

纤维喷射混凝土硬化对隧道围岩的支护作用

侯伟¹,张露晨^{2*},王子方¹,王鹏程³,王修伟³

1. 山东高速基础设施建设有限公司,山东 济南 250013;2. 山东交通学院 交通土建工程学院,山东 济南 250357;
3. 山东大学 齐鲁交通学院,山东 济南 250100

摘要:为解决喷射混凝土在隧道新奥法施工中易开裂、强度低、支护作用不清晰等问题,研制一种新型无碱液体速凝剂,测定净浆凝结时间和砂浆强度。在喷射混凝土中掺入聚丙烯粗纤维和无碱液体速凝剂,进行喷射混凝土力学性能试验研究;考虑纤维喷射混凝土硬化规律,采用离散单元程序法(universal distinct element code, UDEC)分析纤维喷层对隧道围岩的支护作用。研究表明:此无碱液体速凝剂能有效加快混凝土凝结时间,减少喷射混凝土后期强度损失;聚丙烯粗纤维可有效提高喷射混凝土的强度和韧性;纤维喷射混凝土随时间硬化,喷层有让压卸载作用,有利于稳定支护结构。掺入聚丙烯粗纤维和研制的无碱液体速凝剂有效提高了喷射混凝土的强度和韧性,能更好地发挥喷射混凝土衬砌结构对隧道围岩的支护作用。在高地应力、大变形隧道施工中,聚丙烯粗纤维喷射混凝土具有广泛的应用前景。

关键词:纤维喷射混凝土;隧道工程;无碱液体速凝剂;围岩支护;喷层硬化;UDEC

中图分类号:U454;TU528.53

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)02-0081-08

引用格式:侯伟,张露晨,王子方,等.纤维喷射混凝土硬化对隧道围岩的支护作用[J].山东交通学院学报,2022,30(2):81-88.

HOU Wei, ZHANG Luchen, WANG Zifang, et al. Supporting effect of fiber shotcrete hardening on tunnel surrounding rock[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(2): 81-88.

0 引言

喷射混凝土广泛应用于钻爆法施工的隧道围岩支护中,与锚杆、钢筋网、钢拱架等组成联合支护,形成初支结构,对维护围岩稳定起到关键作用。喷射混凝土是将水泥、砂子、石子、水和外加剂按照一定比例混合,采用喷射机通过高压空气喷射到围岩表面,不需人工振捣,混凝土可快速凝结硬化,1 d 抗压强度为 10 MPa 左右^[1-3]。喷射混凝土的早期强度高,可有效抑制开挖洞室的围岩变形,发挥围岩的自撑能力。速凝剂是喷射混凝土中最重要的外加剂,可提高混凝土的早期强度,并有效提高一次喷层的厚度。目前,液体速凝剂应用较多,配合湿喷混凝土使用。速凝剂主要分为有碱和无碱 2 种:有碱液体速凝剂使混凝土后期强度损失严重,并对人体产生危害,目前使用量逐渐减少;无碱液体速凝剂对混凝土和人体无害,发展较为迅速。周博儒等^[4]采用硫酸铝、硫酸镁、氟硅酸镁、磷酸等材料合成了一种新型无碱液体速凝剂,并研究了不同组分对无碱液体速凝剂性能的影响,该速凝剂与水泥的最佳质量比为 4% 时具有良好的促凝效果及砂浆强度比。关业程等^[5]研究硫酸铝类无碱液体速凝剂的促凝机理,发现速凝剂掺量越大,凝结时间越短,此类速凝剂对混凝土的 28 d 抗压强度有一定影响,硫铝酸盐类速凝剂促进短时间内大量生成钙矾石,并吸收水分,使水泥浆快速硬化。李悦等^[6]总结喷射混凝土用速凝剂的研究进展,分析

收稿日期:2021-10-09

基金项目:山东交通学院博士科研启动基金项目(BS201901004)

第一作者简介:侯伟(1979—),男,山东潍坊人,高级工程师,主要研究方向为公路工程,E-mail:30217087@qq.com。

* 通信作者简介:张露晨(1988—),男,山东菏泽人,工学博士,主要研究方向为隧道及地下工程围岩稳定性控制与材料研发,E-mail:271539204@qq.com。

