

普朗铜矿自然崩落开采塌陷区冰碛物水泥注浆模拟试验研究

杨希¹, 孙伟^{1*}, 王少勇², 李争荣³, 程海勇¹, 姜明归¹, 樊锴⁴

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
3. 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 香格里拉 674400;
4. 云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600



摘要:为研究水泥浆液在冰碛物中的扩散规律及固化效果,设计了一套冰碛物注浆室内试验装置,探究水泥浆液在冰碛物中扩散的基本机理及发展过程,并分析不同注浆压力下水泥浆液的扩散规律及固化效果。结果表明:受渗滤效应影响,水泥浆液在冰碛物中无法渗透扩散,只能通过压密和劈裂的方式进行扩散。注浆初期,水泥浆液鼓泡并对冰碛物产生压密作用。随着注浆压力不断增大,冰碛物沿最薄弱面产生裂隙,浆液沿裂隙进入形成劈裂浆脉,对冰碛物产生骨架支撑作用。水泥浆液注浆量、扩散半径、劈裂缝宽和劈裂通道长度均与注浆压力呈正相关关系。该研究结果可为冰碛物注浆工程与塌陷坑地质灾害防治提供参考。

关键词:冰碛物;水泥浆液;注浆压力;渗滤效应;扩散规律

中图分类号:TD353 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)04-0775-14 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.268
引用格式:杨希,孙伟,王少勇,等.普朗铜矿自然崩落开采塌陷区冰碛物水泥注浆模拟试验研究[J].黄金科学技术,2025,33(4):775-788. YANG Xi, SUN Wei, WANG Shaoyong, et al. Simulation Test Study of Cement Grouting of Moraine in Natural Caving Mining Subsidence of Pulang Copper Mine[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 775-788.

普朗铜矿是我国铜金属产量最大的超大型金属矿山,采用自然崩落法开采矿石(徐柱圆等,2025)。该采矿方法基于矿体内部发育的多节理裂隙结构特征和低强度力学特性,通过诱导工程促使矿石在重力作用下自然崩落,形成持续稳定的矿石流。这种兼具高效性与经济性的采矿工艺,在深部金属矿床开采中展现出独特优势,但采用自然崩落法开采矿石必然会引起地表移动和塌陷(孙伟等,2018;朱俊宁等,2024)。普朗矿区地表覆盖有较厚

的第四系冰碛物,其成分复杂,粒径范围广,颗粒结构松散,黏聚力较小。采矿作业扰动极易引起冰碛物覆盖层失稳、变形和开裂,导致地表形成塌陷坑,且在运移崩落矿石的过程中,松散冰碛物会沿裂隙混入矿石,造成矿石贫化与损失(王少勇等,2024;杨朝义等,2024)。同时,冰碛物遇水会形成流动浆体,在重力作用下沿着地质构造和裂隙流入井下,造成井下泥石流灾害,严重影响矿山生产安全。普朗矿区雨季特大暴雨频发,雨季降雨量占全年降雨

收稿日期:2024-08-26;修订日期:2025-05-16

基金项目:国家自然科学基金项目“自然崩落开采中井下泥石流流体流变行为与下泄穿流通道时空演化机制”(编号:42467022)、“铜渣基充填材料协同矿化CO₂作用机制及强度响应规律研究”(编号:52474131)、云南省重大科技项目“关键金属矿产资源集中区深部绿色勘查与安全开采”(编号:202202AG050014)和云南省基础研究计划“全尾砂—冶炼渣复合充填体重金属离子溶出与靶向固化机制”(编号:202101BE070001-038)、“矿井抽水蓄能储库水—岩耦合作用下岩体细观破损机理研究”(编号:202201AT070146)联合资助

作者简介:杨希(1997—),女,云南保山人,硕士研究生,从事金属矿山绿色开采研究工作。E-mail:1801304953@qq.com

***通信作者:**孙伟(1983—),男,甘肃庆阳人,教授,从事膏体充填及矿山废弃物资源化研究工作。E-mail:kmustsw@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

量的87.1%,这种极端降水条件导致泥石流灾害频发且防控难度大(牛向东等,2020;赵明亮等,2022;张应平等,2023)。因此,将冰碛物由“粉”变“块”,使其不易被搬运,从根本上阻断泥石流物源是降低普朗铜矿泥石流灾害发生概率和规模的根本途径。

注浆加固技术作为一种岩土工程改良手段,其核心机理在于将胶结材料制备成流动相浆体,并注入含砂、含水的松散地层或节理裂隙发育的岩体中,使浆体与岩体充分结合并发生固化反应,形成整体结构并提高岩体的力学性能(钱庄等,2016;汪文萍等,2018;叶飞等,2023)。该工艺通过改良地质体的微观结构特征,实现结构整体性提升和承载性能优化。工程实践证明,注浆技术在地下工程地质灾害防控体系中展现出显著的技术优越性(吴祥集等,2023;张玉增等,2024)。目前,众多学者开展的注浆研究表明,注浆压力对砂土可注性的提升作用有限,砂土可注性主要取决于注浆材料类型和颗粒质量分数,砂土级配越细,注浆后强度提升越显著,但需结合浆液颗粒浓度平衡可注性(沙飞等,2019)。砂土介质中浆液扩散模式受渗透系数、浆液参数和注浆工艺的协同控制,当砂土渗透系数较高时,浆液以渗透扩散为主,渗透系数降低则转为劈裂扩散(余永强等,2024)。在砂土注浆过程中,渗滤效应在水泥浆液扩散过程中导致水泥颗粒产生滞留封堵现象,是造成浆液扩散不均匀的根本原因,而脉动注浆通过动态压力调控可扩大渗滤作用范围,能够有效降低渗滤效应的影响,相比稳压注浆也更有利于形成加固圈和浆泡,但稳压注浆易形成局部劈裂浆脉(李术才等,2017;窦金熙等,2023)。研究表明,注浆后的砂土加固体呈现出空间各向异性,抗变形能力更强(秦鹏飞等,2024a)。

现有研究在注浆理论方面已取得丰硕成果,但这些成果主要是基于砂土和黏土介质的注浆研究。冰碛物是冰川搬运、堆积的石块和碎屑物质,与一般砂土层明显不同,其具有成分复杂、粒级分配广泛、结构松散、黏聚力小、均匀性差和渗透性弱等特征,属于特殊混合土质。鉴于冰碛物与常规砂土、黏土介质存在显著差异,现有注浆理论成果难以直接适用于普朗铜矿这类特殊工程条件,本文针对普朗铜矿原状冰碛物,自行设计研制室内注浆试验装置,选择水泥浆液开展注浆试验,研究注浆压力对

水泥浆液注浆量、扩散距离、劈裂缝宽和劈裂通道的的影响,揭示水泥浆液在冰碛物中的扩散规律及固化效果,为冰碛物注浆加固工程和塌陷坑地质灾害防治提供理论指导。

1 试验设计

为研究冰碛物在不同注浆压力下的注浆效果,试验设置了0.4,0.8,1.2,1.6,2.0 MPa共5个注浆压力梯度,注浆试验条件:含石率为50%,装样密度为 $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,含水率为11.83%。

1.1 试验装置

试验设计工况最大注浆压力为2.0 MPa,选用最大供压为8 MPa的氮气瓶作为供压设备,使用阈值为0~2.5 MPa的调节阀进行调节,实现注浆压力精准调控。储浆罐内径为40 cm,高度为55 cm,上部设置带有开合阀门的进浆口、阈值为3 MPa的安全泄压阀、压力表和供气口,下部设置金属稳定架和注浆管道。可拆卸立方体注浆模具规格为60 cm×60 cm×60 cm,模具外部使用口字钢进行焊接加固,采用卯榫结构连接四块边板,具有良好的操作性。注浆试验装置如图1所示。

1.2 试验材料

(1)注浆对象。本次试验所用冰碛物取自普朗铜矿。为了保证试验的准确性和代表性,选取3个现场试验点的原状冰碛物进行测试分析。冰碛物粒径分布特征如表1所示,物理性质如表2所示,冰碛物粒级组成曲线如图2所示,X射线粉晶衍射图谱图如图3所示。由表1和图2可知,普朗铜矿冰碛物主要为细颗粒,其中粒径约2 mm和15 mm的冰碛物颗粒占比分别为30%和60%。经计算,不均匀系数为113.43,曲率系数为2.77,表明该冰碛物级配良好,且颗粒尺寸存在较大差异。由图3可知,普朗铜矿冰碛物中 SiO_2 含量最高,为56.10%,其次为 Al_2O_3 ,占比为18.95%。由表2可知,冰碛物湿密度为 $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,干密度为 $2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,含水率为11.83%,孔隙率为17.6%,土壤的塑限为16.03%,液限为24.16%,为低液限粉质黏土,土壤渗透系数为 $6.75 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,为弱透水量级。

