

# 纤维增强湿喷混凝土的力学特性及矿山工程应用研究\*

郭荣华<sup>1,2</sup>, 韩斌<sup>1,2</sup>, 潘岳浩<sup>1,2</sup>, 胡亚飞<sup>1,2</sup>, 王琪<sup>1,2</sup>

(1.北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;  
2.北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**湿喷纤维混凝土具有抗变形、抗裂性等优异性能。为研究湿喷纤维混凝土支护效果,开展了湿喷纤维混凝土单轴抗压试验、切口梁弯曲韧性试验和圆盘弯曲测试。试验结果表明,尽管纤维的掺入略微降低了湿喷混凝土的抗压强度,但显著提升了其抗弯强度和能量吸收能力。巷道支护试验结果表明,钢纤维湿喷混凝土的抗压强度可达到 25 MPa,喷层厚度保持在 100~150 mm,反弹量小,支护效果良好。

**关键词:**湿喷混凝土;纤维;单轴抗压强度;弯曲韧性;能量吸收值

**中图分类号:**TD353;TU528.572 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2763(2025)10-0160-06

## Study on the Mechanical Properties and Mining Engineering Applications of Fiber-Reinforced Wet-Mix Shotcrete

GUO Ronghua<sup>1,2</sup>, HAN Bin<sup>1,2</sup>, PAN Yuehao<sup>1,2</sup>, HU Yafei<sup>1,2</sup>, WANG Qi<sup>1,2</sup>

(1.School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
2.Key Laboratory of Ministry of Education for High-Efficient Mining and Safety of Metal,  
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:**Fiber-reinforced wet-mix shotcrete has excellent properties such as deformation resistance and crack resistance. To evaluate the support performance of fiber-reinforced wet-mix shotcrete, a series of tests were conducted, including uniaxial compressive tests, notched beam flexural toughness tests, and disk flexural tests. The test results indicate that, although the addition of fibers slightly reduces the compressive strength of wet-mix shotcrete, the flexural strength and energy absorption capacity have been significantly enhanced. The roadway support test results shows that the compressive strength of the steel fiber wet-mix shotcrete can reach 25 MPa, the thickness of the spray layer is maintained at 100-150 mm, with a minimal rebound and notable support effectiveness.

**Key words:** Wet-mix shotcrete, Fiber, Uniaxial compressive strength, Flexural toughness, Energy absorption value

## 0 引言

喷射混凝土最初是由机喷砂浆发展而来,距今已经有一百多年的发展历史。喷射混凝土支护技术的应用始于 20 世纪 40 年代。在初始阶段,人们只会使用干喷法,但干喷混凝土存在衬砌强度低、易开裂、韧性差以及施工过程中粉尘浓度高、回弹率高等问题。20 世纪 70 年代逐步兴起湿喷法,相对于干喷法,降低了粉尘浓度和回弹率,改善了施工环境<sup>[1-5]</sup>。传统的湿喷混凝土以水泥为胶结剂、以天

然砂或人工砂为骨料制备而成,但喷射混凝土也存在抗变形性能差、易开裂、抗渗性差、耐久性差等问题<sup>[6]</sup>,纤维混凝土的出现使得这一问题得以改善。

纤维材料可以提高混凝土的韧性和强度,可以抵抗混凝土裂缝的生成及扩展,从根本上提高混凝土的抗裂性能<sup>[7]</sup>。掺入纤维材料的混凝土称为纤维混凝土(Fiber Reinforced Concrete, FRC),其中若加入钢纤维,则称为钢纤维混凝土,适用于对抗折、抗弯、抗裂、抗冲击和抗疲劳等性能要求较高的工

\* 收稿日期:2024-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(52374115)

作者简介:郭荣华(1998—),男,江西赣州人,硕士,主要从事充填采矿与岩石力学研究。E-mail:guoronghua888@163.com

通信作者:韩斌(1969—),男,甘肃张掖人,博士,教授,主要从事充填采矿与岩石力学研究。E-mail:aisp153426@163.com

程;若掺入合成纤维,则适用于改善混凝土早期抗裂、抗冲击、抗疲劳等性能的工程<sup>[8-9]</sup>。

结合某矿山巷道的变形破坏特点,系统对比分析了钢纤维和合成纤维湿喷混凝土的力学性能,通过单轴抗压试验、弯曲韧性试验和能量吸收对比<sup>[10-12]</sup>,最终优化出适用于矿山巷道的纤维增强混凝土支护方案,并通过工业试验验证其支护效果。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

