

# 高强超微外加剂对喷射混凝土力学性能及回弹率的影响研究\*

Study on the Influence of High Strength Ultramicro Admixture on Mechanical Properties and Rebound Rate of Shotcrete

魏子程<sup>1</sup>, 王 林<sup>1</sup>, 贺鑫鑫<sup>1</sup>, 王宏波<sup>2</sup>

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044;

2. 陕西德和建材有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘 要:** 普通喷射混凝土在喷射过程中回弹率高, 粉尘量大, 强度不容易达标, 特别是在富水区, 这些情况更为严重, 在喷射混凝土中掺入一种高强超微外加剂, 用来改善喷射混凝土的力学性能, 降低喷射混凝土的回弹率及粉尘量。本文将高强超微外加剂应用于喷射混凝土中, 研究了其对喷射混凝土力学性能及回弹率和粘结强度的影响。试验结果表明: 高强超微外加剂能够显著提高喷射混凝土的抗压强度和抗折强度, 在 C25 喷射混凝土中, 高强超微外加剂掺量为 6% 时, 喷射混凝土 28 d 抗压强度与抗折强度与不掺高强超微外加剂组分别提高 6.4% 与 32%; 添加高强超微外加剂的喷射混凝土在工程应用中回弹量平均只有 7.3%, 比普通喷射混凝土降低 28%, 粘结强度最高为 2.29 MPa, 是普通喷射混凝土的 3~4 倍。

**关键词:** 高强超微外加剂; 喷射混凝土; 力学性能; 回弹量; 粘结强度

**中图分类号:** TU528.042 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 05-0082-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.014

WEI Zicheng<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>, HE Xinxin<sup>1</sup>, WANG Hongbo<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Shaanxi Dehe Building Materials Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Ordinary shotcrete in the process of spraying rebound rate is high, large amount of dust, strength is not easy to reach the standard, especially in the water-rich area, these conditions are more serious, in shotcrete mixed with a high strength ultramicro admixture, used to improve the mechanical properties of shotcrete, reduce the rebound rate of shotcrete and dust. In this paper, high strength ultramicro admixture is applied to shotcrete and its effect on mechanical properties and rebound rate of shotcrete is studied. The experimental results showed that the high-strength ultramicro admixture could significantly improve the compressive strength and flexural strength of shotcrete. In C25 shotcrete, when the dosage of high-strength ultramicro admixture was 6%, the 28d compressive strength and flexural strength of shotcrete increased by 6.4% and 32%, respectively, compared with the group without high-strength ultramicro admixture. The average rebound of shotcrete with high strength and ultra-fine admixture in engineering application is only 7.3%, 28% lower than that of ordinary shotcrete, and the highest bond strength is 2.29mpa, which is 3 ~ 4 times of that of ordinary shotcrete.

**Keywords:** high strength ultramicro admixture; shotcrete; mechanical properties; the springback amount; bond strength

\* 基金项目: 市属高校基本科研业务费项目“轻烧氧化镁膨胀剂在低熟料胶凝体系中的膨胀机理及稳定性研究 X18265”资助。

作者简介: 魏子程 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事建筑材料研究。

收稿日期: 2022-08-10

## 0 引言

2000 年以来, 我国经济飞速发展, 基础建设需求日益增长<sup>[1-2]</sup>。国家《新时代交通强国铁路先

行规划纲要》提出,到 2035 年,全国的铁路网规模将达到 20 万公里左右,其中高铁网运营里程要达到近 7 万公里<sup>[3]</sup>。特别是川藏铁路、西部陆海新通道以及出疆入藏等综合运输通道的建设必定会掀起大规模的浪潮,然而由于我国中西部地区地形多貌、地质复杂,且多为山岭重丘,海拔较高,因而经常采取隧道施工的方法<sup>[4-5]</sup>。在隧道施工中,使用喷射混凝土对围岩进行加固是常用的方法,使其形成一个完整、稳定且有一定强度的结构,以确保施工安全<sup>[6]</sup>。