(2)注浆材料。试验使用标准P.C32.5R水泥制备浆液,浆液密度为 1.85 kg/m^3 ,注浆量为5 kg。在

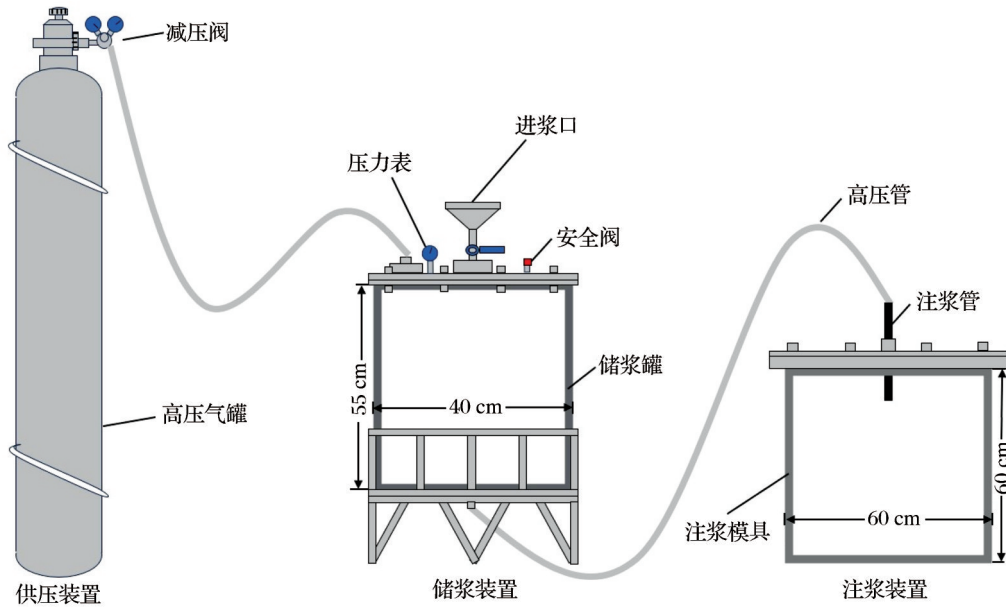


图1 注浆试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grouting test device

表1 不同试验点冰碛物特征粒径

Table 1 Characteristic particle sizes of moraines at different test sites

试验点	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{60}/mm	C_c	C_u
1	0.09	1.57	11.33	2.39	124.51
2	0.14	2.48	15.88	2.77	113.43
3	0.19	1.96	17.46	1.16	91.89
平均值	0.14	2.00	14.89	2.11	109.94

表2 原状地层基本性质

Table 2 Basic properties of undisturbed strata

参数	数值
湿密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2.5×10^3
干密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2.2×10^3
含水率/%	11.83
孔隙率/%	17.6
渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	6.75×10^{-5}
塑限/%	16.03
液限/%	24.16

注浆过程中,水泥浆液黏度会随着浆液的固化而升高,但变化幅度极小,可视为恒定黏度浆液。

1.3 试验步骤

将注浆模具挡板清理干净后,将其紧密拼接组装,为避免注浆过程中发生反浆问题,需在模具挡板内壁均匀涂抹凡士林。将试验冰碛物含水率还

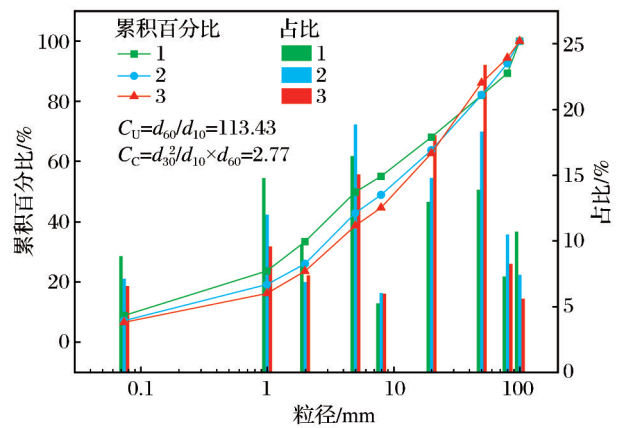


图2 冰碛物粒级组成曲线

Fig. 2 Particle size composition curves of moraine debris

原至 11.83%,装入模具逐层夯实,并在每层冰碛物表面刻划痕防止夯实冰碛物分层,填装高度至 30 cm 时埋入注浆管,继续填装冰碛物直至填满模具。在填装过程中,根据实际情况进行少量洒水,维持冰碛物含水率。填装完毕后,在模具表面铺水泥构建止浆层,密封被注冰碛物,将注浆设备出浆管接入注浆管,开启氮气瓶输出压力,启动注浆作业。观察到模具冒浆后关闭气阀,停止注浆,注浆结束 24 h 后拆除模具挡板,剥离未固结冰碛物,得到注浆结石体。注浆试验流程如图 4 所示。

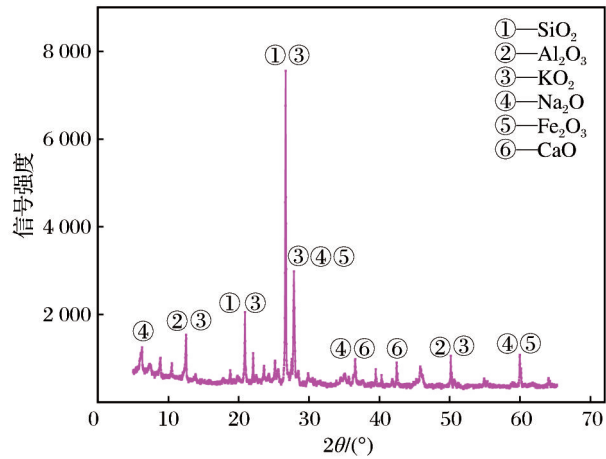


图3 冰碛物 X 射线粉晶衍射波谱图

Fig. 3 X-ray powder crystal diffraction spectra of moraine debris

2 试验结果及分析

2.1 冰碛物水泥注浆基本机理

水泥浆液作为典型的颗粒型浆液,注入冰碛物后,其内部丰富的孔隙结构会对水泥颗粒产生吸附和截留作用。在浆液运移扩散过程中,水泥颗粒在冰碛物孔隙内沉积并形成层状泥膜,进而堵塞孔隙通道。随着注浆持续推进,若干层泥膜逐渐堆叠形

成具有一定厚度的滤饼层,导致后续注浆难度增大(宋洋等,2023a,2023b)。如图5所示,该现象称为渗滤效应,其本质是颗粒沉积与孔隙封堵共同作用的结果。

当注浆压力处于较低水平时,受渗滤效应影响,水泥浆液在冰碛物中形成球状滤饼层,浆液压力持续作用于滤饼层并转化为有效应力,对周围冰碛物进行挤压,逐步形成压密区域,如图6(a)所示,该阶段的水泥浆液扩散运动主要表现为压密扩散。浆液注入冰碛物中,随后对其产生压力,注浆口附近冰碛物逐渐被压密,浆液鼓泡形成球形浆泡,随着浆液不断注入,球形浆泡半径逐渐增大,冰碛物孔隙减少,密实度提高。由图6(a)可以看出,由于压密作用,冰碛物体积减小,为浆液注入提供了空间,注浆口半径明显增大,浆泡外部形成冰碛物压密区域,该区域的冰碛物强度进一步增强(马连生等,2018)。

当注浆压力提高到一定程度时,冰碛物薄弱界面率先开裂形成劈裂通道(雷金山等,2010;秦鹏飞,2017),水泥浆液随即充填其中,形成主劈裂浆脉,扩散方式由压密扩散转变为劈裂扩散,如图6(b)所示。主劈裂浆脉以注浆孔为中心向运移方向不

