# 冻融循环作用下裂隙岩体注浆加固机理研究与应用

陶学伟[1,2]，张凯恒[2]，郎振威[2]，黄　顺[2]，冯建业[3]，江　杰[1]，周　昌[2*]
（1.中联润世新疆煤业有限公司，新疆 昌吉 831800；2.中国矿业大学资源与地球科学学院，江苏 徐州 221116；3.新疆工程学院，新疆 乌鲁木齐 830023）

**摘要**：在矿山、水利等工程中，通过注浆加固提高裂隙岩体工程性质、加强其强度的施工工艺得到了广泛应用。为研究注浆加固中各种注浆因素和注浆方法对裂隙岩体强度的影响，以及裂隙岩体注浆加固后冻融作用对其工程性质的影响，使用水泥砂浆等材料按一定相似比制作可以模拟裂隙原岩力学特性的相似材料，通过对浆液水灰比、注浆流速（注浆压力）、浆液温度等因素进行相关变量的控制，分别用无机材料、无机复合材料以及有机材料对裂隙岩体进行注浆加固。通过模拟该地区的气候等环境条件下，对各类因素进行相关试验，进而分析各类因素对注浆加固的影响；最后根据试验结果，对注浆参数进行优化设计，根据新疆准东西黑山矿区中联润世露天煤矿边坡的工程地质条件和地质环境进行注浆加固方案设计及监测，对该地区和其他地质特性及区域特征相似的露天矿边坡灾害防治具有一定借鉴意义。

**关键词**：冻融循环；裂隙岩体；注浆加固；露天矿边坡
**中图分类号**：TD32　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2025)04-0129-10

# Research and application of grouting and reinforcement mechanism of fractured rock mass under freeze-thaw cycle

TAO Xuewei[1,2], ZHANG Kaiheng[2], LANG Zhenwei[2], HUANG Shun[2], FENG Jianye[3], JIANG Jie[1], ZHOU Chang[2*]
(1. *Zhonglian Runshi Xinjiang Coal Industry Co., Ltd., Changji Xinjiang* 831800, *China*; 2. *School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu* 221116, *China*; 3. *Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi Xinjiang* 830023, *China*)

**Abstract**: The construction technology of improving the engineering properties and strengthening the strength of fractured rock mass by grouting reinforcement has been widely used in mining and water conservancy projects. In order to study the related effects of various grouting factors and grouting methods on the strength of fractured rock mass in grouting reinforcement, as well as the effects of freeze-thaw action on the engineering properties of fractured rock mass after grouting reinforcement, cement mortar and other materials are used to make similar materials that can simulate the mechanical properties of fractured original rock according to a certain similarity ratio. By controlling the relative variables of slurry water-cement ratio, grouting velocity (grouting pressure), grouting temperature and other factors, the fractured rock mass is reinforced by grouting with inorganic materials, inorganic composite materials and organic materials respectively. Through the simulation of the climate and other environmental conditions in this area, the relevant tests of various factors are carried out, and then the influence of various factors on grouting reinforcement is analyzed. Finally, according to the test results, the grouting parameters are optimized, and the grouting reinforcement scheme is designed and monitored according to the engineering geological conditions and geological environment of the

**收稿日期**：2024-09-12；**修回日期**：2024-11-03　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2025.04.017
**基金项目**：国家自然科学基金项目（编号：42207169、U22A20569）；新疆自治区重点研发计划项目（编号：2021B03004-3）
**第一作者**：陶学伟，男，汉族，1985年生，高级工程师，博士研究生，矿业工程专业，长期从事露天煤矿安全高效生产的研究与实践工作，江苏省徐州市泉山区金山东路1号，125710054@qq.com。
**通信作者**：周昌，男，土家族，1993年生，硕士生导师，副教授，地质工程专业，博士，主要从事工程地质方面的科研与教学工作，江苏省徐州市泉山区金山东路1号，changzhou@cumt.edu.cn。
**引用格式**：陶学伟，张凯恒，郎振威，等.冻融循环作用下裂隙岩体注浆加固机理研究与应用[J].钻探工程，2025，52(4)：129-138.
TAO Xuewei, ZHANG Kaiheng, LANG Zhenwei, et al. Research and application of grouting and reinforcement mechanism of fractured rock mass under freeze-thaw cycle[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 129-138.

slope of Zhonglian Runshi open-pit coal mine in Zhundongxiheishan mining area, Xinjiang, which has certain reference significance for slope disaster prevention and control in this area and other open-pit mines with similar geological characteristics and regional characteristics.

**Key words**: freeze-thaw cycles; fractured rock mass; grouting reinforcement; open-pit mine slope

## 0 引言

随着我国寒冷地区经济的发展以及大西北的开发,越来越多的土木建设工程开始兴起,如青藏铁路工程和青康公路工程等等,这些活动开始触及处在温度交替变化条件下的岩体,地质体由于冻融循环劣化效应出现的地质问题愈发凸显。新疆等高海拔地区蕴藏着丰富的煤炭资源,而且这些资源埋深较浅,且山区降雪多,地质构造活跃,岩体冻胀融缩剧烈,裂隙发育,在这种高海拔多年冻土地区进行露天开采时,边坡整体稳定性较差,区内地质灾害频发。而注浆是解决上述裂隙难题的一个重要途径。通过注浆加固提高裂隙岩体工程性质、加强其强度的施工工艺在矿山和水利工程中得到了广泛应用。研究最佳的注浆加固方式不但能在宏观层面上改善岩体工程的受力结构和力学性能,从而将岩土体的强度和稳定性大大提高,而且还能很大程度地降低开采成本,获得巨大经济效益。

