

# 严寒环境下磷酸镁水泥材料早期性能研究

王乐凡<sup>1</sup>, 张继超<sup>1</sup>, 郭鹏硕<sup>1</sup>, 王泽<sup>2</sup>, 种小雷<sup>1</sup>, 任鼎<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 95877部队, 甘肃酒泉, 735000;

3. 长安大学都柏林国际交通学院, 西安, 710018)

**摘要** 针对当前常用于道面修复的硅酸盐系水泥在严寒环境( $-20^{\circ}\text{C}$ )下水化趋于停滞, 强度生成困难的问题, 选择在负温环境下仍能正常水化的磷酸镁水泥作为研究对象, 研究了水灰比、硼砂掺量、聚羧酸减水剂掺量、萘系减水剂掺量对严寒环境下磷酸镁水泥早期性能的影响规律, 并给出了最优配合比。研究结果表明, 严寒环境下水灰比的增加会降低抗折强度, 延长凝结时间, 但对于抗压强度影响较小; 硼砂掺量与强度基本呈先增加后降低的趋势, 在5%时强度表现较好; 随聚羧酸减水剂的增加抗压强度呈先增加后减小的趋势, 抗折强度在1h呈同样规律, 后期则呈负相关。萘系减水剂掺量则与强度呈负相关。因此, 严寒环境下配合比建议选择为水灰比0.16, 硼砂掺量5%, 聚羧酸减水剂掺量0.4%。研究结果可为严寒环境机场道面快速修复工程提供理论支撑。

**关键词** 严寒环境; 磷酸镁水泥; 聚羧酸减水剂; 萘系减水剂; 力学性能; 工作性能

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.05.002

**中图分类号** TU528 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0010-09

## Research on Early Performance Optimization for Magnesium Phosphate Cement Materials in Severe Cold Environment

WANG Lefan<sup>1</sup>, ZHANG Jichao<sup>1</sup>, GUO Pengshuo<sup>1</sup>, WANG Ze<sup>2</sup>, CHONG Xiaolei<sup>1</sup>, REN Ding<sup>3</sup>

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 95877, Jiuquan 735000, Gansu, China; 3. Dublin School of International Transport, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

**Abstract** Aimed at the problems that the hydration of Portland cement commonly used in pavement repair is tending towards stagnation, and the strength is difficult to generate under severe cold environment ( $-20^{\circ}\text{C}$ ), a magnesium phosphate cement is selected which can still hydrate normally under negative temperature environment. The effects of water-cement ratio (W/C), borax content, polycarboxylate superplasticizer content and naphthalene superplasticizer content on the early performance of magnesium phosphate cement in severe cold environment are studied, and the optimal ratio is given. The results show that the increase of W/C in cold environment enables to reduce the flexural strength and prolong the condensation time, but has little effect on the compressive strength. The borax dosage and strength basically show

**收稿日期**: 2024-04-03

**基金项目**: 西安市青年人才托举计划项目(095920221380)

**作者简介**: 王乐凡(1989-), 男, 陕西咸阳人, 副教授, 研究方向为机场道面抢修材料。E-mail: ganyilejidian@163.com

**通信作者**: 张继超(1997-), 男, 山东潍坊人, 博士生, 研究方向为机场道面结构。E-mail: zhangjichao930@163.com

**引用格式**: 王乐凡, 张继超, 郭鹏硕, 等. 严寒环境下磷酸镁水泥材料早期性能研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(5): 10-18. WANG Lefan, ZHANG Jichao, GUO Pengshuo, et al. Research on Early Performance Optimization for Magnesium Phosphate Cement Materials in Severe Cold Environment[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(5): 10-18.

a trend of increasing first and then decreasing, and the strength performance is better at 5%. With the increase of polycarboxylate superplasticizer, the compressive strength shows a trend of increasing first and then decreasing. And the flexural strength shows the same law at 1 h, and then shows a negative correlation at the later stage. The content of naphthalene superplasticizer is negatively correlated with strength. Therefore, this paper recommends to choose the mix ratio of 0.16 W/C, 5% borax dosing and 0.4% polycarboxylate superplasticizer dosing in the cold environment. The results of this paper can provide a theoretical support for the rapid repair of airport pavement in the severe cold environment.

