



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403080

引用格式:康志鹏,余国锋,罗勇,等.聚氨酯/水玻璃破碎岩层注浆模型试验研究[J].科学技术与工程,2025,25(8):3521-3528.

Kang Zhipeng, Yu Guofeng, Luo Yong, et al. Grouting model test of polyurethane/soluble glass broken rock stratum[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3521-3528.

聚氨酯/水玻璃破碎岩层注浆模型试验研究

康志鹏^{1,2}, 余国锋^{1,2}, 罗勇^{1,2}, 段昌瑞^{1,2}, 蔡志良^{1,2}

(1. 淮南矿业(集团)有限责任公司, 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 淮南 232001;

2. 淮河能源控股集团有限责任公司, 深部煤炭开采耦合灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 淮南 232001)

摘要 为解决矿山开采以及隧道挖掘等地下空间作业过程中遇到的顶板破碎、支护困难、突水突泥的难题,以聚氨酯/水玻璃有机无机杂化注浆加固材料为研究对象,通过建立相似仿真注浆模型,对模型注浆过程中距注入点不同距离测点的温度、压力进行研究,分析浆液扩散规律;对注浆加固体进行力学性能分析,检验固结效果。结果表明:聚氨酯(PU)/水玻璃双液注浆材料在破碎岩层试验模型中呈现不规则扩散,固化反应为放热反应,在浆液注入后 10 min 达到最大值 83.2 °C,为室温的 6.6 倍,最大压力 5.7 MPa,为试验加载的 1.425 倍,温度和压力均随时间表现为先急速上升随后缓慢下降最终趋于稳定。聚氨酯(PU)/水玻璃双液注浆加固体单轴抗压强度区间为 15.32 ~ 32.57 MPa,三轴加载最大承载能力 41.9 MPa,残余强度 25 MPa,蠕变破坏最大载荷 25 MPa,被注材料固结后强度大大提升。通过对注浆加固体进行细观分析可知岩石与浆液在交界处紧密胶结,注浆加固效果良好。

关键词 聚氨酯(PU)/水玻璃; 双液注浆; 模型试验; 加固机理

中图法分类号 X936;

文献标志码 A

Grouting Model Test of Polyurethane/Soluble Glass Broken Rock Stratum

KANG Zhi-peng^{1,2}, YU Guo-feng^{1,2}, LUO Yong^{1,2}, DUAN Chang-rui^{1,2}, CAI Zhi-liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Deep Coal Mining Environment Protection, Huainan Mining Group Co., Ltd., Huainan 232001, China;

2. Key Laboratory of Coupled Hazards Prevention and Control in Deep Coal Mining National Mine Safety Administration, Huaihe Energy Holding Group Co., Ltd., Huainan 232001, China)

[Abstract] In order to solve the problems of roof breakage, support difficulty, water and mud inrush encountered in underground space operations such as mining and tunnel excavation, polyester ammonia/water glass organic-inorganic hybrid grouting reinforcement material was taken as the research object. By establishing a similar simulation grouting model, the temperature and pressure of measuring points at different distances from the injection point during the model grouting process were studied, and the slurry diffusion law was analyzed. The mechanical properties of grouting reinforcement were analyzed to test the consolidation effect. The results show that the polyurethane(PU)/water glass double-liquid grouting material exhibits irregular diffusion in the broken rock test model, and the curing reaction is an exothermic reaction. It reaches a maximum of 83.2 °C at 10 min after slurry injection, which is 6.6 times of room temperature. The maximum pressure is 5.7 MPa, which is 1.425 times of the test load. The temperature and pressure increase rapidly with time and then slowly decline and finally stabilize. The uniaxial compressive strength range of polyurethane/water glass double liquid grouting and solid is 15.32 ~ 32.57 MPa, the maximum bearing capacity of triaxial loading is 41.9 MPa, the residual strength is 25 MPa, the maximum load of creep failure is 25 MPa, and the strength of the injected material is greatly improved after consolidation. Through the microscopic analysis of grouting reinforcement, it can be seen that the rock and slurry are closely cemented at the junction, and the grouting reinforcement effect is good.

[Keywords] polyurethane(PU)/soluble glass; double-fluid grouting; model experiment; reinforcement mechanism

隧道及井工矿山等地下硐室施工过程中,由于地质环境复杂多变,在遭遇岩溶性膨胀土、断层、软岩等极端情况下,会导致施工困难,甚至发生突水

突泥灾害,严重威胁人员安全^[1]。注浆技术能够封闭导水裂隙,实现围岩改性从而提高衬砌结构强度以及耐久性。现有的注浆材料主要分为有机注浆

收稿日期:2024-04-26; 修订日期:2024-12-23

基金项目:安徽省自然科学基金(2108085ME155);安徽省重点研究和开发计划(201904a07020011,1804a0802214);淮南市科技计划(2021A05)

第一作者:康志鹏(1994—),男,汉族,河北张家口人,硕士,工程师。研究方向:煤矿绿色安全开采。E-mail:kzp18361267579@163.com。

*通信作者:余国锋(1975—),江西上饶人,正高级工程师,博士。研究方向:地下灾害防治。E-mail:1457511552@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