目前我国喷射混凝土施工方式主要有干喷与湿喷两种<sup>[11-13]</sup>。干喷混凝土回弹和粉尘量很大,施工环境恶劣,同时会造成混凝土的后期强度损失,使工程后期维护费用增加,不符合绿色、可持续发展的要求<sup>[14,15]</sup>。湿喷混凝土的施工效率高,能有效降低回弹,粉尘浓度低,能很好的改善施工环境<sup>[16,17]</sup>。在国家相关部门干预下,湿喷混凝土在我国已大面积普及,地下工程、隧道隧洞及铁路等工程均已采用湿喷混凝土<sup>[8]</sup>。

据不完全统计,隧道施工中湿喷喷射混凝土的回弹率平均都在 30% 以上,超耗在 150%~200% (包含不可避免超挖)<sup>[9-10]</sup>,中老铁路(磨万段)Ⅱ标统计喷射混凝土超耗率基本在 150% 以上,富水区超耗率在 350%~550%,且受碱性速凝剂强度倒缩影响,大部分强度还不能达到理想要求,安全风险加大。特别大的回弹率不仅导致工程质量严重不合格,原材料大量浪费,更容易在施工周围产生大量粉尘,烟雾弥漫,影响施工,加剧工作人员的安全健康隐患<sup>[8]</sup>。

针对普通喷射混凝土回弹率大,且粉尘量大的缺点,在喷射混凝土中掺入高强超微外加剂,研究高强超微外加剂对喷射混凝土力学性能及回弹率的影响。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

水泥为北京金隅公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其比表面积为 386 m<sup>2</sup>/kg,密度为 2.95 g/cm<sup>3</sup>,标准稠度用水量为 29.7%,3 d、28 d 抗

压强度分别为 31.2 MPa、50.6 MPa,均符合规范要求;细骨料为天然河砂,细度模数为 2.40,属于Ⅱ区中砂;粗骨料为石灰岩,根据现场需要所选石子的粒径在 5~10 mm,密度为 2.6 g/cm<sup>3</sup>;速凝剂采用无碱液体速凝剂,含固量为 49%,掺量为 5%;采用聚羧酸高效减水剂,减水率为 40%。水采用自来水。

现场实验所用水泥为泰国 TPI 水泥厂生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其比表面积为 335 m<sup>2</sup>/kg,密度为 3.11 g/cm<sup>3</sup>,标准稠度用水量 27.0%,3 d、28 d 抗压强度分别为 29.2 MPa、51.9 MPa。细骨料为机制砂,细度模数 3.0,属于Ⅱ区中砂。粗骨料为石灰岩,最大粒径 10 mm,表观密度 2650 kg/m<sup>3</sup>。粉煤灰为睿昂老挝 VKEC 生产的粉煤灰,需水量比 102%。

高强超微外加剂为川铁国际经济技术合作有限公司生产的,用于喷射混凝土的外加剂,其粒径范围为 0.4 μm~40 μm,减水率为 34%,推荐掺量为 4%~8%。化学组成见表 1。

### 1.2 试验方法

按 GB/T50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》、JGJ/T372-2016《喷射混凝土应用技术规程》进行室内试验。经多次试配最终确定 C25 强度等级喷射混凝土水胶比为 0.36,砂率为 58%,胶凝材料用量为 430 kg/m<sup>3</sup>,高强超微外加剂掺量为胶材用量的 4%~6%,速凝剂掺量为 5%,喷射混凝土实验室配合比见表 2。

综合考虑现场喷射混凝土施工环境,经过试配后,确定水胶比为 0.41,砂率为 57%,胶凝材料用量为 452 kg/m<sup>3</sup>,高强超微外加剂掺量分别为 5.5%与 7%。喷射混凝土现场配合比见表 3。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 高强超微外加剂对喷射混凝土力学性能影响