**Key words** severe cold environment; magnesium phosphate cement; polycarboxylate superplasticizer; naphthalene superplasticizer; mechanical properties; working performances

机场道面修复区域抗压强度大于 20 MPa 时,即可满足大多数飞机起降要求。目前常温环境下常规快速修复技术已经较为成熟,多种无机和有机材料均可应用于机场道面快速修复工程,修复后材料可以快速硬化,迅速恢复机场跑道功能,且修复后具有优良的耐久性<sup>[1]</sup>。然而现实情况是机场跑道作为暴露设施,修复环境复杂,仅局限于常温环境修复,会极大程度制约我空军战斗力。我国西部、北部和西北部大面积地区冬季气候寒冷,温度往往会达到 -20 °C,甚至更低。这种环境下,传统的无机类快速修复材料水化反应趋于停滞,强度难以生成;有机类材料虽可快速硬化,但是价格昂贵,不适宜大面积使用,且由于材料组成不同,线膨胀系数差异,温差大时粘结面易脱开,出现二次破损。故研究一种适用于严寒环境机场道面快速修复的无机胶凝材料是非常必要的。

磷酸镁水泥(magnesium phosphate cement, MPC)主要是由重烧氧化镁(M)和磷酸盐(P)为主要成分,掺入适量外加剂和掺合料,按照一定比例混合配制而成的水硬性胶凝材料,具有快凝早强、力学性能好、体积稳定性好、抗渗性好、耐久性好等优势<sup>[2-5]</sup>,其在机场道面应急修补中有着广泛的应用前景。

近年来一些学者开始对低温条件下 MPC 的性能开展研究,以探究其在严寒条件下的工程应用前景。在低温环境下加入粉煤灰可改善 MPC 材料的内部孔结构,促进浆体的水化<sup>[6-7]</sup>。通过对比低温环境(-5~ -10 °C)养护与自然条件养护,发现温度对于 MPC 材料的早期强度影响大于后期影响,后期强度甚至要高于自然养护下的 MPC 试件<sup>[7-8]</sup>。陶琦等<sup>[9]</sup>研究了负温环境养护 MPC 混凝土的强度发展规律,发现 -10 °C 时力学性能影响不大, -20 °C 时力学性能明显降低。当温度降到 -20 °C,李茂等<sup>[10]</sup>给出了最佳配合比, W/C 为 0.14、M/P 为 5.0、G/C 为 2.0 时强度可达到最大值,此时选取硼砂掺量为氧化镁质量的 2% 较为合

适。Yuan 等<sup>[11]</sup>同样给出在 -20 °C 时 M/P 建议取值为 4 或 5。Jia 等<sup>[12]</sup>和袁杰等<sup>[13]</sup>从氧化镁出发,以部分轻烧镁替换重烧镁来提高活性,甚至可实现 -20 °C 环境下以冰雪混拌取代拌合水来成型 MPC 材料,但代价为凝结时间延长 4 倍,24 h 强度降低 20%。Jia 等<sup>[14]</sup>还提出以稀磷酸作为早强剂来进一步提高 MPC 砂浆在严寒环境中的强度发展速度。这些研究论证了 MPC 负温条件仍能发生水化,生成强度,但低温会延长 MPC 的凝结时间,降低早期强度,这就需要调整 MPC 的材料组成设计进行性能调节。

由于常温环境下 MPC 凝结过速,工作性差,故硼砂常被选用作 MPC 的缓凝剂,但在低温下研究发现,硼砂掺量越多 MPC 的早期强度越低<sup>[15-16]</sup>,在应用时应选择合适的掺量。此外,也有学者在常温环境分别采用粉煤灰<sup>[6-7,17-18]</sup>、硅灰<sup>[19]</sup>、聚羧酸减水剂<sup>[20]</sup>、萘系减水剂<sup>[21]</sup>、偏高岭土<sup>[22]</sup>、纤维<sup>[23]</sup>等外加剂和掺合料对 MPC 材料进行改性,均具有一定效果。

基于此,本文通过环境试验箱模拟严寒环境温度,以工作性能和力学性能为指标,以水灰比、缓凝剂和减水剂为参数,研究严寒环境下 MPC 各组成材料对早期性能的影响规律,得到适用于严寒环境抢修工程的 MPC 最优配合比,为 MPC 在机场道面抢修的应用提供参考。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

重烧氧化镁,淡黄色粉末状,由菱镁矿( $MgCO_3$ )在 1 800 °C 下煅烧破碎后获得,如图 1 所示。氧化镁的活性影响着 MPC 的凝结时间,其化学成分如表 1 所示。

磷酸二氢铵( $NH_4H_2PO_4$ ),白色颗粒状,工业级,纯度为 99%,如图 2 所示;硼砂( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ),白色粉末,工业级,纯度为 95%;集料:细

度模数 2.74 的灞河中砂;拌合水:实验室水质清洁的自来水;萘系减水剂:黄棕色粉末,工业级;聚羧酸减水剂:白色粉末,工业级。



图 1 重烧 MgO

Fig. 1 Dead burned MgO

图 2 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>Fig. 2 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>

表 1 重烧氧化镁化学成分表

Tab. 1 Chemical compositions of dead burned MgO

| 氧化物  | MgO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | 其他   |
|------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|
| 含量/% | 86.42 | 6.58             | 1.15                           | 0.68                           | 2.02 | 3.15 |

## 1.2 试件制备

砂浆的配合比为氧化镁:磷酸二氢铵=3:1,水灰比 0.13~0.19,硼砂掺量 3%~7%,聚羧酸减水剂掺量 0.2%~0.6%,萘系减水剂掺量 0.50%~1.00%,具体配合比及外加剂掺量方案分别如表 2、表 3 所示。