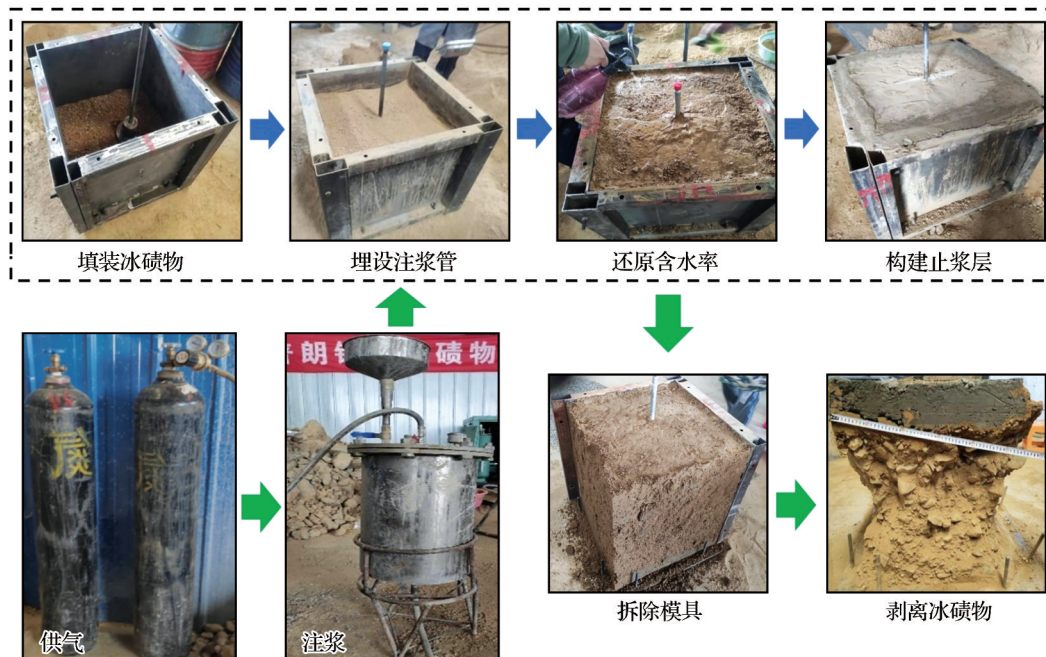


图4 冰碛物水泥注浆试验流程图

Fig. 4 Test flow chart for cement grouting of glacial moraine

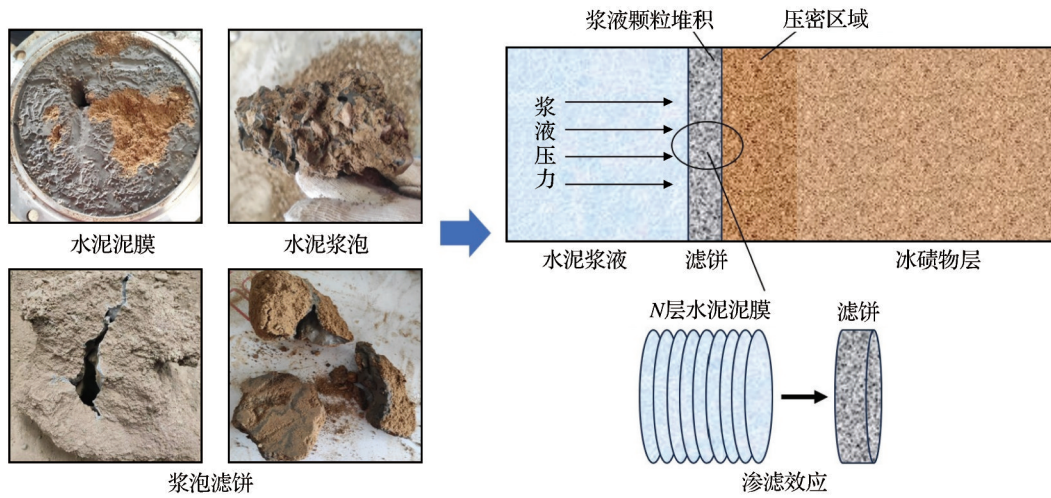


图5 冰碛物水泥注浆过程中的渗滤效应

Fig. 5 Infiltration effect during the cement grouting process of glacial moraine

断延伸至锋面处,形成近浆泡端厚、锋面端薄的板状构造。随着注浆压力持续提升,冰碛物其他薄弱部位将产生次级劈裂,形成次劈裂浆脉,其形态特征与主劈裂浆脉相似,均呈现近端厚、远端薄的渐变分布,通常次劈裂浆脉延伸长度小于主劈裂浆脉

(周茗如等,2023)。由图6(b)可以看出,随着注浆进行,浆脉对周围冰碛物不断产生挤压作用,推动浆脉厚度和长度增长。当应力累积至临界值时,浆脉会发生二次劈裂,衍生细小分支结构,最终形成复杂的浆脉网络骨架。

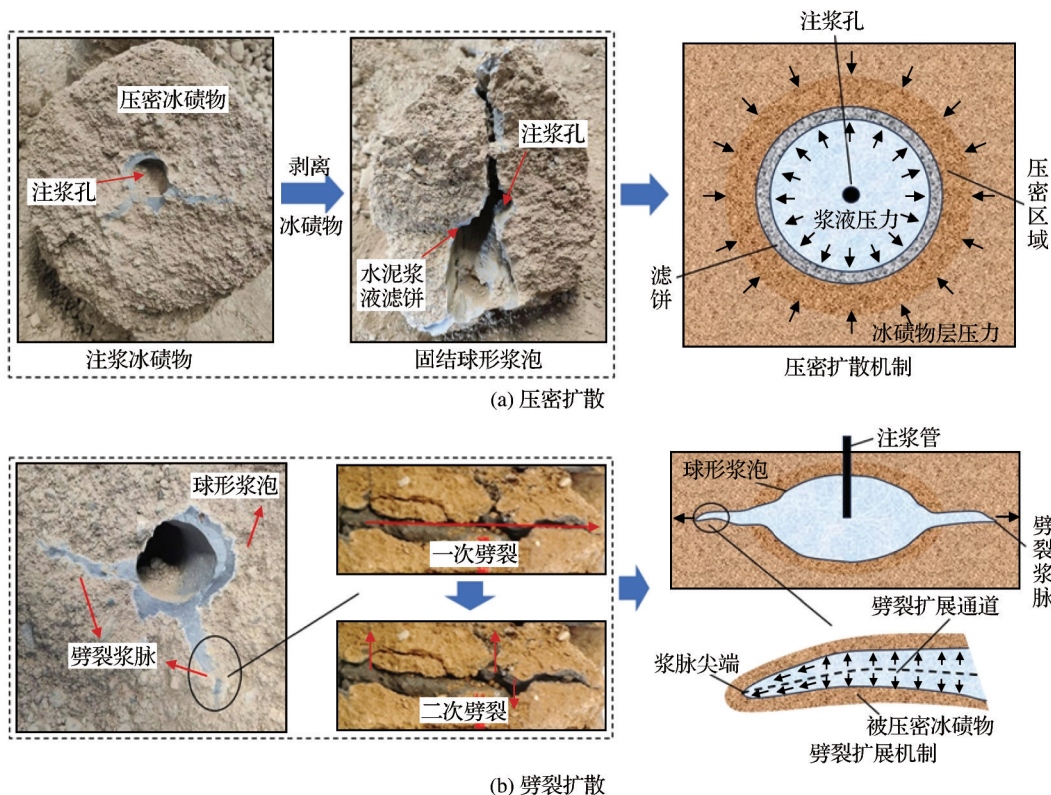


图6 冰碛物水泥注浆基本机理

Fig. 6 Basic mechanism of moraine cement grouting

根据试验观测,水泥浆脉与冰碛物之间界面清晰,水泥浆液的扩散无渗透现象,浆液主要以压密和劈裂的方式进行能量耗散,且这2种扩散方式存在明显的交叉特征。以压密扩散为主的注浆过程,存在一定程度的劈裂扩散,而劈裂扩散本质上又遵循“先压密后劈裂”的演化规律(张忠苗等,2009;樊锴等,2024;钱自卫等,2024)。当注浆压力突破启劈压力时,水泥浆液在冰碛物中的扩散呈现典型的三阶段特征,其扩散过程如图7所示。

在注浆初始阶段,由于浆液压力较小,无法劈裂冰碛物,浆液会在注浆管口聚集并挤压周围冰碛

物,形成球状浆泡,如图7(a)所示。当注浆压力逐渐增大至启劈压力时,冰碛物沿着最薄弱面(该薄弱面称为第一劈裂面,可为经过浆泡中心的任意平面)产生裂隙,浆液沿裂隙填充形成第一劈裂浆脉,如图7(b)所示。浆液不断注入第一劈裂面并挤压周围冰碛物,使冰碛物强度增高。在后续注浆过程中,劈裂再次发生于阻力最小的面上,形成第二劈裂浆脉,该浆脉所在平面通常与第一劈裂面垂直,如图7(c)所示。随着注浆继续进行,冰碛物内不断生成新的劈裂面,最终形成纵横交错的复杂浆脉网络体系(朱明昕等,2018;杨磊等,2024)。