(1) 胶凝材料。胶凝材料为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。

(2) 骨料。试验所用骨料为绿豆石和河砂的混合料,绿豆石最大粒径为 12 mm,河砂的细度模数为 3.07。混合骨料粒径组成如图 1 所示。

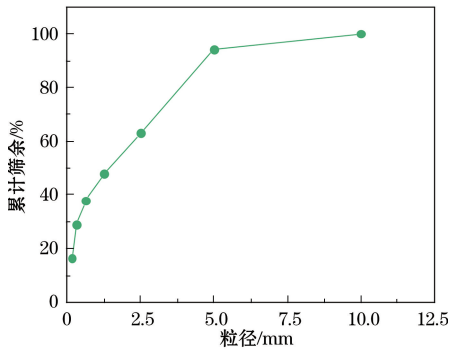


图 1 湿喷混凝土骨料的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of aggregates for wet-mix shotcrete

(3) 纤维。试验采用的纤维包括钢纤维与合成纤维,钢纤维是由贝尔卡特公司生产的 3D 钢纤维系列和 4D 钢纤维系列。根据纤维长径比与掺量之间的关系,初步确定钢纤维最低掺量为  $25 \text{ kg/m}^3$ ,合成纤维用量为  $4 \sim 7 \text{ kg/m}^3$ 。纤维的基本技术参数见表 1。

表 1 纤维技术参数

Table 1 Technical parameters of fibers

纤维类型	纤维系列	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	纤维长度/ mm	纤维直径/ mm	长径比
钢纤维	3D	$\geq 1345$	200	35	0.55	65
	4D	$\geq 1850$	200	35	0.55	65
合成纤维	聚丙烯合成纤维	$\geq 650$	10	48	—	—

### 1.2 配合比方案设计

根据前期大量试验,确定纤维混凝土水灰比为 0.67,水泥掺量为  $414 \text{ kg/m}^3$ ,试验分别设置了 3D 钢纤维掺量为  $30 \text{ kg/m}^3$ 、 $35 \text{ kg/m}^3$  和  $40 \text{ kg/m}^3$ ,4D 钢纤维掺量为  $25 \text{ kg/m}^3$ 、 $30 \text{ kg/m}^3$  和  $35 \text{ kg/m}^3$ ,合成纤维掺量为  $4 \text{ kg/m}^3$ 、 $5 \text{ kg/m}^3$ 、 $6 \text{ kg/m}^3$  和  $7 \text{ kg/m}^3$ ,并以湿喷素混凝土作为对照组。为全面对比钢纤维和合成纤维对湿喷混凝土力学性能的影响,对混凝土进行了抗压、抗弯以及最大弯曲挠度测试。

### 1.3 试验过程

(1) 单轴抗压强度试验。单轴抗压试验通过对试件施加单向压力来研究材料在压缩下的变形和破坏特性。标准试件为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的正方体。为了减小试验误差,每种配合比的混凝土浇筑 3 个试件,最终的 28 d 抗压强度测试结果取其平均值。

(2) 切口梁弯曲韧性试验。切口梁弯曲韧性试验也称为断裂韧性试验,是一种用于评估材料在弯曲载荷下抗断裂能力的试验方法。该试验通常用于脆性材料(如混凝土、陶瓷、岩石等)的力学性能,特别是韧性和抗裂性能的研究<sup>[13]</sup>。试验所用试模为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$  的标准尺寸试模。将养护到期的试件进行切口梁弯曲测试,测试前在试件一侧切割一道宽 2 mm,深 25 mm 的切口。设置试验加载速率为  $0.2 \text{ mm/min}$ ,直到试件产生破坏时停止加载。

(3) 圆板静定(Round Determinate Panel, RDP) 试验。RDP 试验能够通过准确测试圆板试件的能量吸收值来评判湿喷混凝土支护体的残余能量和挠曲强度,可以较为真实地反映井下支护体在应力作用下的承载能力<sup>[14-15]</sup>。标准试件为直径 800 mm、厚度 75 mm 的圆形板件,试验采用 ZWICK Toni 试验机。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 单轴抗压强度