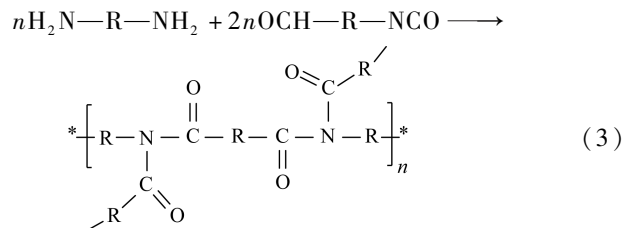
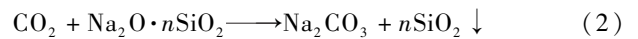
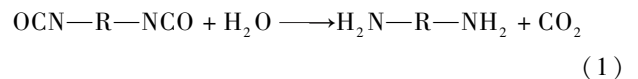
材料和无机注浆材料,聚氨酯(PU)作为主要的有机注浆材料,存在生产成本低、不适宜工程大批量生产的缺点;碳酸钙、云母等无机类注浆材料存在浆液流动效果差,渗透半径小的缺点。由于注浆工程本身具有隐蔽性,且注浆环境受地质结构影响,注浆效果也会打折扣。因此需要对浆液扩散机制及注浆效果进行仿真模拟试验研究。学者们针对浆液扩散机制、新型注浆材料以及注浆工程实践开展了大量研究。张华磊等^[2]研究了不同粒径分布多孔介质的幂律流体渗透注浆规律。梁玉强等^[3]研究了水泥/粉煤灰碱改性对废弃粉质土砂配制盾构壁后注浆性能的影响。余永强等^[4]进行了砂土介质注浆扩散规律试验研究。刘学伟等^[5]分析了硫铝酸盐水泥(SAC)、普通硅酸盐水泥(OPC)和环氧树脂(EPR)3种注浆材料填充双裂隙类岩石试样力学特性。吕鑫等^[6]进行了采空区破碎岩体负压注浆加固试验,得出了加固效果受浆液水化反应、固液交界面液桥特性、孔隙变化及真空脱水效应影响。刘伟韬等^[7]给出了基于单因素试验与响应曲面法(RSM)的超细水泥注浆材料配比及性能优化模型。翟明磊等^[8]对浆液-岩体耦合效应的裂隙注浆扩散机制进行了研究,得出注浆压力是影响浆液扩散距离的主控因素。陈军涛等^[9]对不同长度裂隙灰岩注浆加固特性进行了试验研究。周禹良等^[10]进行了溶蚀白云岩含水层注浆浆水两相运移特征格子玻尔兹曼方法(LBM)模拟研究。部分专家研究了不同掺料对于注浆材料力学性能的影响。李若昀等^[11]研究了水玻璃对于细粒尾矿胶结性能的影响。黄湘寒^[12]、王晓林等^[13]研究了玻璃纤维对于注浆材料的强度影响。曾熙文等^[14]研究了聚丙烯纤维掺料对于注浆材料的影响,能够明显改善胶结试件的抗压性能。贾东秀^[15]、沈玲玲等^[16]分别研究了矿渣-粉煤灰、机械力活化煤泥对于注浆材料流动度及强度的影响。朱昌星等^[17]通过试验室试验及数值模拟的方法,研究了碳纤维增韧注浆体试块动态压缩力学特性。迟凤霞等^[18]研究了矿物掺合料对水泥-水玻璃注浆材料性能的影响。周春煦等^[19]研究了钢渣基胶凝剂对于注浆体的力学特性影响。新型注浆材料方面,张农等^[20]研发了一种以硅溶胶为主要成分的高可注高增强跨尺度复合改性浆材。吴求刚等^[21]通过电石渣的激发作用,制备了一种自燃煤矸石地质聚合物低强度注浆材料。注浆工程现场实践方面,轩大洋等^[22]、卢华喜等^[23]开展了铁路隧道下注浆充填效果研究。段李宏^[24]、潘伟鹏等^[25]、张继远等^[26]、肖同强等^[27]分别研究了煤矿底板水害、过断层、散体顶板和围岩裂

隙等不同工况的注浆改性效果,对注浆的有益效果进行了工程验证。现有对注浆效果的研究大部分基于假设以及工程弱化条件,相较于现场实际具有一定的差异性,而注浆工程亟需实现精准注浆,因此需要进行仿真模型试验,模拟真实被注介质以及实际地下洞室情况,这对研究浆液扩散机制以及对散体的加固效果具有重要意义。

根据实际工程需要,注浆材料选用聚氨酯/水玻璃双液注浆材料。该材料具备相容性高、可注性好、固化时间可调的优点,能够满足在微裂隙含水层下的岩层和煤层加固和堵水需求。通过建立试验室注浆模型,分析模型注浆过程中温度、压力、应变变化,并对注浆加固体进行力学分析,得出注浆试验过程各参数变化规律和加固效果,为工程实践提供理论指导和依据。

1 双液加固材料原理及注浆机理分析

选取聚氨酯/水玻璃有机无机杂化注浆加固材料进行研究。该材料是以高官能度的多苯基亚甲多异氰酸酯(PAPI)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和水玻璃为原料,通过原位法制备。与传统聚氨酯注浆材料相比,该材料阻燃及抗静电性能大大提高且固化反应的最高反应温度降低,同时其力学性能也优于水玻璃注浆材料。双液注浆材料配比为1:1,其注浆工艺技术路线如图1所示。



注浆加固实质为浆液在裂隙孔洞中扩散填充进而黏结充实。浆液运动按照注浆时间可依次分为充填、渗透、压密、劈裂4种方式,最终实现加固被注介质。浆液流动的初始动力为注浆机提供,通过管路输送,到达被注介质后,先填充介质中原有孔洞及裂隙,当原生孔隙填满时,由于持续注浆导致

