

文章编号:1673-2049(2017)06-0044-07

寒冷期湿喷混凝土温度影响效应与纤维掺量优化

吴爱祥,于少峰,王贻明

(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:为解决金英金矿寒冷期湿喷支护效果不佳的问题,对其性能影响因素进行了分析,认为低温与不合理的纤维掺量是主要问题所在。对养护温度分别为0,6,13,20℃的不同龄期混凝土试块进行了强度测试及表面特征电镜扫描(SEM)分析,并通过混凝土水化反应过程对上述分析进行了解释;基于圆盘测试试验(RDP试验),对不同类型与掺量的合成纤维混凝土圆盘试件荷载-挠度-能量曲线进行分析,优选出了能够满足该矿地下巷道支护要求的纤维;针对温度影响试验及RDP试验结果,在现场进行了应用研究。结果表明:在将井下温度控制在10℃以上且向混凝土中添加 $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的C类纤维情况下,湿喷支护后混凝土回弹率明显降低,巷道准入作业时间大幅缩短且湿喷混凝土的单轴抗压强度平均值可达30 MPa,完全满足金英金矿的支护要求。

关键词:湿喷支护;低温;纤维掺量;电镜扫描;RDP试验

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

Temperature Effects of Wet Shotcrete and Optimization of Fiber Content During Cold Period

WU Ai-xiang, YU Shao-feng, WANG Yi-ming

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

Abstract: In order to solve the problem of poor effect of wet shotcrete support of Jinying gold mine during cold period, the factors affecting its performance were analyzed, and it was considered that low temperature and unreasonable fiber ratio were the main problems. The strength tests and surface characteristics scanning electron microscope (SEM) analysis of concrete specimens were carried out under curing temperature 0, 6, 13, 20℃, respectively, and the above analysis was explained by the hydration reaction of concrete. Based on RDP experiment, the load-deflection-energy curves of different types of concrete disc specimens with different contents of synthetic fibers were analyzed, and the fibers which could meet the requirement of underground roadway support of the mine was optimized. According to the experiments of temperature influence and the results of RDP experiment, the applied research was carried out on the spot. The results show that the rebound rate of concrete after wet shotcrete is obviously reduced when the underground temperature is controlled above 10℃ and the C fiber ($6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) is added to concrete. The operation time of roadway access is greatly shortened, and the uniaxial compressive

收稿日期:2017-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51374035,51574013);“十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAB02B05)

作者简介:吴爱祥(1963-),男,湖北仙桃人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wuaixiangustb123@sina.com。

strength of wet shotcrete can reach 30 MPa. The method can fully meet the support requirements of Jinying gold mine.

Key words: wet shotcrete support; low temperature; fiber content; SEM; RDP test

0 引 言

湿喷混凝土支护是指按一定比例将水泥、砂、石、水及添加剂等材料混合并搅拌均匀,然后喷射到待喷面上,混凝土层在短时间内发生胶结、硬化并达到一定强度,从而支护复杂岩体的一种快速支护方法,其与干喷相比具有作业环境好、粉尘少、回弹率低、喷浆能力高及支护效果好等优点^[1]。寒冷条件下搅拌好的料浆极易受到低温环境的影响从而降低喷浆与支护效果。由于纤维混凝土支护能有效抵抗因岩体龟裂而产生的巷道变形等破坏^[2],因此复杂岩体支护中常会选择在混凝土中加入合成纤维以提高湿喷支护质量。

近年来,国内外相关领域学者对湿喷混凝土支护性能的影响因素进行了大量研究。李向辉等^[3]针对某隧洞在不同段因温差较大而导致喷射混凝土支护效果不同的问题,通过模拟不同温度环境进行了喷射混凝土对比试验,从而认为高温条件养护的试块能够明显提高混凝土早期强度;张子明等^[4]研究了温度对混凝土材料的宏观与微观结构影响规律,认为温度升高可以加快水泥水化反应,从而对混凝土的早期和后期强度产生影响;Lee 等^[5]通过室内及现场喷射混凝土试验研究了不同纤维掺量对混凝土力学性能的影响规律,认为合成纤维与混凝土搅拌后能够形成均匀的三维网状系统,从而可以阻止混凝土的收缩及沉降,使得混凝土特性发生了本质改变,由脆性变为柔性,从而提高混凝土支护质量。

