

喷射纤维混凝土在硫酸盐腐蚀环境下的劣化规律

梁树锋

(中铁十八局集团 建筑安装工程有限公司,天津 300308)

摘要:为研究喷射聚丙烯粗纤维混凝土在隧道腐蚀环境下应用的可行性,通过测试不同纤维掺量喷射混凝土的力学性能和在浓度为 5% 的硫酸盐溶液中长期浸泡条件下抗腐蚀性能,研究其在地下水腐蚀环境下的适用性和耐久性。并根据试验结果,探寻聚丙烯粗纤维混凝土的腐蚀劣化规律,在此基础上可对聚丙烯粗纤维混凝土寿命进行预测。研究表明:聚丙烯粗纤维掺量为 8 kg/m^3 左右时,喷射混凝土的力学和抗腐蚀性能均表现良好,试验成果可以作为喷射聚丙烯粗纤维混凝土耐久性定量设计的依据。

关键词:隧道;聚丙烯粗纤维;喷射混凝土;硫酸盐腐蚀;劣化规律

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2019)01-0121-06

0 引言

当前,混凝土材料和结构设计方法正处在由单性能设计向多性能设计的过渡阶段。关于侵蚀环境条件下混凝土结构耐久寿命问题已成为国内外工程技术人员关注的热点^[1-5]。

目前,随着湿喷技术的发展、应用和推广,以及单层喷锚支护结构形式越来越受到地下结构研究人员的青睐,喷射纤维混凝土在隧道锚喷支护中的应用越来越广泛,国内外的隧道工程大量采用喷射纤维混凝土作为隧道的永久衬砌。大量的研究资料表明,在喷射纤维混凝土的应用中,主要以钢纤维为主。但由于钢纤维存在用量大、成本高、易腐蚀等缺点,严重影响了钢纤维混凝土的推广和进一步应用。鉴于此大量学者开始研究可以替代钢纤维的聚丙烯粗纤维,聚丙烯粗纤维具有易分散、造价低、耐腐蚀的优点,且其力学性质与钢纤维相差无几^[6-8]。

邓宗才等^[9]进行了粗合成纤维混凝土抗弯韧性、疲劳特性、冲击动载特性试验研究;王伯昕等^[10]研究了粗合成纤维混凝土抗裂与抗冲击性能;赵军等^[11]展开了高温后聚丙烯纤维高强混凝土力学性能。而对于单层衬砌的喷射聚丙烯粗纤维混凝土的耐腐蚀性能研究甚少。

本文相关研究旨在探明聚丙烯粗纤维混凝土耐腐蚀性能和劣化规律,为聚丙烯粗纤维在实际隧道锚喷支护结构中的应用提供一些理论和技术支撑。

1 聚丙烯粗纤维混凝土配合比设计

水泥采用 P. O42. 5,密度 $3\ 060 \text{ kg/m}^3$ 、细度 1. 46;粗骨料采用粒径为 5~12 mm 碎石(紧密堆积密度 $1\ 625 \text{ kg/m}^3$,表观密度 $2\ 719 \text{ kg/m}^3$;细骨料采用机制砂,细度模数 2. 75、紧密堆积密度 $1\ 980 \text{ kg/m}^3$ 、表观密度 $2\ 680 \text{ kg/m}^3$;硅粉采用优协 92U 硅粉, SiO_2 含量 92%,含水率 2%,比表面积 $20\ 000 \text{ m}^2/\text{kg}$;聚丙烯粗纤维采用深圳维克粗纤维,型号 WK-8,长度 30 mm,直径 0. 73 mm,平均抗拉强度 456 MPa,数量 55 990 根/kg。试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,混凝土试件养生方式为标准养生。

收稿日期:2018-04-08 网络出版日期:2019-02-10 责任编辑:车轩玉 DOI:10. 13319/j. cnki. sjztdxzb. 20180073

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13. 1402. N. 20190210. 1134. 009. html>

基金项目:河北省科技厅重点研发自筹经费课题(17275509);河北省人才工程培养经费资助科研项目(A2017002037);河北省教育厅高等学校科学技术研究重点项目(ZD2018232)

作者简介:梁树锋(1978—),男,高级工程师,研究方向为隧道工程施工与管理。E-mail:117464529@qq.com

梁树锋. 喷射纤维混凝土在硫酸盐腐蚀环境下的劣化规律[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2019,32(1):121-126.