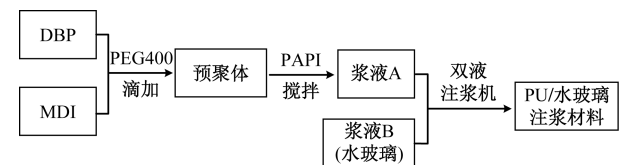


图1 注浆工艺技术路线

Fig. 1 Grouting technology route

注浆压力升高、浆液总量增大,此时注浆方式由渗透转变为压密劈裂。因此,可将注浆加固分为以下4个阶段:①空气压缩能提供浆液初始动力,通过管路克服流体阻力,到达被注材料裂隙;②伴随浆液填充,原生裂隙被填满,注浆量增多,注浆压力升高;③浆液在压力作用下冲挤加固体,产生劈裂的次生裂隙;④浆液反复填充裂隙并不断压实,待固化后形成加固骨架,将注材料挤密固结。

2 破碎岩层注浆模型试验

模型采用薄壁钢制圆筒(Q235钢),整体焊接,接缝处用热固性树脂密封,保证内部空间密闭。模型内部填充破碎岩体模型材料。

2.1 模型尺寸及壁厚设计

试验拟定注浆压力为4 MPa,模型尺寸为:长1 500 mm,外直径200 mm。

筒壁厚度 d 的计算公式为

$$d = \frac{P\Phi S}{2\sigma} \quad (4)$$

式(4)中: d 为薄筒壁厚,mm; P 为圆筒承受的内部压力,MPa; Φ 为圆筒外径,mm; S 为安全系数, $P < 7$ 时, $S = 8$; $7 < P < 17.5$ 时, $S = 6$; $P > 17.5$ 时, $S = 4$; σ 为材料抗压强度,MPa。

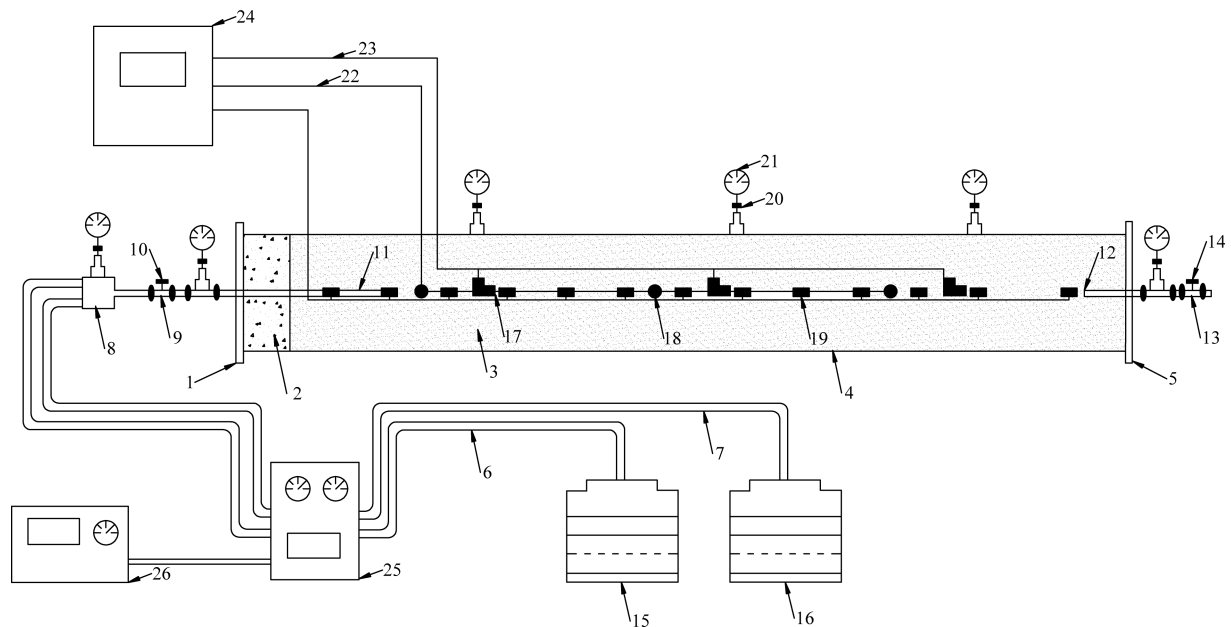
根据给定的注浆压力以及设计断面尺寸,可得安全系数 $S = 8$,其中Q235钢抗拉强度取400 MPa,

代入式(4)可得圆筒壁厚为8 mm。

2.2 模型测试元件安装及试验方法

通过记录注浆过程中模型内部的压力、温度以及模型外壁上的应变来实现注浆过程实时监测。具体方法为将压力传感器、热电偶串、电阻应变片布置于模型的内外表面。压力传感器布置方案为,沿着模型轴线对称布置,第一个测点布置位置为距注浆端口处300 mm,而后间隔400 mm布置两组,共计6个测点;热电偶沿模型轴线对称布置,其位置为距离两端150 mm各布置一个,中间每隔100 mm布置1个,共26个测点;压力表沿模型中轴线布置,其位置为自注液端起400、800、1 200 mm,并在端头部和端尾部各安装一个压力表,共布置5个;电阻式应变片布置位置为自注液端起400、800、1 200 mm,共计6个。为防止浆液堵管,预埋250 mm的注浆管并放置花管,能够使得聚氨酯(PU)与水玻璃混合均匀后注入模型内部。模型端头板为长230 mm,厚8 mm的钢板,中间开圆孔便于注浆管通过。待被注材料按照一定比例填充至筒体内部后,封闭端头板并浇筑80 mm混凝土,保证注浆过程额定注浆压力,模型测点布置如图2所示。