关于裂隙岩体注浆加固研究,吴志军等[1]、Sang等[2]对含裂隙岩体开展不同环境下的注浆试验,研究了温度、围压等对浆液充填速率的变化规律。卢海峰等[3]通过PFC对含裂隙岩体进行对比试验,得出了注浆体的破坏特征和裂纹的拓展情况;Saeidi等[4]提出一种基于岩石工程系统的岩体可灌浆性指标,在明确岩体注浆机理和主要影响因素后,引入相互作用矩阵对岩体注浆性进行研究。刘泉声等[5]为研究注浆加固工艺对裂隙岩体力学性质的影响规律,进行了注浆固结体试样的加载试验,研究结果显示注浆加固后的裂隙岩体的峰值抗剪强度和残余强度均有显著提升。王正胜等[6]为了解丙烯酸盐注浆材料的基本性能进行了一系列研究,结果显示丙烯酸盐注浆材料主剂浓度增加,其凝胶时间相应减小,且浆材固砂体的单轴抗压强度<1 MPa。除此之外,Yao等[7]、曾熙文等[8]、刘人太等[9]还研究了如膨胀材料、聚丙烯纤维改性超细水泥复合注浆材料等特殊注浆材料的性能与最优配比。赵宏海等[10]通过在模拟的裂隙岩体中进行注浆试验,研究分析裂隙宽度$d$、注浆压力$p$、水灰比$m$的单因素和多因素对浆液扩散半径$R$、注浆后试件的抗压强度$P$和渗透系数$K$的影响规律和它们之间的相互关系。结果表明:$R$随着$d$、$p$、$m$的增加而增大,影响$R$最显著的因素是$p$,其次是$d$、$m$。除此之外,张二蒙等[11]、尚宏波等[12]、孙兴平等[13]用数值模拟的方法研究了裂隙岩体注浆扩散规律。

针对寒冷地区裂隙岩体问题,现有对注浆固结体力学性能的研究主要聚焦于注浆后的固结体强度和固结体变形特征等方面。张庆等[14]通过对类岩石预制多裂隙试样及其注浆固结体开展自由饱水冻融试验,研究了冻融环境下多裂隙注浆岩体的破坏特性,结果显示随着裂隙数量逐渐增多,岩体应变突变值也逐渐增大,当裂隙数量增多到一定程度时应变突变值不再增大,但突变位置数量增多;张嘉凡等[15-16]为了研究冻融环境下裂隙岩体注浆固结体力学性能的变化规律,开展了不同循环次数的饱水冻融试验。结果表明随冻融循环次数增加,裂隙试样及注浆固结体的质量先增后减,且抗压强度和残余强度随冻融次数的增加持续降低。Nasir等[17]、Tian等[18]采用室内剪切试验的方法,研究了注浆固结体的剪切特征。结果显示注浆固结体剪切变形曲线出现了明显的峰值剪切强度和残余剪切强度。

本文以新疆准东西黑山矿区中联润世露天煤矿边坡裂隙岩体为研究对象,采用相似材料裂隙岩体,研究其在不同注浆条件下强度的变化情况。然后通过模拟该地区的气候等环境条件下,在冻融循环条件下对注浆后裂隙岩体进行单轴压缩试验,进而分析温度交替环境下裂隙岩体注浆加固后的强度变化情况。最后根据试验结果,对注浆参数进行优化设计,根据该边坡的工程地质条件进行注浆加固方案设计和监测,对该地区和其他地质特性及区域特征相似的露天矿边坡灾害防治具有一定借鉴意义。

## 1 试样制作与试验

### 1.1 裂隙岩石试样制作

经测试,研究区天然岩体密度2.89 g/cm$^3$,弹性

模量32.14 GPa,变形模量18.61 GPa,黏聚力4.72 MPa,内摩擦角46.93°,抗压强度35.71 MPa,抗拉强度2.34 MPa。本试验基于相似原理,根据研究区岩石种类,考虑到相似材料的综合特性,试验配置一定比例的水泥砂浆制作试块,水泥砂浆试块与研究区的天然岩体的力学性质基本一致。主要材料为:P.O 42.5普通硅酸盐水泥,40～60目水洗细砂,混凝土水泥早强剂。材料配比(质量比)为:水泥:细砂:水:混凝土早强剂=1:0.5:0.4:0.02,预制直径50 mm、高100 mm的圆柱体试样。

裂隙岩石试样的制作过程如下:

(1)分别按照配比的质量百分比称取水泥、细砂、混凝土早强剂和水,然后将称取好的材料倒入容器中将其混合均匀,用混凝土振捣棒搅拌3～5 min;

(2)将配制好的水泥砂浆浆液倒入圆柱形塑料模具中,考虑到裂隙大小对岩体强度的影响[19-21],侧面在制作的过程中利用不锈钢片通过薄片抽条法预制成位于试样中部的一条宽度为3 mm、长度为15 mm、角度为45°的一条贯穿裂隙;

(3)在温度20 ℃±2 ℃,含水率97%±2%的标准条件下养护24 h,之后拆模,拆除模具时需要取出不锈钢片;

(4)拆模后对试样进行检查,挑出符合试验要求的试样,并在同样的条件下养护28 d,所制裂隙岩石试样见图1。

**图1　所制裂隙岩石试样**

**Fig.1　Manual fractured rock samples**

### 1.2　注浆材料

注浆材料按主剂性质可以分为无机系列和有机系列。本试验为研究无机材料、无机复合材料以及有机材料注浆加固效果,采用无机材料的普通硅酸盐水泥、水泥复合注浆材料以及有机环氧树脂材料对裂隙岩体进行注浆加固,注浆材料特点及本试验采用配比如下。

#### 1.2.1　无机材料:普通硅酸盐水泥材料

普通硅酸盐水泥材料是一种常见的注浆材料,这种材料的优点包括强度高、耐久性好、易获取、无毒无味且价格较低。但由于其粒径较大,注入细小裂隙时效果较差。此外,在固化时,它会收缩并且析出水分,导致浆液与被注入的基体黏附性不佳,并且凝固时间较长。在地下水封堵工程实践中,用普通硅酸盐水泥材料进行注浆加固水灰比一般为0.8～2.0[22]。经测试,本试验中选用的水灰比为0.8。