各类速凝剂的特性和机理,指出速凝剂发展中存在产品性能评价指标不完善、使用有毒原料、促凝机理不确定等问题,并探讨速凝剂发展趋势。仇影等^[7]以纳米活性氧化铝和改性醇胺为主要材料制成了一种无碱液体速凝剂,与水泥的质量比为6%时,能较好地满足规范要求。刘玮等^[8]采用超细硫酸铝、氟硅酸镁、固体醇胺为主要原料,制备了一种干湿两用型粉状无碱速凝剂,该速凝剂溶解在水中可形成液体速凝剂,具有良好的水泥适应性。目前市面上的无碱液体速凝剂仍存在掺量大、促凝效果不好、适应性和稳定性差、含有毒物质等问题^[9-11],需要研制新型速凝剂代替现有产品,加强喷层的支护作用。

在高地应力、大变形等围岩状态下,普通喷射混凝土层易开裂、破碎,在混凝土中掺入纤维能有效提高其韧性。付玉军等^[12]研究玄武岩纤维对喷射混凝土性能的影响,并通过试验确定了掺加 3 kg/m^3 纤维对巷道支护具有良好的效果。罗洪林等^[13]研究聚丙烯纤维长径比对混凝土力学性能影响,发现聚丙烯纤维直径 $450\ \mu\text{m}$ 时可明显提高基体的力学强度,合理的长径比为 $80\sim 100$ 。周红芳^[14]研究和探讨高弹性模量聚乙烯醇合成纤维喷射混凝土的抗裂性能,高弹性模量PVA合成纤维可有效提高混凝土的抗裂强度,但纤维需均匀分散。部分学者研究喷射混凝土对围岩的支护作用:张顶立等^[15]提出隧道支护的本质作用为调动和协助围岩承载,并提出了隧道支护结构体系协同优化设计方法;张德华等^[16]考虑喷射混凝土随时间的硬化规律,对高应力隧道初期支护进行三维仿真模拟,建立了适合于高应力隧道的围岩支护特征曲线。对于纤维喷射混凝土,现场应用案例较少,目前主要存在纤维不易分散,混凝土基体分布不均匀,纤维的增韧效果不明显等问题。喷射混凝土层对围岩的支护作用机理不明确,将制约隧道支护技术的发展。

本文研发一种新型无碱液体速凝剂,进行凝结时间试验和砂浆强度试验。在喷射混凝土中掺入聚丙烯粗纤维,并进行室内力学试验,寻找纤维的最佳掺量,以期提高喷射混凝土的抗韧性能。考虑喷射混凝土随时间的硬化规律,采用数值模拟法,研究纤维喷射混凝土层对隧道围岩的支护效果。

1 无碱液体速凝剂

无碱液体速凝剂的主要成分为溶解度较低的硫酸铝,速凝剂与水泥的质量比一般为 $7\%\sim 12\%$ 。无碱液体速凝剂中铝离子为主要促凝组分,提高铝离子的质量分数并保证溶液的稳定性是配制速凝剂的主要目的。

1.1 主要材料

新型无碱液体速凝剂的主要材料包括硫酸铝、活性氢氧化铝、醇胺、酰胺和稳定剂。

硫酸铝选用聚合硫酸铝, Al_2O_3 的质量分数大于 18% ,普通工业级硫酸铝中 Al_2O_3 的质量分数一般为 $15\%\sim 16\%$,在速凝剂溶液中的质量分数为 $40\%\sim 60\%$ 。添加活性氢氧化铝可提高溶液中铝离子的含量,粉状无定形氢氧化铝比结晶氢氧化铝的溶解性更好,在速凝剂溶液中氢氧化铝的质量分数为 $5\%\sim 25\%$ 。二乙醇胺是一种表面活性剂,促进硫酸铝和氢氧化铝的溶解。三乙醇胺是一种早强剂,与铝离子形成易溶于水的络合离子,降低铝离子的聚合沉淀,起到稳定剂的作用。聚丙烯酰胺是一种增稠剂,提高溶液的黏聚性,有利于减少喷射混凝土回弹。稳定剂促使硫酸铝和氢氧化铝充分溶解,防止硫酸铝析晶和铝离子水解聚沉,提高溶液中铝离子的质量浓度。在现场喷射施工时,采用无碱液体速凝剂确保不产生混凝土坍塌现象。