上述研究均未对湿喷混凝土强度的影响因素进行综合考虑,只是单一研究了温度或者合成纤维掺量的影响且研究方法较为传统。本文针对金英金矿寒冷期湿喷支护效果不佳的情况进行了研究,认为低温及不合理的纤维掺量是影响湿喷支护效果的主要原因;通过研究温度的影响机制,提出较为合理的温度控制方法^[6];通过 RDP 试验及混凝土流变试验选定最佳的合成纤维类型及其掺量^[7];开展现场湿喷试验,对上述分析结果进行了验证。这对相似矿山的湿喷支护优化设计具有较好的借鉴意义。

1 研究地点与问题

金英金矿位于吉林省白山市,该矿区冰冻期的

井下平均温度约为 5℃。矿体受构造控制而节理裂隙发育,该矿原有井下巷道支护方式主要为喷锚网支护,其中喷浆方式为干喷,由于干喷存在着劳动强度大、作业条件及喷浆效果差等缺点^[8],后来引进了湿喷合成纤维混凝土支护技术。金英金矿湿喷混凝土的需求量巨大,然而由于湿喷技术引进不久,应用过程中出现众多问题,尤其是在严寒条件下巷道支护中出现大量喷层开裂、脱落等现象。分析其主要原因为:一是早期强度发展缓慢,这导致了混凝土回弹量大、难以达到规定单次喷射厚度等问题;二是后期强度不达标,导致顶板岩石冒落、巷道返修率高等问题。分析可知:低温及不合理的纤维掺量是寒冷条件下该矿湿喷支护强度不达标的主要原因,其中前者使得搅拌时间不够,水灰比增加,水泥水化缓慢,减水剂和速凝剂失效,后者未能有效避免混凝土开裂等情况。因此,本文针对温度与纤维掺量两大影响因素进行了研究。

2 试 验

2.1 温度影响试验

2.1.1 试验材料

表 1 为本文试验的混凝土料浆配比,即金英金矿目前采用的湿喷配比,其中水为矿区自来水,水质呈碱性(pH=7.56);水泥为 P. O42.5R 早强型水泥;减水剂为 BASF 公司生产的 RHEOPLUS 26 减水剂;砂石粗骨料为 10 mm 筛下强度较高的岩石颗粒,其中粒径 5~10 mm 的颗粒含量(质量分数)为 72%;细骨料为粒径小于 4 mm 的细砂,其中粒径小于 2 mm 的颗粒含量(质量分数)为 72%。