#### 1.2.2　无机复合材料

(1)水泥-粉煤灰(C-FA)复合注浆材料:粉煤灰掺量为40%～50%时,强度与密实度均较好。本试验中按粉煤灰掺量为50%进行配比,按水灰比0.8进行加水,搅拌均匀,使浆液中水泥颗粒充分分散,碱掺量为6%。

(2)水泥-矿渣粉复合注浆材料:采用普通硅酸盐水泥水灰比0.8,矿渣粉掺量为10%。用氢氧化钠作为碱激发剂用来激发矿渣粉的活性,碱掺量为6%。

#### 1.2.3　有机材料:环氧树脂材料

环氧树脂浆液是被广泛应用的双组份的化学浆液,与超细水泥浆液相比,它不仅包含了超细水泥浆液的黏度小、流动性更好、注入性能极强等特点,同时还具有收缩性小、良好的抗渗性、可调节固化时间和固结体中气泡少等优点。但是环氧树脂浆液制作价格较高,大面积的注浆工程不宜采用。本次注浆试验所用环氧树脂浆液用环氧树脂和固化剂按照5:1的比例配制。

### 1.3　试验方案设计

为研究注浆因素对裂隙岩体强度的影响,根据不同的注浆因素,包括注浆材料、浆液水灰比、注浆流速(注浆压力)、浆液温度等,分别进行注浆加固裂隙试样的试验方案设计。部分裂隙试样进行注浆后进行冻融循环,结束后再对试样进行相关的物理和力学试验等,分析各类注浆因素在不同环境下对于裂隙岩体强度的影响规律。对于每个相同试验变量下设3个同种试样,在进行试验后对3个试样的试验结果取平均值。具体试验如下:

(1)采用不同注浆材料在同一注浆速率(15 mL/min)和注浆压力,在室温下对裂隙岩体进行注浆,然后进行各种物理力学试验,研究注浆材料对裂隙岩体强度的影响。

(2)选用无机复合材料的水泥-粉煤灰作为注浆材料,分别设置不同的水灰比0.5、0.8、1.1、1.4,进

行浆液配制后在室温下用同一注浆速率(15 mL/min)进行注浆。然后在标准养护条件下养护7 d,进行相关的物理力学试验,研究注浆浆液水灰比对注浆加固体物理力学性质的影响。

(3)在渗透注浆时,浆液的流变性在对浆液的渗透能力有很大影响。因此采用无机复合材料的水泥-粉煤灰,水灰比为0.8,设置注浆流速分别为10、15、20、25 mL/min对裂隙岩样进行注浆加固。然后在标准养护条件下养护7 d,进行相关的物理力学试验,研究注浆流速对注浆加固体物理力学性质的影响。

(4)水泥-粉煤灰复合材料在一定范围内,水化速率会随着温度的升高而加快,当温度过低或过高时水化速率会受到限制,从而导致其性能受到影响。选用水泥-粉煤灰作为注浆材料,水灰比选用0.8,分别设置拌合时水温5、20、35、50 ℃,同一注浆速率(15 mL/min)进行注浆加固。然后在标准养护条件下养护7 d,进行相关的物理力学试验,研究注浆温度对注浆加固体物理力学性质的影响。

(5)对于所制备的注浆固结体,一部分用作对照组,另一部分饱水后利用混凝土冻融机(见图2)进行冻融循环试验。根据研究区当地气候,冻融温度设计如图3所示。试验过程中对试样进行不间断循环,总共进行冻融循环25次,然后取出对其进行相关物理力学试验。

具体试验设计及数据编号记录见表1。

## 2 物理力学试验及结果分析

为进一步了解浆-岩黏结界面的细观结构以及注浆的情况,对试样的注浆界面进行了高倍显微镜

图2 混凝土冻融机

Fig.2 Concrete freeze-thaw machine

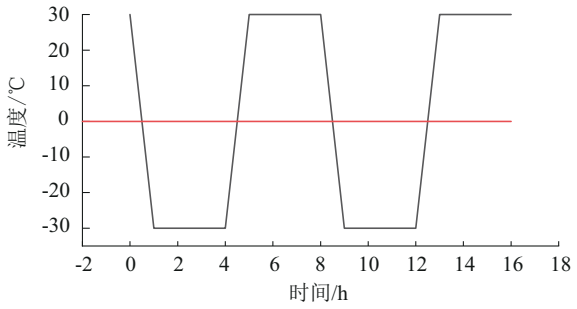



图3 冻融温度设计

Fig.3 Freeze-thaw temperature design

的观测和拍摄,选取一部分较为典型的试样进行展示,见图4。从图中可以看出,注浆后形成的浆体固结部分较为密实,在裂隙中的分布较为均匀,渗透的效果较好;水泥-粉煤灰注浆材料与岩石接触面处有微小裂隙,黏结效果相对于其他三种材料相对较弱,其他注浆材料与岩石之间的接触面、黏结面接触紧密,接触面平整完好,黏结强度较高。