1.2 合成步骤

称取一定量的水并加热至 $60\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$,分多次加入硫酸铝和活性氢氧化铝,并进行高速剪切搅拌;再加入二乙醇胺和稳定剂,温度控制在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,搅拌 $90\sim 150\text{ min}$,初步得到无碱速凝剂母液;对无碱速凝剂母液进行复配,加入三乙醇胺、聚丙烯酰胺,温度控制在 $40\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$,快速搅拌 $60\sim 90\text{ min}$,过滤后得到新型液体速凝剂。经测定,该无碱液体速凝剂质量分数大于 65% 时溶液保持稳定不结晶。

1.3 室内试验

采用符合文献^[17]的标准砂及混凝土外加剂检验专用基准水泥,化学分析结果及矿物组成见表1。

表1 基准水泥化学分析结果及矿物组成

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	NaOeq	f- CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
质量分数/%	21.86	4.56	3.47	65.44	2.60	0.37	0.58	0.93	59.88	17.49	6.22	10.55

速凝剂与水泥的质量比为4%~8%,按照文献[18]的要求,测定掺加无碱液体速凝剂的水泥净浆凝结时间和水泥砂浆抗压强度,试验结果如表2所示。

表2 掺加无碱液体速凝剂的水泥净浆凝结时间和水泥砂浆抗压强度

速凝剂与水泥的质量比/%	初凝时间/s	终凝时间/s	水泥砂浆抗压强度/MPa		砂浆28 d 抗压强度比/%
			1 d	28 d	
0	3000	22 200	8.3	46.7	100
4	340	720	9.4	47.2	101
5	230	390	10.8	47.6	102
6	195	325	11.6	48.1	103
7	150	310	12.5	49.0	105
8	130	270	13.3	48.6	104

注:抗压强度比为速凝剂与水泥的质量比不同的水泥砂浆的抗压强度分别与未掺加速凝剂净浆的抗压强度之比。

由表2可知:无碱液体速凝剂与水泥的质量比为4%时,凝结时间无法满足文献[18]的标准要求;无碱液体速凝剂与水泥的质量比为5%~8%时,凝结时间满足标准要求;无碱液体速凝剂与水泥的质量比越大,促凝效果越好,养护时间为1 d的水泥砂浆抗压强度越高。掺加无碱液体速凝剂的砂浆28 d抗压强度比均大于1,说明水泥砂浆后期强度有一定程度的提高,这有利于发挥喷层的支护作用。考虑成本,实际使用时,根据现场情况确定速凝剂与水泥的质量比一般为5%~7%。

2 纤维喷射混凝土的力学性能

为提高喷射混凝土的力学性能,在混凝土中加入纤维。目前喷射混凝土中主要采用的钢纤维存在易锈蚀,在喷射混凝土层中分布不均匀等问题。其他纤维如玻璃纤维、芳纶纤维、碳纤维、玄武岩纤维等均存在不易分散、成本高等问题。本文选择聚丙烯粗纤维进行研究,该纤维在混凝土中易分散、易搅拌、耐腐蚀、强度高^[19-22]。将聚丙烯粗纤维按不同掺入密度掺入混凝土进行力学性能试验,确定纤维喷射混凝土的最佳配合比。在喷射混凝土中加入聚丙烯粗纤维和无碱液体速凝剂,配制聚丙烯纤维喷射混凝土,能有效抑制喷层开裂,提高喷层对围岩的支护效果。

2.1 试验材料

选用P. O. 42.5硅酸盐水泥、中粗砂(细度模数大于2.5)、粒径5~10 mm的碎石,外加剂采用聚羧酸类减水剂,与水泥的质量比为0.8%,减水率为18%~25%。选用的聚丙烯粗纤维密度为0.91 g/cm³,长25 mm,呈波纹形,断裂强度大于560 MPa,弹性模量大于5 GPa,当量直径为0.8~1.2 mm,抗酸碱腐蚀。