本试验注浆材料为A、B双液,A液为水玻璃,B液为聚氨酯(PU)混合液。试机调试后,开启进浆阀与出浆阀,将A、B液按照1:1混合注入模型中,待端头压力表达达到额定注浆压力后,停止注浆并每间隔



1为端头板;2为端头混凝土;3为被注材料;4为筒体;5为端尾板;6为A液注浆管;7为B液注浆管;8为混合头;9为进浆龙头;10为进浆阀;11为注浆管;12漏浆管;13为出浆龙头;14为出浆阀;15为A液容器;16为B液容器;17为电阻式应变片;18为压力传感器;19为热电偶串;20为弯管;21为压力表;22为压力传感器测线;23为电阻式应变片测线;24为TDS-630多功能数据采集仪;25为气动双液注浆机;26为空气压缩机

图2 注浆试验装置示意图

Fig. 2 Grouting test device schematic diagram

20 min 记录一次数据直至模型中所有热电偶读数与室温相同。

2.3 被注材料制备

现场岩土体具有采集难度大、各向异性的特点,会导致试验结果离散度高,无法准确得出试验结论,因此本试验选用硅酸盐水泥、河沙、细粒径碎石、粗粒径碎石按照 1:3:6:10 配比混合均匀后放入模型中分层夯实,由于现场岩性为粗粒砂岩,为保证配置的模型材料在颗粒级配上满足要求,对模型材料混合均匀后筛分,其粒径对比曲线如图 3 所示,模型材料成分如表 1 所示。

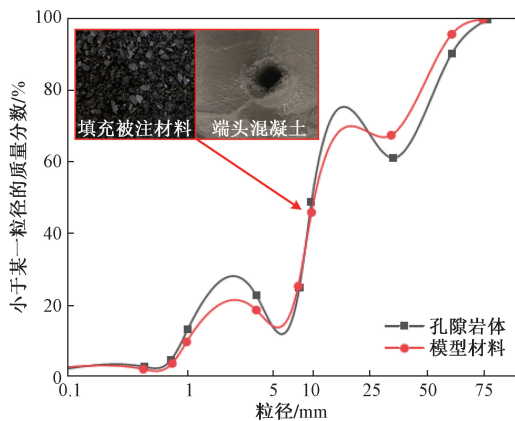


图 3 模型材料与孔隙砂岩颗粒成分累计曲线
Fig. 3 The cumulative curve of model material and pore sandstone particle composition

表 1 被注材料成分

Table 1 Injected material composition

粒径范围/mm	<0.25	0.25~1	1~10	>10
种类	硅酸盐水泥	河沙	细粒径碎石	粗粒径碎石
重量/kg	7	21	42	70
密度/(g·m ⁻³)	1 555	1 296	1 509	1 665

本次试验采用 2ZBQ24/10 型煤矿用气动注浆泵、TDS-630 数据采集仪进行注浆作业及数据采集。

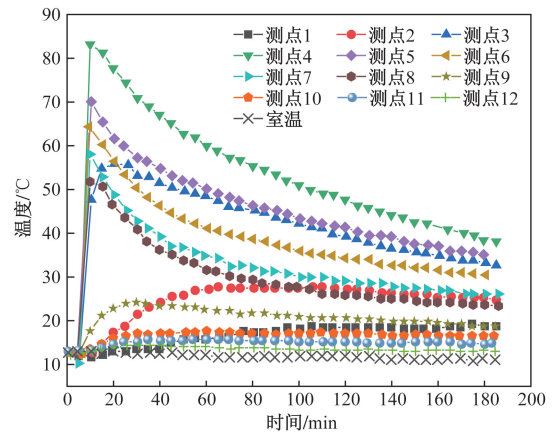
3 注浆试验结果

3.1 试验数据分析

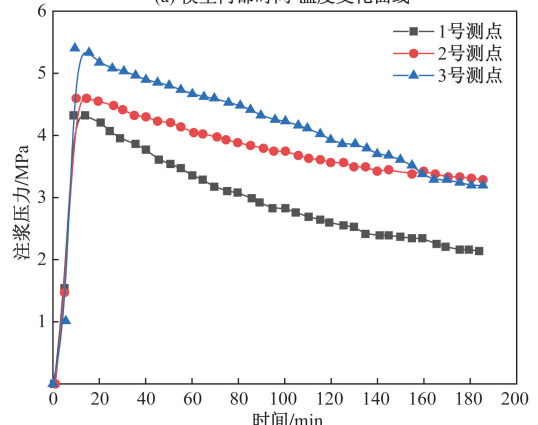
试验过程中各测点收集数据记录图 4 所示,分析可得:注浆过程中,模型内部温度随时间增长呈现急速上升而后缓慢下降的趋势。在注浆后 10 min 达到峰值,温度最高为 83.2℃(室内温度 12.7℃),为距注液端 450 mm 处的 4 号温度测点;模型内部压力变化与温度类似,也在 10 min 处达到压力峰值 5.7 MPa,最大压力值出现在 5 号压力测点(距注液端 700 mm)。