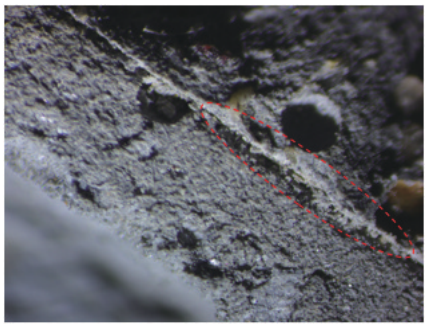
### 2.1 超声波纵波波速检测结果

岩石超声波波速检测是一种对岩石非破坏性

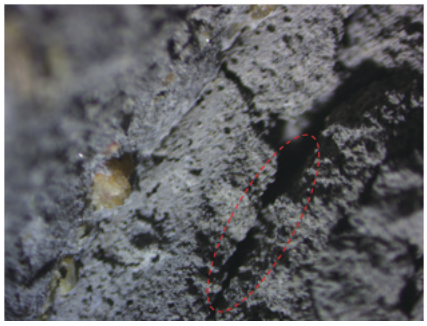
表1 数据编号记录

Table 1 Numbered data record

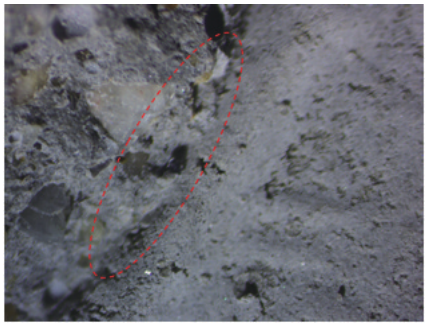
| 冻融0、25次 | | 注浆材料 | | | | 浆液水灰比 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 硅酸盐水泥 | 水泥-粉煤灰 | 水泥-矿渣粉 | 环氧树脂 | 0.5 | 0.8 | 1.1 | 1.4 |
| 单轴抗压试验 | | C1、C2 | C3、C4 | C5、C6 | C7、C8 | C9 | C1 | C10 | C11 |
| 抗剪试验 | 40° | D1、D2 | D9、D10 | D17、D18 | D25、D26 | — | — | — | — |
| | 50° | D3、D4 | D11、D12 | D19、D20 | D27、D28 | — | — | — | — |
| | 60° | D5、D6 | D13、D14 | D21、D22 | D29、D30 | — | — | — | — |
| 巴西劈裂试验 | | D7、D8 | D15、D16 | D23、D24 | D31、D32 | — | — | — | — |
| 试验变量 | | 注浆流速/(L·min$^{-1}$) | | | | 浆液温度/℃ | | | |
| | | 10 | 15 | 20 | 25 | 5 | 20 | 35 | 50 |
| 单轴抗压试验 | | C12 | C1 | C13 | C14 | C15 | C1 | C16 | C17 |



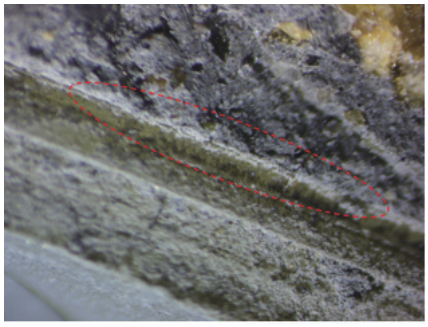
(a)硅酸盐水泥



(b)水泥-粉煤灰



(c)水泥-矿渣粉



(d)环氧树脂

**图4　不同材料注浆黏结界面**

**Fig.4　Grouting bonding interface of different materials**

的检测方法,主要利用超声波技术测量岩石中的波速,来确定岩石的物理性质和结构特征,如密度、弹性模量、抗压强度等。采用图5所示岩石声波参数测试系统,对注浆加固试样烘干后进行超声波纵波波速检测,结果如表2所示。

**图5　岩石声波参数测试系统**

**Fig.5　Rock acoustic parameter test system**

**表2　超声波纵波波速检测数据记录**

**Table 2　Ultrasonic longitudinal wave velocity detected data record**

| 数据编号 | 0次冻融 | | 25次冻融 | |
|---|---|---|---|---|
| | $\Delta T$/μs | 波速/(m•s$^{-1}$) | $\Delta T$/μs | 波速/(m•s$^{-1}$) |
| C1 | 39.633 | 2523 | — | — |
| C2 | 39.082 | 2559 | 47.477 | 2106 |
| C3 | 40.183 | 2489 | — | — |
| C4 | 41.422 | 2414 | 51.055 | 1959 |
| C5 | 39.495 | 2532 | — | — |
| C6 | 42.11 | 2375 | 49.128 | 2036 |
| C7 | 47.064 | 2125 | — | — |
| C8 | 44.587 | 2243 | 55.045 | 1812 |
| C9 | 40.045 | 2497 | — | — |
| C10 | 40.045 | 2497 | — | — |
| C11 | 39.633 | 2523 | — | — |
| C12 | 40.321 | 2480 | — | — |
| C13 | 39.357 | 2541 | — | — |
| C14 | 42.935 | 2329 | — | — |
| C15 | 39.22 | 2550 | — | — |
| C16 | 40.871 | 2447 | — | — |
| C17 | 41.146 | 2430 | — | — |

通过对超声波纵波波速检测的试验结果进行分析,可以发现:

(1)对于利用无机材料进行注浆的试样,波速大都集中于2400 m/s左右,说明其内部结构较为相似,组成成分较为均匀,也反映出注浆后裂缝中注浆固结体与试样的黏结较为紧密,注浆效果较好;

(2)对于利用有机材料环氧树脂进行注浆的试样,其检测波速(均值2184 m/s)对比无机材料波速(均值2479 m/s)较小,其原因是有机材料本身的性质与试样材料有较大差别,另外,有机材料与注浆的无机材料也有区别;

(3)在对试样进行25次冻融循环试验后,各试

样的波速检测结果均有相似程度的减小，其下降数值大致为420 m/s，说明由于冻融作用，使试样的内部结构中生成了一定的孔隙，其内部结构也有一定的破坏，将会导致试样的强度有所降低。

### 2.2 抗冻系数

在对试样进行饱水后，放入混凝土冻融机内，当试样在该环境中温度降至0 ℃及以下时，试样空隙中的水将会由于冻结成固体体积增大（可达到9%），从而对试样产生冻胀力，使其内部结构和浆-岩黏结界面产生一定的破坏。经过多次冻融循环后，将会导致试样的强度降低。试样的抗冻性常用抗冻系数指标进行评价和表示。

抗冻系数（$R_d$）指的是岩石冻融试验后的抗压强度（$\sigma_{cd_2}$）与冻融前的抗压强度（$\sigma_{cd_1}$）之比，以百分率进行表示，如下式进行计算：

$$R_d = \sigma_{cd_2}/\sigma_{cd_1} \times 100\% \quad (1)$$

根据式（1）对试验数据进行整理和计算，抗冻系数结果如表3所示。

**表3 抗冻系数计算数据记录**

**Table 3 Frost resistance coefficient calculation data record**

| 注浆加固体类型 | 冻融前抗压强度（$\sigma_{cd_1}$） | 冻融后抗压强度（$\sigma_{cd_2}$） | 抗冻系数 $R_d$/% |
|---|---|---|---|
| 硅酸盐水泥 | 10.46 | 9.29 | 88.83 |
| 水泥-粉煤灰 | 13.16 | 10.26 | 77.95 |
| 水泥-矿渣粉 | 11.50 | 9.46 | 82.30 |
| 环氧树脂 | 20.04 | 18.00 | 89.82 |