2.2 试验方法

采用现场混凝土强度为C25的配合比,水泥、中粗砂、碎石、水的质量比为460:950:920:207。混凝土分别掺入聚丙烯粗纤维2、3、4、5、6 kg/m³,测定混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗弯强度。

制作150 mm×150 mm×150 mm的立方体块,按照文献[23]要求进行试验,采用型号为YAW-2000的全自动试验机测量抗压强度,加荷速度为0.5~0.8 MPa/s,测量劈裂抗拉强度的加荷速度为0.05~0.08 MPa/s。采用型号为WE-300B的电液式万能试验机进行四分点加载弯曲试验,试件选用

150 mm×150 mm×600 mm 的梁体,加荷速度为 0.05~0.08 MPa/s。

2.3 试验结果及分析

保持混凝土的配合比不变,分别测定不同聚丙烯粗纤维密度混凝土的 7、28 d 的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗弯强度,如表 3 所示。

表 3 不同聚丙烯粗纤维掺入密度混凝土的 7、28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度、抗弯强度

纤维掺入 密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa		劈裂抗拉强度/MPa		28 d 抗弯强度/ MPa
	7 d	28 d	7 d	28 d	
0	33.2	45.6	2.7	3.6	2.6
2	33.8	46.8	2.9	3.8	2.9
3	34.7	48.3	3.2	4.3	3.6
4	35.5	48.4	3.6	4.9	4.1
5	34.2	47.3	3.8	5.1	4.3
6	32.5	46.2	4.0	5.2	4.4

由表 3 可知:聚丙烯粗纤维掺入密度为 4 kg/m³ 时混凝土的抗压强度最高,7、28 d 混凝土的抗压强度比未掺加聚丙烯粗纤维的混凝土分别提高了 6.9%、6.1%,加入纤维对提高抗压强度作用不明显;聚丙烯粗纤维掺入密度分别为 5、6 kg/m³ 时,混凝土的抗压强度下降,这是因为纤维过多破坏了混凝土的整体性。聚丙烯粗纤维掺入密度越大,混凝土的劈拉强度也越大;聚丙烯粗纤维掺入密度为 6 kg/m³ 时,混凝土 28 d 劈裂抗拉强度比未掺加纤维时提高了 44.4%;聚丙烯粗纤维掺入密度为 4 kg/m³ 时,劈裂抗拉强度提高不明显。随着聚丙烯粗纤维掺入密度的增大,混凝土的抗弯强度增大;聚丙烯粗纤维掺入密度为 6 kg/m³ 时,混凝土 28 d 抗弯强度比不掺加聚丙烯粗纤维提高了 69.2%。

因此,聚丙烯粗纤维掺入密度为 4 kg/m³ 时,混凝土力学性能较好,且能控制成本。

3 考虑硬化的喷层支护作用

3.1 混凝土硬化规律曲线

在隧道支护中,喷射混凝土的早期抗压强度影响较大。在养护前 3 d 内,隧道的收敛变形发展变化较快,考虑喷射混凝土的硬化过程可较准确地分析喷射混凝土与围岩的相互作用关系^[24-25]。

采用现场 C25 喷射混凝土配合比,加入研制的无碱液体速凝剂,聚丙烯粗纤维掺入密度为 4 kg/m³,进行喷射混凝土大板试验,测得 9 个试块 8、12 h 与 1、3、7、28 d 的单轴抗压强度-时间回归曲线、弹性模量-时间回归曲线如图 1、2 所示。