3.2 注浆加固体力学性能研究

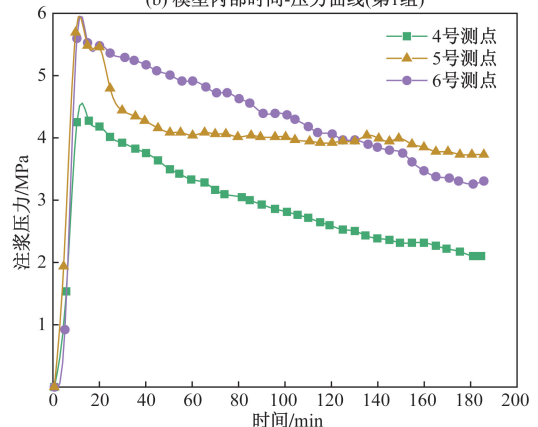
为研究注浆加固效果,待试验结束常温养护



(a) 模型内部时间-温度变化曲线



(b) 模型内部时间-压力曲线(第1组)



(c) 模型内部时间-压力曲线(第2组)

图 4 模型内部各测点随时间变化曲线

Fig. 4 The curve of each measuring point in the model changing with time

72h 后,对模型内加固体沿中轴线间隔 7 cm 取芯并制作成高 100 mm,直径 50 mm 的标准试样,共计 24 个进行力学性能研究。取芯结果如图 5 所示,其中被注材料为黑色,混合浆液为黄色,浆液与被注材料混合并固结,形成密实的胶结体,其浆液含量与距注液端距离呈反比,反映出浆液在模型内部为非均匀扩散,其扩散量随扩散距离呈负相关。

试件的单轴抗压强度、弹性模量与距注液端距离关系如图 6 所示,试件最大单轴抗压强度为



图5 注浆加固体取芯

Fig. 5 Grouting reinforced solid specimen

32.57 MPa,对应的弹性模量 1 633.85 MPa,距注液端 80 cm;试件最小单轴抗压强度为 15.32 MPa,对应的弹性模量为 420.55 MPa,距注液端 40 cm。注浆加固体的强度和弹性模量沿轴线不均匀分布,表现为先上升后下降。

三轴加载采用 5 MPa 围压,试验结果如图 7 所示。在距注液端 46、74、95 cm 处,胶结体承载能力分别为 24.3、41.9、31.4 MPa,其破坏后的残余强度分别为 14.9、25、23.3 MPa。注浆固结体三轴加载破坏过程可大致分为 6 个阶段:①压密阶段:试件内原有裂隙受压闭合,应力-应变曲线斜率增加,呈“上凹”型;②线弹性阶段:应力-应变曲线斜率近似为常数;③塑性变形阶段:试件破坏,发生不可恢复变形;④屈服阶段:试件承载达到极限,内部裂纹萌生扩展;⑤应变软化阶段:试件进一步破坏,裂纹发育贯通,整体承载能力下降;⑥残余强度阶段:伴随压力增大,试件变形逐渐增大,试件结构完整性遭到破坏,承载能力相对稳定。

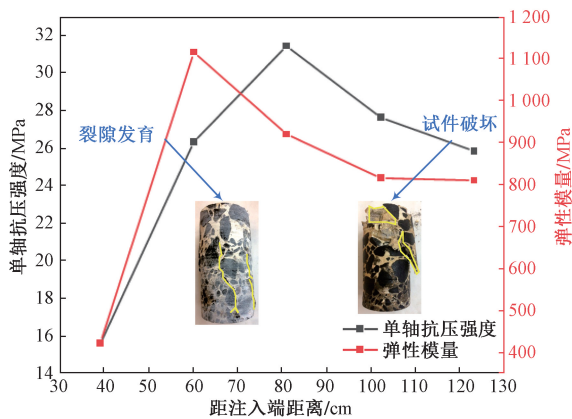


图6 注浆加固体单轴抗压试验

Fig. 6 Uniaxial compression test of grouting reinforcement

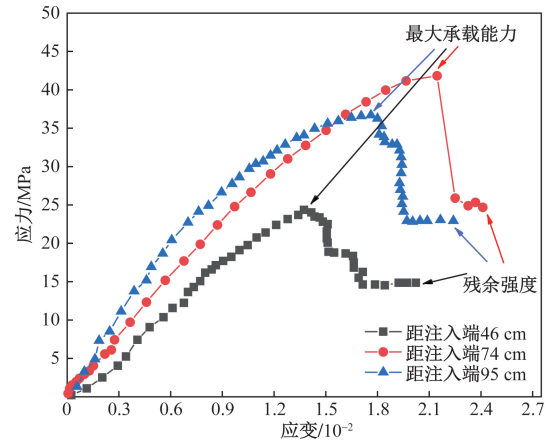


图7 注浆加固体应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of grouting reinforcement