通过分析图表，可以看出：从抗冻系数来看，进行冻融循环试验的试样其抗冻系数普遍＞75%。总体来说，这些试样的抗冻性较好。冻融作用对于其强度的影响，还需进行下一步的物理力学试验来进行分析。

### 2.3 单轴压缩试验

本试验中，在进行单轴抗压试验时，为了记录试样的压缩变形数据，进行了轴向与径向应变测量，结合应变仪系统，进行了数据的测量与记录。在单轴加载条件下注浆固结体试样的破坏特征以环氧树脂注浆的C7为例，呈现拉伸破坏形式，其破坏特征如图6。

对试验数据进行处理分析，如图7所示。

在试验的几种注浆材料中，通过注浆后试样的

**图6 注浆固结体圆柱试样的破坏特征**

**Fig.6 Failure characteristics of cylindrical specimens of grouting consolidated body**

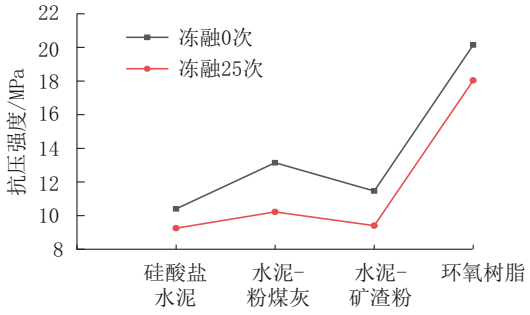



**图7 不同注浆材料单轴抗压强度**

**Fig.7 Uniaxial compression data diagram of different grouting materials**

单轴抗压强度进行比较，注浆效果为：环氧树脂＞水泥-粉煤灰＞水泥-矿渣粉＞硅酸盐水泥；在这几类注浆材料中，无机复合材料的注浆效果要优于无机材料注浆，而有机材料的注浆效果又优于无机复合材料注浆，即注浆效果为：有机材料＞无机复合材料＞无机材料；在经过25次冻融循环试验后，各个试样的单轴抗压强度均有不同程度的下降，说明试样在冻融环境下其内部结构和连结遭受了一定的破坏；冻融后不同注浆材料进行注浆的试样其单轴抗压强度依然符合冻融前的注浆规律，不同注浆材料的抗压强度下降幅度分别为：环氧树脂（10%）＜硅酸盐水泥（11%）＜水泥-矿渣粉（18%）＜水泥-粉煤灰（22%），环氧树脂和硅酸盐水泥注浆的试样其单轴抗压强度下降的幅度较小。

选择水泥-粉煤灰材料进行进一步研究，不同注浆参数对注浆岩体强度的影响见图8。通过对比分析发现：不同注浆浆液水灰比对试样的单轴抗压强度影响较大，注浆流速对其自身的强度也会产生一定的影响，注浆浆液温度的不同，注浆效果也有很大的区别。

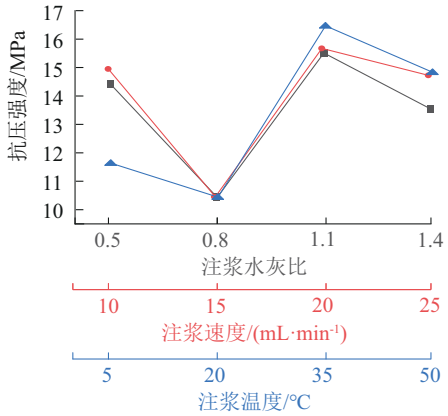



**图 8　注浆因素对抗压强度的影响**

**Fig.8　The influence of grouting factors on the compressive strength**

随着注浆水灰比逐渐增大,注浆加固体强度呈现先减小,后增大,后又减小的趋势。这是由于水泥中的钙化物遇水发生水化反应形成了 $Ca(OH)_2$ 的碱性环境,因粉煤灰中含有大量活性 $SiO_2$ 及 $Al_2O_3$,潮湿的环境下与 $Ca(OH)_2$ 等碱性物质发生反应,形成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝物质,来填充裂隙岩体内的空隙。当水灰比在 0.5~0.8 之间时,由于浆液黏度降低,导致加固体强度降低;在 0.8~1.1 之间时,固体和水充分发生反应,流动性增大,黏结力增强,从而增加加固体强度;当水灰比达到 1.1 后,新生成的浆液浓度低,水化后多余游离水分往往先附着在骨料上,浆液与骨料黏结面积减小,黏结力下降,从而降低加固体强度。速度低的时候,慢速注浆可以使浆液与水泥基体的反应时间延长,从而促进更充分的水化反应,形成更强的水泥石结构。浆液在基体内的均匀分布,避免了局部过度填充或气泡形成,从而增强了整体强度。速度增高陡降的原因是高速注浆可能导致浆液中引入大量的空气,形成气泡。这些气泡的存在会削弱固结体的强度,导致强度降低。速度增高强度增加的原因:注浆速度增加通常伴随着注浆压力的增大,高压能使浆液更深入地渗透到孔隙和裂隙中,从而提高了固结体的密实度。强度再次缓降:高速注浆可能导致水泥颗粒和水发生分离,即偏析现象。偏析会影响水化反应的均匀性,从而导致强度降低。由于水泥-粉煤灰材料水化速率会随着温度的升高而加快,当注浆温度过低或过高时水化速率会受到限制,从而导致其性能受到影响。

从本试验中来看,不同注浆浆液水灰比的注浆效果为:W/C=1.1>W/C=0.5>W/C=1.4>W/C=0.8。注浆流速的注浆效果为:20 mL/min>10 mL/min >25 mL/min >15 mL/min。不同注浆浆液温度的注浆效果为:35 ℃>50 ℃>5 ℃>20 ℃。

