

文章编号:1674-599X(2022)03-0107-06

岩溶地区高速公路隧道绿色注浆试验研究

柴宝红¹,史红英¹,梅坤¹,邓卓湘²

(1. 中交第四公路工程局有限公司,北京 100123;2. 中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 430103)

摘 要:为减少岩溶地区高速公路隧道注浆施工对水环境的污染,研究了多种绿色外加剂的效果,并基于达尔文遗传算法和多元线性回归方法,分析了绿色外加剂在不同凝结时间时的最优掺量。试验结果表明:绿色注浆材料的缓凝剂、早强剂和减水剂分别采用葡萄糖酸钠、甲酸钙和聚羧酸最为合适。当初凝时间小于等于30 min,终凝时间小于等于33 min时,最优掺量组合分别为2.564%甲酸钙、0.039%聚羧酸,不掺葡萄糖酸钠。当初凝时间为30~60 min,终凝时间为33~65 min时,最优掺量组合分别为2.480%甲酸钙、0.117%聚羧酸,不掺葡萄糖酸钠。当初凝时间大于60 min,终凝时间大于65 min时,最优掺量组合分别为0.022%葡萄糖酸钠、1.580%甲酸钙和0.140%聚羧酸。

关键词:公路隧道;绿色注浆;回归分析;遗传算法

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Study on green grouting test of highway tunnel in Karst area

CHAI Baohong¹, SHI Hongying¹, MEI Kun¹, DENG Zhuoxiang²

(1. China Communications Fourth Highway Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing 100123, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 430103, China)

Abstract:In order to reduce the pollution of expressway tunnel grouting construction in Karst areas, the effect of various green admixtures was analyzed, and the optimal parameters of green admixture at different setting time was analyzed based on the Darwinian genetic algorithm and multiple linear regression method. The test results show that, sodium gluconate, calcium formate and sodium gluconate are considered as the most suitable green grouting material of retarder, early strength and water reducer agent, respectively. When the initial coagulation time is equal or lesser than 30 min, and the final coagulation time is equal or lesser than 33 min, the optimal mixing amount is 2.564% calcium formate and 0.039% polycarboxylic acid, without sodium gluconate. When the initial coagulation time is 30~60 min, and the final coagulation time is 33~65 min, the optimal mixing amount is 2.48% calcium formate and 0.117% polycarboxylic acid, respectively, without sodium gluconate. When the initial coagulation time exceeds 60 min, and the final coagulation time exceeds 65 min, the optimal incorporation is 0.022% sodium gluconate, 1.58% calcium formate, and 0.140% polycarboxylate, respectively.

Key words:highway tunnel; green grouting; regression analysis; genetic algorithm

在岩溶区修建高速公路隧道时,通常采用注浆止水、注浆回填和注浆加固等工艺处理涌水、溶腔等问题^[1]。在中国,绿色施工的理念已广泛采纳,工程施工,既要求保质保量,又要执行“绿水青山”的可持续发展观^[2]。

目前,国内外单、双液注浆施工工艺较为成熟。

其中,单液注浆施工因不易堵塞、工艺简单等优点而被广泛采用^[3]。双液注浆具有凝结时间短、浆液黏性大、保水性强等优势^[4],但容易出现管道堵塞,操作复杂等问题,因此在国内使用较少。贺雄飞^[5]通过正交试验,配制出了高效单液注浆浆液。张民庆等人^[6]选取硫铝酸盐水泥单液浆注浆,获得了良

收稿日期:2021-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50908234);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4743)

作者简介:柴宝红(1984—),男,中交第四公路工程局有限公司工程师。

好的注浆效果,但纯硫铝酸盐水泥的成本较高。传统硅酸盐水泥韧性低,易开裂^[7],而缓凝剂不会对混凝土后期性能产生不良影响^[8],因而在配制注浆材料中普遍使用。郭学铭^[9]研究了以葡萄糖酸钠作为缓凝剂的问题,发现其不仅延长了水泥的凝结时间,而且提高了水泥的流动性。而聚羧酸、萘系减水剂能减少拌合用水量,节约水泥,降低成本。张敏^[10]指出聚羧酸系减水剂是一种高减水率、低收缩率的新型绿色建筑材料。在注浆浆液中加入甲酸钙、氯化钙等早强剂能缩短施工时间,提高施工效率^[11]。许凤桐^[12]指出甲酸钙可以起到早强、减水的作用,但掺量过高会出现过快凝结导致后期水泥开裂。本研究针对岩溶地区地下水系发达、孔(裂)隙贯通性好的特点,拟通过试验对比分析不同外加剂对绿色注浆液性能的影响,选配最优的缓凝剂、早强剂和减水剂,并通过SPSS软件采用回归分析方法,获得满足不同凝结时间时隧道绿色注浆外加剂的最佳掺量,减少注浆材料对地下水环境的污染。