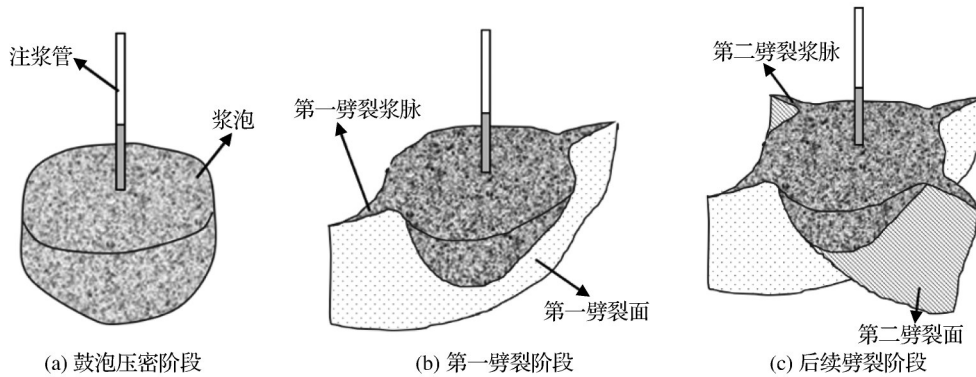


图7 压密—劈裂扩散三阶段

Fig. 7 Three stages of compacting-splitting diffusion

2.2 注浆压力对注浆量的影响

图8所示为不同注浆压力下的注浆量。由图8可知,注浆量随着注浆压力的上升而增加,二者呈显著正相关关系,其变化趋势符合一元线性函数

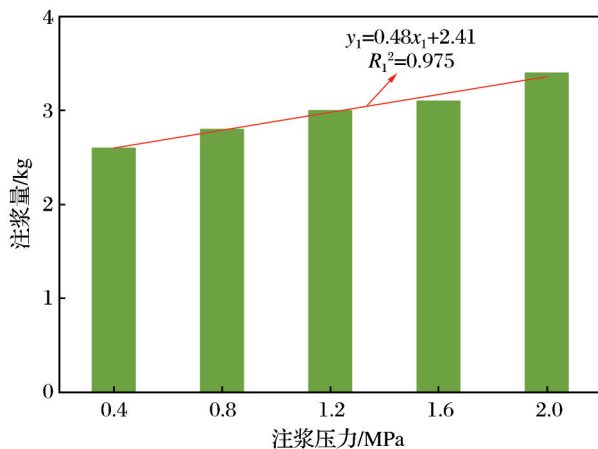


图8 不同注浆压力下的注浆量

Fig. 8 Grouting amount under different grouting pressures

$y_1=0.48x_1+2.41$ 的递增规律。浆液注入后不断挤压周围松散冰碛物,使其孔隙减少、密度增大,冰碛物体积减小,为后续浆液注入提供了空间。随着注浆压力的增大,作用在冰碛物上的有效应力增大,压密作用更显著,浆液注入量逐渐增大(刘奇等,2019;杜俊等,2024)。

2.3 注浆压力对扩散半径的影响

图9所示为不同注浆压力下的扩散半径。由图9可知,扩散半径与注浆压力呈显著正相关关系,其变化规律符合函数 $y_2=44.05-16.13/\{1+\exp[(x_2-1.00)/0.11]\}$ 递增趋势(秦鹏飞,2022)。随着注浆压力的提升,扩散半径呈现出明显的增大趋势(秦鹏飞,2023),但后期增速趋缓,其原因是水泥浆液为颗粒类材料,容易沉积,在原状冰碛物中受渗滤效应影响无法渗透扩散,只能通过压密和劈裂的方式进入冰碛物,注浆过程中浆液动能大量耗散,同时扩散半径增大后浆液运动速度逐渐降低,导致注浆后期水泥浆液在冰碛物中的扩散半径增长速

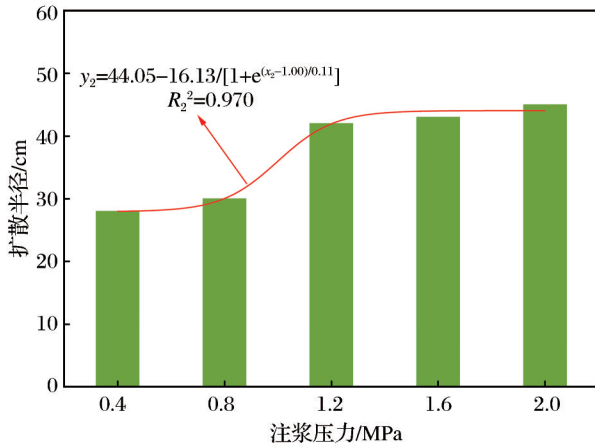


图9 不同注浆压力下的扩散半径
Fig. 9 Diffusion radius under different grouting pressures

率明显趋缓(秦鹏飞等,2022)。

以注浆压力 1.2 MPa 为分界点,试验现象出现较明显差异,注浆压力为 0.4 MPa 与注浆压力为 0.8 MPa 的试验现象相似,注浆压力为 1.6 MPa 与注浆压力为 2.0 MPa 的试验现象相似,因此选取 0.8 MPa、1.2 MPa 和 1.6 MPa 压力条件下的试验现象进行分析。图 10 所示为不同注浆压力下扩散半

径试验结果。

由图 10 可知,水泥浆液扩散范围较小,容易在较小区域内聚集,这是由于水泥浆液黏度较大、扩散能力差,在注浆过程中仅有少量水泥颗粒或水化离子进入劈裂通道两侧的冰碛物浅表区域,一定程度上增强了浆脉与冰碛物之间的胶结效果(张泽甫等,2022;秦鹏飞等,2024b)。同时,水泥颗粒与冰碛物之间存在较为明显的渗滤效应,浆脉对周边冰碛物挤密作用也十分显著,但注浆过程中未观察到渗透现象。

2.4 注浆压力对劈裂缝宽的影响

图 11 所示为不同注浆压力下的劈裂缝宽。由图 11 可知,劈裂缝宽与注浆压力呈显著正相关关系,其变化趋势遵循函数 $y_3=5.18-4.59/\{1+\exp[(x_3-1.59)/0.13]\}$ 递增规律。在注浆作业过程中,水泥浆液扩散时的能量耗散主要涉及 3 个方面:一是克服浆液自身黏度产生的内摩擦力,二是突破冰碛物结构所需的劈裂力,三是维持浆液流动的动能损耗(杨磊等,2018)。劈裂通道边缘存在的应力集中效应,使得注浆压力能够有效驱动劈裂通道持续扩展。因此,随着注浆压力的提升,劈裂缝宽呈现快速扩展的趋势(王钰鑫等,2023)。

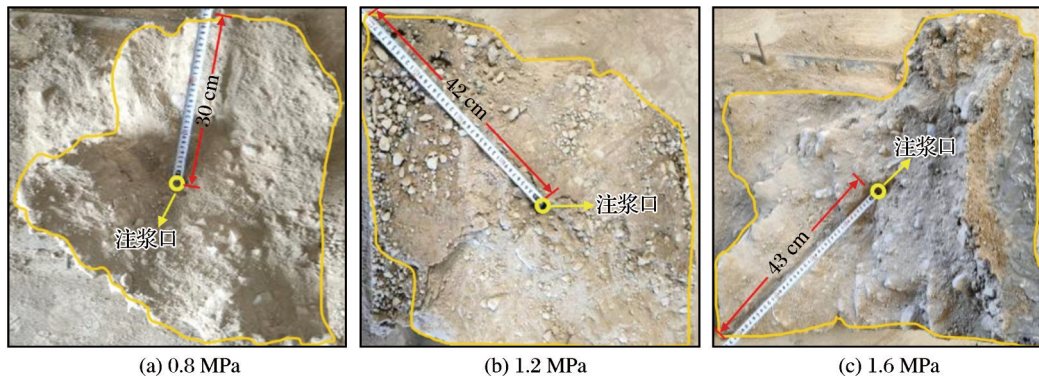


图 10 不同注浆压力下扩散半径试验结果

Fig. 10 Test results of diffusion radius under different grouting pressures

图 12 所示为不同注浆压力下劈裂缝宽试验结果。如图 12 所示,浆脉宽度沿劈裂扩展通道逐渐衰减,注浆孔口附近浆脉宽度最大,至锋面处衰减为 0(申时钊等,2022;秦鹏飞等,2023;李晓龙等,2024)。这是因为随着浆液扩散距离增大,浆液运动速度逐渐降低,其动能也随之减小,且锋面处劈裂扩展通道宽度较小,浆液受到冰碛物颗粒摩

擦阻力较大,进而导致注浆压力减小(周茗如等,2019)。

2.5 注浆压力对劈裂通道的影响

图 13 所示为不同注浆压力下的劈裂通道长度。水泥浆液扩散时会把冰碛物严重破坏形成 2 条较为明显的劈裂通道,分别为主劈裂通道和次劈裂通道。由图 13 可知,2 条劈裂通道的长度均与

