某铁矿巷道钢纤维混凝土支护遇水耐久性优化研究*

帅平，陈俊智

（昆明理工大学 国土资源工程学院， 云南 昆明 650093）

摘要：针对云南某铁矿巷道钢纤维混凝土支护遇水开裂、耐久性不足的问题，基于三因素三水平正交试验设计，系统开展吸水率与抗硫酸盐侵蚀试验，定量分析水灰比(0.42、0.45、0.47)、钢纤维掺量(2%、3%、4%)及防水剂掺量(0.10、0.12、0.14)对吸水率与抗硫酸盐侵蚀性能的影响规律，以优化材料的遇水耐久性，并将最优配比应用于云南某铁矿实际巷道支护中进行施工检验。结果表明：各优化配比下的钢纤维混凝土吸水率均较低，防水剂掺量对吸水率的影响最为显著(极差1.73%)，掺量为0.14时吸水率降至4.69%。抗硫酸盐侵蚀中试块质量损失比均为负值(−0.35%～−0.14%)，抗压强度随着循环侵蚀次数的增加而提高，防水剂掺量对抗压强度影响最大(极差22.7 MPa)；配比2(水灰比0.42、钢纤维3%、防水剂0.14)综合性能最优，吸水率4.54%，抗压强度由初始70.6 MPa增至83.1 MPa，提升了17.6%。现场应用结果表明，采用配比2支护后巷道两帮位移稳定于25 mm，表面无显著渗漏，验证了优化后配比的可行性。

关键词：巷道支护；钢纤维混凝土；材料参数；遇水耐久性；配比试验

中图分类号：TD353 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)02-0139-08

Optimization Study on Water Durability of Steel Fiber Reinforced Concrete Support in a Certain Iron Mine Roadway

SHUAI Ping, *CHEN Junzhi*

(Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: Aiming at the problems of water-induced cracking and insufficient durability of steel fiber reinforced concrete support in the roadway of a certain iron mine in Yunnan, based on the three-factor and three-level orthogonal test design, water absorption rate and sulfate erosion resistance tests were systematically carried out, and the influence laws of water-cement ratio (0.42, 0.45, 0.47), steel fiber content (2%, 3%, 4%) and waterproofing agent content (0.10, 0.12, 0.14) on water absorption rate and sulfate erosion resistance performance were quantitatively analyzed to optimize the water durability of the materials, and the optimal proportion was applied to the actual roadway support of the certain iron mine in Yunnan for construction verification. The results show that the water absorption rate of steel fiber reinforced concrete under various optimized proportions is relatively low, and the content of waterproofing agent has the most significant effect on water absorption rate (with a range of 1.73%). When the content of waterproofing agent is 0.14, the water absorption rate decreases to 4.69%. In the sulfate erosion resistance tests, the mass loss ratios of specimens are all negative (−0.35%--0.14%), the compressive strength increases with the increase in the number of cyclic erosion times, and the content of waterproofing agent has the most significant effect on compressive strength (with a range of 22.7 MPa). Proportion 2 (with a water-cement ratio of 0.42, 3% steel fiber content and 0.14 waterproofing agent content) exhibits the best comprehensive performance, with a water absorption rate of 4.54%. Its compressive strength increases from the initial 70.6 MPa to 83.1 MPa, with an increase of 17.6%. Field application results show that after support with Proportion 2, the displacement of two sides of the roadway stabilizes at 25 mm, with no significant leakage on the surface, which verifies the feasibility of the optimized proportion.

Key words: Roadway support, Steel fiber reinforced concrete, Material parameter, Water durability, Proportion test

0 引言

随着深部矿产资源开采需求的增长，复杂水文地质条件下的巷道支护技术面临严峻挑战[1-2]。钢纤维混凝土因其优异的抗裂性、韧性和抗冲击性能，被广泛应用于矿山巷道支护工程[3-4]。然而，在富水

* **收稿日期**：2025-03-21

基金项目：国家自然科学基金项目(U1602232)

作者简介：帅平(1999—)，男，贵州遵义人，硕士研究生，主要从事矿山岩体力学方面的研究。E-mail:19862523608@163.com

通信作者：陈俊智(1974—)，男，陕西榆林人，博士，副教授，主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:465424873@qq.com