表 1 试验材料配比

Tab. 1 Mix Proportion of Experiment Material

kg·m ⁻³				
水泥	砂石	水	减水剂	纤维掺量
460	1 740	220	5	1

利用 TD-3500X 射线衍射仪对金英金矿湿喷混凝土所添加的骨料成分进行了 XRD 分析,其成分如图 1 所示,其中 1~36 表示不同衍射峰值序号。

2.1.2 试验方案

根据金英金矿井下温度条件,为验证温度对湿喷支护强度的影响,该试验对养护温度 T 分别为 0,

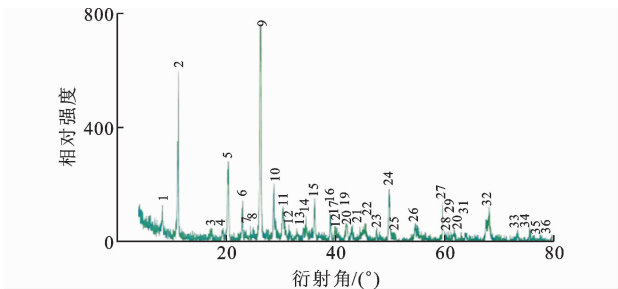


图 1 骨料 XRD 扫描图谱

Fig. 1 XRD Spectra of Skeletal Material

6,13,20 ℃的混凝土试块进行强度测试及表面特征 SEM 分析。主要步骤如下:①根据表 1 配置料浆并充分搅拌 3 min;②将料浆制作成边长为 100 mm 的立方体试块;③采用 WES-100 液压万能试验机测试试块 3,7,14,28 d 的单轴抗压强度,同时对试块进行 SEM 微观形貌扫描。

2.2 纤维掺量 RDP 试验

2.2.1 试验原理

RDP 试验是对纤维混凝土材料制作的圆盘试件进行性能测试的一种方法,该方法通过确定圆盘试件的挠曲强度及能量吸收性能,可以有效反映湿喷混凝土的工作性能^[9-14]。目前,该方法在欧美国家已得到一定的研究与应用,是最为可靠的纤维混凝土性能评定方法之一。

RDP 试验的标准试件为一直径 800 mm、厚度 75 mm 的混凝土圆盘,如图 2 所示,其中 d_1 、 d_2 分别为外径和内径。试验时对圆盘底部进行三等分支撑且支撑点分布于直径为 750 mm 的圆上,通过对圆盘中心施加荷载,同时监测中心挠度,得到荷载-挠度-能量曲线及纤维混凝土性能评价中的重要指标,即中心挠度为 40 mm 时所对应的加载功 W。典型 RDP 试验测得的荷载-挠度-能量曲线可分为 3 个部分:①下方区域面积为试件吸收的能量;②曲线最高点为峰值荷载;③峰值荷载后面部分为试件的残余荷载能力,它表示试件在达到挠曲破坏后由于纤维的作用仍可以承受一定的位移。

表 2 为美国 ASTM C1550 标准制定的不同支护类型的 RDP 试件能量吸收标准(养护 28 d)。

2.2.2 试验材料

试验检测 3 种不同类型与掺量的合成纤维(A,B,C)RDP 试件能量吸收性能,其中 3 种纤维的工作性能及参数见表 3;利用 3 种纤维和混凝土各制作 3 个圆盘,其中纤维的掺量分别为 $2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (标记为 A1,B1,C1)、 $4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (标记为 A2,B2,C2)

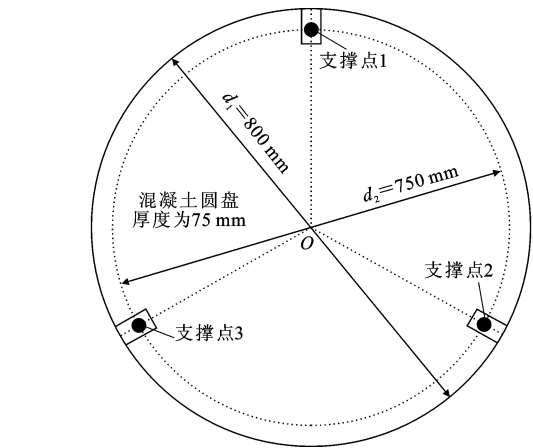


图 2 RDP 标准试件示意

Fig. 2 Schematic of Standard RDP Specimen

表 2 RDP 试件能量吸收标准

Tab. 2 Energy Absorption Standard of RDP Specimens

序号	支护类型	W/J
1	普通或一般支护	210
2	中等支护	269
3	高强度支护	330

表 3 纤维性能参数

Tab. 3 Performance Parameters of Fibers

纤维类型	A	B	C
材质	HPP	HPP	HPP
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.95	0.91	0.91
抗拉强度/MPa	562	510	>460
初始模量/MPa	7 325	7 200	3 500
规格长度/mm	50 ± 2	55	50
熔点/℃	175	170	160
单价/(元 $\cdot\text{kg}^{-1}$)	28.3	28.5	27.6