据文献[12]~文献[13]的研究,综合考虑配合比的经济性、简易性、适用性,设计聚丙烯粗纤维混凝土和基准混凝土的配合比,根据经验水胶比选定为 0.48,根据密度填充试验得砂率为 50%,聚丙烯粗纤维和外加剂作为外掺材料不计入混凝土配合比中,基准混凝土表观密度为 2 350 kg/m³,单方基准混凝土材料用量为:水泥 390 kg、硅灰 40 kg、砂子 854 kg、石子 860 kg、拌合水 206 kg。单方喷射混凝土外加剂和粗纤维掺量见表 1。

表 1 单方喷射混凝土外加剂和纤维掺量

喷射混凝土类别	减水剂掺量/%	粗纤维掺量/kg
J1	0.80	0
C6	0.60	6
C8	0.65	8
C10	0.60	10

2 纤维掺量对混凝土性能的影响

2.1 纤维掺量对混凝土抗压强度的影响

试验中为了确保喷射纤维混凝土的质量,同时为保证纤维在混凝土中均匀分布,充分发挥其骨架作用,决定采用水泥裹砂法搅拌混凝土并适当的延长搅拌时间以确保纤维在混凝土中分散并能均匀分布。具体搅拌工艺如图 1 所示:先将纤维、砂子、70%的拌合用水和减水剂同时投入搅拌机中搅拌 30 s,然后向搅拌机中投入水泥搅拌 30 s,最后将碎石和剩余的 30%的拌合用水投入到搅拌机中搅拌 120 s。

对不同掺量聚丙烯粗纤维混凝土进行了抗压强度试验研究,试验结果如表 2 所示。

表 2 不同纤维掺量的喷射混凝土抗压强度试验结果

龄期/d	不同纤维掺量的喷射混凝土			
	J1	C6	C8	C10
1	15.1	11.0	12.0	10.7
3	26.0	19.8	21.6	19.1
7	32.8	25.1	27.7	23.2
14	34.9	27.6	35.7	26.6
28	37.0	32.1	38.9	31.3
56	45.7	37.2	47.6	36.3

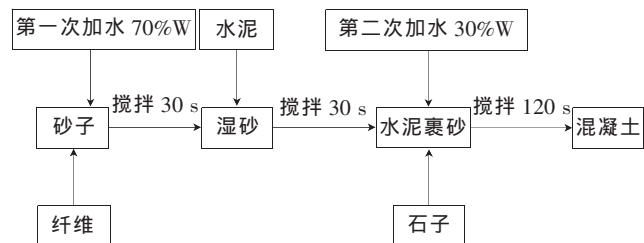


图 1 喷射纤维混凝土搅拌工艺流程

由表 2 可知,当基准混凝土中掺入一定量的聚丙烯粗纤维后可提高混凝土抗压强度,增强效果取决于纤维掺量。当聚丙烯粗纤维掺入量为 6% 时,混凝土早期强度和后期强度均有所降低;当掺入量为 8% 时,粗纤维混凝土后期抗压强度增强效果明显,这时纤维的阻裂作用起主导作用,纤维混凝土的抗压强度逐步提高,增强效果明显;当掺入量为 10% 时,纤维对混凝土的抗压强度开始下降,由于纤维体积率的提高,纤维与混凝土的界面过渡区的面积逐步增大,界面过渡区的负作用也开始逐渐显现。在基准混凝土配比确定的情况下,当纤维掺入量为 8% 时,纤维对混凝土的力学提高最显著且经济性适中。

2.2 纤维掺量对混凝土抗腐蚀性能的影响

为研究常年有地下水且水中含有硫酸根离子的隧道环境下喷射混凝土的耐腐蚀性能,将混凝土试件放入硫酸盐浓度为 10% 的溶液中浸泡,进行长期浸泡条件下喷射混凝土的抗硫酸腐蚀性能及其规律试验研究,试验结果如表 3 和图 2 所示。

