of grouting material with increase of uniaxial compressive strength

3.4 弱面注浆加固试件抗剪强度特征

基于水泥砂浆块、注浆材料的抗剪强度特征,进 一步分析弱面注浆加固试件的抗剪强度特征。图 9~11 分别给出了承压注浆试件的抗剪强度参数随法向应 力、注浆材料单轴抗压强度、水泥砂浆块单轴抗压强 度增加而变化的规律。

图 9 中显示,随法向应力的增加,承压注浆试件 抗剪强度呈线性增加,总体来说符合莫尔-库伦强度 理论,但线性回归的相关系数 *R*² 值的变化范围为



图 9 承压注浆岩石试件抗剪强度随法向应力变化的曲线 Fig. 9 Change curves of shear strength of confined grouting rock specimen with normal stress (Uniaxial strength of cement mortar block 10 MPa; data in figure representing uniaxial compressive strength of grouting material)

0.646~0.993,说明注浆材料的性质、试件的整体性质 发生变化时,采用莫尔-库仑强度理论推测承压注浆 试件的抗剪强度的误差会出现较大变化。

由图 10 可知, 黏聚力随注浆材料和水泥砂浆块单 轴抗压强度的增加而增加。当注浆材料单轴抗压强度 增加时, 黏聚力回归直线的斜率为 0.116~0.138; 而水 泥砂浆块单轴抗压强度增加时, 相应黏聚力增长回归 直线的斜率为 0.038~0.047, 说明承压注浆试件的抗剪 强度特征受注浆材料强度影响较明显。以黏聚力增长 回归直线斜率的比值衡量二者对承压注浆试件抗剪强 度的影响,发现注浆材料的单轴抗压强度对承压注浆 试件抗剪强度的影响程度约为水泥砂浆块单轴抗压强 度的3倍。

由图 11 可知,內摩擦角随注浆材料单轴抗压强度 的增加而减小,随水泥砂浆块单轴抗压强度的增加却 维持恒定。注浆材料的强度越大,其脆性性质越明显, 弱结构面注浆加固时水泥砂浆块和注浆材料接触面耦 合的效果就较差,剪切试验时易沿接触面产生滑动破 坏,最终造成承压注浆试件的内摩擦角减小。由于承 压注浆试件在剪切荷载作用下,弱面最易发生剪切破 坏,当水泥砂浆块抗剪强度较大时,整个试件的抗剪 切强度主要取决于弱面性质和注浆材料性质,故测定 的内摩擦角随水泥砂浆块单轴抗压强度变化的范围 较小。

4 岩--浆抗剪强度耦合机理

4.1 试件-注浆材料抗剪强度耦合规律

注浆材料的性质一定程度上决定了裂隙岩体注浆 加固的效果。分析注浆加固裂隙岩体的抗剪强度与注 浆材料单轴抗压强度之间的关系,可为建立承压注浆 加固弱面屈服准则提供理论依据。图 12 给出了二者之 间的变化规律。

由图 12 可知,承压注浆加固岩体的抗剪强度随注 浆材料单轴抗压强度的增加而增加,且呈对数函数的



图 10 承压注浆岩石试件的黏聚力随注浆材料或水泥砂浆块单轴抗压强度增加而变化的曲线

Fig. 10 Changing curves of cohesive force of confined grouting rock specimen with increase of uniaxial compressive strength of grouting materials or cement mortar blocks: (a) Relationship between cohesive force and uniaxial compressive strength of grouting material (Data in figure representing uniaxial compressive strength of cement mortar lock); (b) Relationship between cohesive force and uniaxial compressive strength of grouting material)



图 11 承压注浆岩石试件的内摩擦角随注浆材料或水泥砂浆块单轴抗压强度增加而变化的曲线

Fig. 11 Changing curves of internal friction angle of confined grouting rock specimen with increase of uniaxial compressive strength of grouting materials or cement mortar blocks: (a) Relationship between internal friction angle and uniaxial compressive strength of grouting material (Data in figure represent uniaxial compressive strength of cement mortar lock); (b) Relationship between internal friction angle and uniaxial compressive strength of cement mortar block (Data in figure represent uniaxial compressive strength of grouting material)