和 $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (分别标记为 A3,B3,C3)。

2.2.3 试验方案

制作内部直径为 800 mm、高为 75 mm 的铁质模具;根据表 1 及设计的纤维掺量配制料浆,采用搅拌机充分搅拌 5 min;将搅拌好的料浆通过矿山现有的 Normet Spraymec 湿喷台车喷入模具内,然后用刮板将样品的上表面大致刮平,最后用泥刀抹平,图 3(a)所示;将试件放在室内养护,28 d 后将试件取出待测,图 3(b)为养护 28 d 后的试件 C1;由于该试验只能在少数配备超宽立柱间距的伺服式试验机上进行,而目前中国很少有能够开展 RDP 测试的实验室,因此将养护完毕的试件运至 BEKAERT 亚洲研发中心进行测试,试验装置为 ZWICK Toni。试验时荷载加载速率为 $4\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,当试件挠度为 40 mm 时终止加载^[15-18]。试件破坏形式和试件断层如图 3(c),(d)所示。

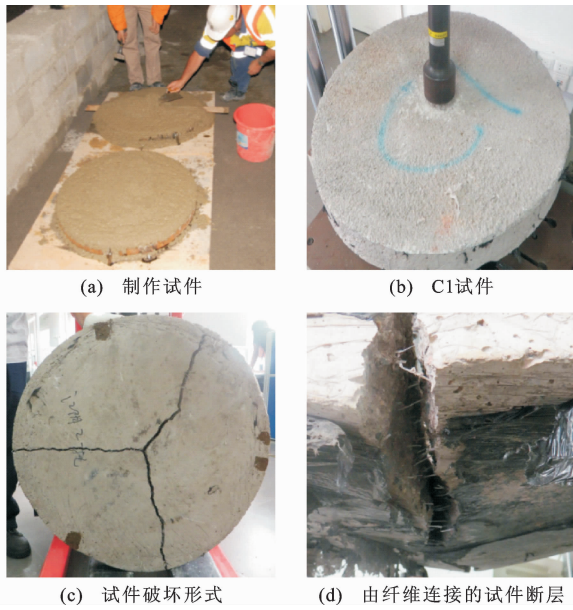


图 3 RDP 试验主要过程

Fig. 3 Main Processes of RDP Test

3 结果与分析

3.1 温度影响

3.1.1 抗压强度

试验得到不同养护温度下湿喷混凝土试块强度与养护温度的关系,如图 4 所示。由图 4 可以看出,混凝土强度随养护温度的升高而显著增大,当温度从 0℃ 提高到 20℃ 时,3,7,14,28 d 混凝土单轴抗压强度分别提高了 7.32,16.32,17.73,17.31 MPa。可见,养护温度对湿喷混凝土的强度有着重要影响。

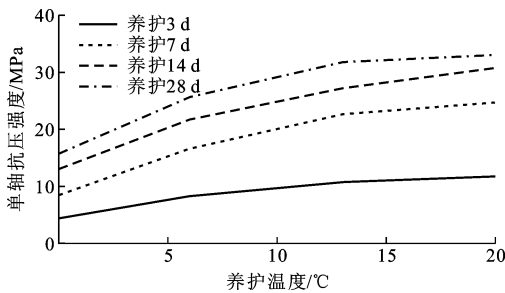


图 4 试块抗压强度与养护温度的关系

Fig. 4 Relationship Between Compressive Strength and Curing Temperature of Specimen