采用高强超微外加剂制备 C25 喷射混凝土,高强超微外加剂掺量取 4%、5%与 6%,对其抗压强度及抗折强度进行测定,研究高强超微外加剂对混凝土力学性能的影响。喷射混凝土配合比见表 2。图 1、图 2 分别为喷射混凝土抗压强度、抗

材料科学

折强度试验结果。

表 1 高强超微外加剂化学成分  
Table 1 Chemical composition of high-strength ultra-fine admixture /%

| 组分 | SiO <sub>2</sub> | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> |
|----|------------------|------|--------------------------------|-------------------------------|------|-------------------|------------------|--------------------------------|-----------------|
| 含量 | 97.4             | 0.15 | 0.28                           | 0.06                          | 0.38 | 0.24              | 0.54             | 0.76                           | 0.89            |

表 2 喷射混凝土实验室配合比  
Table 2 Mix proportion of shotcrete laboratory / (kg/m<sup>3</sup>)

| 强度  | 序号 | 水泥  | 砂   | 石   | 高强超微外加剂 | 普通减水剂 | 速凝剂  | 水   |
|-----|----|-----|-----|-----|---------|-------|------|-----|
| C25 | M1 | 430 | 955 | 692 | 0       | 4.3   | 21.5 | 155 |
|     | M2 | 430 | 955 | 692 | 17.2    | 0     | 21.5 | 155 |
|     | M3 | 430 | 955 | 692 | 21.5    | 0     | 21.5 | 155 |
|     | M4 | 430 | 955 | 692 | 25.8    | 0     | 21.5 | 155 |

表 3 喷射混凝土现场配合比  
Table 3 Site mix proportion of shotcrete / (kg/m<sup>3</sup>)

| 序号 | 水泥  | 砂   | 碎石  | 速凝剂  | 水   | 高强超微外加剂 | 减水剂  | 粉煤灰 |
|----|-----|-----|-----|------|-----|---------|------|-----|
| N1 | 410 | 934 | 676 | 29   | 152 | 0       | 5.31 | 72  |
| N2 | 407 | 929 | 701 | 13.5 | 185 | 25.0    | 0    | 45  |
| N3 | 407 | 929 | 701 | 13.5 | 170 | 32.0    | 0    | 45  |

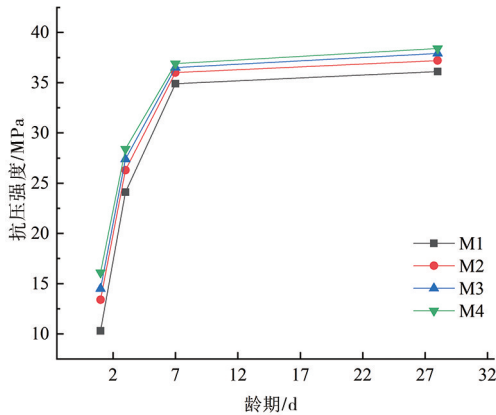


图 1 高强超微外加剂掺量对喷射混凝土抗压强度的影响  
Fig. 1 Effect of high-strength ultra-fine admixture on compressive strength of sprayed concrete

从图 1 可知，随高强超微外加剂掺量的增加，喷射混凝土抗压强度有所增加，且在龄期 1 d~7 d 时强度发展较快，7 d~28 d 时强度增长缓慢。在 C25 强度等级喷射混凝土中，掺加高强超微外加剂的喷射混凝土抗压强度大于基准组。相较于基准 M1 组，当高强超微外加剂掺量为 6% 时，喷射混凝土抗压强度最高，1 d、7 d、28 d 抗压强度分别为 16.1 MPa、36.9 MPa、38.4 MPa，较基准组强度分别增长 56%、5.7%、6.4%。由此可知，高强超微外加剂能有效提高喷射混凝土早期抗压强度且对后期强度发展无不良影响。