图 12 承压注浆岩石试件的抗剪强度随注浆材料单轴抗压 强度增加而变化的曲线(水泥砂浆块单轴抗压强度 10 MPa; 图中数据表示法向应力)

Fig. 12 Changing curves of shear strength of confined grouting rock specimen with increase of uniaxial compressive strength of grouting materials (Uniaxial strength of cement mortar block 10 MPa; data in figure representing normal stress)

趋势变化。分析拟合公式的变化形式,发现当注浆材 料的单轴抗压强度在一定范围内不断增加时,承压注 浆岩体的抗剪强度也不断增加,但增加的速率却逐渐 减小,超出一极限值时便趋于恒定,甚至出现减小的 假象。这一规律说明在一定范围内提高注浆材料的强 度可有效改善承压注浆岩体的整体抗剪强度,但注浆 材料强度超出该范围后,改善裂隙岩体抗剪强度的效 果便不明显。

4.2 试件-水泥砂浆块抗剪强度耦合规律

分析承压注浆加固岩体的抗剪强度受水泥砂浆块 单轴抗压强度的影响规律,可反映裂隙岩体本身性质 在注浆加固时所起的作用,图 13 分别给出了法向应力 约为 1.40、2.14 MPa 时承压注浆加固含弱面岩体抗剪 强度随水泥砂浆块单轴抗压强度增加而变化的规律。

图 13 中显示,随水泥砂浆块单轴抗压强度的增加,抗剪强度的变化趋势较离散,但总体上增减的幅度不大,说明含弱面岩体自身强度在注浆加固时提高整体抗剪强度方面所起的作用不太明显。进一步分析,当水泥砂浆块的单轴抗压强度约为14 MPa时,承压注浆加固含弱面岩体的抗剪强度处于阶段峰值,如图13(a)注浆材料单轴抗压强度为14.7、17.5、23.2 MPa,图13(b)注浆材料单轴抗压强度为17.5、23.2 MPa时的抗剪强度近似处于同一阶段峰值。该现象揭示含弱面岩体的强度一定时,存在某一合理的注浆加固强度,当选择匹配该强度的注浆材料进行承压注浆加固时,可有效提高含弱面岩体的整体抗剪强度。

4.3 岩-浆抗剪强度耦合机理

注浆材料、水泥砂浆块的单轴抗压强度都会影响 注浆加固后含弱面岩体的抗剪强度,选取二者比值为 一参量,分析承压注浆加后含弱面岩体抗剪强度变化



图 13 承压注浆岩石试件的抗剪强度随水泥砂浆块单轴抗 压强度增加而变化的曲线

Fig. 13 Changing curves of shear strength of confined grouting rock specimen with increase of uniaxial compressive strength of cement mortar blocks (Data in figure representing uniaxial compressive strength of grouting material): (a) Normal stress 1.4 MPa; (b) Normal stress 2.14 MPa

的规律。

图 14 中显示,当注浆材料的单轴抗压强度与水泥 砂浆块的单轴抗压强度的比值增大时,承压注浆加固 试件的抗剪强度先增大后减小,说明注浆材料强度与 含弱面岩体原有强度的比值处于某一值时,承压注浆 加固后含弱面岩体的抗剪强度最大,将该比值定义为 最优比值,可用来衡量注浆加固的效果。图中还显示, 抗剪强度 *r* 随比值 *x* 变化趋势的拟合公式为一元二次 多项式,整理其表达式如下:

$$\tau = a_1 x^2 + b_1 x + C_1$$
 ($a_1 < 0, b_1 > 0, C_1$ 为常数) (5)