3.1.2 微观孔隙结构

从微观结构来说,湿喷混凝土是由水泥胶体、细砂颗粒、水泥水化产物、未水化水泥颗粒、孔裂隙及水等形成的一种多孔隙体系,其微观特性对混凝土的力学性能有着重要影响。湿喷混凝土强度与孔隙率存在如下关系^[19]

$$S = S_0 \exp(-bp) \quad (1)$$

式中: S 为理想状态下混凝土强度; S_0 为无孔隙时混凝土强度; b 为与龄期有关的常数; p 为孔隙率。

由公式(1)分析可知:随着混凝土试块内部孔隙率的提高,其强度会呈指数降低。由此可知,混凝土试块的强度在较大程度上取决于其内部的孔隙率,即同一材料配合比下,混凝土结构越密实则强度越高。图 5 为不同养护温度下混凝土试块内部放大 500 倍的扫描图(以养护 7 d 为例)。由图 5 可以看出:当养护温度为 0℃ 时,硬化后的混凝土试块结构疏松且存在着很多贯穿性的孔裂隙;随着养护温度升高,即温度达到 6~13℃ 时,试块内孔隙逐渐减少,混凝土空间结构逐渐完善,但仍可以观察到贯穿性缝隙;当养护温度升高到 20℃ 时,试块内部结构变得较为均匀,从 SEM 图像上几乎看不到缝隙,结构更加密实紧凑。结合公式(1)可知:较高的养护温度能够使得混凝土内部结构更加紧密,从而降低其内部孔隙率,最终使得混凝土强度升高。

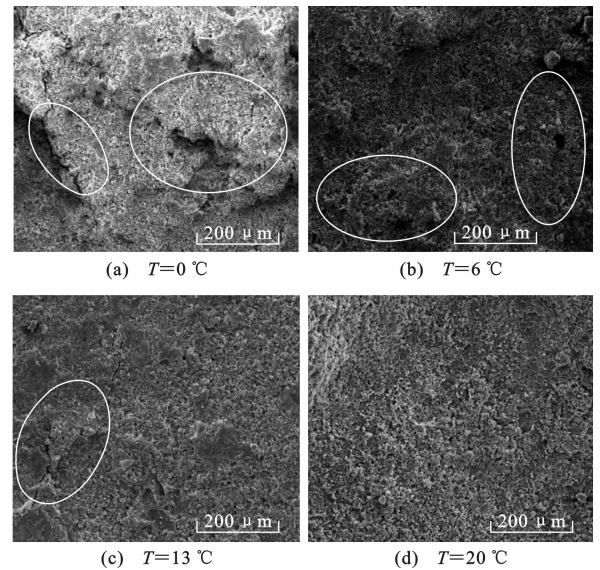
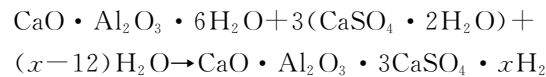


图 5 试块 SEM 图像

Fig. 5 SEM Images of Specimens

3.1.3 水化反应机理

金英金矿采用的水泥为 P. O42.5R 早强型水泥,碱性条件下 C3A 在石膏充足的条件下会发生化学反应^[20-22],即



式中: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 为钙矾石 (AFt),其结晶水含量与环境温度及参与反应的水量有关。

研究结果表明, CaSO_4 的 XRD 衍射角为 10°~30°。由图 1 可以看出,序号 2~11 所表示的物质成

分为 CaSO_4 , 且其 XRD 衍射的相对强度值较高。根据 JCPDS 卡片可知该矿用的骨料中石膏含量较大。此外, 由于矿区天然水的水质呈碱性, 故反应式成立。对寒冷矿区湿喷混凝土强度较低的原因分析如下: 低温下参与反应的自由水流动性较弱, 未与水泥各组分充分接触, 水泥水化反应速率较低, 其水化产物较多 (C-S-H 凝胶、 C_3AH_6 及 AFt 等) 且组合结构复杂, 导致混凝土内部孔隙较为发育; 随着温度升高, 参与水化反应的水流动性变强, 可以与混凝土各成分全面接触, 使得水泥的水化反应速率加快, 初期水化产物逐渐转化为较为均匀的 AFt , 使得混凝土微观结构的孔隙率逐渐降低, 最终使得湿喷层的强度得到提高。