环境中,钢纤维混凝土易受地下水侵蚀及干湿交替作用影响,导致耐久性劣化,表现为表面开裂、剥落及强度衰减[5-6]。云南某铁矿巷道围岩为凝灰岩与泥灰岩,岩体破碎且处于地下水补给区,现有 C20 钢纤维混凝土支护出现严重遇水开裂问题,影响矿山安全生产与巷道稳定性。

近年来,钢纤维混凝土支护技术研究呈现出多学科交叉融合的趋势。在材料性能层面,学者们通过微观结构分析揭示了钢纤维-基体界面黏结的强化机理,建立了纤维掺量-力学性能的定量关系模型[7]。在施工工艺方面,研究者们系统优化了喷射混凝土的配合比设计,提出了基于围岩类别的动态施工参数调整方法[8]。工程应用方面的研究则聚焦于不同地质条件下的支护效果评估,发展了基于能量耗散理论的支护结构安全性分析方法[9]。既有研究表明,材料配比是影响钢纤维混凝土耐久性的核心因素之一[10]。水灰比通过改变孔隙结构影响密实性[11]。钢纤维掺量可提升抗渗性,但过量掺入易导致分散不均[12]。外加剂(如防水剂)通过填充孔隙或形成憎水膜降低吸水率[13]。然而,现有研究多聚焦单一因素的作用机理,对多因素耦合效应及长期侵蚀环境的系统性分析不足,且缺乏针对湿度、硫酸盐侵蚀复合工况的优化配比方案。

为此,本文以云南某铁矿 1 363 m 运输平巷为工程背景,通过正交试验设计 9 组配比方案,结合吸水率与抗硫酸盐侵蚀试验,定量分析水灰比、钢纤维掺量及防水剂掺量对耐久性的影响规律,提出兼顾力学性能与抗侵蚀能力的优化配比,并将其运用于矿山实际支护工作中,以期为类似工程提供理论支撑与技术参考。

1 工程背景及影响因素分析

1.1 工程背景

云南某铁矿开采标高为+1 250～+1 630 m,采用分段崩落法开采铁矿原矿石,开拓方式为平硐开拓。矿区位于断裂带,节理裂隙发育。矿床位于地下水分水岭地带,属于地下水补给区,为以溶蚀裂隙为主的岩溶充水矿,岩溶含水层属中等富水性。巷道围岩为凝灰岩与泥灰岩,属较坚硬岩,岩体较破碎,工程质量分级为Ⅳ级。故而,岩体易因水渗入而发生膨胀、碎裂,弱化围岩强度,给支护工作带来不利影响。

目前,该矿山 1 363 m 水平运输平巷处于掘进状态,一掘一支,巷道设计为三心拱形状,巷道宽 3 m、墙高 1.8 m、拱高 1 m。现 1 363 m 分段在开掘工程中所用支护方法为钢纤维混凝土支护,混凝土设计等级为 C20,支护厚度为 60 mm。经现场踏勘,矿山在使用该方法进行支护工程中,存在混凝土遇水开裂掉块(见图 1)、耐久性难以保障的问题,亟需对其支护效果进行改良优化。



(a) 巷道遇水 (b) 开裂 (c) 掉块

图 1 1 363 m 水平巷道钢纤维混凝土支护现状

Fig.1 Current situation of steel fiber reinforced concrete support in 1 363 m level roadway

1.2 影响因素分析

钢纤维混凝土遇水脱落、开裂等现象主要由材料特性、环境因素、施工质量等多方面原因造成[14]。施工方面的影响主要为矿山生产组织问题,本文仅考虑从钢纤维混凝土的材料、环境两方面进行优化。

1.2.1 材料特性

材料方面的主要影响因素为材料质量、混凝土配合比、钢纤维掺量及外加剂。该矿山原有钢纤维混凝土各原材料每立方米用量见表 1。其中,水灰比为 0.45;水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;细骨料及粗骨料用料比为 1∶1,细骨料为粒径 3～5 mm 的砂粒,粗骨料为粒径 5～15 mm 的瓜子石;钢纤维长度 30 mm、直径 0.5 mm;速凝剂为 HQ-240 型无碱液体速凝剂。常出现的材料质量问题有钢纤维的抗拉强度不足、水泥胶结性能不佳、粗细骨料尺寸不合适等。结合该矿山钢纤维混凝土的原材料使用情况来看,各材料质量均较优质,型号尺寸符合行业规范,故