长期浸泡条件下混凝土抗压强度耐蚀系数 $K = R_2/R_1$ 。其中, R_2 为混凝土在溶液中浸泡后的抗压强度; R_1 在清水中浸泡后的抗压强度。

表 3 长期浸泡条件下喷射混凝土抗硫酸盐腐蚀试验结果

喷射混凝土类别	浸泡天数/d	耐蚀系数/%	抗硫酸盐等级/(KS)
J1	150	81.11	150
C6	150	75.65	150
C8	150	77.87	150
C10	90	68.12	90

由表 3 可知,在 4 种喷射混凝土中,只有 C10 配比耐蚀性能未达到 150 d,其中 J1、C6、C8 在浸泡 150 d 后分别富余 6.11%、0.65%、2.78%,其中 J1 配比富余量最大,这是因为在浸泡后期对耐蚀系数起决定作用的是喷射混凝土中的过渡相,掺入纤维后对于腐蚀后期的混凝土来讲,增大了过渡相的体积,故 J1 在浸泡后期的抗腐蚀性能优于喷射粗纤维混凝土。

由图 2 可知,基准配合比随着浸泡天数的增加,耐蚀系数逐渐降低;C8 配比喷射纤维混凝土的耐蚀系数在浸泡前 60 d 中最大增长 7% 左右,当浸泡超过 60 d 后,耐蚀系数迅速降低。这主要因为混凝土劣化程度与环境水中的 SO_4^{2-} 浓度以及喷射混凝土的内部结构有关。28 d 龄期强度可间接证明 C8 配比喷射纤维混凝土孔隙率远远小于基准混凝土,所以在浸泡前 60 d 中,环境中的 SO_4^{2-} 进入喷射混凝土内部缓慢且浓度较低,生成的物质主要以针状的钙矾石为主,在腐蚀初始结晶物很少,混凝土的孔隙和空洞被这些结晶物填充而变得密实,此时,混凝土的强度甚至比未受侵蚀的混凝土强度有所增加。而对于基准混凝土,内部结构的孔隙率远远大于喷射粗纤维混凝土, SO_4^{2-} 迅速进入喷射混凝土内部,孔隙内部的 SO_4^{2-} 浓度较大,主要以钙矾石、石膏结晶侵蚀破坏为主,所以基准混凝土的耐蚀系数在浸泡前 60 d 中,抗压耐蚀系数逐渐降低。

一般情况下喷射混凝土微结构由骨料、水泥浆体、过渡相组成且过渡相是整个结构中的最薄弱的环节,在基准混凝土中掺入粗纤维,虽改善了整个结构的孔隙状态,但同时也增加了过渡区的体积。在持续的结晶作用下,浸泡 60 d 后喷射粗纤维混凝土的孔隙和毛细孔壁产生很大张力之后,喷射粗纤维混凝土水泥石结构组分破坏,其强度下降速度远大于基准混凝土。

3 混凝土硫酸盐腐蚀劣化规律^[14]

混凝土在硫酸盐腐蚀作用下的劣化是其自身结构的破损引起的,劣化过程就是其自身结构的损失过程,劣化量就是损失量。设 S_0 为混凝土初始物理量(抗压强度), S_n 为混凝土经过 n_d 浸泡后的未损伤量(残余抗压强度), λ_0 为劣化常数,则混凝土劣化方程

$$\frac{dS_n}{dn} = -\lambda_0(S_n - S_0) \quad (1)$$

式(1)可变为: $\frac{dS_n}{S_0} = -\lambda_0(\frac{S_n}{S_0} - 1)dn$,解此微分方程得

$$\frac{S_n}{S_0} - 1 = e^{-\lambda_0 n} + C \quad (2)$$

由边界条件时 $n=0$, $\frac{S_n}{S_0}=1$,故 $1+C=0$,劣化方程的终解为

$$\frac{S_n}{S_0} = e^{-\lambda_0 n} \quad (3)$$

混凝土未损失量是随初始物理量作自然规律劣化衰减,这就是混凝土的理论劣化方程。

对适量纤维掺量的喷射纤维混凝土抗压强度的变化是上升—稳定—下降的过程,设 $\lambda(n) = -\lambda_0 n$,混凝土硫酸盐腐蚀劣化方程为 $K_f = \frac{S_n}{S_0} = e^{-\lambda(n)}$, K_f 为混凝土经 n_d 浸泡后抗压强度的耐蚀系数, $\lambda(n)$ 为随浸泡天数变化的劣化系数。假设: $\lambda(n) = A + Bn + Cn^2 + Dn^3 + \dots$