3.2 RDP 试验结果

试验过程中, 随着试件的挠曲变形不断增加, 其裂缝逐渐扩展, 直至最终完全破裂, 图 3(c) 为本文试验 9 个试件的基本表现形式, 符合 RDP 试件典型的破裂形式^[23]。试验结束后, 如图 3(d) 所示, 在试件裂缝内可以清楚看到有合成纤维连接着混凝土碎块, 这充分体现了合成纤维强化支护的特点, 湿喷合成纤维混凝土可以有效阻止围岩松散程度的加剧。对于不同掺量的合成纤维 (以 $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 为例), 相应的 RDP 试验荷载-挠度-能量曲线如图 6 所示。

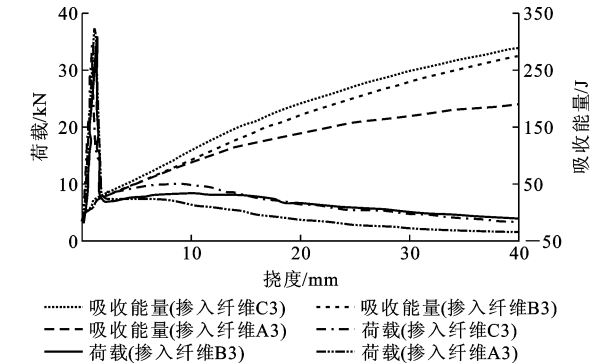


图 6 RDP 试验荷载-挠度-能量曲线

Fig. 6 Load-deflection-energy Curves of RDP Test

RDP 试验试件吸收能量见表 4。分析可知: 9 个试件的荷载-挠度-能量曲线均与 RDP 试验典型曲线吻合, 且随着试验进行, 试件吸收的能量逐渐增加, 表明混凝土层可以有效吸收围岩的变形能量; 9 组试件的峰值荷载均约为 $3.7\times 10^4\text{ N}$, 这说明纤维对于试件的峰值荷载提升作用不大; 不同类型及掺量的纤维表现出不同的能量吸收特征, 3 种纤维的能量吸收大小综合排序为 C, B, A。

由于金英金矿支护要求为中等支护, 由表 2 可知, 掺量为 $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的纤维 B3 (吸收能量为 276 J)

表 4 RDP 试验试件吸收能量

Tab. 4 Absorbed Energy of Specimens of RDP Test

试件 编号	不同挠度 (mm) 下的试件吸收能量/J							
	5	10	15	20	25	30	35	40
A1	31	46	55	61	65	67	68	69
B1	37	53	67	80	91	99	107	113
C1	54	86	104	115	122	125	126	126
A2	43	66	86	102	114	124	131	137
B2	49	81	112	139	160	178	193	206
C2	46	80	112	139	161	180	195	207
A3	53	89	118	140	157	171	181	190
B3	53	94	135	171	202	230	254	276
C3	60	109	155	191	222	248	271	289

与 C3 (吸收能量为 289 J) 均能够满足要求, 而矿山原有的 A 纤维 (掺量为 $1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 未满足支护要求。由表 3 可知, B 纤维的单价要高于 C 纤维, 因此从成本方面考虑, 建议采用 C 纤维。

4 讨论与应用

根据温度影响试验及纤维添加试验的结果, 金英金矿在寒冷期主要采用了如下 2 种方式来提高湿喷支护质量: ①提高井下养护温度, 矿山在斜坡道入口处建立了锅炉房, 通过向井下湿喷养护段输入暖风以提高井下养护温度, 这一措施使得巷道平均温度提高到了 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上; ②向混凝土料浆中添加了 $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 C 纤维。现场湿喷混凝土支护应用表明: 优化后的单次喷浆厚度可以达到设计要求且顶板料浆的回弹率明显降低, 巷道施工的准入时间由 4 h 缩短为 2.5 h, 湿喷层单轴抗压强度平均可达到 30 MPa, 巷道掘进速度提高了 27% 以上, 井下生产效率提高了 14%, 湿喷支护过的巷道返修率几乎为 0。该研究成功解决了金英金矿寒冷期湿喷混凝土强度低、易开裂等技术难题, 为矿山高效开采提供了有效保障。