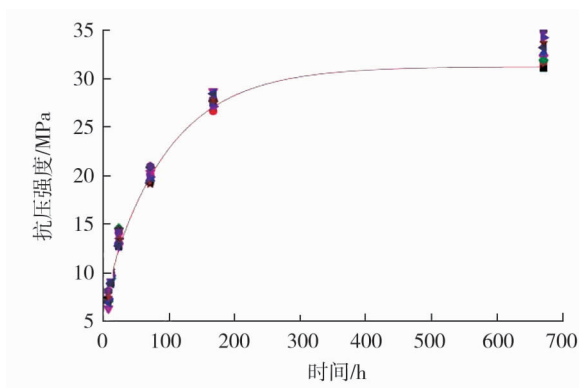


图 1 纤维喷射混凝土单轴抗压强度-时间回归曲线

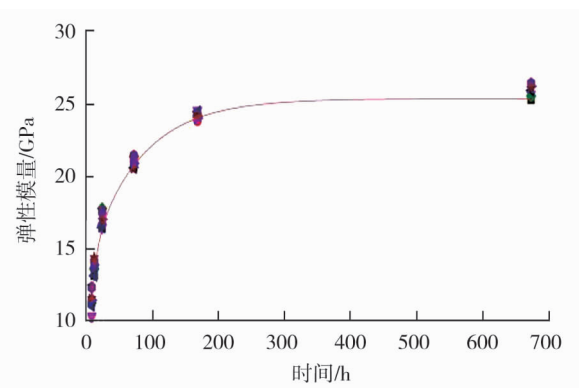


图 2 纤维喷射混凝土弹性模量-时间回归曲线

由图 1、2 可知,掺入研制的无碱液体速凝剂和聚丙烯粗纤维能有效提高喷射混凝土的强度。由此得到聚丙烯粗纤维喷射混凝土回归后的强度-时间曲线公式和弹性模量-时间曲线公式分别为:

$$\{F_c(t)\} = 31.2(1 - 0.27e^{-0.18|t|} - 0.77e^{-0.01|t|}), \quad (1)$$

$$\{E(t)\} = 25.4(1 - 0.39e^{-0.127|t|} - 0.46e^{-0.013|t|}), \quad (2)$$

式中 t 为时间。

3.2 数值分析

采用通用离散单元程序法(universal distinct element code, UDEC)数值模拟软件模拟聚丙烯粗纤维喷射混凝土的支护作用。喷射混凝土的抗压强度随着时间的延长而增大,并最终达到稳定值,一般取 28 d 抗压强度为最终结果。在模拟喷层对围岩的支护时,往往忽略喷射混凝土的硬化过程,直接采用喷射混凝土的 28 d 抗压强度进行模拟,造成模拟结果与实际数据有一定的差距。因此,数值分析时需考虑喷层的硬化过程规律,与不考虑硬化过程进行对比分析,引入式(1)(2),得到模拟结果。

3.2.1 围岩塑性区

通过数值模拟分析,分别得到不考虑喷层硬化、考虑喷层硬化时纤维喷射混凝土层支护的围岩塑性区范围,如图 3 所示。

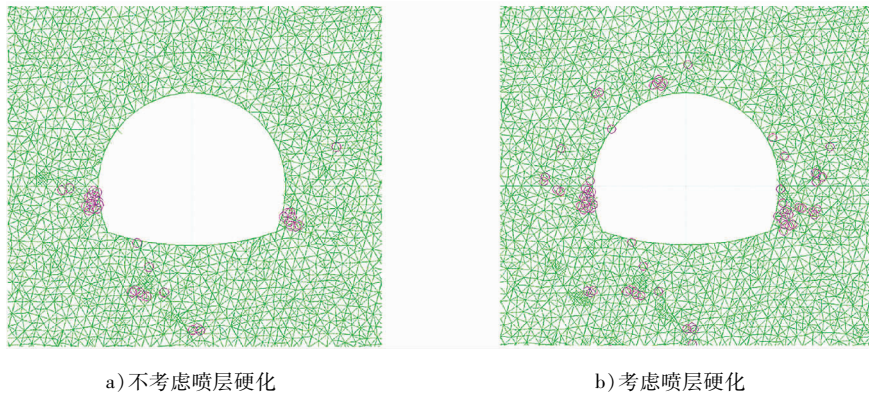


图 3 围岩塑性区范围

由图 3 可知:考虑喷层硬化时,围岩的塑性区范围比不考虑喷层硬化时大,塑性区多分布在拱脚和边墙附件;不考虑硬化时,塑性区主要分布在边墙附件。喷射混凝土层在硬化过程中,围岩同时收敛,二者协同变形,喷射混凝土层起到了让压卸载的作用,有利于围岩的应力释放。