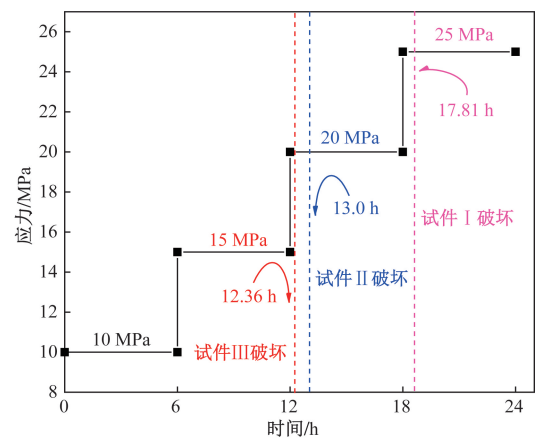


图8 注浆加固试件分级加载破坏

Fig. 8 Grouting reinforcement specimen graded loading failure

分别选取距注液端 53、88、144 cm 处试件进行单轴蠕变分级加载试验,初始应力 10 MPa,加载速率为 5 MPa/6 h,试验结果如图 8、图 9 所示,在距注液端 53 cm 处试件发生最大蠕变破坏,此时载荷为 25 MPa,累计破坏时间 18.71 h。蠕变破坏所发生的时间与距注液端距离呈反比。蠕变破坏伴随应力升高分为衰减、等速、加速 3 个阶段。试件在低应力状态下仅发生第 I 和第 II 阶段的蠕变破坏,应变随时间推移而逐渐稳定;应力水平升高后,试件发生第 III 阶段破坏,表现为应变-时间曲线斜率不断增大,直至试件完全破坏。

3.3 注浆加固效果微观分析

将注浆加固试件加工成直径 < 25 mm,高度 < 20 mm 薄片,并在表面蒸涂一层金属导电膜后进行电镜扫描,放大 200 倍后结果如图 10 所示。可以看出,浆脉-岩体界面间距小于 1 μm,浆液面平滑且结构致密,即说明浆液填充固结效果好。由于浆液扩散方式为渗透扩散,具有非均匀性,即同一试件不同位置存在微小差异,浆液在不改变煤体结构的情

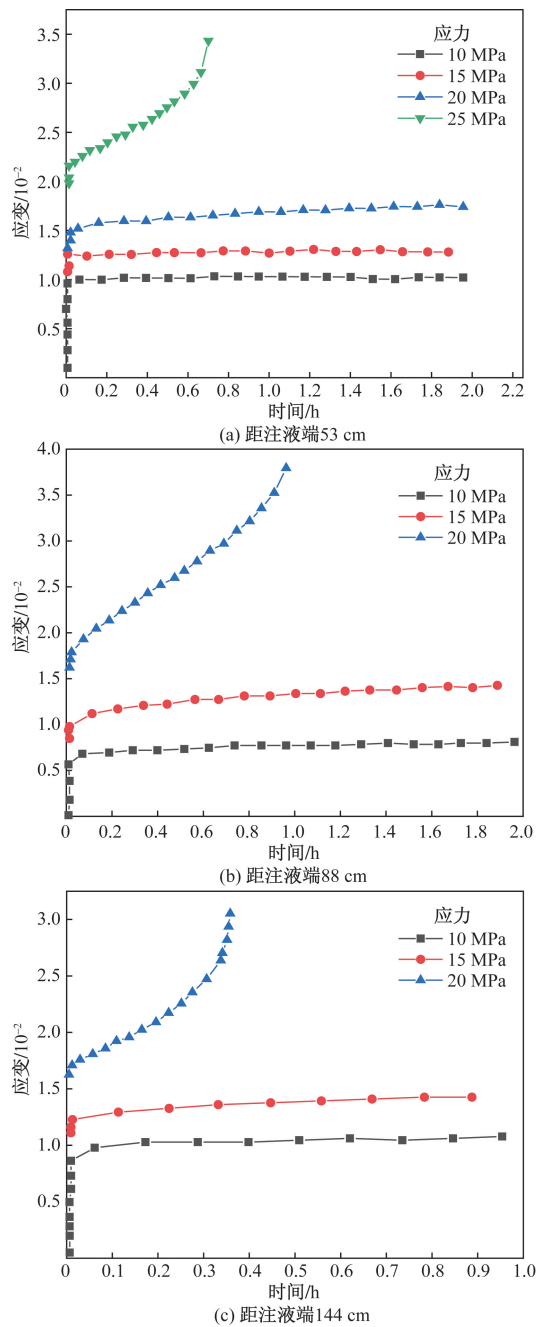


图9 注浆加固试件分级加载应变-时间曲线

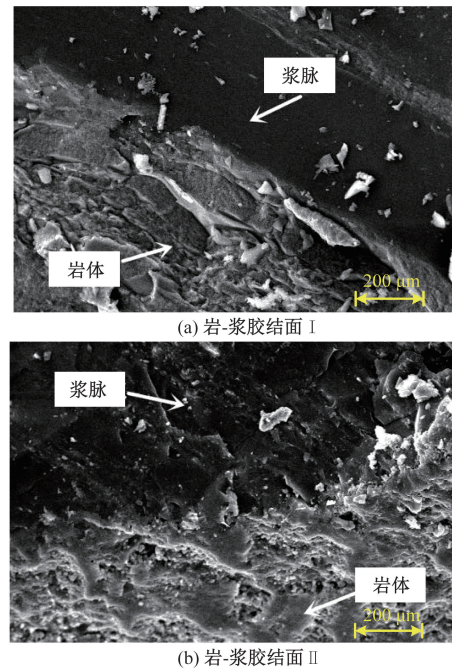
Fig. 9 Grouting reinforcement specimen graded loading failure

况下挤走原有孔洞中的水分和空气继而凝结,起到填充加固的作用。

4 结论

(1)设计得出聚氨酯(PU)/水玻璃破碎岩层双液注浆模型尺寸,给出了对应的测试元件安装及试验方法,建立了试验室注浆模型并进行试验,能有效弥补理论计算与实际注浆之间的差距。