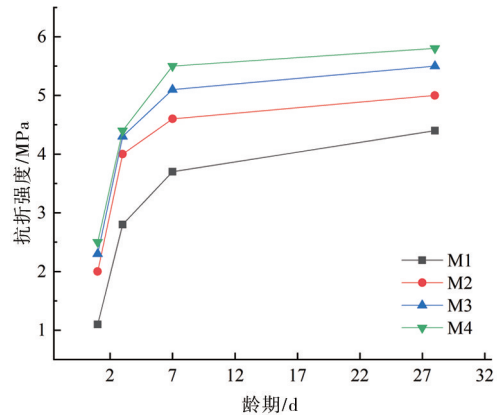


图 2 高强超微外加剂掺量对喷射混凝土抗折强度的影响  
Fig. 2 Effect of high-strength ultra-fine admixture on the flexural strength of shotcrete

由图 2 可知，随着高强超微外加剂掺量的增加，喷射混凝土抗折强度提高。在 1 d 喷射混凝土抗折强度中，M2、M3、M4 组抗折强度分别为 2 MPa、2.3 MPa、2.5 MPa，较基准组分别增加 0.9 MPa、1.2 MPa、1.4 MPa，均高于基准 M1 组，说明高强超微外加剂的加入能有效提高喷射混凝土的早期抗折强度；以 28 d 抗折强度为例，当掺量为 4% 时，28 d 抗折强度为 5 MPa，较基准组提高 25%，28 d 抗折强度最高的是 M4 组，其抗折强度能够达到 5.8 MPa，较基准组提高了 32%。由此可知掺用高强超微外加剂的喷射混凝土抗折强度

高于不掺高强超微外加剂的喷射混凝土，且掺量越高抗折强度越高。

高强超微外加剂在生产过程中，其颗粒因为急速冷却，在表面张力作用下，形成的颗粒表面致密光滑，导致需水量低，加之颗粒是形状为球状的玻璃体，因此具有“滚珠轴承”的效应，可以起到润滑作用，减少内摩擦阻力，提高流动性。高强超微外加剂其粒径范围仅仅为  $0.4 \mu\text{m} \sim 40 \mu\text{m}$ ，并具有连续的级配，导致细度很小，比表面积很大，潜在化学活性很高，能够起到微集料的作用，充分填充水泥颗粒间的空隙，并与水泥的水化产物生成具有强度的胶凝体，提高喷射混凝土的密实度进一步提高强度<sup>[16]</sup>。试验所用高强超微外加剂中含有大量的微硅粉，引入的非晶态、无定形的  $\text{SiO}_2$  易溶于碱性溶液中，在速凝剂协同作用下可以加速  $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{A}$  的早期水化速率<sup>[7]</sup>，在水化反应早期即可与氢氧化钙发生反应，并消耗大量石膏，生成大量的水化硅酸钙凝胶，填充水化水泥浆体的孔隙并减小混凝土内部孔隙尺寸，使水泥-骨料多孔的界面区致密而显著提高强度<sup>[5]</sup>。

## 2.2 高强超微外加剂对喷射混凝土回弹率影响

高强超微外加剂应用于川铁公司老挝项目和

平隧道喷射混凝土中，进行现场试喷作业，将不掺高强超微外加剂的喷射混凝土与添加高强超微外加剂的喷射混凝土进行对比分析试验，并统计记录回弹率，现场施工配合比见表 3。试验现场采用垫彩条布收集回弹混凝土称量计算回弹量的方法与项目部采用测量开挖断面及初期支护断面计算喷射混凝土数量与实际使用喷射混凝土数量对比分析方式计算喷射混凝土回弹量，现场施工工图见图 3。



图 3 现场收集回弹量试验图

Fig. 3 Test diagram of rebound amount collected on site

为尽量保证喷射混凝土回弹量计算准确，开挖、初支断面间距按照  $0.6 \text{ m}$ （钢架间距  $1.2 \text{ m}$ ，开挖、初支断面必须测量同一里程）、测点环向间距按照不大于  $0.5 \text{ m}$  进行测量。通过对开挖、初支断面测量断面方统计与各循环实际使用喷射混凝土数量分析见表 4、表 5。