图 14 承压注浆岩石试件的抗剪强度随注浆材料和水泥砂 浆块强度比值的变化曲线

Fig. 14 Changing curves of shear strength of confined grouting rock specimen with strength ratio of grouting materials and cement mortar blocks (Uniaxial strength of cement mortar block 10 MPa; data in figure representing normal stress)

$$A_1 = -\frac{b_1}{2a_1} \tag{6}$$

式中: *A*₁为注浆加固含弱面岩体的最大抗剪强度对应的最优比值。

由图 15 可知,承压注浆加固含弱面岩体的黏聚力 及内摩擦角都随注浆材料单轴抗压强度与水泥砂浆块 单轴抗压强度比值的增加呈先增大后减小的趋势变 化。由莫尔-库伦强度理论可知,岩体抗剪强度随黏 聚力及内摩擦角的增加而增加,故上述现象反映注浆 材料强度与含弱面岩体原有强度耦合作用才能达到最 佳注浆加固效果。分析黏聚力 c、内摩擦角φ随比值 变化趋势拟合公式的形式,可将其表达式分别定义为

$$c = a_2 x^2 + b_2 x + C_2$$
 ($a_2 < 0, b_2 > 0, C_2$ 为常数) (7)

$$\phi = a_3 x^2 + b_3 x + C_3$$
 ($a_3 < 0, b_3 > 0, C_3$ 为常数) (8)

进一步对式(7)~(8)进行分析,各存在一比值,使 得黏聚力、内摩擦角的值最大,如采用最大黏聚力或 最大内摩擦角衡量注浆加固含弱面岩体的效果,可将 该比值定义为次优比值,处于次优比值时注浆加固含 弱面岩体的效果最理想。由式(7)~(8)可分别推导出两 个次优比值的表达式如下:

$$A_2 = -\frac{b_2}{2a_2}$$
(9)

$$4_3 = -\frac{b_3}{2a_3}$$
(10)



图 15 承压注浆岩石试件抗剪强度参数随水泥砂浆块和注 浆材料强度比值的变化关系

Fig. 15 Changing curves of shear strength parameters of confined grouting rock specimen with strength ratio of grouting materials and cement mortar blocks (Data in figure representing uniaxial compressive strength of cement mortar block): (a) Relationship between cohesion force and uniaxial compressive strength ratio; (b) Relationship between Internal friction angle and uniaxial compressive strength ratio

式中: *A*₂为最大黏聚力对应的次优比值; *A*₃为最大内 摩擦角对应的次优比值。

5 承压注浆加固含弱面岩体效果评价准则

5.1 注浆加固效果评价准则建立

经承压注浆加固含弱面岩体时的岩-浆抗剪强度 耦合机理试验研究,得出含弱面岩体、注浆材料的力 学性质及岩体所处的应力条件都影响含弱面岩体注浆 加固后的抗剪强度特征。图9中也显示,若仅依托莫 尔-库伦强度理论预测承压注浆试件的抗剪强度并评 估注浆效果,可能产生较大的误差,不能有效地指导 工程实践。为降低误差,基于岩-浆抗剪强度耦合机 理,以注浆材料和含弱面岩体的单轴抗压强度比值为 参量,结合莫尔-库伦强度理论建立更符合工程实践 的评价准则。

由于注浆材料的单轴抗压强度与水泥砂浆块的单 轴抗压强度之比处于最优比值时,承压注浆加固后岩 体的抗剪强度最大,分析最优比值与法向应力之间的 关系可为注浆加固含弱面岩体的效果评价准则的建立 提供间接基础关系,结果如图 16 所示。



图 16 承压注浆加固岩体时最优比值与法向应力之间的 关系

Fig.16	Relationship	between	optimal	ratio	and	normal	stress
under co	onfined groutin	ig to rein	force ro	ck ma	ss		

由图 16 可知,最优比值随法向应力的增加而增加,且增加的趋势呈对数函数形式。法向应力在一定范围内增加,可促使承压注浆加固后含弱面岩体的抗剪强度增加,但当其超过该范围时,注浆材料或含弱面岩体便产生压缩破坏,注浆加固后的岩体抗剪强度不增反降。由式(5)可知,抗剪强度随最优比值的增加先增大后减小,图 16 中则显示最优比值随法向应力的增加而增加,将式(5)中的最优比值用法向应力表示后,仍可反映承压注浆加固含弱面岩体的抗剪强度特征。