(2)聚氨酯(PU)/水玻璃破碎岩层双液注浆过程中,模型各测点温度短期内显著上升,在10 min



暗色区域为浆液;亮色区为岩石

图10 注浆固结效果微观分析

Fig. 10 Mesoscopic analysis of grouting consolidation effect

时距注液端450 mm处温度测点达到最大值83.2℃,约为室温的6.6倍,随后浆液与被注材料发生固化反应,温度逐渐下降并趋于稳定;模型内部压力变化趋势与温度类似,在10 min时,距注液端500 mm处压力测点达到最大值5.7 MPa,随后模型内部压力逐渐下降至恒定值。

(3)聚氨酯(PU)/水玻璃双液注浆加固体浆液含量与距注液端距离呈反比,且浆液在模型内部为非均匀扩散,其扩散量随扩散距离呈负相关。通过对加固体进行力学测试,得出试件的最大抗压强度为32.57 MPa,最小抗压强度为15.32 MPa,其对应的弹性模量分别为1 633.85、420.55 MPa,注浆加固体的强度和弹性模量沿轴线不均匀分布,表现为先上升后下降;试件三轴加载最大承载能力41.9 MPa,残余强度25 MPa,注浆加固体应力-应变曲线随加载过程分为“压密-线弹性-塑性变形-屈服-应变软化-残余强度”6个阶段;试件最大蠕变破坏承载荷载为25 MPa,累计破坏时间18.71h,蠕变破坏时间与距注液端距离呈反比。

参考文献

[1] 张延杰,浦仕江,周辉,等.滇中引水工程安全建设与高效运行关键技术研究若干进展——地下工程[J].岩石力学与工程学报,2024,43(2):333-357.

Zhang Yanjie, Polyurethane Shijiang, Zhou Hui, et al. Advances in key technologies for safe construction and efficient operation of water diversion projects in central Yunnan: underground engineering

- [J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(2): 333-357.
- [2] 张华磊, 徐保杰, 王开伟, 等. 不同粒径分布多孔介质的幂律流体渗透注浆机制[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(5): 1025-1035.
Zhang Hualei, Xu Baojie, Wang Kaiwei, et al. Permeation grouting mechanism of power-law fluid in porous media with different particle size distribution[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2024, 41(5): 1025-1035.
- [3] 梁玉强, 张雷, 李德, 等. 水泥/粉煤灰改性对废弃粉质土砂配制盾构壁后注浆性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(35): 15171-15179.
Liang Yuqiang, Zhang Lei, Li De, et al. Effect of alkali modification of cement/fly ash on post-grouting performance of shield wall prepared with waste silty soil sand[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(35): 15171-15179.
- [4] 余永强, 张程鑫, 张纪云, 等. 砂土介质注浆扩散规律试验研究[J]. *金属矿山*, 2024(7): 66-74.
Yu Yongqiang, Zhang Chengxin, Zhang Jiyun, et al. Experimental study on grouting diffusion law in sand medium[J]. *Metal Mine*, 2024(7): 66-74.
- [5] 刘学伟, 王赛, 刘滨, 等. 不同注浆材料填充双裂隙类岩石试样力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(3): 623-638.
Liu Xuewei, Wang Sai, Liu Bin, et al. Study on mechanical properties of rock samples with double cracks filled with different grouting materials[J]. *According to Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(3): 623-638.
- [6] 吕鑫, 杨科, 方珏静, 等. 采空区破碎岩体负压注浆加固试验研究与机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(S2): 4174-4188.
Lü Xin, Yang Ke, Fang Juejing, et al. Experimental study and mechanism analysis of negative pressure grouting reinforcement of broken rock mass in goaf[J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(S2): 4174-4188.
- [7] 刘伟韬, 吴海风, 申建军. 基于RSM的超细水泥注浆材料配比及性能优化模型[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(8): 146-158.
Liu Weitao, Wu Haifeng, Shen Jianjun. RSM-based superfine cement grouting material ratio and performance optimization model[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(8): 146-158.
- [8] 翟明磊, 白海波. 基于浆液-岩体耦合效应的裂隙注浆扩散机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(7): 158-167.
Zhai Minglei, Bai Haibo. Study on the diffusion mechanism of fracture grouting based on the coupling effect of slurry-rock mass[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(7): 158-167.
- [9] 陈军涛, 李昊, 贾东秀, 等. 流固耦合作用下含不同长度裂隙灰岩注浆加固特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(3): 189-199.
Chen Juntao, Li Hao, Jia Dongxiu, et al. Experimental study on grouting reinforcement characteristics of fractured limestone with different lengths under fluid-solid coupling[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(3): 189-199.
- [10] 周禹良, 袁东锋, 杨雪, 等. 溶蚀白云岩含水层注浆浆水两相运移特征 LBM 模拟研究[J]. *金属矿山*, 2023(12): 204-210.
Zhou Yuliang, Yuan Dongfeng, Yang Xue, et al. LBM simulation study on two-phase flow characteristics of grouting slurry water in dissolved dolomite aquifer[J]. *Metal Mine*, 2023(12): 204-210.
- [11] 李若昀, 刘庆, 冯艳斐, 等. 水玻璃改性水泥对细粒尾矿胶结性能的影响[J]. *矿产综合利用*, 2023(6): 114-119.
Li Ruoyun, Liu Qing, Feng Yanfei, et al. Effect of water glass modified cement on cementation performance of fine tailings[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2023(6): 114-119.
- [12] 黄湘寒, 肖楮文, 郑凯, 等. CRT 玻璃纤维增强注浆材的制备及其强度特征[J/OL]. (2024-04-20)[2024-12-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.td.20231116.1205.012.html>.
Huang Xianghan, Xiao Chuwen, Zheng Kai, et al. Preparation and strength characteristics of CRT glass fiber reinforced grouting material[J/OL](2024-04-20)[2024-12-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.td.20231116.1205.012.html>.
- [13] 王晓林, 周凯. 西峪煤矿井下玻璃纤维增强注浆材料的强度性能研究[J]. *矿业研究与开发*, 2024, 44(3): 220-224.
Wang Xiaolin, Zhou Kai. Study on the strength performance of glass fiber reinforced grouting material in Xiyu Coal Mine[J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(3): 220-224.
- [14] 曾熙文, 王艳芬, 赵光明, 等. 聚丙烯纤维改性超细水泥复合注浆材料试验与性能研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(7): 57-67.
Zeng Xiwen, Wang Yanfen, Zhao Guangming, et al. Polypropylene fiber modified ultrafine cement composite grouting material test and performance research[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(7): 57-67.
- [15] 贾东秀, 唐道增, 窦江海, 等. 矿渣-粉煤灰注浆材料的性能与微观结构研究及优化[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(10): 43-50.
Jia Dongxiu, Tang Daozeng, Dou Jianghai, et al. Research and optimization of properties and microstructure of slag-fly ash grouting material[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(10): 43-50.
- [16] 沈玲玲, 丁鹿玮, 张羽者, 等. 面向残煤复采的煤泥基注浆充填材料机械活化机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(6): 1243-1252.
Shen Lingling, Ding Luwei, Zhang Yuzhe, et al. Study on the mechanical activation mechanism of coal slurry-based grouting filling material for residual coal remining[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2023, 40(6): 1243-1252.
- [17] 朱昌星, 吴大志, 孙家鑫. 碳纤维增强注浆体试块动态压缩力学特性及其数值模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(3): 600-612.
Zhu Changxing, Wu Dazhi, Sun Jiaxin. Dynamic compressive mechanical properties and numerical simulation of carbon fiber reinforced grouting block[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2024, 53(3): 600-612.
- [18] 迟凤霞, 韩博, 孙艺涵, 等. 矿物掺合料对水泥-水玻璃注浆材料性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(2): 773-780.
Chi Fengxia, Han Bo, Sun Yihan, et al. Effect of mineral admixtures on the properties of cement-water glass grouting materials[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(2): 773-780.
- [19] 周春煦, 冯红春, 周文正. 钢渣基胶凝剂改性注浆体的力学特性与细观损伤机理研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(8): 173-179.
Zhou Chunxu, Feng Hongchun, Zhou Wenzheng. Study on the mechanical properties and mesoscopic damage mechanism of steel