由表 2 和图 2 可知,不论是添加钢纤维还是合成纤维,所制备的混凝土的单轴抗压强度均比素混凝土的低,但差距很小,表明纤维对湿喷混凝土抗压强度有轻微的弱化作用。原因在于,混凝土中加入纤维后,骨料与纤维接触部位产生缺陷,混凝土中的

孔隙结构增多,因此受压后首先在界面薄弱区引起破坏,导致抗压强度有轻微的下降。

表 2 单轴抗压试验结果

Table 2 Results of uniaxial compressive strength tests

编号	材料类型	纤维掺量/ (kg/m <sup>3</sup> )	28 d 单轴抗压强度/MPa			
			试件 1	试件 2	试件 3	平均值
1	素混凝土	—	25.2	25.5	25.9	25.5
2	合成纤维	4	25.0	24.5	24.2	24.6
3	合成纤维	5	25.0	24.5	24.2	24.6
4	合成纤维	6	24.5	25.0	24.8	24.8
5	合成纤维	7	24.9	24.8	24.3	24.7
6	3D 钢纤维	30	23.4	24.0	25.9	24.4
7	3D 钢纤维	35	24.7	24.4	24.6	24.6
8	3D 钢纤维	40	24.9	24.4	24.4	24.6
9	4D 钢纤维	25	24.7	24.8	24.4	24.6
10	4D 钢纤维	30	24.5	24.5	24.1	24.4
11	4D 钢纤维	35	24.4	24.3	24.3	24.3

2.2 切口梁弯曲韧性试验

不同类型混凝土切口梁弯曲韧性试验结果见表 3。

表 3 切口梁弯曲韧性试验结果

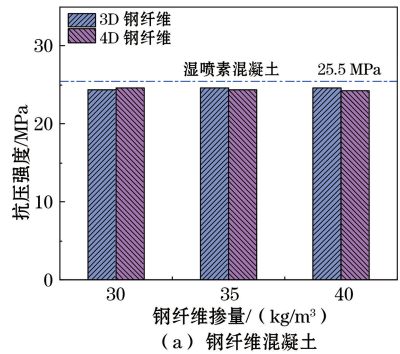
Table 3 Results of flexural toughness tests for notched beams

编号	材料类型	抗拉强度/ MPa	纤维掺量/ (kg/m <sup>3</sup> )	弯曲强度/MPa						
				$f_s$	$f_{R1}$	$f_{R2}$	$f_{R3}$	$f_{R4}$		
1	素混凝土	—	—	2.56	0.31	0.04	0.01	0.00		
2	合成纤维混凝土	≥650 MPa	4	2.92	0.56	0.41	0.38	0.36		
3			5	2.83	1.05	1.12	1.10	0.99		
4			6	3.15	1.27	1.29	1.31	1.21		
5			7	3.32	1.46	1.75	1.81	1.68		
6			30	3.65	1.67	1.86	1.86	1.74		
7	3D 钢纤维混凝土	≥1 345 MPa	35	3.44	2.46	2.92	3.05	2.88		
8			40	3.44	2.98	3.48	3.52	3.25		
9			25	3.03	1.87	2.14	2.11	1.97		
10			4D 钢纤维混凝土	≥1 850 MPa	30	3.66	3.04	3.53	3.52	3.21
11					35	4.18	3.52	4.28	4.36	3.99

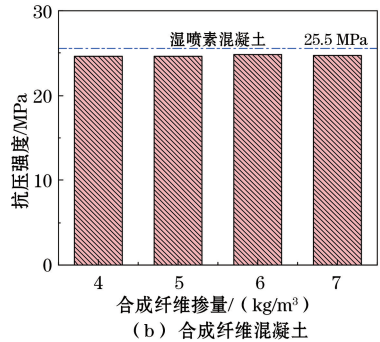
注: $f_s$ 、 $f_{R1}$ 、 $f_{R2}$ 、 $f_{R3}$ 、 $f_{R4}$  分别表示挠度为 0、0.5 mm、1.5 mm、2.5 mm 和 3.5 mm 时的弯曲强度。

梁的挠度是梁在载荷作用下其中部或其他特定测量点发生的垂直于轴线方向的位移。较大的挠度值通常意味着梁在承受载荷时具有更好的塑性变形能力,从而表现出更高的韧性。通过比较不同材料或结构的挠度,可以判断其抗变形能力和裂缝扩展控制能力。