在后续研究中默认各材料质量优质,不再额外考虑。

混凝土配合比不合理,对钢纤维混凝土的影响是巨大的。若水灰比过大,会使混凝土内部孔隙率增加,降低混凝土的密实度和强度,同时也会影响钢纤维与混凝土的黏结效果。水泥用量不足或砂率不当,则会导致混凝土的和易性差,影响钢纤维的均匀分布,使混凝土局部强度不足,在水的作用下容易开裂脱落。

在一定范围内,随着钢纤维掺量的增加,钢纤维混凝土的力学性能会有所提高。同时,适量掺入钢纤维可以提高钢纤维混凝土的抗渗性,钢纤维在混凝土中形成的网络结构能够有效阻止水分和有害物质的渗透,减少混凝土内部的孔隙和裂缝,从而提高抗渗性能;但钢纤维掺量过多可能会因钢纤维的团聚等问题导致混凝土内部结构不均匀,反而对抗渗性产生不利影响。

合理引入外加剂可显著改善混凝土的性能。如防水剂可以有效阻止水分侵入混凝土内部,降低水对混凝土的侵蚀作用,减少因水的作用导致的开裂和脱落;早强剂能使混凝土在早期快速达到一定强度,满足矿山巷道施工进度的要求,同时能使混凝土在早期具备一定的抗水侵蚀能力,减少水分对混凝土的早期破坏,降低遇水开裂、脱落的风险;减水剂和引气剂可以改善混凝土的和易性,使混凝土在搅拌、运输和浇筑过程中更加顺畅。在矿山原有材料配选中已使用速凝剂这一早强剂,为进一步提升其遇水耐久性,可考虑增设防水剂。

表 1 钢纤维混凝土材料配比

Table 1 Proportion of steel fiber reinforced concrete materials

水/kg	水泥/kg	硅粉/kg	钢纤维/kg	速凝剂/%
180	400	25	40	7.5

1.2.2 环境因素

该矿山巷道在环境方面对钢纤维混凝土支护设施的主要影响因素体现在地下水侵蚀及干湿交替作用两个方面。

地下水侵蚀:矿山巷道中通常存在地下水,地下水中的化学成分(如硫酸盐、氯盐等)会对钢纤维混凝土产生侵蚀作用。硫酸盐会与水泥中的水化产物发生反应,生成膨胀性的产物,导致混凝土内部产生应力,引起开裂;氯盐会加速钢纤维锈蚀,降低钢纤维与混凝土的黏结性能,从而导致脱落。

干湿交替作用:矿山巷道的环境湿度变化较大,钢纤维混凝土支护结构经常处于干湿交替环境中,这种环境会使混凝土内部产生反复的膨胀和收缩应力,加速混凝土的老化和损伤,导致裂缝的产生和扩展,最终引起开裂脱落。

2 材料耐久性优化

2.1 材料配比正交设计

综合上节分析结果,在材料方面对抗水性能影响较大的因素主要有水灰比、钢纤维掺量及外加剂(防水剂)三者,通过对三因素配比的优化改良,以增强钢纤维混凝土对水的抗侵蚀、抗干湿交替的性能,进而提升钢纤维混凝土的耐久性。

在水灰比方面,矿山所使用的钢纤维混凝土原水灰比为 0.45,介于 C20(0.47)和 C25(0.42)之间,本次配比试验探究取水灰比 3 个水平值,分别为 0.42、0.45、0.47,兼顾密实性与流动性需求。在钢纤维掺量方面,以质量计,矿山所使用的钢纤维混凝土原钢纤维掺量为 2%左右,《有色金属矿山井巷工程设计规范》(GB 50915—2013)[15] 中规定,钢纤维掺量宜为混合料质量的 3%～6%,原掺量偏少,本次配比试验探究取钢纤维掺量三水平为 2%、3%、4%,平衡力学性能与结构均匀性。在防水剂掺量方面,经对防水剂产品的市场调研,本次配比试验探究选用“雨虹卫盾”混凝土抗渗防水剂,参照产品用量说明,取防水剂掺量(水剂比)3 个水平为 0.10、0.12、0.14,用以优化抗渗与抗腐蚀性能。根据以上各因素的取定水平,在其他材料配比不变的情况下,基于正交试验法设计三因素三水平正交试验,具体设计见表 2。