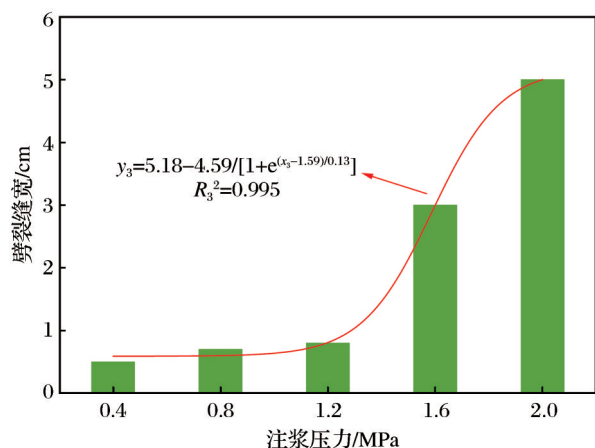


图 11 不同注浆压力下的劈裂缝宽

Fig. 11 Crack width under different grouting pressures

注浆压力呈正相关关系,主劈裂通道遵循一元线性函数 $y_4=20.25x_4+38.10$ 递增规律,次劈裂通道遵循一元线性函数 $y_5=18.00x_5+26.40$ 递增规律。主劈裂通道长度大于次劈裂通道长度,且增长速度大于次劈裂通道,这是由于冰碛物多孔隙的自然结构性,

注浆初期浆液在扩散过程中受冰碛物阻力较小,对冰碛物的压密作用明显,扩散距离大,主劈裂通道较长。随着注浆进行,冰碛物密实度提高,孔隙率降低,浆液在扩散过程中受到的冰碛物阻力变大,后续产生的次劈裂通道长度比主劈裂通道短。

图 14 所示为不同注浆压力下劈裂通道试验结果。其中由图 14(a)和图 4(e)可以看出,水泥浆液对冰碛物具有显著的抬升作用。在注浆初始阶段,由于渗滤效应的影响,浆液中的水泥颗粒无法进行渗透扩散,而是堆积起来形成止浆围护结构,浆液鼓泡对周围松散的冰碛物起到了压密填充的作用。随着注浆压力的不断增大,浆液以劈裂扩散的方式形成浆脉,从径向挤压冰碛物(张连震等,2019)。水泥浆液通过对冰碛物的压密和劈裂作用,进而在冰碛物中产生向上的抬升力,有效减少了冰碛物的沉降量(叶飞等,2024)。当注浆所产生的抬升力超过上部冰碛物的总压力时,能够对已发生的部分沉降进行控制和恢复。

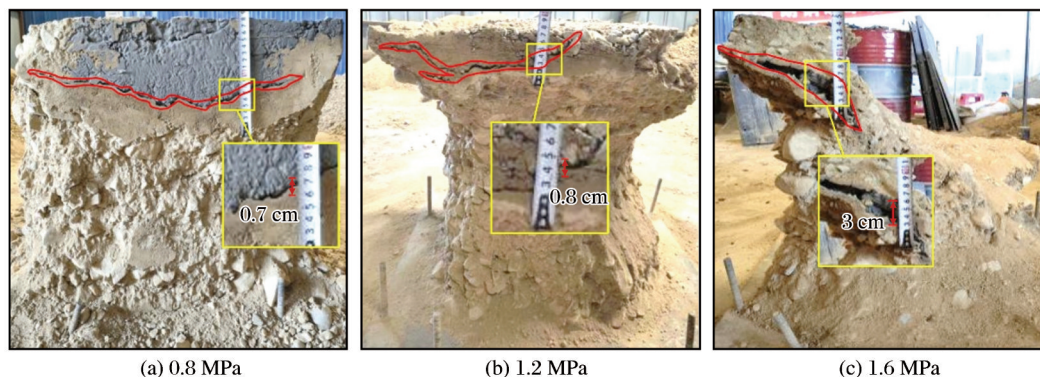


图 12 不同注浆压力下劈裂缝宽试验结果

Fig. 12 Test results of splitting crack width under different grouting pressures

2.6 冰碛物水泥注浆前后 SEM 微观分析

取普朗铜矿原状冰碛物和水泥注浆后的冰碛物养护 7 d,通过电子显微镜扫描对冰碛物的细观结构和作用机理展开观测和对比分析。

图 15 和图 16 所示分别为原状冰碛物和注浆冰碛物养护 7 d 后放大 5 000 倍的电镜照片。由图 15 可知,原状冰碛物由大小不一的颗粒堆积而成,其结构松散,孔隙丰富,颗粒间联结不紧密。由图 16 可知,注浆后的冰碛物中出现大量六方形薄片状晶体、团絮状凝胶物质以及针状和棒状物质,这些物

质与冰碛物颗粒紧密联结在一起,冰碛物孔隙大量减少(Andres et al,2015;金炜枫等,2016)。其原因是,在注浆过程中,水泥发生水化反应,生成大量薄片状氢氧化钙晶体(C-H)、絮状水化硅酸钙凝胶(C-S-H)以及针状和棒状的钙矾石矿物(Aft)。这些水化产物的结构和形态对冰碛物性能产生了重要影响。针状钙矾石、棒状晶体、大量片状和纤维状、团絮状的凝胶相互交织搭建,不仅填充了冰碛物的孔隙,而且与冰碛物颗粒有序联结,构成了一个牢固、密实的三维空间体系,使冰碛物从疏松的

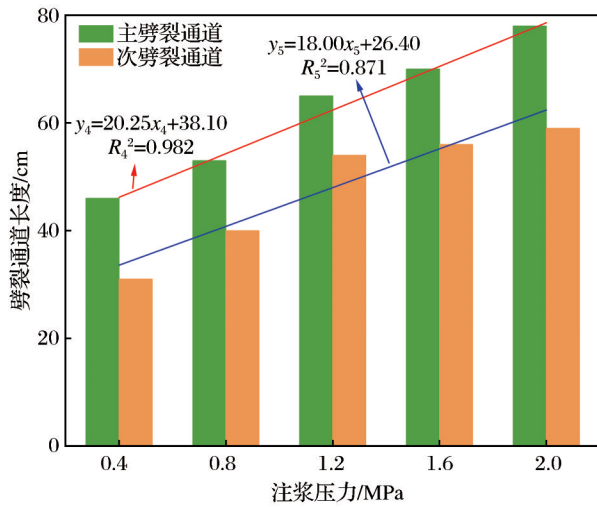


图 13 不同注浆压力下的劈裂通道长度

Fig. 13 Splitting channels length under different grouting pressures

孔隙结构转变为致密的团状结构。

2.7 冰碛物水泥注浆的工程化建议

在冰碛地层注浆施工中,注浆压力的控制是实现高效加固的关键,可根据实际工程对注浆量、扩

散半径和劈裂效果的需求,分阶段控制注浆压力(李鹏等,2018)。注浆初期采用较低注浆压力进行压密扩散,通过浆泡挤压冰碛物形成压密加固区,提升冰碛物强度。当注浆速率显著下降且扩散半径增速衰减时,可以通过提升注浆压力至启劈压力以上,引导浆液沿薄弱面定向劈裂,快速形成宽幅浆脉骨架和长距离劈裂通道,利用浆液抬升力主动补偿地层沉降。同时,通过浆脉延伸突破渗滤效应限制,扩展冰碛物加固范围,待劈裂通道形成后,适当回调注浆压力至稳定扩散区间,维持裂缝扩展动能,进一步压密深层冰碛物。在低压段保持连续注浆,强化压密效应,在高压段实施脉冲式加压,降低滤饼沉积速率,通过“压密—劈裂”协同作用构建多层次加固体系,形成以注浆口为核心、兼具密实区域和辐射状浆脉骨架的复合加固结构,显著提升冰碛物的整体稳定性。