由于最优比值和法向应力之间呈对数函数关系, 故可将其表达式表示如下:

$$A_1 = K_1 \ln \sigma_n + C \tag{11}$$

将式(11)代入式(5)中,得最优抗剪强度 τ_{max}

$$\tau_{\max} = a_1 (K_1 \ln \sigma_n + C)^2 + b_1 (K_1 \ln \sigma_n + C) + C_1$$
(12)

基于莫尔-库仑强度理论,确定最大内聚力 c_{max} 和内摩擦角 \u03c6_{max} 便可推演出承压注浆加固岩体的最 大抗剪强度 τ_{max},分别将式(9)代入式(7),式(10)代入 式(8),可得

$$c_{\max} = \frac{b_2^2}{4a_2} - \frac{b_2^2}{2a_2} + C_2 \tag{13}$$

$$\phi_{\max} = \frac{b_3^2}{4a_3} - \frac{b_3^2}{2a_3} + C_3 \tag{14}$$

将式(13)~(14)代入莫尔-库仑准则,得

$$\tau'_{\max} = \tan\left(\frac{b_3^2}{4a_3} - \frac{b_3^2}{2a_3} + C_3\right) \cdot \sigma_n + \left(\frac{b_2^2}{4a_2} - \frac{b_2^2}{2a_2} + C_2\right)$$

(15)

式(12)是基于最优比值与法向应力之间的关系间 接建立承压注浆加固含弱面岩体能达到的最优抗剪强 度随法向应力之间的关系式。式(15)则是立足于莫尔-库仑准则,将准则公式中的内聚力、内摩擦角替换成 最大黏聚力、内摩擦角得到的。通过式(12)获得的最 大抗剪强度和式(15)获得的最大抗剪强度反映的是法 向应力一定时,通过改善注浆材料强度的方式能达到 的最大值,也是承压注浆加固含弱面岩体可达到的最 佳加固效果。令 $\tau_{max} = \tau'_{max}$ 建立方程,解对应的方程 发现其解存在"一解、两解、无解"3 种情况,故可 将式(12)和式(15)表示的剪切强度-正应力曲线绘制如 图 17 所示。

分析图 17 中的 4 组示意图, 可将 *τ*_{max} 和 *τ*_{max} 之间 的关系分成 3 种情况,基于此可确定承压注浆加固含 弱面岩体的抗剪强度能达到的合理范围。

非合理区(破坏区):抗剪强度大于 τ_{max} 和 τ'_{max}, 该区域的抗剪强度承压注浆加固含弱面岩体时无法达 到。若承压注浆加固含弱面岩体时,依该区域的值为 目标则是不合理的。承压注浆加固后的含弱面岩体承 受的剪应力处于该区域时,便发生破坏。

过渡区(屈服区):抗剪强度位于 $\tau_{max} 和 \tau'_{max}$ 之间, 该区域为过渡区,即承压注浆加固含弱面岩体抗剪强 度的最大值由合理值向非合理值进行过渡。承压注浆 加固含弱面岩体时,最大抗剪强度的确定也应避开该 区间。承压注浆加固含弱面岩体承受的剪应力处于该 区域时,岩体进入屈服阶段,产生的损伤加剧。

合理区(加固区):抗剪强度小于 τ_{max} 和 τ'_{max},该 区域的抗剪强度可通过调整注浆加固材料的单轴抗压 强度达到,也是注浆加固含弱面岩体能到达抗剪强度 的合理范围。承压注浆加固含弱面岩体时,应以该区 域的值为目标,可利用该区域的值检验工程注浆加固 的效果。含弱面岩体承受的剪应力处于该区域,可采 用注浆加固的方法加固,达到维护工程岩体稳定的 目的。



图 17 承压注浆加固含弱面岩体效果评价准则示意图

Fig. 17 Schematic diagram of effect evaluation criteria of confined grouting reinforcement for weak-faced rock mass: (a) One solution (two curves intersect); (b) One solution (two curves tangent); (c) Two solutions; (d) Without solution