表 4 和平隧道回弹量统计  
Table 4 Springback statistics of heping tunnel

| 序号 | 循环里程                                     | 开挖净空断面方/ $\text{m}^3$                          | 初支净空断面方/ $\text{m}^3$                      | 实际混凝土用量/ $\text{m}^3$ | 回弹量/% | 平均回弹量/% |
|----|--|--|--|-----------------------|-------|---------|
| N1 | DK219+538.8 ~ DK219+541.2 段 (循环进尺 2.4 m) | (102.18+101.71+101.27+101.55) /4 * 2.4=244.03  | (92.24+91.96+92.33+92.19) /4 * 2.4=221.23  | 38.5                  | 35.7  | 36.25   |
| N1 | DK219+541.2 ~ DK219+543.6 段 (循环进尺 2.4 m) | (102.3+102.31+101.08+100.66) /4 * 2.4=243.81   | (92.45+92.69+92.25+92.47) /4 * 2.4=221.92  | 37                    | 36.8  |         |
| N2 | DK219+543.6 ~ DK219+546 段 (循环进尺 2.4 m)   | (100.10+100.66+100.87+101.99) /4 * 2.4=242.172 | (91.93+91.97+91.97+91.86) /4 * 2.4=220.64  | 25                    | 7.8   | 7.65    |
| N2 | DK219+546 ~ DK219+548.4 段 (循环进尺 2.4 m)   | (101.47+103.52+104.51+105.61) /4 * 2.4=249.06  | (91.63+91.18+91.64+91.39) /4 * 2.4=219.504 | 34.5                  | 7.5   |         |

表 5 和平隧道（斜井）回弹量统计  
Table 5 Rebound statistics of heping tunnel (inclined shaft)

| 序号 | 循环里程                                     | 开挖净空断面方/ $\text{m}^3$         | 初支净空断面方/ $\text{m}^3$ | 实际混凝土用量/ $\text{m}^3$ | 回弹量/% | 平均回弹量/% |
|----|--|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|---------|
| N1 | DK225+628.8 ~ DK225+626.4 段 (循环进尺 2.4 m) | (66.26+66.21) /2 * 2.4=158.96 | 58.504 * 2.4=140.41   | 27                    | 31.3  | 34.4    |
| N1 | DK225+626.4 ~ DK225+624 段 (循环进尺 2.4 m)   | (66.42+66.39) /2 * 2.4=159.37 | 58.594 * 2.4=140.626  | 30                    | 37.5  |         |

## 材料科学

| 序号 | 循环里程  | 开挖净空断面方/m <sup>3</sup>                      | 初支净空断面方/m <sup>3</sup>                      | 实际混凝土用量/m <sup>3</sup> | 回弹量/% | 平均回弹量/% |
|----|---|---|---|------------------------|-------|---------|
| N3 | DK225+624 ~ DK225+621.6 段<br>(循环进尺 2.4 m)   | (66.05+66.06+65.46+66.18)<br>/4*2.4=158.247 | (58.61+58.59+58.555+58.62)<br>/4*2.4=140.61 | 21                     | 6     | 7       |
| N3 | DK225+621.6 ~ DK225+619.2 段<br>(循环进尺 2.4 m) | (66.21+66.35)/2*2.4=159.07                  | 58.409*2.4=140.182                          | 23                     | 7.9   |         |

表 6 高强超微混凝土粘结力强度表  
Table 6 Adhesion strength of high-strength ultra-fine concrete

| 序号 | 龄期/d | 试件尺寸/mm     | 换算系数 | 劈裂面积/mm <sup>2</sup> | 破坏荷载/kN | 粘结强度/MPa |
|----|------|-------------|------|----------------------|---------|----------|
| N1 |      |             |      |                      | 15.7    | 0.85     |
| N2 | 28   | 100×100×100 | 0.85 | 10000                | 39.7    | 2.15     |
| N3 |      |             |      |                      | 42.3    | 2.29     |