3 结论

通过对冰碛物进行水泥注浆试验,进一步分析

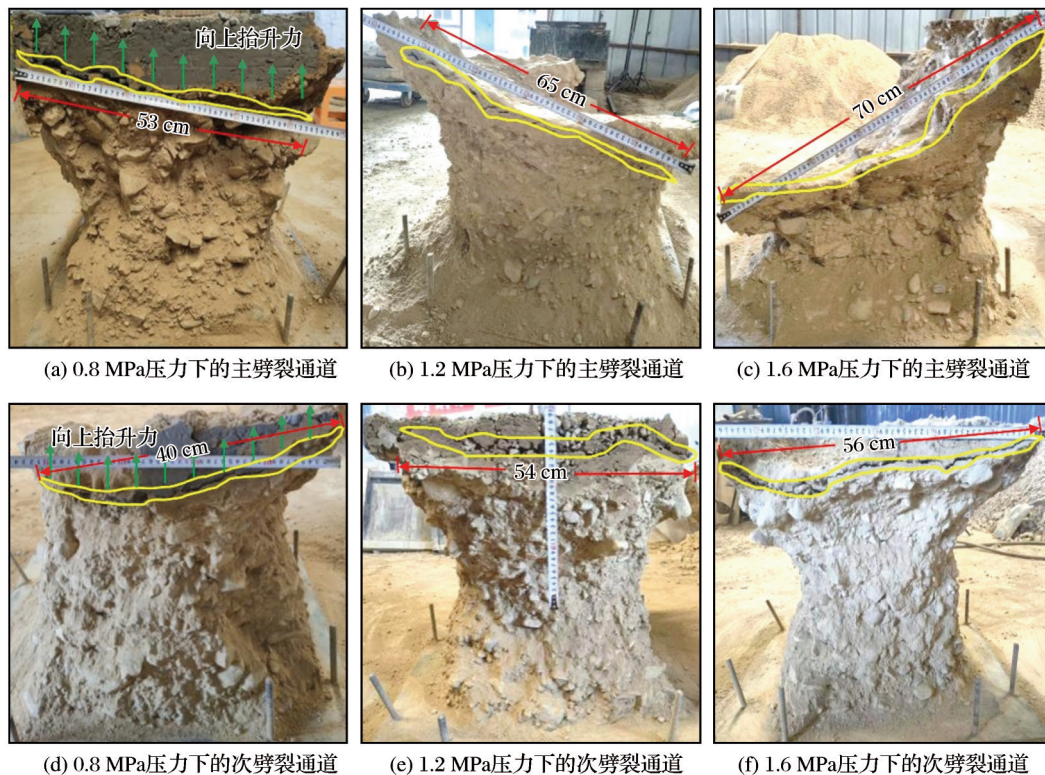


图 14 不同注浆压力下劈裂通道试验结果

Fig. 14 Test results of splitting channel under different grouting pressures

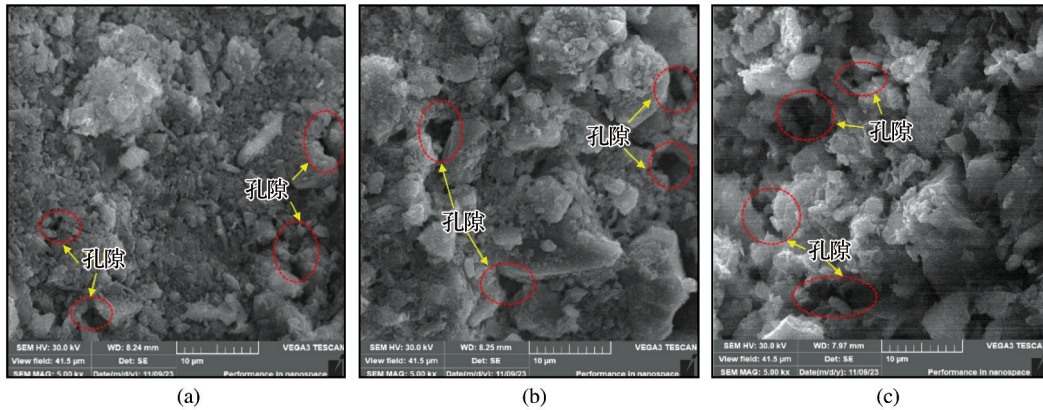


图 15 养护 7 d 后原状冰碛物微观形貌

Fig. 15 Microscopic morphology of undisturbed moraine after 7 days of curing

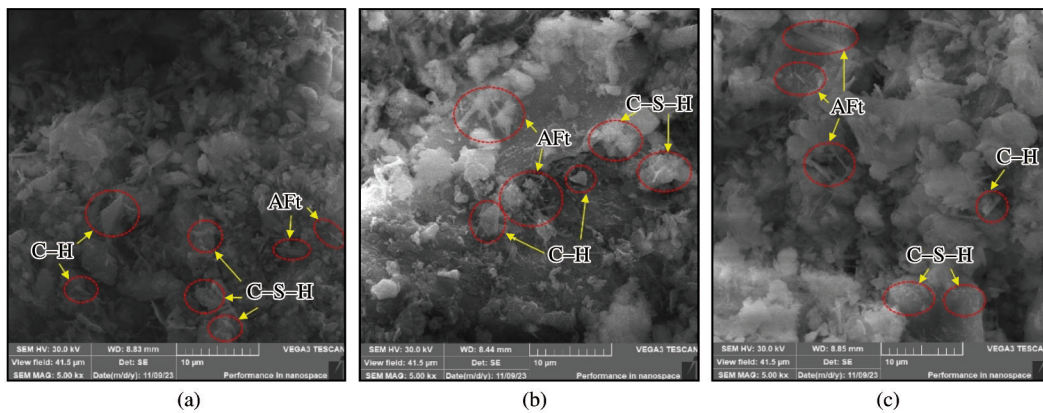


图 16 养护 7 d 后注浆冰碛物微观形貌

Fig. 16 Microscopic morphology of grouting moraine after 7 days of curing

冰碛物中水泥浆液的扩散规律及水泥浆液对冰碛物的固化效果,得到以下主要结论:

(1)水泥浆液在冰碛物中的扩散运动主要表现为压密扩散和劈裂扩散 2 种形式,受渗滤效应影响,水泥浆液在冰碛物中无法实现渗透扩散。

(2)在注浆过程中,水泥浆液的注浆量、扩散距离、劈裂缝宽和劈裂通道长度均与注浆压力呈正相关关系。

(3)在注浆过程中,水泥浆液对冰碛物具有明显的抬升作用,浆液通过对冰碛物的压密和劈裂作用,进而产生向上的抬升力,减少冰碛物的沉降。

(4)水泥浆液对冰碛物的注浆固化效果主要有 2 个方面:一是压密作用,注浆压密使冰碛物的密度增加,提高了冰碛物的强度;二是骨架支撑作用,水泥浆脉能够支撑和限制周围冰碛物变形,具有骨架支撑作用。

参考文献 (References):

Andres Q, 张帅, 程晓辉, 2015. 微生物入渗注浆法加固非饱和和砂土的研究[J]. 工业建筑, 45(7): 28-30, 175. Andres Q, Zhang Shuai, Cheng Xiaohui, 2015. Study of the micp injection in unsaturated sandy soils[J]. Industrial Construction, 45(7): 28-30, 175.

窦金熙, 张贵金, 蒋焯斌, 等, 2023. 考虑渗滤效应的全风化花岗岩体脉动注浆扩散规律[J]. 工程地质学报, 31(6): 2060-2070. Dou Jinxi, Zhang Guijin, Jiang Huangbin, et al, 2023. Diffusion mechanism of pulsating grouting in completely weathered altered granite considering infiltration effect [J]. Journal of Engineering Geology, 31 (6) : 2060-2070.

杜俊, 张龙, 杨新昭, 等, 2024. 砂砾石地层渗透注浆扩散规律模型试验研究[J]. 化工矿物与加工, 53(3): 8-15. Du Jun, Zhang Long, Yang Xinzhao, et al, 2024. Experimental study on the diffusion law model of infiltration grouting in