3.2.2 喷层轴力

通过数值模拟分析得到不考虑喷层硬化和考虑喷层硬化时的纤维喷射混凝土层的轴力,见图 4。

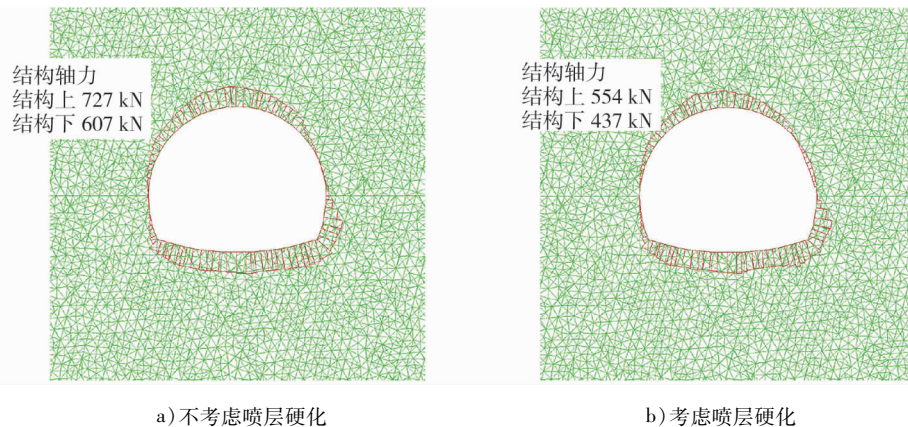


图 4 纤维喷射混凝土层的轴力

由图 4 可知:不考虑喷层硬化时纤维喷射混凝土喷层的最大轴力为 728 kN,考虑喷层硬化时喷层的

最大轴力为 554 kN。考虑喷层硬化时,喷层与围岩共同变形,纤维混凝土喷层具有良好的韧性,围岩压力得到有效释放,作用于喷层上的应力相应减小,有利于支护结构的稳定。

在隧道开挖初期,考虑喷射混凝土硬化有利于喷层与围岩产生协同变形,起到让压卸载的作用,减少支护结构的受力。但应加强支护结构强度,否则可能扩大围岩塑性区,增大围岩位移,引起围岩失稳。

4 结论

1) 研制一种无碱液体速凝剂,与水泥的最佳质量比为 5%~7%,初凝时间约为 3 min,终凝时间约为 5 min,水泥砂浆后期抗压和抗弯强度有所提高,该液体速凝剂有较好的稳定性和水泥适应性。

2) 对纤维喷射混凝土进行室内抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验和抗弯强度试验,可知在混凝土中掺加聚丙烯粗纤维的掺入密度为 4 kg/m³ 效果最佳。

3) 采用离散单元程序法数值软件计算模拟纤维喷射混凝土对围岩的支护作用,可知:考虑喷层混凝土硬化时围岩塑性区范围比不考虑喷层硬化时大,这是因为喷层能起到让压卸载的作用,有利于围岩所受应力的释放;考虑硬化时喷层轴力较小,说明喷层韧性较好,与围岩协同变形,有利于支护结构的稳定。

本文主要针对聚丙烯粗纤维喷射混凝土及其硬化对隧道围岩的支护作用,随着可用纤维类型的增多,还需进一步研究不同类型纤维喷射混凝土的性能试验,对纤维的力学性能增强效果进行数值分析。对喷层与围岩的相互作用机理仅考虑喷层随时间的硬化规律,未全面反应喷层的支护作用,还需从支护结构与围岩的接触面等方面进行考虑,以便进一步明确支护与围岩的相互作用。

参考文献:

- [1] 徐帮树,杨为民,王者超,等. 公路隧道型钢喷射混凝土初期支护安全评价研究[J]. 岩土力学,2012,33(1):248-254.
XU Bangshu, YANG Weimin, WANG Zhechao, et al. Study of initial support safety evaluation about shape steel reinforced shotcrete in highway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 248-254.
- [2] 杨力远,田俊涛,杨艺博,等. 喷射混凝土液体速凝剂研究现状[J]. 隧道建设,2017,37(5):543-552.
YANG Liyuan, TIAN Juntao, YANG Yibo, et al. State-of-art of research on liquid accelerators for shotcrete[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(5): 543-552.
- [3] 张露晨,李树忱,路为,等. 隧道围岩喷护速凝增强效应试验研究及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(10):2106-2114.
ZHANG Luchen, LI Shuchen, LU Wei, et al. Experimental study and engineering application of quick setting enhancement effect of shotcrete in tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2106-2114.
- [4] 周博儒,王睿,高飞,等. 新型无碱液体速凝剂的制备及性能评价[J]. 新型建筑材料,2021,48(5):29-33.
ZHOU Boru, WANG Rui, GAO Fei, et al. Preparation and performance evaluation on a new type of alkali-free liquid accelerator admixture[J]. New Building Materials, 2021, 48(5): 29-33.
- [5] 关业程,沈卫国,李志堂,等. 硫酸铝类无碱速凝剂促凝机理研究[J]. 武汉理工大学学报,2021,43(4):1-5.
GUAN Yecheng, SHEN Weiguo, LI Zhitang, et al. Study on accelerating mechanism of aluminum sulfate-based alkali-free accelerator[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021, 43(4): 1-5.
- [6] 李悦,蔡博群,吴玉生,等. 喷射混凝土用速凝剂的研究进展[J]. 混凝土,2020(9):121-125.
LI Yue, CAI Boqun, WU Yusheng, et al. Research progress of flash setting admixtures for shotcrete[J]. Concrete, 2020(9): 121-125.
- [7] 仇影,倪锐. 喷射混凝土用无碱液体速凝剂的制备及其机理研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(7):2113-2119.
QIU Ying, NI Rui. Study on preparation and mechanism of alkali-free liquid accelerator for sprayed concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(7): 2113-2119.
- [8] 刘玮,王子明,王庄,等. 干湿两用型粉状无碱速凝剂的制备与性能研究[J]. 新型建筑材料,2021,48(7):156-158.
LIU Wei, WANG Ziming, WANG Zhuang, et al. Research on synthesis and properties of powder alkali-free accelerator for dry

- and wet shotcrete[J]. *New Building Materials*, 2021, 48(7): 156–158.
- [9] 陈拥军. 新型超微外加剂在大断面隧道机械化施工中的应用[J]. *铁道建筑技术*, 2019(9): 30–33.
CHEN Yongjun. Application of new ultrafine admixture for large section tunnel with mechanized construction[J]. *Railway Construction Technology*, 2019(9): 30–33.
- [10] 霍涛. 喷射混凝土用速凝剂概述及其促凝机理[J]. *铁道建筑技术*, 2016(11): 120–122.
HUO Tao. Summary and accelerating mechanism of setting accelerator for shotcrete[J]. *Railway Construction Technology*, 2016(11): 120–122.
- [11] 蒋敏, 杨春明, 尹成杰, 等. 无碱无氯液体速凝剂聚合硅酸硫酸铝的制备及机理研究[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2016, 39(2): 35–42.
JIANG Min, YANG Chunming, YIN Chengjie, et al. Study of preparation and mechanism of alkali-free and chlorine-free liquid accelerator polyaluminium silicate sulfates[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2016, 39(2): 35–42.
- [12] 付玉军, 韩振宇, 陈新明. 玄武岩纤维喷射混凝土力学性能及工程应用研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2019(8): 50–53.
- [13] 罗洪林, 杨鼎宜, 周兴宇, 等. 聚丙烯纤维长径比对混凝土力学性能的影响研究[J]. *混凝土*, 2019(9): 25–30.
LUO Honglin, YANG Dingyi, ZHOU Xingyu, et al. Study on effect of length-to-diameter ratio of polypropylene fiber on mechanical properties of concrete[J]. *Concrete*, 2019(9): 25–30.
- [14] 周红芳. 木寨岭公路隧道高弹模PVA合成纤维喷射混凝土抗裂技术与探讨[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(4): 490–495.
ZHOU Hongfang. Experimental study on crack resistance technology of PVA synthetic fiber shotcrete with high elastic modulus for Muzhailing Highway Tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(4): 490–495.
- [15] 张顶立, 孙振宇, 侯艳娟. 隧道支护结构体系及其协同作用[J]. *力学学报*, 2019, 51(2): 577–593.
ZHANG Dingli, SUN Zhenyu, HOU Yanjuan. Tunnel support structure system and its synergistic effect[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(2): 577–593.
- [16] 张德华, 刘士海, 任少强. 基于围岩-支护特征理论的高地应力软岩隧道初期支护选型研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(1): 139–148.
ZHANG Dehua, LIU Shihai, REN Shaoqiang. Research on selection of preliminary support for tunnel in high ground-stress soft rock based on surrounding rock-support characteristic curve theory[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(1): 139–148.
- [17] 水泥强度试验用标准砂:GB 178—1997[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [18] 全国水泥制品标准化技术委员会(SAC/TC 197). 喷射混凝土用速凝剂:GB/T 35159—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [19] 欧阳幼玲, 陈迅捷, 陆采荣, 等. 钢纤维和仿钢纤维喷射混凝土性能[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(增刊2): 44–48.
OUYANG Youling, CHEN Xunjie, LU Cairong, et al. Properties of steel fiber and macro-synthetic fiber reinforced shotcrete[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2010, 40(Suppl. 2): 44–48.
- [20] 徐成辉. 峰后碎裂岩体破坏能量转化与纤维喷射混凝土支护特性研究[D]. 济南:山东大学,2015.
XU Xianhui. Study on energy conversion of post-peak fractured rock mass failure and the supporting characteristics of fiber shotcrete[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [21] 李冲志. 纤维喷射混凝土的力学特性试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2013.
LI Congzhi. Experimental study on mechanical properties of fiber shotcrete[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.
- [22] 庞建勇, 徐道富. 聚丙烯纤维混凝土喷层支护技术及其在顾桥矿区的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 1073–1077.
PANG Jianyong, XU Daofu. Support technology of polypropylene fiber concrete shotcrete layer and its application to Guqiao Coal Mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 1073–1077.
- [23] 中国工程建设标准化协会混凝土结构委员会(TC/5). 纤维混凝土试验方法标准:CECS 13—2009[S]. 北京:中国计划