通过上述对比,使用高强超微外加剂配合比的回弹量为 6%~7.9%,而不掺高强超微外加剂的普通喷射混凝土的回弹量为 31.3%~37.5%;综合得出使用高强超微外加剂配合比的喷射混凝土回弹量平均为 7.3%,而普通喷射混凝土的回弹量平均为 35.3%,回弹量减少 28%。

### 2.3 高强超微外加剂对喷射混凝土粘结强度影响

粘结强度试验采用钻孔取芯法对施工现场喷射混凝土进行钻孔取芯,测试记录掺加高强超微外加剂喷射混凝土与不掺加高强超微外加剂喷射混凝土的受喷面粘结强度,并对结果进行对比分析。施工现场取样见图 4。在施工现场取样测得不同配合比喷射混凝土 28 d 粘结强度见表 6。



图 4 试验喷射混凝土钻芯取样图

Fig. 4 Drill core sampling diagram of test shotcrete

经过现场试验,掺加高强超微外加剂的喷射混凝土,其粘结强度最高可达 2.29 MPa,不掺加高强超微外加剂喷射混凝土粘结强度仅仅只有 0.85 MPa,提高了 3~4 倍。粘结强度的提高能够使喷射的混凝土牢牢的粘结在一起,降低了喷射混凝土施工过程中的回弹量,减少了由于高回弹率导致喷射混凝土缝隙增多,孔隙增多,缺陷增多的弊端,提高了抗渗性能,尤其是在隧道富水区域施工过程中,有效防止了水分渗透,提高施

工质量与效率,单次喷射厚度可达 30 cm<sup>[15-16]</sup>。

### 3 结论

本论文研究了高强超微外加剂掺量对 C25 强度等级喷射混凝土抗压、抗折强度的影响,并将高强超微外加剂应用于隧道施工中,通过回弹率及粘接强度的测试,得出以下结论:

(1) 随着高强超微外加剂掺量的增加,喷射混凝土力学性能得以提升。当掺量为 6% 时,喷射混凝土 28 d 抗压强度与抗折强度分别为 38.4 MPa 与 5.8 MPa,较基准组提高了 6.4% 与 32%。

(2) 与普通喷射混凝土对比,添加高强超微外加剂的喷射混凝土在实际工程应用中回弹量较低,平均只有 7.3%,与不掺高强超微外加剂的喷射混凝土相比,降低了 28%;粘结强度最高为 2.29 MPa,是普通喷射混凝土的 3~4 倍。添加高强超微外加剂可以显著降低回弹率,提高混凝土的粘结强度,减少粉尘污染,减少对人体的伤害,充分满足湿式喷射混凝土的施工要求。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 朴世玮. 高强喷射固废基胶凝材料混凝土的配制及性能研究 [D]. 河北工程大学, 2021.
- [3] 胡志明. 轻骨料喷射混凝土性能试验研究 [D]. 西南交通大学, 2020.
- [4] 王平,刘国明,刘伟. 矿用喷射混凝土的发展及现状 [J]. 山东煤炭科技, 2015 (12): 28-29+31.

(下转第 139 页)