表 2 钢纤维混凝土遇水耐久性优化配比试验

Table 2 Optimized proportion tests for water durability of steel fiber reinforced concrete

配比编号	水灰比	钢纤维掺量/%	防水剂掺量(水剂比)
1	0.42	2	0.10
2	0.42	3	0.14
3	0.42	4	0.12
4	0.45	2	0.12
5	0.45	3	0.10
6	0.45	4	0.14
7	0.47	2	0.14
8	0.47	3	0.12
9	0.47	4	0.10

2.2 吸水率试验

2.2.1 试验过程

吸水率能够反映混凝土内部孔隙结构和密实程度,进而影响混凝土的抗渗性、抗冻性等耐久性指标,

是评估混凝土耐久性和物理性能的关键指标之一。

依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[16],采用人工插捣制备 70 mm×70 mm×70 mm 的钢纤维混凝土试块,标准养护 28 d。试块烘干至恒重后,分别测量烘干质量 m_d 与饱水表干质量 m_s,按式(1)计算钢纤维混凝土的吸水率 W_a:

$$W_a=\frac{m_s-m_d}{m_d}\times 100 \tag{1}$$

2.2.2 吸水率分析

经对试验结果进行计算处理,配比编号 1～9 的吸水率分别为 6.21%、4.54%、5.96%、6.97%、6.45%、4.56%、4.97%、6.34%、6.11%。9 组配比下的钢纤维混凝土吸水率介于 4.54%～6.97%,显著低于普通混凝土(5%～10%)。这表明钢纤维混凝土的内部结构较为致密,较低的吸水率能够减少水分带来的损害,降低结构破坏风险,从而延长结构的使用寿命,意味着 9 种配比下的钢纤维混凝土的耐久性均较好。从上述计算结果来看,配比 2、6、7 烘干 48 h 后的吸水率相对较低。

同时,分别计算水灰比、钢纤维掺量、防水剂掺量 3 个因素各自在相同水平值下的吸水率平均值,绘制折线统计图如图 2 所示。由图 2 可知,水灰比在 0.42 时平均吸水率最低(5.57%),但各水平下其差异不显著;钢纤维掺量增至 4%时平均吸水率最低(5.54%),同吸水率呈负相关关系;防水剂掺量在 0.14 时平均吸水率显著降低至 4.69%,抗渗效果最优。水灰比、钢纤维掺量、防水剂掺量三者对吸水率的极差依次为 0.42%、0.51%、1.73%,由此可知,防水剂掺量对吸水率的影响最大,水灰比和钢纤维掺量对吸水率的影响相差不大。

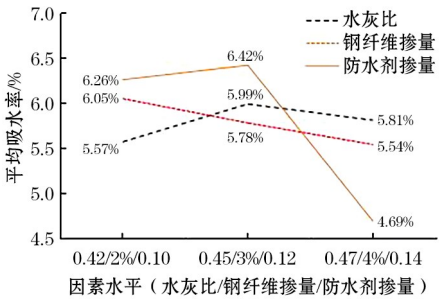


图 2 平均吸水率

Fig.2 Average water absorption rate

2.3 抗硫酸盐侵蚀试验

2.3.1 试验设置

综合考虑现实中地下水对支护用钢纤维混凝土的侵蚀作用、干湿交替作用,参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024)[17]对钢纤维混凝土设计抗硫酸盐侵蚀试验,以对比不同材料性能,指导耐久性设计。

试验采用 50 mm×50 mm×50 mm 试块,经制备并标准养护后浸入 5%硫酸钠溶液中,进行 30 次干湿循环[18](浸泡 16 h 后风干 8 h)。每 3 次循环侵蚀测定试块质量、计算质量损失比,并在 0、15、30 次循环侵蚀时,测试试块的单轴抗压强度,其试验过程如图 3 所示。