5 结 语

- (1) 寒冷条件下金英金矿巷道采用的湿喷合成纤维混凝土支护效果不佳, 通过对其影响因素进行分析, 认为低温与不合理的纤维掺量为 2 个主要影响因素。
- (2) 对混凝土的温度影响机制进行了研究, 较高的养护温度可以有效提高混凝土试块的抗压强度; 通过不同温度下的试块表面微观形态 SEM 分析可知, 较高的温度能够极大程度上降低试块内部的孔隙率, 从而提高试块的抗压强度; 通过混凝土水化反

应机理对试验结果进行了科学解释。

(3)对不同种类及掺量的3种纤维进行了RDP试验,结果表明采用C纤维且其掺量为 $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,湿喷纤维混凝土能够保证较高的支护性能。

(4)根据研究结果对金英金矿现有的湿喷支护条件进行了优化,在将井下温度提高至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及C纤维掺量为 $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的情况下,该矿实现了较好的井下湿喷支护效果。

参考文献:

References:

- [1] MINELLI F, PLIZZARI G. Derivation of a Simplified Stress-crack Width Law for Fiber Reinforced Concrete Through a Revised Round Panel Test[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 58: 95-104.
- [2] 谢建和, 李自坚, 孙明炜. 硅粉对纤维橡胶再生混凝土抗压性能影响试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 72-77.
XIE Jian-he, LI Zi-jian, SUN Ming-wei. Experiment About Influence of Silica Fume on Compression Performance of Fiber Reinforced Rubber Recycled Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3): 72-77.
- [3] 李向辉, 汪健, 段宇. 高地温隧洞对喷射混凝土性能影响的研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(4): 17-20.
LI Xiang-hui, WANG Jian, DUAN Yu. Research on the Effects of High Temperature Tunnel of Sprayed Concrete Performance[J]. Journal of Hebei University of Engineering: Natural Science Edition, 2014, 31(4): 17-20.
- [4] 张子明, 周红军, 赵吉坤. 温度对混凝土强度的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 674-679.
ZHANG Zi-ming, ZHOU Hong-jun, ZHAO Ji-kun. Influences of Temperature on Strength of Concrete [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(6): 674-679.
- [5] LEE S, KIM D, RYU J, et al. An Experimental Study on the Durability of High Performance Shotcrete for Permanent Tunnel Support[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 431-435.
- [6] ASTM C1550, Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally-loaded Round Panel)[S].
- [7] 毕远志, 孔一凡, 蔡东红, 等. 高韧性纤维混凝土在深部软岩巷道支护中的应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1969-1974.
- [8] BI Yuan-zhi, KONG Yi-fan, CAI Dong-hong, et al. Application of High Toughness Fibers Concrete in Deep Soft Rock Roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1969-1974.
- [9] MALMGREN L, NORDLUND E. Behaviour of Shotcrete Supported Rock Wedges Subjected to Blast-induced Vibrations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(4): 593-615.
- [10] DENG Z C, SHI F, YIN S, et al. Characterisation of Macro Polyolefin Fibre Reinforcement in Concrete Through Round Determinate Panel Test[J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 229-235.
- [11] 宿辉, 汪健, 李向辉, 等. 不同温度下的喷射混凝土粘结强度实验及数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(36): 231-233, 193.
SU Hui, WANG Jian, LI Xiang-hui, et al. Experiment and Numerical Modeling of Bonding Strength of Concrete and Rock Under Different Temperature[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(36): 231-233, 193.
- [12] WANG P M, LIU X P. Effect of Temperature on the Hydration Process and Strength Development in Blends of Portland Cement and Activated Coal Gangue or Fly Ash[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2011, 12(2): 162-170.
- [13] 赵军, 缪昌国, 姚如胜. 高强混凝土巴西圆盘动态劈裂试验[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2017, 38(1): 56-60.
ZHAO Jun, MIAO Chang-guo, YAO Ru-sheng. Brazilian Disc Dynamic Split Test of High Strength Concrete[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2017, 38(1): 56-60.
- [14] 向达, 王志华, 王根伟. 混凝土动态劈裂试验中的惯性效应研究[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(2): 237-242.
XIANG Da, WANG Zhi-hua, WANG Gen-wei. Investigation on Inertia Effect in the Dynamic Splitting Test of Concrete[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(2): 237-242.
- [15] 张华, 郭继鑫, 傅玉珍, 等. 冲击作用下混凝土裂纹扩展试验研究及数值模拟[J]. 振动与冲击, 2016, 35(17): 107-112.
ZHANG Hua, GUO Ji-xin, FU Yu-zhen, et al. Tests and Simulation for Concrete Crack Propagation Under Impact Load[J]. Journal of Vibration and Shock,