### 2.4　抗剪试验

使用 WES-D1000 型高压伺服压力试验机,搭配 EHC-3000 型电液伺服测控系统进行控制,以 0.5 kN/s 的加载速率施加均匀载荷,直至试样破坏。在试验加载期间,同时使用高速相机观测试样破碎过程。对剪切后的数据进行处理,得到不同注浆材料的抗剪强度参数见表 4。从表中可以看出:注浆固结体在经过了冻融循环后其黏聚力均出现了不同程度的减小,其内摩擦角也发生了一定的变化。

**表 4　剪切强度指标数据记录**

**Table 4　Shear strength index data record**

| 序号 | 注浆材料 | 0 次冻融循环 | | 25 次冻融循环 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $c$/MPa | $\varphi$/(°) | $c$/MPa | $\varphi$/(°) |
| 1 | 硅酸盐水泥 | 2.83 | 25.8 | 2.12 | 27.5 |
| 2 | 水泥-粉煤灰 | 4.31 | 21.9 | 4.28 | 20.4 |
| 3 | 水泥-矿渣粉 | 3.92 | 22.2 | 2.89 | 25.5 |
| 4 | 环氧树脂 | 5.33 | 23.6 | 5.11 | 21.5 |

在试验过程中,利用高速相机观测并记录了试样的破碎过程如图 9。

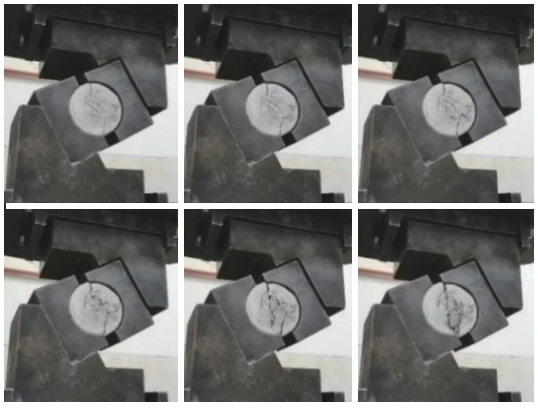


**图 9　注浆固结体加载破坏特征**

**Fig.9　Loading failure characteristics of grouting consolidated body**

注意到试样在加载破坏的过程中其加载曲线呈现出一定的规律性,分别以 D5、D13、D21、D29 为例绘制了其载荷随加载时间变化的过程,如图 10。

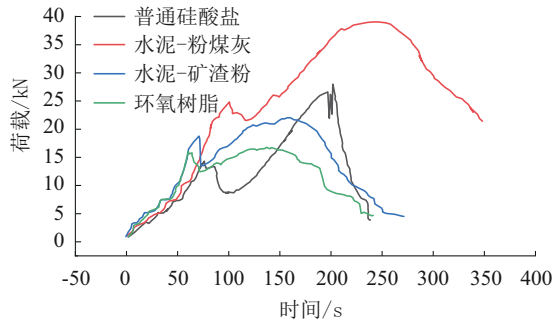



**图10 不同注浆材料岩石加载破坏曲线**

**Fig.10 Rock loading failure curves of different grouting materials**

通过分析加载破坏曲线可以得出:在试样载荷到达第一个波峰后发生破坏,此时主要是由于试样本身的结构出现了破坏。参考高速相机记录的试样破碎过程,此时试样已出现裂纹;在曲线的第二个上升阶段直到出现第二个波峰,主要是由于裂隙内注浆材料的支撑作用,使其载荷又发生了一定的提升,此过程中试样裂纹的宽度基本保持不变,说明注浆加固对试样的强度起到了一定的增强作用,此后阶段试样由于载荷的增大而发生最终的破坏,试样表面出现的裂缝逐渐增大直至发生破坏。

## 3 新疆露天矿边坡注浆方案设计及效果评价

### 3.1 研究区概况

矿区位于奇台县城北东约90 km处,南西距乌鲁木齐约300 km,自乌鲁木齐沿吐乌大高速公路及303省道东行220 km可达奇台县城,区内外交通便利。

该矿区位于大陆干旱荒漠气候区,年温差和昼夜温差大。夏季炎热,白天气温一般在40 ℃以上。冬季寒冷,最低气温可达-40 ℃。该地区年平均降水量为106 mm,年蒸发量在1202~2382 mm之间,冬季积雪相对较少。

通过地质调查及钻孔揭露情况反映,首采区地层由新至老主要有第四系松散岩类、侏罗系碎屑岩。岩性以泥岩、粉砂岩、泥质粉砂岩为主,夹细砂岩,底部为紫红、砖红色底砾岩。边帮岩层以软弱岩体为主,其天然状态下单轴极限抗压强度低,并且胶结不充分,极易风化,特别是遇水后软化特征明显。由于常用的清方减荷等措施容易对原始的地形地貌产生破坏,造成水土流失等不利影响,从而给环境保护造成巨大难题,因此设计采用注浆加固的治理手段。

### 3.2 注浆加固方案

根据前期在现场的踏勘工作,综合考虑多种施工方式,遵循经济节省、技术可靠、施工便利的原则,本工程决定主要采用注浆加固法,结合辅助防治措施在坡脚处设置被动型SNS柔性防护网,来对此露天矿边坡进行防治。

根据本地区的工程地质条件,以及通过相似材料模拟的该地区典型岩石的相关注浆试验,确定合理的注浆参数。在进行实际注浆前,还应进行现场的地表注浆试验,以对模拟试验结果进行进一步的检验并确定具体的方案。根据对扩散半径的现场试验分析,还应在实地确定注浆孔布设的合理间距与注浆压力等参数。根据相关施工方案的经验及参考前期的试验结果,确定的注浆施工参数如下:

(1)注浆孔布置:根据边坡后缘部分裂隙的分布进行布置,大致呈条带状分布,注浆孔间距为2 m,排距为3 m,具体施工中可根据实际扩散半径作适当调整。

(2)连续注浆:在计划注浆范围内由上至下连续注入浆液。

(3)注浆材料及配比:

注浆材料:无机复合材料水泥-粉煤灰(C-FA),其中水泥为42.5普通硅酸盐水泥,粉煤灰含量(与水泥的质量比)为0.4~0.5,浆液水灰比:W/C=1.1,注浆流速:20 mL/min,浆液温度:35 ℃。

### 3.3 注浆加固效果分析

根据采场南帮边坡,用flac3d建立工程地质模型如图11所示,采用有限元方法进行数值分析。模型的前、后、左、右边界为截离边界,模型前、后以$Y$方向位移约束,模型的左、右方向以$X$方向位移约束,模型的底部以$Z$方向位移约束,从而构成位移边界条件,以保持整个系统的受力平衡。

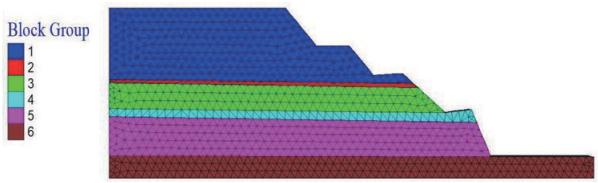



**图11 采场南帮边坡数值分析计算模型**

**Fig.11 Numerical analysis model of the south side slope of stope**

模型建立完成后模拟采用无机复合材料水泥-粉煤灰注浆后开挖时边坡稳定性分析,由于边坡开挖,引起应力重分布,开挖后的应力释放作用,应力水平比较低,且应力方向发生偏转,局部坡体内应力发生变化,坡体内岩体出现不同程度的弹塑性变形。开挖后边坡位移矢量云图如图 12 所示。

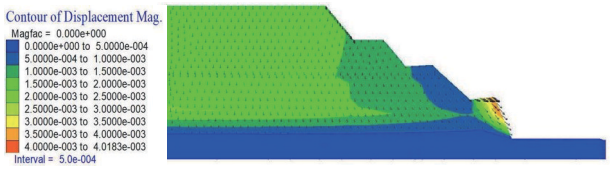



**图 12　边坡位移矢量云图**

**Fig.12　Cloud image of the slope displacement vector**

从图中可以看出,边坡的位移矢量最大位置位于边坡坡脚处,边坡底板存在软弱层,能够提供的抗滑力较小,在坡体自重的作用下,首先在底板处出现变形,产生向临空面的滑移,边坡体上部岩土体以竖直向下移动为主,边坡整体可能的破坏模式为圆弧剪切破坏。从边坡位移矢量云图上看,边坡位移量最大处只有 4 mm,位移量很小,模型计算稳定时,边坡岩土体移动速率基本为零,变形已达稳定。图 13 为南端帮边坡 2024 年 2 月注浆后监测的位移数据,从图中可以看出注浆后边坡位移在 2 月 15 日之前逐渐增大,但增大速度很慢,位移最大达到 5 mm;但在 2 月 15 日时,位移突然增大,一直到 2 月 18 日时,增大速度趋于平缓,边坡趋于稳定,此时最大位移达到 8 mm,之后位移基本稳定在 10 mm,边坡处于稳定状态,与边坡位移矢量云图位移量基本一致,这说明无机复合材料水泥-粉煤灰对边坡加固效果较好。

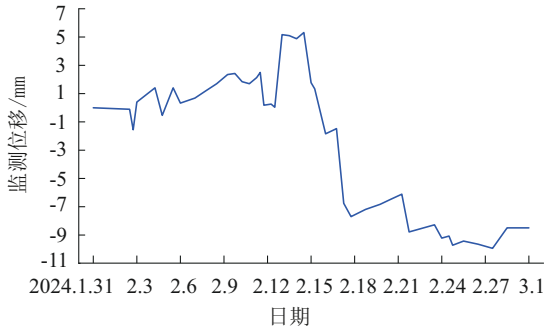



**图 13　边坡位移监测曲线**

**Fig.13　Slope displacement monitoring curve**

## 4　结论

(1)使用无机材料进行注浆的试样相较于有机材料环氧树脂进行注浆的试样波速检测结果要高,说明注浆后裂缝中无机材料注浆固结体与试样的黏结较为紧密,注浆效果较好。在对试样进行 25 次冻融循环试验后,各试样的波速检测结果均有相似程度的减小,是因为冻融作用使试样的内部结构中生成了一定的孔隙。

(2)使用不同材料进行注浆,其加固效果也不同。在本试验的这几种注浆材料中,对注浆后试样的单轴抗压强度进行比较,加固效果为:环氧树脂>水泥-粉煤灰>水泥-矿渣粉>硅酸盐水泥;在经过 25 次冻融循环试验后,各个试样的单轴抗压强度均有不同程度的下降,不同注浆材料的抗压强度下降幅度为:环氧树脂(10%)<硅酸盐水泥(11%)<水泥-矿渣粉(18%)<水泥-粉煤灰(22%),说明试样在冻融环境下其内部结构和连结遭受了一定的破坏;冻融后不同注浆材料进行注浆的试样其单轴抗压强度依然符合冻融前的注浆规律。

(3)不同注浆方式也会对注浆加固效果产生一定的影响。在对新疆准东西黑山矿区中联润世露天煤矿边坡进行注浆加固设计时,因有机材料环氧树脂的成本太高,故采用加固效果仅次于环氧树脂且成本低的无机复合材料水泥-粉煤灰。注浆时控制浆液水灰比为 1.1,浆液流速 20 mL/min,浆液温度为 35 ℃,以此来达到更好的注浆效果。

(4)对新疆准东西黑山矿区中联润世露天煤矿南端帮边坡开挖时的边坡稳定性进行了模拟,并对注浆后开挖边坡位移进行了分析和现场监测,模拟结果与现场监测结果基本一致,说明无机复合材料水泥-粉煤灰对该边坡加固效果较好。

## 参考文献(References):

[1] 吴志军,张锶浪,翁磊,等.温度和围压影响下裂隙砂岩渗透注浆过程的实时核磁共振试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(4):660-675.
WU Zhijun, ZHANG Silang, WENG Lei, et al. Real-time NMR tests on fractured sandstones during the infiltration grouting process under different temperatures and confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4):660-675.