1 试验方法

1.1 试验材料

1.1.1 注浆基材

传统双液注浆材料以水泥-水玻璃为基材,绿色注浆水泥基材采用湖北宜城安宜特种水泥厂生产的硫铝酸盐水泥,掺入普通硅酸盐水泥。低碱硫铝酸盐水泥是一种节能环保型新品种水泥,其主要成分为无水硫铝酸钙,具有低碱性、耐腐蚀性、高抗冻性、高抗渗性、高强性和早强性等优点^[13]。

1.1.2 外加剂

选用葡萄糖酸钠、蔗糖、柠檬酸作为缓凝剂,聚羧酸作为减水剂,甲酸钙和氯化钙作为早强剂。

1.2 试验方法

室内注浆材料的性能试验主要检测材料的凝结时间、流动度、质量分数、抗压强度等指标。试验方法采用单因素均分法。其中,维卡仪法测量凝结时间,截锥圆模法测量流动度,抗折抗压仪器测量抗压强度。

1.3 试验步骤

本试验共分4步进行,如图1所示。先选取0.31~0.4的水灰比,掺入0%~40%普通硅酸盐水泥,研究选取最佳掺量。选择不同缓凝剂、减水剂、早

强剂进行试验对比,再通过SPSS软件采用多元回归法分析其显著性,通过最优配比模型确定最佳配比。

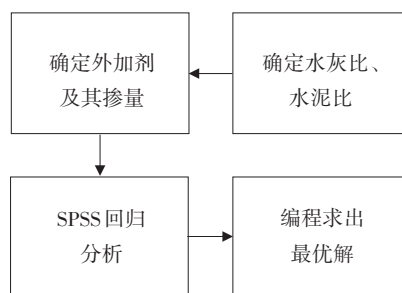


图1 试验研究流程

Fig.1 Flow chart of experimental research

2 试验结果与分析

2.1 水灰比的确定

本试验的水灰比范围为0.31~0.40,试验结果如图2所示。

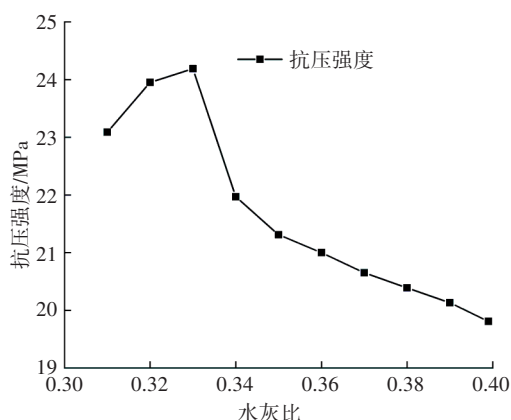


图2 结石体水灰比与抗压强度关系

Fig.2 Relationship between water cement ratio and stone compressive strength

从图2可以看出,随着水灰比增加,结石体抗压强度呈现先增大后减小的趋势。当水灰比为0.33时,结石体抗压强度最大。水灰比小于0.33时,随水灰比的增大,抗压强度呈现快速增长趋势,其原因是水灰比过低时硫铝酸盐水泥不能充分发生水化作用,水泥易结块。当水灰比大于0.33后,注浆结石体的抗压强度随着水灰比的增大显著降低,尤其是水灰比在0.33~0.35时,抗压强度衰减程度较为剧烈,其原因是水灰比过大会对结石体内部结构的致密性产生不利影响。因此,水灰比在0.30~0.40时,结石体抗压强度都可以满足规范的强度要求^[14]。当水灰比小于0.3时,搅拌困难;当水灰比大于0.4时,抗压强度小于

20 MPa,达不到规范要求,因此采用水灰比为0.33。

根据陈娟等人^[15]的研究成果,在硫铝酸盐水泥中加入普通硅酸盐水泥,可以显著缩短注浆结石体的凝结时间,但是注浆结石体的抗压强度、抗折强度会随着普通硅酸盐水泥的掺入而降低。因此,在保证抗压强度、抗折强度满足规范要求的前提下,通过试验确定普通硅酸盐水泥合适的掺量。