由于混凝土受硫酸盐腐蚀劣化是抗压强度先升后降的过程,据此及函数性质, K_f 应满足如下边界条件:

- (1) 当 $n=0$ 时, $K_f=1$;
- (2) 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $K_f \rightarrow 0$;

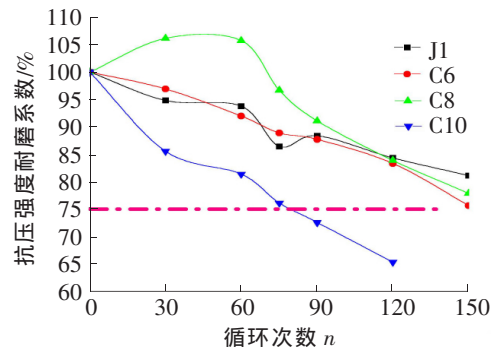


图 2 长期浸泡下喷射混凝土耐蚀系数时程曲线图

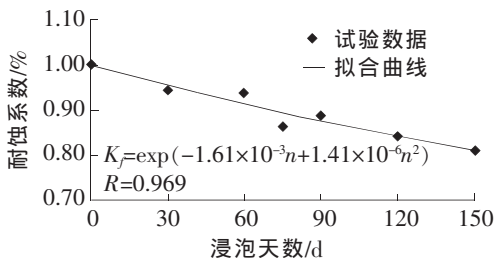
- (3)在整个函数区间 $[0, n]$ 内, $0 \leq K_f \leq 1$;
 (4)函数连续, $K_f' = 0$ 的点只有一个;
 (5)对于钢纤维混凝土在整个函数区间 $[0, n]$ 内, 二阶导数 $K_f'' < 0$ 。

依据以上条件可知喷射粗纤维劣化函数为: $\lambda(n) = Bn + Cn^2$, 所以混凝土的劣化函数为

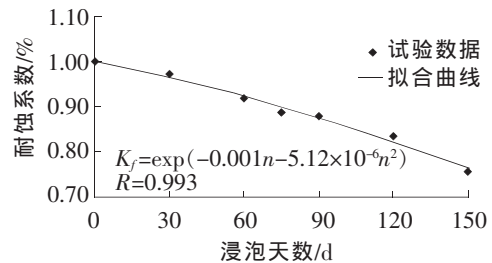
$$K_f = e^{Bn+Cn^2} \quad (4)$$

式中, K_f 为混凝土抗压强度耐蚀系数; n 为浸泡天数; B, C 为拟合参数。

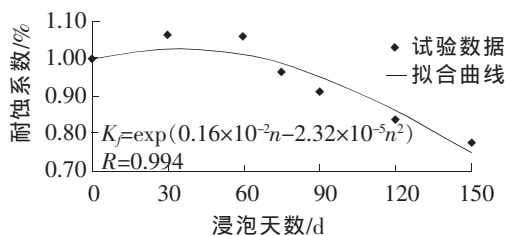
通过式(4)对试验数据拟合得到图 3~图 6。



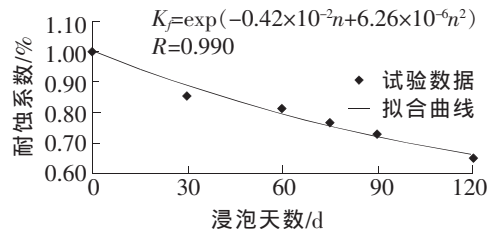
3 J1 配比喷射混凝土硫酸盐腐蚀劣化拟合曲线



C6 配比喷射混凝土硫酸盐腐蚀劣化拟合曲线



5 C8 配比喷射混凝土硫酸盐腐蚀劣化拟合曲线



C10 配比喷射混凝土硫酸盐腐蚀劣化拟合曲线

4 混凝土硫酸盐腐蚀寿命预测

国内外研究学者已对混凝土结构硫酸盐腐蚀失效机理进行了一些相关试验和理论研究, 但至今尚未形成较统一的耐久寿命预测模型。

4.1 寿命预测函数的建立^[15]