(a) 试块制备 (b) 试块标准养护 (c) 浸泡侵蚀

(d) 风干干燥 (e) 称重 (f) 单轴抗压测试

图 3 抗硫酸盐侵蚀试验

Fig.3 Test of sulfate erosion resistance

2.3.2　质量损失比分析

根据试验安排，分别测得各配比下钢纤维混凝土试块循环侵蚀下的动态质量，同时计算其质量损失比，结果见表3。由表3可知，各配比下试块质量随循环侵蚀次数的增加整体呈上升的趋势，质量损失比均为负数，其增长速率呈前期较快、后期较缓的特点。所有配比质量损失比均为负值(−0.35%～−0.14%)，且所得值均较小，说明在试验过程中，试块内部发生化学反应生成的侵蚀产物积累效应或者物理吸附作用等导致的质量增加量与可能产生的质量损失量较为接近。这在一定程度上表明，试块在当前循环侵蚀次数内抗硫酸盐侵蚀的性能相对较好，试块没有出现明显的质量损失，内部结构未因硫酸盐侵蚀而发生严重的破坏。

表3　不同循环侵蚀次数下试块的质量

Table 3　Quality of specimens under different cyclic erosion times

配比编号	不同循环侵蚀次数下试块的质量/g										质量损失比/%
	循环侵蚀3次	循环侵蚀6次	循环侵蚀9次	循环侵蚀12次	循环侵蚀15次	循环侵蚀18次	循环侵蚀21次	循环侵蚀24次	循环侵蚀27次	循环侵蚀30次	
1	292.19	292.59	292.70	292.54	292.75	292.60	292.98	292.81	292.97	293.06	−0.30
2	295.00	295.47	295.46	295.16	295.46	295.35	295.62	295.60	295.82	295.85	−0.29
3	305.02	305.53	305.63	305.19	305.52	305.26	305.67	305.47	305.69	305.64	−0.20
4	300.90	301.44	301.40	301.13	301.25	301.13	301.64	301.31	301.54	301.57	−0.22
5	302.28	302.74	331.22	302.50	302.73	302.69	303.37	302.96	303.20	303.33	−0.35
6	300.35	300.81	301.16	300.55	301.08	300.69	301.13	300.94	301.14	301.18	−0.28
7	298.22	298.87	298.99	298.60	298.78	298.64	298.93	298.86	298.98	299.01	−0.26
8	300.93	300.90	301.10	300.84	300.96	300.83	301.38	301.09	301.29	301.36	−0.14
9	289.42	289.64	289.99	289.72	289.98	289.71	290.32	289.97	290.20	290.27	−0.30

2.3.3　单轴抗压强度分析

根据试验安排，测得各配比下试块在0次、15次、30次循环侵蚀作用下的单轴抗压强度见表4。

表4　不同循环侵蚀次数下试块的抗压强度

Table 4　Compressive strength of specimens under different cyclic erosion times

配比编号	试块编号	循环侵蚀次数	破坏荷载/kN	单轴抗压强度/MPa
1	1-1	0	52.171	20.8
	1-2	15	105.020	42.0
	1-3	30	117.578	47.0
2	2-1	0	176.568	70.6
	2-2	15	176.114	70.4
	2-3	30	207.785	83.1
3	3-1	0	63.241	25.3
	3-2	15	113.689	45.5
	3-3	30	111.736	44.7
4	4-1	0	60.672	24.3
	4-2	15	111.235	44.5
	4-3	30	120.800	48.3
5	5-1	0	58.427	23.4
	5-2	15	93.409	37.4
	5-3	30	99.766	39.9
6	6-1	0	125.308	50.1
	6-2	15	138.721	55.5
	6-3	30	133.637	53.5
7	7-1	0	132.943	53.2
	7-2	15	121.650	48.7
	7-3	30	122.105	48.8
8	8-1	0	78.916	31.6
	8-2	15	117.559	47.0
	8-3	30	113.942	45.6
9	9-1	0	79.739	31.9
	9-2	15	108.375	43.4
	9-3	30	108.858	43.5