抗弯韧性试验结果表明,湿喷混凝土中掺入纤维材料能够显著提高其抗弯强度,尤其是钢纤维混凝土的抗弯性能最佳。



(a) 钢纤维混凝土



(b) 合成纤维混凝土

图 2 纤维混凝土的 28 d 单轴抗压强度

Fig.2 28-day uniaxial compressive strength of FRC

由图 3 可知,无论是钢纤维混凝土还是合成纤维混凝土,其抗弯能力和残余抗弯能力均随着纤维掺量的增加而提升。4D 钢纤维对峰后抗弯强度的提升效果优于 3D 钢纤维,其中,3D 钢纤维掺量从 30 kg/m<sup>3</sup> 增加到 40 kg/m<sup>3</sup> 时,峰后抗弯强度提高了约 90%,而 4D 钢纤维掺量从 25 kg/m<sup>3</sup> 提高到 35 kg/m<sup>3</sup> 时,峰后抗弯强度提高了约 100%。在纤维掺量超过一定限度时,湿喷钢纤维混凝土的抗弯能力显著优于湿喷合成纤维混凝土和湿喷素混凝土。

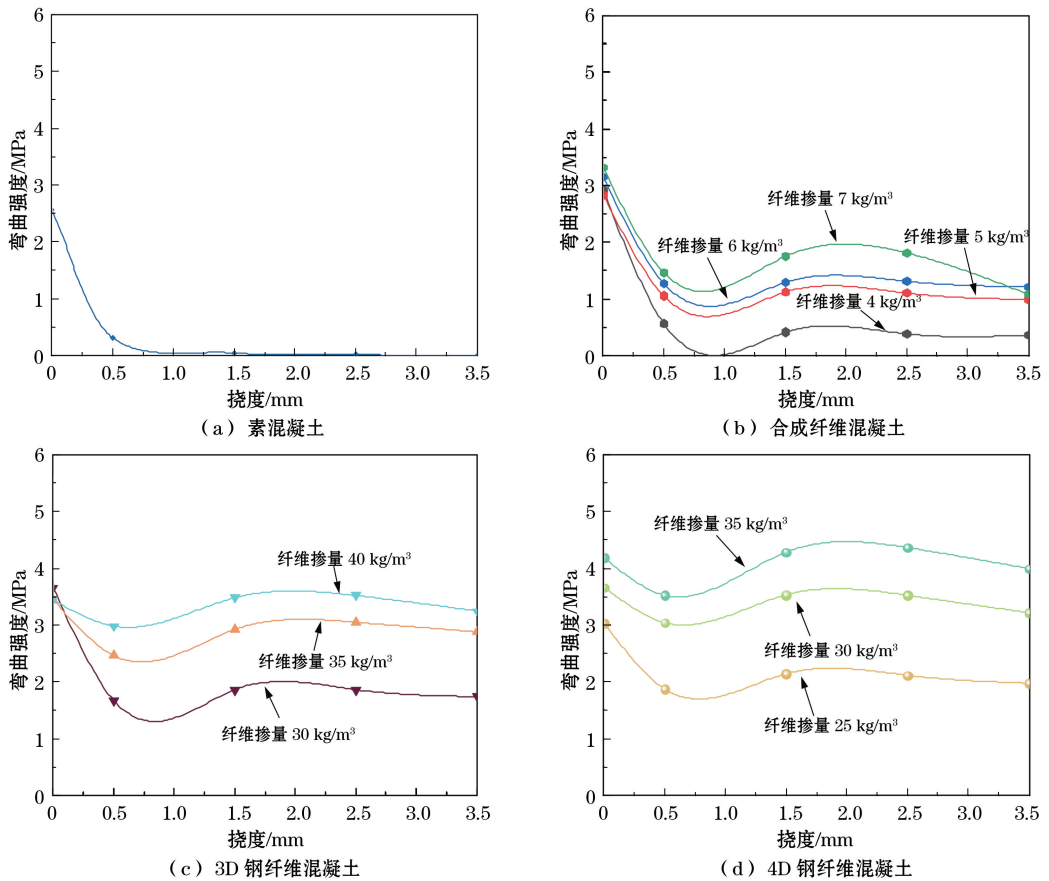


图3 切口梁弯曲韧性试验结果对比

Fig.3 Comparison results of flexural toughness tests for notched beams

### 2.3 RDP 试验

RDP 试验通过载荷-挠度曲线评估材料的变形能力和能量吸收性能,能够通过位移-载荷曲线积

分得出不同位移对应的加载功率,即试件吸收的能量值,试件吸收的能量越多,表明试件具有更强的韧性、抗冲击性和断裂安全性,RDP 试验结果见表 4。

表 4 RDP 试验能量吸收值

Table 4 Energy absorption values of specimens in RDP tests

编号	类型	强度特性	纤维掺量/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	能量吸收值/J						
				$W_5$	$W_{10}$	$W_{15}$	$W_{20}$	$W_{25}$	$W_{30}$	$W_{35}$
1	素混凝土	—	—	15	15	15	15	15	15	15
2	3D 钢纤维混凝土	抗拉强度 $\geq 1\ 345$ MPa	30	66	129	181	222	255	282	304
3		弹性模量 $\geq 20$ GPa	40	89	179	250	304	347	383	410
4	4D 钢纤维混凝土	抗拉强度 $\geq 1\ 850$ MPa	25	71	136	190	234	273	308	338
5		弹性模量 $\geq 20$ GPa	35	78	151	209	256	298	334	366