由前面理论推导出混凝土硫酸盐腐蚀的劣化方程为

$$K_f = e^{-\lambda_0 n} \quad (5)$$

式中, λ_0 为混凝土劣化常数, 它与混凝土的性能和组成密切相关; n 为浸泡天数。

假设混凝土在实验室硫酸盐腐蚀环境下浸泡 m d, 相当于隧道环境中含有硫酸盐地下水对混凝土的腐蚀作用 1 a, 那么混凝土抗硫酸盐腐蚀的时间为 $t = n/m$, 令 $\lambda = \lambda_0 m$, 代入得

$$K_f = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

当混凝土强度耐蚀系数将至 75% 时, 表明混凝土结构中有 25% 已经损伤, 这是规范中规定混凝土的抗腐蚀标准。这时所经历的时间为混凝土的“标准寿命”: $t = \frac{\ln 0.75}{\lambda} = \frac{0.288}{\lambda}$ 。

目前, 我国高速铁路隧道设计平均寿命按 100 a 考虑, 据此反分析得出隧道衬砌结构在硫酸盐腐蚀情况的劣化常数: $\lambda = \frac{0.288}{100} \approx 0.003$ 。

这时, 混凝土的寿命预测基本函数为

$$K_f = e^{-0.003t} \quad (7)$$

4.2 不同配比喷射混凝土寿命预测

根据查阅大量文献确定了在浓度为 10% 的硫酸盐溶液下浸泡 1 d 相当于自然环境中耐久寿命为 1 a。

通过前面拟合曲线中的 $\lambda(n) = A + Bn + Cn^2 + Dn^3 + \dots$ 来计算实验室中硫酸盐腐天数以此来对应自然环境下在硫酸盐腐蚀情况下,混凝土耐久寿命。取腐蚀系数为 75%,具体数值见表 4。

表 4 寿命预测结果

喷射混凝土类别	J1	C6	C8	C10
预测寿命/a	228	160	150	63

由表 4 混凝土寿命预测结果可知,在单一因素影响条件下,前 3 种配合比喷射混凝土耐久寿命均超过 100 a,满足喷锚永久支护的耐久性要求。

5 结 论

通过对各配方喷射纤维混凝土的力学性能和长期浸泡腐蚀试验,结合损伤理论对喷射粗纤维混凝土的抗腐蚀劣化规律开展了相关研究得出以下结论:

(1)在聚丙烯粗纤维掺量为 8 kg/m^3 时,喷射聚丙烯纤维混凝土的经济性适中,抗腐蚀性、抗压性能均优于其它掺量纤维喷射混凝土。说明喷射混凝土聚丙烯粗纤维的最优掺量在 8 kg/m^3 左右。