第30卷第11期

5.2 注浆加固效果评价准则验证

根据建立的承压注浆加固含弱面岩体效果评价准则,选取单轴抗压强度为 16 MPa 的水泥砂浆块剪切试验结果进行分析,验证建立的评价准则。首先分析承压注浆加固试件的抗剪强度随注浆材料与水泥砂浆块单轴抗压强度比值的变化关系(见图 18),确定式(5)中各参数的值。



图 18 承压注浆加固试件的抗剪强度随注浆材料与水泥砂 浆块单轴抗压强度比值的变化曲线

Fig. 18 Changing curves of shear strength of confined grouting to reinforce specimen with strength ratio of grouting materials and cement mortar blocks (Uniaxial strength of cement mortar block 16 MPa; data in figure representing normal stress)

基于图 18 中拟合公式的各项系数及常数项,取相 应参数的平均值为式(5)各项系数及常数项的最终值, 以达到考虑法向应力对公式各参数的影响及减小误差 的目的。式(11)中各参数的值可通过图 16 中轴压为 16 MPa时的拟合公式获取。基于上述参数确定的方法, 得出式(12)中各参数的值,结果如表 2 所示。

表 2 基于最优比值与法向应力之间的关系间接建立评价 准则公式参数

Table 2
 Parameters of evaluation criteria formula based on relationship between optimal ratio and normal stress

a_1	b_1	C_1	K_1	С
-3.1602	8.2414	-0.7058	0.2390	0.9836

为确定式(15)中各参数的值,分析水泥砂浆块单 轴抗压强度为 16 MPa 时承压注浆加固含弱面岩体的 抗剪强度参数与单轴抗压强度比值的关系,结果如图 19 所示。

分析图 19 中拟合公式的各项系数及常数项,确定 式(15)中各参数,结果如表 3 所示。



图19 水泥砂浆块单轴抗压强度为16 MPa时承压注浆加固 后抗剪强度参数随单轴抗压强度比值的变化曲线

Fig. 19 Changing curves of shear strength parameters of confined grouting to reinforce specimen with uniaxial compressive strength ratio at strength of cement mortar blocks of 16 MPa

表3 基于莫尔库伦准则建立的评价准则公式参数

 Table 3 Parameters of evaluation criterion formula based on

 Mohr coulomb criterion

<i>a</i> ₂	b_2	C_2	<i>a</i> ₃	b_3	<i>C</i> ₃
-0.946	2.948	0.120	-15.96	38.97	11.63

将表2及3中各参数分别代入式(12)及式(13)得到 相应表达式,然后基于表达式绘制相应曲线,代入试 验数据验证建立的承压注浆加固含弱面岩体效果评价 准则的合理性,结果如图20所示。



图 20 承压注浆加固含弱面岩体效果评价准则验证示意图 Fig. 20 Verification diagram of effect evaluation criteria of confined grouting reinforcement for weak-faced rock mass (Data in figure representing uniaxial compressive strength of grouting material)

由图 20 可知,不同法向应力下 5 种单轴抗压强度 的注浆材料加固含弱面岩体后的抗剪强度都处于合理 区和过渡区内,说明建立的评价准则可有效预测注浆 加固含弱面岩体时能达到的效果。若盲目地期待注浆 加固的效果,即以图 20 中非合理区域内的抗剪强度为 注浆加固后岩体的抗剪强度,指导含弱面岩体控制工 程,会造成预期目标过高,导致工程事故产生。

6 结论

 1)承压注浆加固含弱面岩体时,不仅提高了含弱 面岩体的抗剪强度,还促使其破坏呈现弹-脆-塑性破 坏特征,最终延缓含弱面岩体发生宏观破坏。

2) 随法向应力的增加,水泥砂浆块、注浆材料、 弱面注浆加固试件的抗剪强度都呈线性增加,但抗剪 强度参数随单轴抗压强度增加而变化的趋势不同。水 泥砂浆块和注浆材料的黏聚力、内摩擦角随各自单轴 抗压强度的增加呈对数函数趋势增加,而含弱面岩体 的抗剪强度参数随岩体或注浆材料的单轴抗压强度的 增加呈线性趋势变化。