- sand and gravel layers[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 53(3):8-15.
- 樊锴, 孙伟, 李争荣, 等, 2024. 冰碛土体化学浆液注浆扩散模式与距离影响机制研究[J]. *金属矿山*, 53(6):89-93. Fan Kai, Sun Wei, Li Zhengrong, et al, 2024. Study on diffusion mode and distance influence mechanism of chemical grout grouting in moraine soil [J]. *Metal Mine*, 53(6):89-93.
- 金炜枫, 张力友, 程泽海, 等, 2016. 微生物超声波振动注浆法加固饱和砂土的研究[J]. *科技通报*, 32(5):177-179. Jin Weifeng, Zhang Liyou, Cheng Zehai, et al, 2016. Study of the micp superaudible vibration in saturated sandy soils [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 32(5):177-179.
- 雷金山, 阳军生, 杨秀竹, 2010. 饱和砂土振动注浆的有限元模拟[J]. *振动与冲击*, 29(9):235-237. Lei Jinshan, Yang Junsheng, Yang Xiuzhu, 2010. Finite element simulation of vibration grouting in saturated sand [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 29(9):235-237.
- 李鹏, 张庆松, 王倩, 等, 2018. 隧道泥质断层多序注浆动态劈裂扩散规律[J]. *中国公路学报*, 31(10):328-338. Li Peng, Zhang Qingsong, Wang Qian, et al, 2018. Dynamic fracturing diffusion law considering the influence of multiple sequence grouting in argillaceous fault [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 31(10):328-338.
- 李术才, 冯啸, 刘人太, 等, 2017. 考虑渗滤效应的砂土介质注浆扩散规律研究[J]. *岩土力学*, 38(4):925-933. Li Shucai, Feng Xiao, Liu Rentai, et al, 2017. Diffusion of grouting cement in sandy soil considering filtration effect [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 38(4):925-933.
- 李晓龙, 赵泽鑫, 陈坤洋, 等, 2024. 考虑化学反应的高聚物压密劈裂注浆仿真研究[J]. *岩土力学*, 45(9):2823-2838. Li Xiaolong, Zhao Zexin, Chen Kunyang, et al, 2024. Simulation study on polymer compaction fracture grouting considering chemical reactions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 45(9):2823-2838.
- 刘奇, 陈卫忠, 袁敬强, 等, 2019. 岩溶充填黏土注浆加固试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 38(增刊1):3179-3188. Liu Qi, Chen Weizhong, Yuan Jingqiang, et al, 2019. Laboratory experiment study of grouted materials filled in karst caverns [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(Suppl.1):3179-3188.
- 马连生, 王腾, 周茗如, 等, 2018. 黄土劈裂注浆土体裂纹扩展模型研究[J]. *地下空间与工程学报*, 14(4):962-967. Ma Liansheng, Wang Teng, Zhou Mingru, et al, 2018. Study on the crack extended model for loess with fracturing grouting [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 14(4):962-967.
- 牛向东, 谢晋谊, 侯克鹏, 等, 2020. 普朗铜矿井下冰碛补给型泥石流启动机理试验研究[J]. *有色金属工程*, 10(7):100-106. Niu Xiangdong, Xie Jinyi, Hou Kepeng, et al, 2020. Experimental study on the start-up mechanism of moraine-supplied debris flow in the Prang copper mine [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 10(7):100-106.
- 钱庄, 许焯霜, 沈水龙, 等, 2016. 砂土覆盖型岩溶地层盾构隧道施工地面注浆加固实例分析[J]. *隧道建设*, 36(4):479-484. Qian Zhuang, Xu Yeshuang, Shen Shuilong, et al, 2016. A case study of ground surface grouting reinforcement of shield tunnel in karst strata with sandy soil cover [J]. *Tunnel Construction*, 36(4):479-484.
- 钱自卫, 鹿存金, 巩起立, 等, 2024. 脉状裂隙导水型岩溶陷落柱高压注浆机理及应用[J/OL]. *煤炭科学技术*:1-12. [2024-07-29]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTKJ20240715004&dbname=CJFD&bcodes=CJFQ>. Qian Ziwei, Lu Cunjin, Gong Qili, et al, 2024. Mechanism and application of high pressure grouting in karst collapse column with vein-like water channel [J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1-12. [2024-07-29]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTKJ-20240715004&dbname=CJFD&bcodes=CJFQ>.
- 秦鹏飞, 2017. 砂土注浆的颗粒流细观力学数值模拟[J]. *土木工程与管理学报*, 34(4):30-38. Qin Pengfei, 2017. Micromechanics particle flow numerical simulation on sandy soil grouting [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 34(4):30-38.
- 秦鹏飞, 2022. 基于“浆-土”耦合效应的砂土劈裂注浆机理研究[J]. *实验室研究与探索*, 41(12):14-18. Qin Pengfei, 2022. Study on sand splitting grouting mechanism based on “slurry soil” coupling effect [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 41(12):14-18.
- 秦鹏飞, 2023. 非线性压密效应下砂土劈裂注浆机理研究[J]. *工业建筑*, 53(12):198-203, 61. Qin Pengfei, 2023. Study on splitting grouting mechanisms in sand based on nonlinear compaction effect [J]. *Industrial Construction*, 53(12):198-203, 61.
- 秦鹏飞, 孙洪硕, 陈晓红, 等, 2023. 考虑砂土压密特性的劈裂注浆机理分析[J]. *实验技术与管理*, 40(1):31-37, 43. Qin Pengfei, Sun Hongshuo, Chen Xiaohong, et al, 2023. Analysis of splitting grouting mechanism considering sand compaction characteristics [J]. *Experimental Technology and Management*, 40(1):31-37, 43.

- 秦鹏飞, 闫然, 钟宏伟, 等, 2022. 基于渗滤效应的砂土注浆加固机理研究[J]. 金属矿山, 51(4): 208-213. Qin Pengfei, Yan Ran, Zhong Hongwei, et al, 2022. Mechanism analysis of sand grouting based on percolation effect [J]. Metal Mine, 51(4): 208-213.
- 秦鹏飞, 张颖, 王柳舒, 2024a. 非均质砂土劈裂注浆加固机理分析[J]. 力学与实践, 46(3): 609-616. Qin Pengfei, Zhang Ying, Wang Liushu, 2024a. Mechanism analysis of splitting grouting reinforcement in heterogeneous sand soil [J]. Mechanics in Engineering, 46(3): 609-616.
- 秦鹏飞, 钟宏伟, 2024b. 地铁隧道砂土劈裂注浆加固机理分析[J]. 城市轨道交通研究, 27(3): 30-36, 42. Qin Pengfei, Zhong Hongwei, 2024b. Mechanism analysis of sand splitting grouting in metro tunnel [J]. Urban Mass Transit, 27(3): 30-36, 42.
- 沙飞, 李术才, 林春金, 等, 2019. 砂土介质注浆渗透扩散试验与加固机制研究[J]. 岩土力学, 40(11): 4259-4269. Sha Fei, Li Shucai, Lin Chunjin, et al, 2019. Research on penetration grouting diffusion experiment and reinforcement mechanism for sandy soil porous media [J]. Rock and Soil Mechanics, 40(11): 4259-4269.
- 申时钊, 涂小兵, 雷进生, 等, 2022. 不同渗透系数的非均质黏土劈裂注浆数值模拟[J]. 水利水运工程学报, (5): 102-112. Shen Shizhao, Tu Xiaobing, Lei Jinsheng, et al, 2022. Numerical simulation of split grouting of heterogeneous clay with different permeability coefficient [J]. Hydro-Science and Engineering, (5): 102-112.
- 宋洋, 王宏帅, 李昂, 等, 2023a. 富水粉细砂层盾尾同步注浆浆液渗透—压密扩散机制研究[J]. 岩土力学, 44(5): 1319-1329. Song Yang, Wang Hongshuai, Li Ang, et al, 2023a. Permeation-compaction diffusion mechanism of shield tail synchronous grouting slurry in water-rich fine sand layer [J]. Rock and Soil Mechanics, 44(5): 1319-1329.
- 宋洋, 王宏帅, 李昂, 等, 2023b. 富水粉细砂层盾尾同步注浆滤饼生长速率研究[J]. 铁道科学与工程学报, 20(8): 2974-2986. Song Yang, Wang Hongshuai, Li Ang, et al, 2023b. Study on the growth rate of filter cake of shield tail synchronous grouting in water rich fine sand layer [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 20(8): 2974-2986.
- 孙伟, 刘华武, 冯兴隆, 等, 2018. 普朗铜矿自然崩落法底部结构地压监测方案探讨[J]. 世界有色金属, (22): 164-165. Sun Wei, Liu Huawei, Feng Xinglong, et al, 2018. Discussion on ground pressure monitoring scheme for bottom structure of block caving method in Pulang copper mine [J]. World Nonferrous Metals, (22): 164-165.
- 汪文萍, 蒋买勇, 曹磊, 2018. 岩溶堤坝控制注浆浆液扩散机制与工程应用[J]. 人民黄河, 40(11): 140-143, 149. Wang Wenping, Jiang Maiyong, Cao Lei, 2018. Diffusion mechanism and application of high efficiency control of grouting in embankment karst [J]. Yellow River, 40(11): 140-143, 149.
- 王少勇, 冯兴隆, 吴爱祥, 等, 2024. 自然崩落法放矿中覆盖层冰碛物穿流特征与控制试验研究[J]. 矿业研究与开发, 44(4): 40-45. Wang Shaoyong, Feng Xinglong, Wu Aixiang, et al, 2024. Experimental study on inflow characteristics and control of overburden moraine during ore drawing by natural caving method [J]. Mining Research and Development, 44(4): 40-45.
- 王钰鑫, 吕思忠, 姚望, 等, 2023. 粉质黏土地层桩侧劈裂注浆参数设计与效果评价[J]. 山东大学学报(工学版), 53(6): 70-81. Wang Yuxin, Lü Sizhong, Yao Wang, et al, 2023. Parameter design and effect evaluation of pile side splitting grouting insilty clay stratum [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 53(6): 70-81.
- 吴祥集, 张玉增, 韩伟伟, 等, 2023. 水泥浆液在砂层注浆中的渗滤效应分析[J]. 建设科技, (17): 96-99. Wu Xiangji, Zhang Yuzeng, Han Weiwei, et al, 2023. Analysis of filtration effect of cement grout in sand layer grouting [J]. Construction Science and Technology, (17): 96-99.
- 徐柱圆, 赵崇延, 郭祖江, 等, 2025. 普朗铜矿自然崩落法顺序循环出矿制度简述[J]. 世界有色金属, (10): 138-140. Xu Zhuyuan, Zhao Chongyan, Guo Zujiang, et al, 2025. A brief introduction to the "natural caving method & circular sequential ore removal system" in Pulang copper mine [J]. World Nonferrous Metals, (10): 138-140.
- 杨朝义, 韩江峰, 朱乾坤, 等, 2024. 水玻璃固化冰碛物的强度及固结机理分析[J]. 硅酸盐通报, 43(6): 2217-2224. Yang Chaoyi, Han Jiangfeng, Zhu Qiankun, et al, 2024. Strength and consolidation mechanism of glacial moraine solidified with water glass [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 43(6): 2217-2224.
- 杨磊, 林荣峰, 李召峰, 等, 2018. 水泥浆液黏度对全风化花岗岩注浆加固效果的影响[J]. 中国公路学报, 31(10): 246-254. Yang Lei, Lin Rongfeng, Li Zhaofeng, et al, 2018. Influence of grout viscosity on the grouting reinforcement effect of completely weathered granite [J]. China Journal of Highway and Transport, 31(10): 246-254.
- 杨磊, 张耀磊, 唐明秀, 等, 2024. 富水软弱围岩劈裂型注浆