普通硅酸盐水泥掺量与试件抗压强度、初凝时间的试验结果关系图如图3所示。从图3可以看出,当普通硅酸盐水泥掺量达到40%时,试件抗压强度达不到标准抗压强度(20 MPa)的要求。掺量分别为10%、20%和30%普通硅酸盐水泥的抗压强度均符合规范要求,且初凝时间随着普通硅酸盐水泥掺量的增加而减少,而初凝时间直接影响施工进度。所以,选用掺量为30%普通硅酸盐水泥,既能保证抗压强度,又可使初凝时间最短。

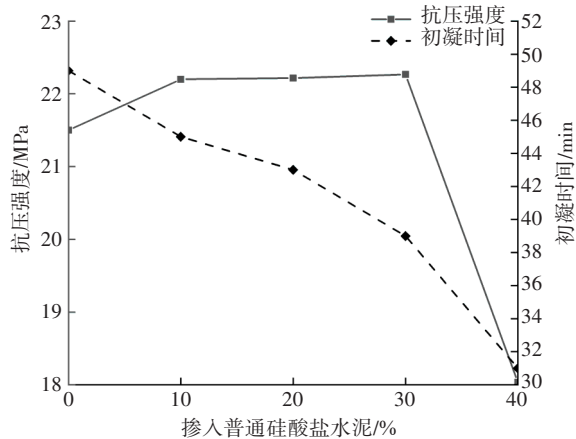


图3 普通硅酸盐水泥掺量与结石体抗压强度关系

Fig.3 Relationship between the amount of portland cement and the compressive strength of stone

2.2 缓凝剂的选定

葡萄糖酸钠、柠檬酸、蔗糖3种缓凝剂的掺量分别为0%、0.01%、0.02%、0.03%、0.04%和0.05%时,试验结果如图4所示。从图4可以看出,随着缓凝剂掺量的增大,水泥试块的抗压强度逐渐降低。其中,加入葡萄糖酸钠抗压强度的曲线下降幅度最大。随着葡萄糖酸钠、蔗糖掺量的增大,水泥试块的初凝时间、终凝时间逐渐增加。随着柠檬酸掺量的增大,水泥试块的初凝时间逐渐减少。由于掺入等量的葡萄糖酸钠和蔗糖时葡萄糖酸钠的效果更好,而柠檬酸掺量在0.05%以下时无缓凝效果,因此选用葡萄糖酸钠作为缓凝剂。

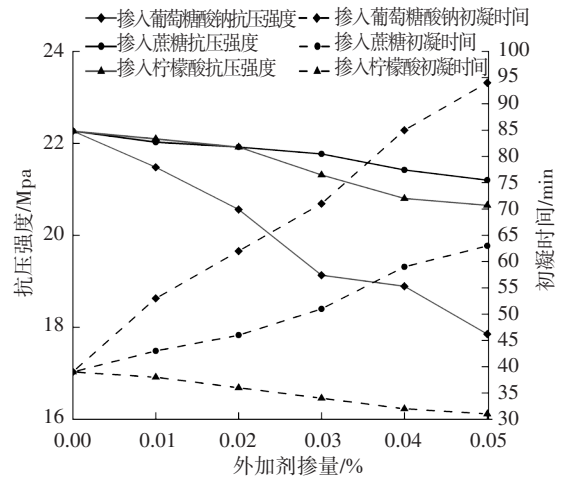


图4 葡萄糖酸钠、蔗糖、柠檬酸掺入量与结石体抗压强度关系

Fig.4 Relationship between the amount of sodium gluconate, sucrose and citric acid and the compressive strength of stone

2.3 早强剂的选定

早强剂分别选用甲酸钙和氯化钙,试验结果如图5所示。从图5可以看出,掺入甲酸钙和氯化钙对试块抗压强度有明显提升,且掺量越大,对抗压强度影响越大。当掺量小于1.5%时,甲酸钙对抗压强度的影响大于氯化钙对抗压强度的影响;当掺量大于2.0%时,两种早强剂对抗压强度的影响程度相近。掺入甲酸钙或氯化钙均缩短了试块的初凝时间,且掺量越大,试块初凝时间越短。