出版社,2010.

[24]张德华,刘士海,任少强. 隧道喷射混凝土强度增长规律及硬化速度对初期支护性能影响试验研究[J]. 岩土力学, 2015,36(6):1707-1713.

ZHANG Dehua, LIU Shihai, REN Shaoqiang. Experimental study of effects of strength increase and hardening rate of shotcrete on its early supporting performances in tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1707-1713.

[25]陈峰宾. 隧道初期支护与软弱围岩作用机理及应用[D]. 北京:北京交通大学,2012.

CHEN Fengbin. Application and mechanism of initial support and surrounding rock in weak rock tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

Supporting effect of fiber shotcrete hardening on tunnel surrounding rock

HOU Wei¹, ZHANG Luchen^{2*}, WANG Zifang¹, WANG Pengcheng³, WANG Xiuwei³

1. Shandong Hi-Speed Infrastructure Construction Co., Ltd., Jinan 250013, China;

2. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250100, China

Abstract: To solve the problems, such as easy cracking, low strength and unclear supporting function, of shotcrete in procedure of tunnel construction by NATM, a new alkali-free liquid accelerator is developed. The paste setting time and mortar strength are measured. Polypropylene coarse fibers are added into shotcrete to carry out mechanical properties experimental study. Considering the hardening rule of shotcrete, using universal distinct element code (UDEC) method, the supporting effect of shotcrete on tunnel surrounding rock is analyzed. The results show that the alkali-free liquid accelerator can effectively reduce the setting time and decrease the later strength loss of shotcrete, the addition of polypropylene coarse fiber can effectively improve its strength and toughness. Considering the hardening process of fiber shotcrete with time, the shotcrete spray layer can relief pressure, which is conducive to the stability of support structure. Adding polypropylene coarse fiber and the developed alkali free liquid accelerator can effectively improve the strength and toughness of shotcrete, and can better support the shotcrete lining structure on the surrounding rock of the tunnel. Therefore, polypropylene coarse fiber shotcrete has a wide application prospect in tunnel construction with high in-situ stress and large deformation.

Keywords: fiber shotcrete; tunnel engineering; alkali-free liquid accelerator; surrounding rock support; spray layer hardening; UDEC

(责任编辑:郭守真)