高精准确的数据基础。

### 参 考 文 献

- [1] 苟欢欢. 基于激光散射测量的虚拟建筑空间重建设计[J]. 激光杂志, 2021, 42 (12): 160-164.
- [2] 刘翔宇, 王健, 常清法, 等. 改进贪婪投影三角化算法的激光点云快速三维重建[J]. 激光与红外, 2022, 52 (5): 763-770.
- [3] 杨书广. 基于深度反向投影的感知增强超分辨率重建模型[J]. 应用光学, 2021, 42 (4): 691-697+716.
- [4] 宋燕飞, 罗尧治, 沈雁彬, 等. 基于双目视觉与图像识别的网架结构三维重建[J]. 空间结构, 2020, 26 (4): 28-35+74.
- [5] 武镇邦, 李恒凯, 王玉青, 等. 融合多源数据的古城构件模型库三维重建方法[J]. 测绘科学, 2021, 46 (8): 205-212.
- [6] 李晓璐, 周亚同, 何静飞, 等. 全变分正则化非局部均值地震数据降噪[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42 (6): 1106-1110.
- [7] 李宗民, 张鹏, 刘玉杰, 等. 结合注意力模型与双峰高斯分布的深度哈希检索算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32 (5): 759-768.
- [8] 张润, 冯云霞. 基于交叉熵的倾斜文本图像细节特征提取仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37 (7): 489-492.
- [9] 陈继明, 许辰航, 李鹏, 等. 基于时频分析与分形理论的GIS局部放电模式识别特征提取方法[J]. 高电压技术, 2021, 47 (1): 287-295.
- [10] 毛亚琼, 田立勤, 王艳, 等. 引入局部向量点积密度的数据流离群点快速检测算法[J]. 计算机工程, 2020, 46 (11): 132-138+147.
- [11] 刘骥, 曾文亮, 梁晓升. 深度图辅助的主动轮廓分割算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37 (1): 287-290.
- [12] 姚钦舟, 庄苏锋, 屠大维, 等. 水下透视投影图像非线性畸变校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (2): 176-183.
- [13] 王永祥, 周小杨, 张周焕, 等. 基于变参数矩阵PMSM无传感器控制[J]. 控制工程, 2021, 28 (2): 345-353.
- [14] 刘颖, 刘倩, 李大湘, 等. 基于PTM模型文物纹理映射算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56 (12): 209-214.
- [15] 韩雪娟, 李国东. 动态猫变换和混沌映射的图像加密算法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41 (8): 2381-2387.
- [5] 班逸轩, 蒋焱, 叶向阳, 等. 纳米二氧化硅对混凝土的性能改良[J]. 山东化工, 2022, 51 (4): 173-174+180.
- [6] TONG J J, CAI Y S, GUI D B, et al. Study on carbonation resistance and micromechanism of shotcrete in high geothermal tunnels[J]. Construction and Building Materials, 2022, 320.
- [7] WU B, CHAI M M, LI S J, et al. Effect of Fly Ash Content in Shotcrete on Mechanical Properties [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2168 (1).
- [8] 郑小魁. 基于离散元法湿喷混凝土回弹率研究[D]. 安徽理工大学, 2021.
- [9] 孙超. 喷射混凝土掺硅灰配合比设计与质量控制[J]. 四川水泥, 2020 (2): 11+20.
- [10] 李鹏程. 湿喷混凝土射流碰壁回弹实验及数值模拟研究[D]. 山东科技大学, 2019.
- [11] 林振涛. 硅灰掺量对喷射混凝土性能的影响试验研究[J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47 (3): 1-3+8.
- [12] LIU Z X, BIAN W H, PANG, et al, Michael Aizenshtein. Influences on shotcrete rebound from walls with random roughness[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018.
- [13] 靳杰. 喷射混凝土用速凝剂的行业现状及发展趋势[J]. 中国标准化, 2018 (12): 89-90.
- [14] 王子明, 贾琳, 王庄, 等. 喷射混凝土及速凝剂研究发展现状与趋势[C]//中国混凝土外加剂研究与应用进展-2018年科隆杯论文汇编(下), 2018: 78-84.
- [15] 杨文超. 高强超微喷射混凝土外加剂的研究与应用[J]. 铁路采购与物流, 2018, 13 (2): 33-36.
- [16] 尹大祥, 王宏波, 刘瑛, 等. 高强超微外加剂在喷射混凝土中的运用[J]. 科技创新导报, 2017, 14 (3): 16-19.
- [17] IKUMI T, SALVADOR RENAN P, AGUADO A. Mix proportioning of sprayed concrete: A systematic literature review [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2022.

(上接第 86 页)