3) 含弱面岩体的抗剪强度随注浆材料单轴抗压强度的增加呈对数函数趋势增加,受岩体单轴抗压强度的影响却较小,且承压注浆加固含弱面岩体的抗剪强度、内摩擦角、黏聚力随注浆材料和岩体单轴抗压强度比值的增加先增大后减小。

4) 定义衡量注浆加固含弱面岩体效果的最优比 值、次优比值,建立了相应的评价准则,并通过试验 验证评价准则提出的破坏区、屈服区、加固区是合理 的。

REFERENCES

[1] 刘泉声, 雷广峰, 卢超波, 彭星新, 张 静, 王俊涛. 注浆 加固对岩体裂隙力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学 与工程学报, 2017, 36(S1): 3140-3147.

LIU Quan-sheng, LEI Guang-feng, LU Chao-bo, PENG Xing-xin, ZHANG Jing, WANG Jun-tao. Experimental study of grouting reinforcement influence on mechanical properties of rock fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3140–3147.

[2] WANG Q, QIN Q, JIANG B, JIANG B, YU H C, PAN R, LI S C. Study and engineering application on the bolt-grouting reinforcement effect in underground engineering with fractured surrounding rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 237–247.

- [3] WANG Cheng, LI Xue-feng, XIONG Zu-qiang, WANG Chun, SU Cheng-dong, ZHANG Yao-hui. Experimental study on the effect of grouting reinforcement on the shear strength of a fractured rock mass[J]. PLOS ONE, 2019, 14(8): 1–13.
- [4] LIU Quan-sheng, LEI Guang-feng, PENG Xing-xin, LU Chao-bo, WEI Lai. Rheological characteristics of cement grout and its effect on mechanical properties of a rock fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(2): 613–625.
- [5] 宗义江,韩立军,韩贵雷.破裂岩体承压注浆加固力学特性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4): 483-488.

ZONG Yi-jiang, HAN Li-jun, HAN Gui-lei. Mechanical characteristics of confined grouting reinforcement for cracked rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 483–488.

- [6] SHIMADA H, HAMANAKA A, SASAOKA T, MATSUI K. Behavior of grouting material used for floor reinforcement in underground mines[J]. International Journal of Mining Reclamation and Environment, 2014, 28(2): 133–148.
- [7] ZHU Yi-mo, CHEN Liang, ZHANG Heng, ZHOU Ze-lin, CHEN Shou-gen. Physical and mechanical characteristics of soft rock tunnel and the effect of excavation on supporting structure[J]. Applied Sciences-Basel, 2019, 9(8): 1–15.
- [8] 郑 卓,刘人太,李术才,王晓晨,张连震,王洪波. 基于 Hoek-Brown 准则的岩体注浆加固机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S1): 409-417.
 ZHENG Zhuo, LIU Ren-tai, LI Shu-cai, WANG Xiao-chen, ZHANG Lian-zhen, WANG Hong-bo. Investigation into grouting reinforcement mechanism of fractured rock mass based on Hoek-Brown criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 409-417.
- [9] HUANG Ming, XU Chao-shui, ZHAN Jin-wu, WANG Jun-bao. Comparative study on dynamic properties of argillaceous siltstone and its grouting-reinforced body[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(2): 333–352.
- [10] XU Hong-fa, GENG Han-sheng, CHEN Feng, CHEN Xiao, QI Liang-liang. Strength assessment of broken rock post grouting reinforcement based on initial broken rock quality and grouting quality[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 17(5): 1–14.
- [11] 赵庆彪,毕 超,虎维岳,王海桥,南生辉,刘再斌, 啜晓 字. 裂隙含水层水平孔注浆"三时段"浆液扩散机理研 究及应用[J]. 煤炭学报,2016,41(5):1212-1218. ZHAO Qing-biao, BI Chao, HU Wei-yue, WANG Hai-qiao, NAN Sheng-hui, LIU Zai-bin, CHUAI Xiao-yu. Study and

application of three-stage seriflux diffusion mechanism in the fissure of aquifer with horizontal injection hole[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1212–1218.