- 加固体力学性能与破坏模式[J].中南大学学报(自然科学版),55(2):649-664. Yang Lei, Zhang Yaolei, Tang Mingxiu, et al, 2024. Mechanics performance and failure modes of fracture grouting reinforced body in water-rich soft surrounding rock [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 55(2):649-664.
- 叶飞,李思翰,夏天晗,等,2023.低渗地层盾构隧道壁后注浆压密—劈裂扩散模型研究[J].岩土工程学报,45(10):2014-2022. Ye Fei, Li Sihan, Xia Tianhan, et al, 2023. Compaction-fracture diffusion model for backfill grouting of shield tunnels in low permeability strata [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 45(10):2014-2022.
- 叶飞,李思翰,夏天晗,等,2024.含水率影响下黄土盾构隧道壁后注浆浆液扩散特性试验研究[J].岩土工程学报,46(10):2051-2059. Ye Fei, Li Sihan, Xia Tianhan, et al, 2024. Experimental study on diffusion characteristics of backfill grouting in shield tunnels of loess under effects of moisture content [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 46(10):2051-2059.
- 余永强,张程鑫,张纪云,等,2024.砂土介质注浆扩散规律试验研究[J].金属矿山,53(7):66-74. Yu Yongqiang, Zhang Chengxin, Zhang Jiyun, et al, 2024. Experimental study on the diffusion law of sand medium grouting [J]. Metal Mine, 53(7):66-74.
- 张连震,李志鹏,刘人太,等,2019.砂层劈裂—压密注浆模拟试验系统研发及试验[J].岩土工程学报,41(4):665-674. Zhang Lianzhen, Li Zhipeng, Liu Rentai, et al, 2019. Simulation tests on fracture-compaction grouting process in sand layer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 41(4):665-674.
- 张应平,牛向东,刘关锋,等,2023.普朗铜矿地表冰碛物径流分选试验研究[J].现代矿业,39(4):167-170. Zhang Yingping, Niu Xiangdong, Liu Guanfeng, et al, 2023. Experimental study on surface moraine runoff separation in Pulang copper mine [J]. Modern Mining, 39(4):167-170.
- 张玉增,韩伟伟,郭世荣,等,2024.浅埋富水砂层隧道复合注浆治理技术研究[J].中国水泥,(5):80-84,87. Zhang Yuzeng, Han Weiwei, Guo Shirong, et al, 2024. Study on composite grouting treatment technology for shallow-buried water-rich sand tunnel [J]. China Cement, (5):80-84, 87.
- 张泽甫,成远登,丁文云,等,2022.基于离散元模拟的黏土劈裂注浆扩散特性[J].长江科学院院报,39(12):154-160. Zhang Zefu, Cheng Yuandeng, Ding Wenyun, et al, 2022. Diffusion characteristics of clay splitting grouting based on discrete element simulation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 39(12):154-160.
- 张忠苗,邹健,贺静漪,等,2009.黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J].岩土工程学报,31(12):1818-1824. Zhang Zhongmiao, Zou Jian, He Jingyi, et al, 2009. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 31(12):1818-1824.
- 赵明亮,冯兴隆,吴道雍,等,2022.普朗铜矿塌陷坑内泥石流成因及造浆运动过程浅析[J].采矿技术,22(3):109-111,123. Zhao Mingliang, Feng Xinglong, Wu Daoyong, et al, 2022. Analysis on the cause of debris flow in the collapse pit of Pulang copper mine and the process of slurry making [J]. Mining Technology, 22(3):109-111, 123.
- 周茗如,卢国文,王腾,等,2019.结构性黄土劈裂注浆力学机理分析[J].工程力学,36(3):169-181. Zhou Mingru, Lu Guowen, Wang Teng, et al, 2019. Mechanism analysis of structured loess fracturing grouting [J]. Engineering Mechanics, 36(3):169-181.
- 周茗如,钟琳,李少飞,等,2023.基于宾汉体浆液的黄土可控劈裂注浆研究[J].地下空间与工程学报,19(1):200-206. Zhou Mingru, Zhong Lin, Li Shaofei, et al, 2023. Study on controllable splitting grouting of loess based on Bingham fluid [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 19(1):200-206.
- 朱俊宁,朱霆,王欢,等,2024.自然崩落法采区地压活动控制技术研究[J].有色金属(矿山部分),76(1):99-106,122. Zhu Junning, Zhu Ting, Wang Huan, et al, 2024. Study on control technology of ground pressure activity in natural caving mining area [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 76(1):99-106, 122.
- 朱明听,张庆松,李术才,等,2018.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),52(11):2058-2067. Zhu Mingting, Zhang Qingsong, Li Shucai, et al, 2018. Simulation test for main control factors of soil splitting grouting reinforcement [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 52(11):2058-2067.

Simulation Test Study of Cement Grouting of Moraine in Natural Caving Mining Subsidence of Pulang Copper Mine

YANG Xi¹, SUN Wei¹, WANG Shaoyong², LI Zhengrong³, CHENG Haiyong¹, JIANG Minggui¹, FAN Kai⁴

1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Yunnan Diqing Nonferrous Metals Co., Ltd., Shangri-La 674400, Yunnan, China;

4. Yunnan Phosphate Chemical Group Co., Ltd., Kunming 650600, Yunnan, China

Abstract: In response to the surface moraine collapse and debris flow incidents resulting from the natural caving method at the Pulang copper mine in Yunnan Province, this study undertook laboratory experiments on moraine grouting. The objective was to investigate the fundamental mechanisms and developmental processes of cement slurry diffusion within moraine, as well as to analyze the diffusion characteristics and solidification effects of cement slurry under varying grouting pressures. The experiments utilized undisturbed moraine with a stone content of 50% and a moisture content of 11.83%, employing five grouting pressure gradients of 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 MPa. Utilizing a self-developed grouting apparatus, the study systematically examined the impact of grouting pressure on grouting volume, diffusion radius, formation of splitting channels, and the solidification effect. The findings indicate that: (1) Due to the percolation effect, the diffusion of cement slurry within the moraine is primarily governed by compaction and splitting diffusion, rather than permeation diffusion. During the initial phase of grouting, the slurry compacts the moraine proximate to the grouting port, forming a spherical slurry bubble, which characterizes the compaction diffusion stage. As the pressure escalates to the splitting threshold, the slurry propagates along the moraine's weakest surfaces, resulting in the formation of primary and secondary slurry vein structures, marking the splitting diffusion stage. (2) Quantitative analysis reveals a positive correlation between grouting volume, diffusion radius, splitting crack width, and channel length with grouting pressure. Notably, the diffusion radius and splitting crack width exhibit a nonlinear growth trend as grouting pressure increases. (3) Furthermore, throughout the grouting process, the cement slurry exerts a significant lifting effect on the moraine. By compacting and splitting the moraine, the slurry generates an upward lifting force, which effectively mitigates moraine settlement. (4) Scanning electron microscopy reveals that the C-H crystals, C-S-H gels, and ettringite minerals formed during the cement hydration process occupy the pores within the moraine and interact with the moraine particles, resulting in a dense mass structure that significantly enhances the mechanical properties of the moraine. (5) The solidification effect of cement slurry grouting on moraine is primarily characterized by two mechanisms: compaction effect and skeleton support effect. For the compaction effect, the grouting process increases the density of the moraine, thereby enhancing its strength. For the skeleton support effect, the cement slurry veins provide structural support and constrain the deformation of the surrounding moraine, functioning as a skeletal framework. This study aims to elucidate the diffusion behavior and solidification effects of cement slurry in moraine, offering theoretical insights for moraine grouting reinforcement projects and the prevention and management of collapse pit geological hazards.

Key words: moraines; cement slurry; grouting pressure; percolation effect; the law of diffusion