对9种配比下的抗压强度进行观察，大部分配比下试块的单轴抗压强度随着循环侵蚀次数的增加而增加。如配比5的试块5-1在循环侵蚀次数为0时单轴抗压强度为23.4 MPa，循环次数为15次时单轴抗压强度变为37.4 MPa，循环次数为30次时单轴抗压强度为39.9 MPa，随着循环侵蚀次数的增加，单轴抗压强度呈现上升趋势。这种现象是由于在干湿循环的早期阶段，混凝土内部的水泥水化反应仍在继续进行，未水化的水泥颗粒进一步水化，生成更多的水化产物填充孔隙，使结构更加致密，从而导致抗压强度提高。根据平均值，水灰比为0.42、钢纤维掺量为3%、防水剂掺量为0.14时(即配比2)所对应的受硫酸盐侵蚀试块的平均抗压强度表现最好。

根据表4试验结果，分别计算水灰比、钢纤维掺量、防水剂掺量3个因素各自在相同水平值下的单轴抗压强度平均值，绘制折线统计图如图4所示。水灰比在0.42、0.45、0.47三个水平下对应的单轴抗压强度平均值分别为49.9 MPa、41.9 MPa、43.7 MPa，极差为8.0 MPa；水灰比在抗侵蚀试验的单轴抗压强度中大致呈负相关，水灰比在0.42时其单轴抗压强度最大。钢纤维掺量在2%、3%、4%三个水平下对应的单轴抗压强度平均值分别为42.0 MPa、49.9 MPa、43.7 MPa，极差为7.9 MPa；钢纤维掺量在3%时达到最大的单轴抗压强度。防水剂掺量在0.10、0.12、0.14三个水平下对应的单轴抗压强度平

均值分别为 36.6 MPa、39.6 MPa、59.3 MPa，防水剂掺量与单轴抗压强度呈明显的正相关关系，极差为 22.7 MPa，即防水剂掺量对钢纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀后的单轴抗压强度影响最大，其次是水灰比，钢纤维掺量的影响相对较小。

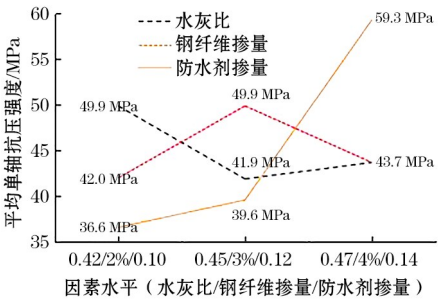


图 4 平均单轴抗压强度

Fig.4 Average uniaxial compressive strength

2.4 综合分析

综合考虑吸水率、抗硫酸盐侵蚀试验中质量变化、抗压强度变化等因素，配比 2（水灰比 0.42、钢纤维掺量 3%、防水剂掺量 0.14）的综合性能相对最优，以下是具体分析。

吸水率方面，配比 2 的吸水率为 4.54%，虽不是所有配比中最低的，但处于中等水平，在实际矿山巷道支护中，该吸水率不会导致过多水分侵入而对结构产生严重破坏。

抗硫酸盐侵蚀质量方面，配比 2 的质量损失比为－0.29%，在各配比中表现较好，在可接受范围内，其在硫酸盐侵蚀环境下质量相对稳定，抗侵蚀能力较强。

在抗压强度变化方面，配比 2 在循环侵蚀次数为 0 时，单轴抗压强度为 70.6 MPa，循环侵蚀 30 次后，抗压强度增加至 83.1 MPa，强度提升明显且初始强度较高，表明其在抗硫酸盐侵蚀的同时，还能保持较好的抗压强度发展，具备良好的力学性能。

故在综合考虑抗硫酸盐侵蚀的多个性能指标（包括单轴抗压强度、质量损失比、吸水率等）时，配比 2 能够在各方面达到较好的平衡，适合作为实际工程应用的优选配比。

3 现场施工检验

综合以上试验结果，将最优的配比 2（水灰比 0.42、钢纤维掺量 3%、防水剂掺量 0.14）的支护参数应用于云南某铁矿 1 363 m 水平巷道实际支护工作中。