(2)在喷射粗纤维混凝土时,纤维对混凝土的抗腐蚀性能是在纤维改善孔隙结构与纤维软弱界面两种作用下产生的结果。其中纤维改善孔隙结构起正作用,界面薄弱层起负作用。

(3)运用已经拟合的混凝土劣化方程可以预测混凝土在实际隧道地下水腐蚀的环境下耐久寿命,该研究成果可作为喷射纤维混凝土耐久性定量设计的依据。

参 考 文 献

- [1]赵占山,孙亮,安乐,等.高韧性水泥基复合材料研究进展[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(4):83-89.
- [2]付士峰,张广田,杜渊博.不同掺量的粉煤灰对泡沫混凝土性能的影响[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(3):49-52.
- [3]付士峰,张广田,杜渊博.不同掺量的粉煤灰对泡沫混凝土性能的影响[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(3):49-52.
- [4]李海艳,刘刚.高强混凝土高温性能研究进展[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(1):48-54.
- [5]夏吉涛,王海彦,战启芳,等.高含量石粉机制砂对隧道二衬混凝土性能影响试验研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(1):58-61.
- [6]田良辉.钢纤维混凝土及其在工程中的应用[J].现代隧道技术,2001(5):32-35.
- [7]刘新荣,祝云华,李晓红,等.隧道钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J].岩土力学,2009(8):2319-2323.
- [8]曹康建.湿喷钢纤维混凝土在隧道单层衬砌中的应用[J].水利与建筑工程学报,2011,9(3):83-86.
- [9]邓宗才,李建辉,王现卫,等.粗合成纤维混凝土抗弯韧性及疲劳特性试验研究[J].新型建筑材料,2006(7):8-10.
- [10]王伯昕,黄承逵.大直径合成纤维增强混凝土抗冲击性能的研究[J].建筑材料学报,2006(5):608-612.
- [11]赵军,高丹盈.高温后聚丙烯纤维高强混凝土力学性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2008(1):133-135.
- [12]张玉浩.隧道工程防水混凝土配合比优化设计试验研究[J].新型建筑材料,2015,42(5):48-50.
- [13]李佳梦,韩斌,吴建勋,等.湿喷混凝土配合比优化试验[J].现代矿业,2014,30(12):156-159.
- [14]金雁南,周双喜.混凝土硫酸盐侵蚀的类型及作用机理[J].华东交通大学学报,2006,23(5):4-8.
- [15]王海彦,仇文革,杜立峰,等.隧道衬砌混凝土抗硫酸盐侵蚀耐久寿命预测模型研究[J].现代隧道技术,2014(3):91-97.

Deterioration Law of Fibrous Shotcrete in the Environment of Sulfate Corrosion

Liang Shufeng

(Construction and Installation Engineering Co., LTD of China Railway 18 Bureau Group, Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to study the feasibility and durability of Macro-PPFRC concrete in groundwater e-rode environment in the tunnel, many tests have been done. The mechanical properties and corrosion resistance of Macro-PPFRC concrete with different fiber contents were tested under medium-and long-term immersion conditions in the sulfate solution at a concentration of 5%. The law of corrosion deterioration of Macro-PPFRC concrete was explored according to the results to predict the life of Macro-PPFRC concrete. The results show that the mechanical properties and the corrosion resistance of Macro-PPFRC concrete perform well when the content of Macro-PPFRC is about 8 kg/m³. This conclusion can be used as the basis of durability design of Macro-PPFRC concrete.

Key words: tunnel; Macro-PPFRC; shotcrete; sulfate corrosion; deterioration law

(上接第 97 页)

- [3]孙静,王新民,金国举.基于 AMESim 的液压位置控制系统动态特性研究[J].机床与液压,2012,40(11):120-122.
 [4]鲁鼎.多液压缸同步控制技术的研究[D].镇江:江苏科技大学,2013.
 [5]龚齐斌,向贤兵.自整定模糊 PID 控制器的设计与 Simulink 仿真[J].重庆电力高等专科学校学报,2012,17(2):88-90.
 [6]李晓红,么娆,刘松青.基于 Simulink 的模糊 PID 参数自整定控制器的设计与仿真[J].吉林工程技术师范学院学报:自然科学版,2006,9(22):33-37.
 [7]苏东海,孙占文. AMESim 仿真技术在电液位置同步系统中的应用[J].液压气动与密封,2007,27(6):13-15.
 [8]胡爱闽.基于 AMESim 和 Simulink 的液压升降台同步控制仿真研究[J].煤矿机械,2007,28(12):45-47.

Simulation and Research on Synchronization System of Double Grouting Pump Based on Fuzzy-PID

Wang Chan, Ma Yuehui, Yu Zhenghang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that the controlling accuracy of the traditional synchronization system of double grouting pump is difficult to be guaranteed, a synchronization system of double grouting pump based on fuzzy PID is proposed. The electro-hydraulic proportional valve is used to control the hydraulic cylinder. The piston rod of hydraulic cylinder directly controls the grouting pump's piston. Therefore, the piston displacement of the grouting pump can be synchronized by controlling the displacement of the piston rod of the hydraulic cylinder, so that the feed and discharge of double grouting pump are synchronous. The system is simulated by AMESim and Simulink, and verified by experiments to compare with the traditional system. The results show that the fuzzy PID controller can effectively improve the precision of the system.

Key words: AMESim/Simulink; fuzzy-PID; synchronize grouting