- slag-based cementitious agent modified grouting body[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(8): 173-179.
- [20] 张农, 项哲, 潘东江. 硅溶胶自吸渗注浆及泥岩防渗加固[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3121-3130.
Zhang Nong, Xiang Zhe, Pan Dongjiang. Silica sol self-imbibition grouting and mudstone anti-seepage reinforcement[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3121-3130.
- [21] 吴求刚, 赵恒, 王新富, 等. 自燃煤矸石地质聚合物低强度注浆材料的制备及其微观分析[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(7): 2539-2547.
Wu Qiugang, Zhao Heng, Wang Xinfu, et al. Preparation and microscopic analysis of low-strength grouting material based on spontaneous combustion coal gangue geopolymer[J]. Silicate Bulletin, 2024, 43(7): 2539-2547.
- [22] 轩大洋, 许家林. 铁路隧道下综放面覆岩隔离注浆充填开采试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 1102-1110.
Xuan Dayang, Xu Jialin. Experimental study on isolated grouting and filling mining of overlying strata in fully mechanized caving face under railway tunnel[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40(5): 1102-1110.
- [23] 卢华喜, 刘甦宇, 罗青峰, 等. 上覆软弱路基加固对既有地铁隧道沉降的影响规律[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(7): 2947-2955.
Lu Huaxi, Liu Suyu, Luo Qingfeng, et al. Influence of overlying weak subgrade reinforcement on the settlement of existing subway tunnels[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(7): 2947-2955.
- [24] 段李宏. 大采长工作面高承压水底板注浆改造技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(4): 110-115.
Duan Lihong. Study on grouting transformation technology of high-confined water floor in working face with large mining length[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(4): 110-115.
- [25] 潘伟鹏, 华心祝, 刘斌, 等. 桃园煤矿综采工作面过断层巷道注浆加固技术研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(7): 58-65.
Pan Weipeng, Hua Xinzhu, Liu Bin, et al. Study on grouting reinforcement technology of roadway crossing fault in fully mechanized mining face of Taoyuan Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2023, 55(7): 58-65.
- [26] 张继远, 任金武, 辛亚军, 等. 复杂散体状顶板回采巷道围岩注浆改性控制分析[J]. 金属矿山, 2024(4): 228-235.
Zhang Jiyuan, Ren Jinwu, Xin Yajun, et al. Analysis of grouting modification control of surrounding rock in mining roadway with complex granular roof[J]. Metal Mine, 2024(4): 228-235.
- [27] 肖同强, 余子豪, 李怀珍, 等. 深部巷道围岩裂隙注浆加固浆液扩散规律研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 16-24.
Xiao Tongqiang, Yu Zihao, Li Huaizhen, et al. Study on slurry diffusion law of grouting reinforcement for fractured surrounding rock in deep roadway[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2024, 43(1): 16-24.