钢纤维混凝土喷射支护施工完成后，现场观察表明，支护体表面平整度良好，局部存在轻微蜂窝麻面缺陷，无明显剥落、掉块现象；在巷道两帮及顶底板发现少量细小裂缝，但宽度均极小，不超过 0.5 mm，长度不超过 1 m，主要为横向裂缝，分布较为均匀，无明显扩展迹象；钢纤维混凝土与围岩黏结良好，敲击声音沉闷，无空鼓现象，支护系统协同工作良好。巷道断面形状基本保持不变，无明显鼓出或凹陷，能够有效地控制围岩变形，维持巷道的正常使用空间和形状；混凝土表面均较干燥，无显著渗漏。

在巷道支护完成后随即进场安装了自制单片机测量设备，用以测量巷道两帮的相对距离。现场支护后监测时长为 15 d，图 5 为巷道两帮位移监测结果，支护后两帮基本稳定，监测时间内，巷道两帮位移最终稳定在 25 mm 左右，未发生较大变形，该支护方案取得了良好的支护效果，如图 6 所示。

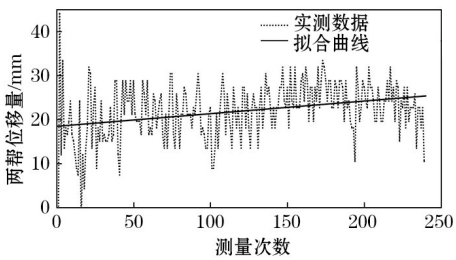


图 5 巷道两帮位移监测结果

Fig.5 Displacement monitoring results of two sides of roadway



（a）支护前巷道 （b）支护后巷道 （c）钢纤维混凝土表面

图 6 支护现场

Fig.6 Support site

4 结论

(1) 经正交试验分析,优化配比后的钢纤维混凝土吸水率显著降低至4.54%～6.97%,较普通混凝土(5%～10%)具有更优的密实性。其中,防水剂掺量对吸水率的影响最为显著(极差1.73%),当掺量提升至0.14时,吸水率最低为4.69%;其次,钢纤维掺量增至4%时吸水率降至5.54%,而水灰比的极差为0.42%,影响相对较小。

(2) 抗硫酸盐侵蚀试验表明,经配比优化后的各钢纤维混凝土试块在30次循环侵蚀后质量损失比均为负值(－0.35%～－0.14%),此现象归因于侵蚀产物积累未引发结构劣化;抗压强度随循环侵蚀次数增加提升显著,其中配比2(水灰比0.42、钢纤维3%、防水剂0.14)抗压强度由初始70.6 MPa增至83.1 MPa,提升了17.7%。防水剂掺量对抗压强度影响最大(极差22.7 MPa),水灰比次之(极差8.0 MPa),钢纤维掺量影响最小(极差7.9 MPa)。

(3) 现场应用表明,优化配比2(水灰比0.42、钢纤维3%、防水剂0.14)综合性能最优。支护后巷道两帮位移稳定于25 mm,钢纤维混凝土表面无明显渗漏,裂缝宽度≤0.5 mm且无扩展趋势,与围岩黏结良好,验证了其工程适用性,该配比可有效控制围岩变形并延长结构寿命。

(4) 研究表明,通过调控水灰比(0.42)、钢纤维掺量(3%)及防水剂掺量(0.14)的协同作用,可显著提升钢纤维混凝土的遇水耐久性,为类似水文地质条件下的矿山巷道支护提供了量化配比优化方案。

参考文献(References):

[1] 王连成,邵安林,曲福明,等.金属矿山开采技术发展现状与展望[J].工程科学学报,2025,47(5):971-983.
WANG Liancheng, SHAO Anlin, QU Fuming, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2025,47(5):971-983.

[2] 孟庆彬,张烜,葛政宇,等.深部巷道锚注支护结构时效特性理论分析[J].岩石力学与工程学报,2025,44(6):1420-1437.
MENG Qingbin, ZHANG Xuan, GE Zhengyu, et al. Time-dependent analysis of bolt-grouting support structures in deep roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2025,44(6):1420-1437.

[3] 童文.钢纤维喷射混凝土支护巷道技术及经济分析[J].建材与装饰,2017(32):155-156.
TONG Wen. Technical and economic analysis of steel fiber shotcrete support roadway[J]. Construction Materials & Decoration,2017(32):155-156.