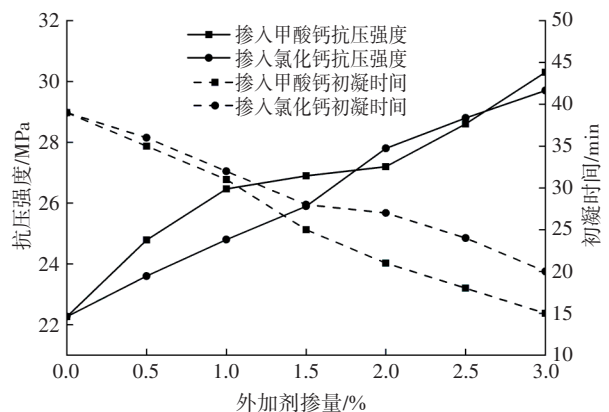


图5 甲酸钙、氯化钙掺入量与结石体抗压强度关系

Fig.5 Relationship between the amount of calcium formate and calcium chloride addition and compressive strength of stone

2.4 减水剂的选定

选取聚羧酸作为减水剂掺入进行试验,试验结果如图6所示。从图6可以看出,随着聚羧酸掺量增大,水泥浆液流动度变大,凝结时间变长。当聚羧酸掺量为0%~0.04%时,结石体抗压强度增长较缓;当聚羧酸掺量为0.04%~0.07%时,结石体抗压

强度增长迅速。这是由于掺入适量减水剂降低了水泥水化需要的水量,多余水分被消耗,从而降低了水灰比;当聚羧酸掺量为0.07%~0.10%时,结石体抗压强度会急剧减小,这是减水剂掺量超标导致大量水分释放,而湿磨过程未将其完全消耗^[16]所导致的。聚羧酸的掺量在0.1%以下时,初凝时间均在50 min以内,无显著差异,因此聚羧酸减水剂的最佳掺量为0.07%。

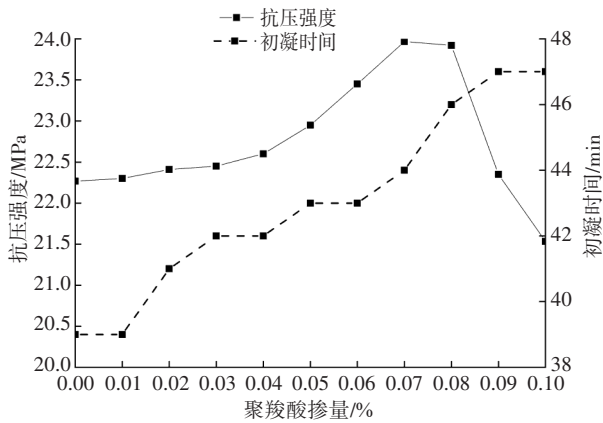


图6 聚羧酸掺入量与结石体抗压强度关系

Fig.6 Relationship between the amount of polycarboxylic acid and compressive strength of stone

3 试验结果线性回归分析

本研究选取抗压强度、初凝时间、终凝时间和流动度4个性能指标进行多元线性回归分析。

设 x_1 为缓凝剂掺入量,%; x_2 为早强剂掺入量,%; x_3 为减水剂掺入量,%; y_1 为抗压强度,MPa; y_2 为初凝时间,min; y_3 为终凝时间,min; y_4 为流动度,mm。抗压强度系数分析见表1~2。

回归平方和 S_{ESS} 是总偏差平方和 S_{TSS} 与残差平方和 S_{RSS} 之差,为: $S_{\text{TSS}} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X})^2$,其中,

$$S_{\text{ESS}} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2, S_{\text{RSS}} = \sum_{i=1}^r n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2.$$

式中: $\bar{X}$ 是各试验值 X_{ij} 的平均值, $\bar{X}_i$ 是各组试验值 X_i 的平均值。

S_{TSS} 能反映全部试验数据之间的差异, S_{ESS} 是由随机误差引起的, S_{RSS} 是由各因素取不同水平引起的。将抗压强度数据代入回归平方和公式得到平方和,平方和与自由度的商即为均方,两者通过统计学公式运算可得到Sig值。Sig值表示方程的显著

表1 抗压强度ANOVA分析

Table 1 ANOVA analysis of compressive strength

模型	平方和	均方	Sig
回归	194.342	64.781	0.000 1
残差	8.478	0.499	

表2 抗压强度系数分析

Table 2 Ratio analysis of compressive strength

(a) 未掺减水剂回归分析结果

外掺料	未标准化系数B	标准化系数 β
缓凝剂	-107.160	-0.501
早强剂	2.435	0.715
常量	22.916	

(b) 掺入减水剂回归分析结果

外掺料	未标准化系数B	标准化系数 β
减水剂	-1.154	-0.013
缓凝剂	-105.725	-0.494
早强剂	2.459	0.722
常量	22.863	