- [12] ZHU Yu-shan, WANG Xiao-ling, DENG Shao-hui, CHEN Wen-long, SHI Zu-zhi, XUE Lin-li, LÜ Ming-ming. Grouting process simulation based on 3D fracture network considering fluid-structure interaction[J]. Applied Sciences-Basel, 2019, 9(4): 1–19.
- [13] 李相辉,张庆松,张 宵,蓝雄东,左金鑫.非均质断层 破碎带注浆扩散机理[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(2): 67-76.

LI Xiang-hui, ZHANG Qing-song, ZHANG Xiao, LAN Xiong-dong, ZUO Jin-xin. Grouting diffusion mechanism in heterogeneous fault-fracture zone[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(2): 67–76.

[14] 刘泉声, 卢超波, 卢海峰, 刘学伟. 断层破碎带深部区域 地表预注浆加固应用与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3688-3695.

LIU Quan-sheng, LU Chao-bo, LU Hai-feng, LIU Xue-wei. Application and analysis of ground surface pre-grouting strengthening deep fault fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3688–3695.

 [15] 李召峰,李术才,刘人太,蒋宇静,沙 飞. 富水破碎岩 体注浆加固实验与机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 198-207.
 LI Zhao-feng, LI Shu-cai, LIU Ren-tai, JIANG Yu-jing, SHA

Fei. Grouting reinforcement experiment for water-rich broken rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 198–207.

- [16] ZHANG Qing-song, ZHANG Lian-zhen, LIU Ren-tai, LI Shu-cai, ZHANG Qian-qing. Grouting mechanism of quick setting slurry in rock fissure with consideration of viscosity variation with space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70: 262–273.
- [17] 王 志,李 龙. 含裂隙岩石注浆加固后的弯曲疲劳性能 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1823-1832.
 WANG Zhi, LI Long. Experimental study on bending fatigue behavior of grouting reinforced rock with fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,
- 37(8): 1823–1832.
 [18] WANG Zhi, LI Long, GUO Shuai-cheng, DAI Qing-lin. Nonlinear fatigue damage of cracked cement paste after grouting enhancement[J]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(7): 1–9.
- [19] 张 霄,李术才,张庆松,孙克国,刘人太,韩伟伟,原小帅.关键孔注浆方法在高压裂隙水封堵中的应用研究[J].

岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1414-1421.

ZHANG Xiao, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, SUN Ke-guo, LIU Ren-tai, HAN Wei-wei, YUAN Xiao-shuai. Study of key-hole grouting method to harness high pressure water gushing in fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1414–1421.

- [20] 陈兴年,刘国彬,侯学渊. 挤压注浆在上海地区的发展探 讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 487-488.
 CHEN Xing-nian, LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Discussion on compaction grouting in shanghai area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 487-488.
- [21] 李 鹏,张庆松,张 霄,李术才,张伟杰,李梦天,王 倩.基于模型试验的劈裂注浆机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3221-3230.
 LI Peng, ZHANG Qing-song, ZHANG Xiao, LI Shu-cai, ZHANG Wei-jie, LI Meng-tian, WANG Qian. Analysis of fracture grouting mechanism based on model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3221-3230.
- [22] 朱明听,张庆松,李术才,李 卫,随海通,杨红鲁. 土体 劈裂注浆加固主控因素模拟试验[J]. 浙江大学学报(工学 版), 2018, 52(11): 2058-2067.
 ZHU Ming-ting, ZHANG Qing-song, LI Shu-cai, LI Wei, SUI Hai-tong, YANG Hong-lu. Simulation test for main control factors of soil splitting grouting reinforcement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(11): 2058-2067.
- [23] 韩立军,宗义江,韩贵雷,张后全. 岩石结构面注浆加固 抗剪特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2570-2576.
 HAN Li-jun, ZONG Yi-jiang, HAN Gui-lei, ZHANG Hou-quan. Study of shear properties of rock structural plane by grouting reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2570-2576.
- [24] 李晓锋,李海波,夏 祥,刘 博,冯海鹏.类节理岩石 直剪试验力学特性的数值模拟研究[J]. 岩土力学,2016, 37(2):583-591.