注: $W_i$ ( $i=5, 10, 15, 20, 25, 30, 35$ )表示挠度为  $i$  mm 时的能量吸收值。

根据表 4 绘制出 RDP 试验能量吸收曲线,如图 4 所示。由图 4 可得出以下结论。

(1) 湿喷素混凝土试块在破裂后迅速丧失了承载能力,挠度达到 5 mm 后,其能量吸收值显著下降,几乎趋近于 0,表现出明显的脆性破坏特征。这表明湿喷素混凝土的残余承载能力极为有限,其抗

弯力学性能较差。

(2) 随着挠度的增大,3D 钢纤维和 4D 钢纤维混凝土试件的能量吸收值均呈现上升趋势。值得注意的是,3 种材料的试件在挠度达到 40 mm 时,能量吸收值的上升幅度趋缓。

(3) 在所有试件中,掺钢纤维使湿喷混凝土的

能量吸收能力显著提升,能量吸收能力为湿喷素混凝土的 15 倍以上,显著增强了试件的抗弯强度和韧性。总体而言,掺入不同增强材料的湿喷混凝土,在能量吸收能力上有明显改善。这对提升地下巷道围岩的支护效果具有重要的工程意义。

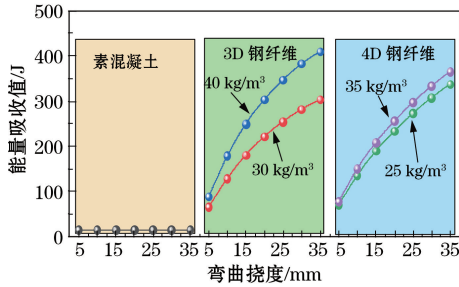


图 4 RDP 试验能量吸收曲线

Fig.4 Energy absorption curves of specimens in RDP tests

表 5 钢纤维湿喷混凝土的配合比

Table 5 Mix proportions of steel fiber wet-mix shotcrete

混凝土等级	水灰比	水泥/ (kg/m <sup>3</sup> )	水/ (kg/m <sup>3</sup> )	石子/ (kg/m <sup>3</sup> )	河砂/ (kg/m <sup>3</sup> )	减水剂/ (kg/m <sup>3</sup> )	3D 钢纤维/ (kg/m <sup>3</sup> )
C25	0.64	387	246	586	1 114	5.0	30

### 3.1 工业试验

首先按照试验方案的材料配比制备钢纤维湿喷混凝土料浆,然后通过混凝土罐车将混凝土料浆运送至试验地点并进行钢纤维湿喷混凝土支护,混凝土喷层厚度为 100 mm。在工业试验过程中发现,由于钢纤维长度与台车上的格筛网孔尺寸不匹配,钢纤维容易堆积成团并堵塞网孔,混凝土料浆无法顺利进入湿喷台车,从而影响下料速率,造成喷浆作业不连续。为解决此问题,将现有 15 mm×30 mm 的格筛网孔调整为 30 mm×30 mm 之后,喷浆效果良好。对现场钢纤维混凝土取样并进行抗压试验,试验测得 3D 钢纤维湿喷混凝土的 7 d、28 d 抗压强度分别为 16.20 MPa 和 25.66 MPa,该强度值符合工程设计要求。