[4] 牛龙暄,孟庆新,张假妮,等.巷道钢纤维硅粉混凝土喷浆支护试验与应用[J].现代矿业,2020,36(7):56-59.
NIU Longxuan, MENG Qingxin, ZHANG Jiani, et al. Test and application of steel fiber silicon powder concrete shotcrete support in roadway[J]. Modern Mining,2020,36(7):56-59.

[5] 王文正,王明年,刘大刚,等.钢纤维喷射混凝土结构安全性分析方法[J].地下空间与工程学报,2024,20(5):1676-1685.
WANG Wenzheng, WANG Mingnian, LIU Dagang, et al. Safety analysis method for steel fiber sprayed concrete structures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2024,20(5):1676-1685.

[6] 段明翰,覃源,李阳.盐－冻融/干湿循环作用下纤维混凝土耐久性能[J].硅酸盐学报,2024,52(12):3703-3717.
DUAN Minghan, QIN Yuan, LI Yang. Durability of fiber reinforced concrete under salt-freeze-thaw/dry-wet cycles[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2024,52(12):3703-3717.

[7] MOREIRA DE ALENCAR MONTEIRO V, DE ANDRADE SILVA F.On the design of the fiber reinforced shotcrete applied as primary rock support in the Cuiabá underground mining excavations: a case study[J]. Case Studies in Construction Materials,2021:e00784.

[8] 杨美.钢纤维混凝土的基本特性及其在隧道工程中的应用[J].山西交通科技,2018(5):70-73.
YANG Mei. The basic characteristics and its application of the steel fiber concrete in the tunnel engineering[J]. Shanxi Science & Technology of Transportation,2018(5):70-73.

[9] JUSUFI F, GERSTGRASSER A. Use of fibre sprayed concrete as initial support in drill and blast tunneling: example linz, A26-section 1[J]. Geomechanics and Tunnelling,2024,17(6):700-707.

[10] ZHANG C Y, PU C Z, CAO R H, et al.The stability and roof-support optimization of roadways passing through unfavorable geological bodies using advanced detection and monitoring methods, among others, in the Sanmenxia Bauxite Mine in China's Henan Province[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2019,78(7):5087-5099.

[11] 王飞,曹平,李凯辉,等.钢纤维砼在巷道支护中代替素喷的可行性研究[J].黄金科学技术,2015,23(6):97-102.
WANG Fei, CAO Ping, LI Kaihui, et al. Feasibility research of steel fiber reinforced concrete superseding plain concrete in tunnel supporting[J]. Gold Science and Technology,2015,23(6):97-102.

[12] 王兴国,赵春孝,程朝霞,等.速凝剂和钢纤维对喷射混凝土性能的影响[J].河南理工大学学报(自然科学版),2010,29(6):808-811.
WANG Xingguo, ZHAO Chunxiao, CHENG Zhaoxia, et al. Effects of accelerator and steel fiber on sprayed concrete[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2010,29(6):808-811.

[13] 杨维好,黄书翔,王衍森,等.中国立井冻结井壁技术的发展与展望[J].煤炭学报,2025,50(1):92-114.

YANG Weihao, HUANG Shuxiang, WANG Yansen, et al. Development and prospect of freezing shaft lining technology forvertical mine shafts in China[J]. Journal of China Coal Society, 2025,50(1):92-114.

[14] 段福荣,皮奇志,欧建广,等.钢纤维喷混凝土在引水隧洞永久支护中的应用[J].人民长江,2007(5):45-46+51+150.
DUAN Furong, PI Qizhi, OU Jianguang, et al. Application of steel fibre shotcrete in permanent support of water diversion tunnel[J]. Yangtze River,2007(5):45-46+51+150.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.有色金属矿山井巷工程设计规范:GB 50915—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2024[S].北京:中国建筑工业出版社,2024.

[18] 于洋,兰超,张程.铁路隧道工程用纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀能力评价[J].盐科学与化工,2025,54(3):30-33+38.
YU Yang, LAN Chao, ZHANG Cheng. Evaluation of sulfate corrosion resistance of fiber reinforced concrete for railway tunnel engineering[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry,2025,54(3):30-33+38.