性,该值越小方程越显著。由表1可知,显著性明显小于0.05,表明回归程度显著,该模型具有统计学意义。未标准化系数B决定拟合的线性回归方程。 β 值大于0时,该因素对方程为正向影响,该值越大表明影响越大。 β 值小于0时,该因素对方程为负向影响,该值越小表明影响越大。由表2可知,早强剂、缓凝剂对结石体抗压强度的影响大,减水剂对其影响小。删去减水剂后,得到回归方程:

$$y_1 = 22.863 - 105.725x_1 + 2.459x_2$$

公式中的系数为未标准化系数B。类似地,初凝时间、终凝时间、流动度的回归方程分别为:

$$y_2 = 39.258 + 1111.140x_1 + 2.459x_2;$$

$$y_3 = 43.546 + 1776.01x_1 - 9.879x_2 + 19.601x_3;$$

$$y_4 = 36.032 + 71.853x_1 - 5.740x_2 - 122.146x_3。$$

在本试验注浆材料配比优化设计中,注浆材料的配比优化约束条件为:

1) 为避免浆液硬化过快,影响注浆,浆液的初期流动度不小于220 mm;

2) 为保证结构稳定,其1 d抗压强度不小于20 MPa;

3) 为适应施工实际情况,设定3种方案,分别为初凝时间小于等于30 min,终凝时间小于等于33 min;初凝时间为30~60 min,终凝时间33~65 min;初凝

时间大于等于 60 min、终凝时间大于等于 65 min。

通过求解最优配比模型,获得的最佳配比:

1) 初凝时间小于等于 30 min,终凝时间小于等于 33 min 时,掺入 30% 普通硅酸盐水泥、0.000 5% 葡萄糖酸钠、2.564% 甲酸钙和 0.039% 聚羧酸。

2) 初凝时间为 30~60 min,终凝时间 33~65 min 时,掺入 2.480% 甲酸钙和 0.117% 聚羧酸。

3) 初凝时间大于等于 60 min,终凝时间大于等于 65 min 时,掺入 0.022% 葡萄糖酸钠、1.580% 甲酸钙和 0.140% 聚羧酸。

4 结论

通过对绿色注浆材料配比试验结果进行研究,得到结论:

1) 注浆材料选用硫铝酸盐水泥作为基材,水灰比为 0.33,掺入 30% 的 P·O 普通硅酸盐水泥。该配比具有流动性好、强度高和凝结时间短等优点。

2) 缓凝剂选用葡萄糖酸钠缓凝效果最好。氯化钙和甲酸钙作为早强剂,两种早强剂的效果相差不大。考虑到绿色注浆要求,推荐甲酸钙作为早强剂。减水剂选用聚羧酸能显著提高流动性。葡萄糖酸钠、甲酸钙、聚羧酸均对地下水无污染,可实现绿色环保这一施工理念。

3) 获得了不同初凝时间、终凝时间需求下的绿色外加剂的最优掺量。初凝时间小于等于 30 min,终凝时间小于等于 33 min 时,掺入 2.564% 甲酸钙、0.039% 聚羧酸,不掺葡萄糖酸钠;初凝时间为 30~60 min,终凝时间为 33~65 min 时,掺入 2.480% 甲酸钙、0.117% 聚羧酸,不掺葡萄糖酸钠;初凝时间大于等于 60 min,终凝时间大于等于 65 min 时,掺入 0.022% 葡萄糖酸钠、1.580% 甲酸钙和 0.140% 聚羧酸。

参考文献(References):

- [1] 陈扬勇. 岩溶隧道注浆加固技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2009. (CHEN Yangyong. Study on grouting-reinforcement techniques of tunnel in Karst [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [2] 李欢欢,焦磊,肖晓春,等. 绿色高性能同步注浆干混砂浆的研究与应用[J]. 隧道与轨道交通, 2020(2): 46-52, 79. (LI Huanhuan, JIAO Lei, XIAO Xiao chun, et al.