### 3.2 应用效果分析

(1) 钢纤维湿喷混凝土流动性符合现场实际要求,且钢纤维湿喷混凝土的 28 d 单轴抗压强度能达到 25 MPa。

(2) 喷浆支护过程中,钢纤维湿喷混凝土料浆能顺利喷出,无堵塞喷头的现象,混凝土上墙效果好,反弹料少;钢纤维在混凝土中分布均匀,巷道两帮没有出现喷层开裂和片帮等现象。

(3) 喷层面平整,喷层厚度可达 100~150 mm;

### 3 工程应用

基于试验结果,在某矿山井下开展了工业试验。该矿山开采深度已超过 1 000 m,矿区深部岩体节理发育,蚀变程度较为严重,岩体质量较差,主要属于Ⅲ~Ⅳ类岩体。同时,矿区深部地应力较大,最大主应力一般在 30 MPa,最高可达 50 MPa<sup>[16]</sup>。在这种高应力条件下,复杂的岩体结构表现出独特的力学行为,导致支护系统频繁出现剥落、片帮等问题,巷道返修次数大幅增加,严重影响了矿山的正常生产。由于素混凝土这一脆性材料在支护系统中未能有效应对高应力下的变形和破坏,必须采用具有优异抗裂性能和韧性的钢纤维混凝土来改进支护效果,减少支护结构的失效,降低巷道返修频率。工业试验所采用的配合比见表 5。

钢纤维与混凝土间有较好的锚固力,支护效果良好。

### 4 结论

(1) 单轴抗压强度试验结果表明,尽管掺入纤维后湿喷混凝土的抗压强度略有降低(降低 3%左右),但混凝土的受压韧性得到了显著提升。

(2) 抗弯韧性试验结果表明,掺入纤维材料能显著提升湿喷混凝土的抗弯强度,且钢纤维效果优于合成纤维。随着纤维掺量的增加,湿喷混凝土的抗弯能力和残余抗弯能力均明显提高,其中 4D 钢纤维在提升峰后抗弯强度方面优于 3D 钢纤维。3D 钢纤维掺量从 30 kg/m<sup>3</sup> 增加到 40 kg/m<sup>3</sup> 时,峰后抗弯强度提高了约 90%;而 4D 钢纤维掺量从 25 kg/m<sup>3</sup> 增加到 35 kg/m<sup>3</sup> 时,峰后抗弯强度提高了约 100%。当纤维掺量超过一定限度时,湿喷钢纤维混凝土的抗弯能力显著优于湿喷合成纤维混凝土和湿喷素混凝土。

(3) 圆盘试验结果表明,湿喷素混凝土在破裂后迅速丧失承载能力,表现出明显的脆性破坏特征,且能量吸收能力极低。掺纤维湿喷混凝土的能量吸收能力是湿喷素混凝土的 15 倍以上,显著增强了其抗弯强度与韧性。这一改善对提升井下巷道围岩的支护质量及巷道稳定性具有重要的工程意义。

(4) 从现场工业试验来看,钢纤维湿喷混凝土在流动性和抗压强度上符合现场要求,抗压强度能够达到 25 MPa。在喷浆过程中,料浆顺利喷出,无堵塞现象,混凝土上墙效果良好,反弹料少,纤维分布均匀且未出现开裂或片帮的现象,支护效果良好。喷层厚度达到 100~150 mm,喷层面平整,钢纤维与混凝土的锚固力较强。