LI Xiao-feng, LI Hai-bo, XIA Xiang, LIU Bo, FENG Hai-peng. Numerical simulation of mechanical characteristics of jointed rock in direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 583–591.

- [25] TIAN Yong-chao, LIU Quan-sheng, MA Hao, LIU Qi, DENG Peng-hai. New peak shear strength model for cement filled rock joints[J]. Engineering Geology, 2018, 233: 269–280.
- [26] 徐志伟,周国庆,刘志强,周金生,田秋红.直剪试验的 面积校正方法及误差分析[J].中国矿业大学学报,2007, 36(5):658-662.

XU Zhi-wei, ZHOU Guo-qing, LIU Zhi-qinag, ZHANG

Jin-sheng, TIAN Qiu-hong. Correcting method and error analysis for sample area in direct shear test[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(5): 658–662.

[27] 王 刚,张学朋,蒋宇静,张永政.一种考虑剪切速率的 粗糙结构面剪切强度准则[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1399-1404.

WANG Gang, ZHANG Xue-peng, JIANG Yu-jing, ZHANG Yong-zheng. New shear strength criterion for rough rock joints considering shear velocity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1399–1404.

[28] 余 凯,姚 鑫,张永双,李成功,欧 璐.基于面积和 应力修正的直剪试验数据分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(1):118-124.

YU Kai, YAO Xin, ZHANG Yong-shuang, LI Cheng-gong, OU Lu. Analysis of direct shear test data based on area and stress correction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 118–124.

Coupling mechanism of rock-pulp shear strength in process of confined grouting reinforcement for weak-faced rock mass

WANG Chun^{1, 2, 3}, WANG Huai-bin¹, XIONG Zhu-qiang^{1, 3}, WANG Cheng¹, CHENG Lu-ping¹, LI Xue-feng¹, ZHAN Shuai-fei¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. State and Local Joint Engineering Laboratory for Gas Drainage and Ground Control of Deep Mines,

Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

3. Collaborative Innovation Center of Coal Safety and Clean-efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: By using cement mortar blocks with different strengths to simulate the rock masses with good homogeneity and different lithology, the coupling mechanism of rock-slurry shear strength of weak-faced rock mass under pressure grouting for reinforcement was researched to explore the evaluation mechanism of pressure grouting for reinforcement effect. The results show that the pressure grouting for reinforcement can improve shear strength and delay the macroscopic failure of weak-faced rock mass effectively. The shear strength of weak-faced rock mass expresses a linear growth with the increasing normal stress, and it rises in a logarithmic function with increase the strength of grouting material, moreover, the shear strength parameters (τ , c, φ) first increase and then decrease as the ratio of grouting material strength and rock mass strength, while the internal friction angle declines with increasing the grouting material strength, and it remains constant as the rock mass strength enhances. Based on the coupling mechanism of rock-slurry shear strength, the evaluation criteria for effect of the pressure grouting for reinforcement. This point was verified, and it can be used to guide the control project of grouting reinforcement of weak-faced rock mass. **Key words:** pressure grouting; weak-faced rock mass; shear strength; coupling mechanism; assessment criteria

Foundation item: Project(51904093) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (192102310247) supported by the Development and Promotion of Special (Science and Technology) Project of Henan Province, China; Project(SJF201803) supported by the Research Fund of State and Local Joint Engineering Laboratory for Gas Drainage & Ground Control of Deep Mines (Henan Polytechnic University), China; Project(NSFRF180321) supported by the Exploration of Youth Innovation Foundation of Henan Polytechnic University, China; Project(18A440014) supported by the Key Scientific Research Foundation in University of Henan Province, China; Project(672707) supported by the Doctoral Foundation of Henan Polytechnic University, China

Received date: 2020-01-03; Accepted date: 2020-08-28

Corresponding author: WANG Chun; Tel: +86-15716363691; E-mail: wczy115728@163.com