[2] Sang H M, Liu B, Liu Q S, et al. Study of grouting reinforcement mechanism in fractured rock mass and its engineering application[J]. International Journal of Geomechanics, 2024,24(5):04024057.

[3] 卢海峰,曹爱德,刘泉声,等.含内缺陷注浆固结体力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8):1560-1571.
LU Haifeng, CAO Aide, LIU Quansheng, et al. Experimental study on mechanical properties of grouting consolidating bodies with inner defects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(8):1560-1571.

[4] Saeidi O, Khalokakaie R. A new rock-engineering index to assess jointed rock mass groutability[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013,17(5):374-397.

[5] 刘泉声,雷广峰,卢超波,等.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(S1):3140-3147.
LIU Quansheng, LEI Guangfeng, LU Chaobo, et al. Experimental study of grouting reinforcement influence on mechanical-properties of rock fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017(S1):3140-3147.

[6] 王正胜,宋雪飞,吕华文.丙烯酸盐注浆材料实验研究及其应用[J].煤炭工程,2013(S1):140-142.
WANG Zhengsheng, SONG Xuefei, LÜ Huawen. Experiment study and application of acrylate grouting material[J]. Coal Engineering, 2013(S1):140-142.

[7] Yao N, Zhang W H, Luo B Y, et al. Exploring on grouting reinforcement mechanism of expansive slurry[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023,56(6):4613-4627.

[8] 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. Study on properties of polypropylene fiber-modified ultrafine cement composite grouting materials[J]. Coal Science and Technology, 2024,52(7):56-67.

[9] 刘人太,李术才,张庆松,等.一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1454-1459.
LIU Rentai, LI Shucai, ZHANG Qingsong, et al. Experiment and application research on a new type of dynamic water grouting material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(7):1454-1459.

[10] 赵宏海,李磊,秦福刚,等.裂隙岩体注浆模拟试验研究[J].人民长江,2012,43(1):30-32,94.
ZHAO Honghai, LI Lei, QIN Fugang, et al. Experimental research on simulation of grouting in fractured rock mass[J]. Yangtze River, 2012,43(1):30-32,94.

[11] 张二蒙,刘浪,许延春,等.裂隙岩体单元注浆扩散规律及其强度演化模拟试验研究[J].煤炭科学技术.(2024-05-30)[2024-06-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240529.1657.007.html.
ZHANG Ermeng, LIU Lang, XU Yanchun, et al. Filling characteristics of grout diffusion zone in fractured rock mass and its influence mechanism on rock mass strength[J]. Coal science and technology.(2024-05-30)[2024-06-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240529.1657.007.html.

[12] 尚宏波,王皓.裂隙岩体水平孔注浆浆液扩散规律研究[J].煤炭科学技术,2022,50(7):233-243.
SHANG Hongbo, WANG Hao. Study on diffusion law of grouting slurry in horizontal hole in fractured rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2022,50(7):233-243.

[13] 孙兴平,陈建本,侯俊友,等.基于蒙特卡洛算法的裂隙岩体注浆扩散模拟[J].煤炭科技,2022,43(3):68-74.
SUN Xingping, CHEN Jianben, HOU Junyou, et al. Simulation of grouting diffusion in fractured rock mass based on Monte Carlo Algorithm[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2022,43(3):68-74.

[14] 张庆,王博,赵钰洲.冻融循环下多裂隙注浆岩石破坏特性试验研究[J].科学技术创新,2021(34):115-117.
ZHANG Qing, WANG Bo, ZHAO Yuzhou. Experimental study on failure characteristics of multi-crack grouting rock under freeze-thaw cycle[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2021(34):115-117.

[15] 张嘉凡,徐荣平,刘洋,等.冻融循环作用下注浆裂隙岩体力学特性试验研究[J].实验力学,2021,36(3):378-388.
ZHANG Jiafan, XU Rongping, LIU Yang, et al. Experimental study on mechanical properties of grouted fractured rock mass under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021,36(3):378-388.

[16] 张嘉凡,徐荣平,刘洋,等.冻融循环作用下注浆裂隙岩体微观孔隙演化规律及剪切力学行为研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(4):676-690.
ZHANG Jiafan, XU Rongping, LIU Yang, et al. Study on micro-pore evolution law and shear mechanical behavior of grouting fractured rock mass under freeze-thaw cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022,41(4):676-690.

[17] Nasir O, Fall M. Shear behaviour of cemented pastefill-rock interfaces[J]. Engineering Geology, 2008,101(3/4):146-153.

[18] Tian H M, Chen W Z, Yang D S, et al. Experimental and numerical analysis of the shear behaviour of cemented concrete-rock joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015,48(1):213-222.

[19] 肖桃李,李新平,郭运华.三轴压缩条件下单裂隙岩石的破坏特性研究[J].岩土力学,2012,33(11):3251-3256.
XIAO Taoli, LI Xinping, GUO Yunhua. Experimental study of failure characteristic of single jointed rock mass under triaxial compression tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11):3251-3256.

[20] 路亚妮,李新平,肖桃李.三向应力下裂隙岩石力学特性试验研究[J].武汉理工大学学报,2013,35(9):91-95.
LU Yani, LI Xinping, XIAO Taoli. Experimental study on mechanical properties of fractured rock under three-way stress[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013,35(9):91-95.

[21] Zou X T, Chao A, Tian Y, et al. An experimental study on the concrete hydration process using Fabry-Perot fiber optic temperature sensors[J]. Measurement, 2012,45(5):1077-1082.

[22] 刘军.高温富水裂隙岩体速凝浆液注浆扩散机理与工程应用[D].济南:山东大学,2023.
LIU Jun. Study on grouting diffusion mechanism and engineering application of quick-setting slurry in high temperature water-rich fractured rock mass[D]. Jinan: Shandong University, 2023.

(编辑 王文)