#### 参考文献(References):

- [1] 孙杰.铁路隧道施工中水泥喷射混凝土技术的应用研究[J].中国水泥,2024(7):97-99+102.  
SUN Jie. Research on the application of cement sprayed concrete technology in railway tunnel construction[J]. China Cement, 2024(7):97-99+102.
- [2] 韩斌,武拴军,李宏业.高效机械化湿喷混凝土技术及其在地下矿山的应用[J].金属矿山,2009(5):23-26.  
HAN Bin, WU Shuanjun, LI Hongye. High-efficiency wet shotcreting technology and its application in underground mines[J]. Metal Mine, 2009(5):23-26.
- [3] 马忠诚,汪澜,马井雨.喷射混凝土技术及其速凝剂的发展[J].混凝土,2011(12):126-128.  
MA Zhongcheng, WANG Lan, MA Jingyu. Development of shotcrete technology and accelerators[J]. Concrete, 2011(12):126-128.
- [4] 苏美娟,王子明,赵攀.喷射混凝土及速凝剂的应用发展现状[J].混凝土世界,2022(2):34-40.  
SU Meijuan, WANG Ziming, ZHAO Pan. Current status of application and development of shotcrete and accelerators[J]. China Concrete, 2022(2):34-40.
- [5] 王红喜,陈友治,丁庆军.喷射混凝土的现状与发展[J].岩土工程技术,2004(1):51-54.  
WANG Hongxi, CHEN Youzhi, DING Qingjun. Modern shotcrete and development of shotcrete[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004(1):51-54.
- [6] 刘立斌.高性能喷射混凝土在隧道工程中的应用[J].交通世界,2023(增刊2):174-176.  
LIU Libin. Application of high-performance shotcrete in tunnel engineering[J]. TranspoWorld, 2023(Suppl.2):174-176.
- [7] 杨雯雯.纤维混凝土力学性能及耐久性能试验研究[D].济南:山东大学,2012.  
YANG Wenwen. Experimental study on the mechanical properties and durability of fiber reinforced concrete[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [8] 吴三元.基于钢纤维与聚丙烯纤维喷射混凝土的弯曲韧性[J].合成纤维,2023,52(2):66-69.  
WU Sanyuan. Flexural toughness of steel fiber and polypropylene fiber shotcrete[J]. Synthetic Fiber in China, 2023,52(2):66-69.
- [9] 郭进平,郑冰,祝砚桧,等.新型聚丙烯纤维混凝土在软岩巷道支护中的应用[J].采矿技术,2022,22(1):70-74.  
GUO Jinping, ZHENG Bing, ZHU Yanhui, et al. Application of new polypropylene fiber reinforced concrete in soft rock tunnel support[J]. Mining Technology, 2022,22(1):70-74.
- [10] 杨永翔.钢纤维和聚丙烯纤维增强混凝土性能对比试验及分析[J].广东建材,2023,39(8):29-31.  
YANG Yongxu. Comparative experiment and analysis of the performance of steel fiber and polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Guangdong Building Materials, 2023, 39(8):29-31.
- [11] 李传习,聂洁,石家宽,等.纤维类型对混凝土抗压强度和弯曲韧性的增强效应及变异性的影响[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(2):147-158.  
LI Chuanxi, NIE Jie, SHI Jiakuan, et al. Effect of fiber type on the compressive strength and flexural toughness of concrete and analysis of variability[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019,41(2):147-158.
- [12] 丁一宁,董香军,王岳华.钢纤维混凝土弯曲韧性测试方法与评价标准[J].建筑材料学报,2005(6):660-664.  
DING Yining, DONG Xiangjun, WANG Yuehua. Testing methods and evaluation standards for flexural toughness of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Building Materials, 2005(6):660-664.
- [13] 程伟峰,杨虹,全德华,等.现场喷射成型双掺硅粉和钢纤维湿喷混凝土弯曲韧性研究[J].岩土工程学报,2025,47(5):1073-1081.  
CHENG Weifeng, YANG Hong, TONG Dehua, et al. Experimental investigation on on-site flexural toughness of wet-sprayed concrete with silica fume and steel fibers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(5):1073-1081.
- [14] 韩斌,刘超,于少峰,等.基于 RDP 试验的合成纤维湿喷混凝土工作性能研究[C]//第 14 届全国岩石动力学学术会议暨工程安全与防护专题研讨会论文集,2015:525-532.  
HAN Bin, LIU Chao, YU Shaofeng, et al. Research on the workability of synthetic fiber wet sprayed concrete based on RDP tests[C]//Proceedings of the 14th National Conference on Rock Dynamics and Special Symposium on Engineering Safety and Protection, 2015:525-532.
- [15] 吴爱祥,于少峰,王贻明.寒冷期湿喷混凝土温度影响效应与纤维掺量优化[J].建筑科学与工程学报,2017,34(6):44-50.  
WU Aixiang, YU Shaofeng, WANG Yiming. Temperature effect and fiber dosage optimization of wet sprayed concrete during cold periods[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017,34(6):44-50.
- [16] 张鹏.金川二矿区深部地应力测量及应力状态研究[D].北京:中国地质大学(北京),2011.  
ZHANG Peng. Resarch on stress field and stress state of second mine block in the Jinchuan Mine[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.