- 2016,35(17):107-112.
- [15] LIU X P, WANG P M, DING M J. Hydration Process in Portland Cement Blended with Activated Coal Gangue[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2011, 12(7): 503-510.
- [16] 樊 鸿, 张 盛, 王启智. 用直裂缝平台巴西圆盘确定混凝土的动态起裂韧度[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1234-1240.
- FAN Hong, ZHANG Sheng, WANG Qi-zhi. Determination of Dynamic Initiate Toughness of Concrete Using Cracked Straight-through Flattened Brazilian Disc[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1234-1240.
- [17] 曹腾腾. 沥青混凝土面板防渗层圆盘试验的应变计算方法[J]. 中国水能及电气化, 2016(8): 52-57, 42.
- CAO Teng-teng. Strain Calculation Method of Asphalt Concrete Panel Impervious Layer Disc-type Test [J]. China Water Power & Electrification, 2016(8): 52-57, 42.
- [18] 丁一宁, 任县伟, 李 冬. 结构型钢纤维对混凝土单裂缝渗透特性的影响[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 13-20.
- DING Yi-ning, REN Xian-wei, LI Dong. Investigation of the Fiber Effect on the Permeability of Cracked Concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(1): 13-20.
- [19] BARSBY C L. Toughness Based Analysis and Design of Fiber Reinforced Concrete[D]. Phoenix: Arizona State University, 2011.
- [20] 徐 磊, 庞建勇, 张金松, 等. 聚丙烯纤维混凝土喷层支护技术研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 150-155.
- XU Lei, PANG Jian-yong, ZHANG Jin-song, et al. Research and Application of Polypropylene Fiber Concrete Shotcrete Support Technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 150-155.
- [21] CIANCIO D, MAZZOTTI C, BURATTI N. Evaluation of Fibre-reinforced Concrete Fracture Energy Through Tests on Notched Round Determinate Panels with Different Diameters[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 86-95.
- [22] 阎培渝, 郑 峰. 水泥基材料的水化动力学模型[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(5): 555-559.
- YAN Pei-yu, ZHENG Feng. Kinetics Model for the Hydration Mechanism of Cementitious Materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(5): 555-559.
- [23] 吴爱祥, 孙 伟, 韩 斌, 等. 温度对寒冷矿区湿喷支护强度影响及工程应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(5): 697-705.
- WU Ai-xiang, SUN Wei, HAN Bin, et al. Study on the Influence of Temperature on the Strength of Wet Shotcreting in Cold Mining Areas & Its Application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(5): 697-705.