Research and application of dry mixed mortar for green and high performance synchronous grouting [J]. Tunnel and Rail Transit, 2020(2): 46-52, 79. (in Chinese))

- [3] 俞培德,赵云辉. 盾构注浆系统的选择与优缺点分析[J]. 建筑机械化, 2015, 36(1): 76-78. (YU Peide, ZHAO Yunhui. Shield tunnel grouting system choice of and disadvantages[J]. Construction Mechanization, 2015, 36(1): 76-78. (in Chinese))
- [4] 张高展. 新型工业废渣双液注浆材料的研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007. (ZHANG Gaozhan. Research and application of new industrial residue two-shot grouting materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [5] 贺雄飞. 单液惰性同步注浆浆液的配合比试验研究[J]. 隧道建设, 2012, 32(5): 24-30. (HE Xiongfei. Study on mixing proportion of single component grout for synchronous grouting [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(5): 24-30. (in Chinese))
- [6] 张民庆,孙国庆. 硫铝酸盐水泥单液浆的研究与应用[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(6): 73-78, 95. (ZHANG Mingqing, SUN Guoqing. Research and application of sulphate cement single liquid slurry [J]. Modern Tunnel Technology, 2009, 46(6): 73-78, 95. (in Chinese))
- [7] 熊钱华. 超高韧性水泥基复合材料耐久性性能研究[J]. 公路与汽运, 2021(1): 54-58. (XIONG Qianhua. Study on the durability of ultra-high toughness cement-based composite materials [J]. Highways and Automotive Applications, 2021(1): 54-58. (in Chinese))
- [8] 陈大江. 岩溶区铁路地基可控水泥浆液试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. (CHEN Dajiang. Experimental study on controllable cement slurry of foundation in karst area [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [9] 郭学铭. 外加剂中葡萄糖酸钠用量对水泥净浆和砂浆性能的影响研究[J]. 广东建材, 2020, 36(1): 19-20. (GUO Xueming. Effect of sodium gluconate on properties of cement paste and mortar in admixture [J]. Guangdong Building Materials, 2020, 36(1): 19-20. (in Chinese))
- [10] 张敏. 聚羧酸高性能减水剂的作用机理分析及工程应用[J]. 安徽建筑, 2020, 27(9): 113-114. (ZHANG Min. Mechanism analysis and engineering application of polycarboxylic acid high performance superplasticizer

- [J]. Anhui Architecture, 2020, 27 (9) : 113-114. (in Chinese))
- [11] 许刚刚. 水泥浆液在低温环境下的凝结特性试验研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(12): 44-48, 52. (XU Ganggang. Experimental study on coagulation characteristics of cement slurry under low temperature environment [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48 (12) : 44-48, 52. (in Chinese))
- [12] 许凤桐, 陈瑞波, 顾轲. 甲酸钙早强剂在干粉砂浆中的应用[J]. 墙材革新与建筑节能, 2008(2) : 56-58. (XU Fengtong, CHEN Ruibo, GU Ke. Application of calcium formate early strength agent in dry mortar [J]. Wall Material Innovation and Building Energy Conservation, 2008 (2): 56-58. (in Chinese))
- [13] 刘红彬, 唐伟奇, 肖凯璐, 等. 水泥基注浆材料的研究进展[J]. 混凝土, 2016(3) : 71-75. (LIU Hongbin, TANG Weiqi, XIAO Kailu, et al. Advances in research on cement-based grouting materials [J]. Concrete, 2016(3) : 71-75. (in Chinese))
- [14] 邵正明, 王强, 邹新, 郑旗. 《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T50448—2008) 研究与编制[J]. 施工技术, 2009, 38(10) : 4-7. (SHAO Zhengming, WANG Qiang, ZOU Xin, et al. Research and compilation of code for application technique of cementitious grout (GB/T50448—2008) [J]. Construction Technology, 2009, 38 (10) : 4-7. (in Chinese))
- [15] 陈娟, 卢亦炎. 硫铝酸盐水泥性能的调整与应用[J]. 混凝土, 2007(9) : 54-56. (CHEN Juan, LU Yiyang. Adjustment and application of sulfoaluminate cement properties [J]. Concrete, 2007(9) : 54-56. (in Chinese))
- [16] 唐皇, 阳逸鸣. 减水剂影响下湿磨黏土水泥灌浆材料性能研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4) : 76-80. (TANG Huang, YANG Yiming. Experimental study on properties of wet-grinding clay cement grouting material under the influence of water reducer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4) : 76-80. (in Chinese))
- (责任编辑: 欧兆虎; 校对: 李脉 罗容; 英文编辑: 陈璐)