表 2 基本配合比

Tab. 2 Basic mix proposition

| 序号 | 水灰比  | 硼砂掺量/% |
|----|------|--------|
| 1  | 0.13 | 3      |
| 2  | 0.16 | 5      |
| 3  | 0.19 | 7      |

表 3 外加剂掺量

Tab. 3 Additives content

| 序号 | 萘系减水剂掺量/% | 聚羧酸减水剂掺量/% |
|----|-----------|------------|
| 1  | 0.50      | 0.2        |
| 2  | 0.75      | 0.4        |
| 3  | 1.00      | 0.6        |

可编程环境试验箱最低温度可设置为-50℃,满足试件养护条件。环境箱主要由箱体、制冷系统、压强控制系统,液晶操作面板组成,可实现对箱体内温度和气压的实时监控,如图 3 所示。

为了排除温度对试验的影响,将环境箱保持为-20℃恒温条件,试验材料放置在环境箱中预冷 24 h。按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》,将砂浆进行拌合,当水泥搅拌均匀后,倒入砂浆试模,置于环境箱中,为保证试件成型效果,1 h 后再进行脱模。养护至相应龄期后立即测试其性能。由于对 MPC 的强度试验测试水泥早期性能尤为重要,故分别于 1 h、3 h、24 h 龄期应用抗折抗压一体机进行抗折强度和抗压强度测试,如图 4

所示。工作性能则在搅拌好之后直接在环境箱中测试。

## 1.3 试验方法

根据《JTG 3420—2020 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》进行水泥胶砂强度试验,将养护至相应龄期的试件取出立即进行强度试验,试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体,抗折强度测试后的断块用于抗压强度的测试。为保证试验数据准确,每组试验每个龄期测试 5 个试件,测试结果取平均值。

流动度和凝结时间测定:为了排除温度这一影响因素,除了搅拌过程,其余试验步骤均在环境箱中完成。由于 MPC 凝结较快,初凝和终凝时间间隔较短,以初凝时间定义为 MPC 的凝结时间。搅拌时先低速搅拌 30 s,材料充分混合后,再高速搅拌 120 s,然后将混合料倒入跳桌的试模中,如图 5 所示。流动度测试则将倒入维卡仪试模中,再放入环境箱测量,如图 6 所示。



图 3 可编程环境试验箱

Fig. 3 Programmable environmental test chamber



图 4 抗折抗压一体机

Fig. 4 Integrated bending and compression machine



图 5 流动性测试

Fig. 5 Fluidity test



图 6 凝结时间测试

Fig. 6 Setting time test



MPC 胶砂抗折强度计算公式如下所示:

$$R_f = \frac{1.5F_f L}{b^3} \quad (1)$$

式中: $F_f$  为折断时施加于棱柱体中部的荷载,单位为 N; $L$  为支撑圆柱之间的距离,单位为 mm; $b$  为棱柱体正方形截面边长,单位为 mm。

MPC 胶砂抗压强度计算公式如下所示:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (2)$$

式中: $F_c$  为破坏时最大荷载,单位为 N; $A$  为受压面积,单位为  $\text{mm}^2$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水灰比对 MPC 早期性能的影响

-20 °C 条件下,水灰比对 MPC 砂浆抗压强度、抗折强度的影响分别如图 7 和图 8 所示。由图可知,随龄期的增长,MPC 的强度整体呈增强趋势。水灰比与水泥抗压强度的理论关系应该是水灰比越小,抗压强度越高。因为决定水泥强度的主要因素是水化产物和水泥的相对密实度,水灰比较低时,单位体积内水化物凝聚体密集,即相比高水灰比而言,水化产物间的孔径较小,所以强度较高,故 0.13 和 0.16 水灰比的水泥不同龄期时的抗压强度普遍高于 0.19 水灰比。但是从图中可以看出在 1 h 和 3 h 龄期时,0.13 水灰比的抗压强度最大,而在 24 h 龄期时 0.16 水灰比的抗压强度增至最大,这种现象是上文提到的。对于同一水灰比的 MPC,随着水化的进行,生成的鸟粪石继续填充孔隙,在这个过程中可能会破坏原有结构,造成一定程度的强度损失,因此会造成在 3 h 时出现强度低于 1 h 强度的现象。决定水泥强度的因素主要有 2 点,除了水化产物孔径以外还有水化产物的生成量,而同一龄期下,水灰比越高水泥的水化程度越高,这是由于水对水泥颗粒分离的程度不同,水灰比大时,能够为水泥水化提供更多的水,所以水化反应能够进行的较为完全,这种因素对于强度的影响,龄期越长,反映得越明显。综上 2 种因素的共同作用,故水灰比为 0.13 时,龄期为 1 h 和 3 h 抗压强度最大;而水灰比为 0.16 时,前期抗压强度次之,后期强度最大。水灰比与水泥抗折强度的理论关系应该是,水灰比越小,抗折强度越高。决定因素同水灰比对抗压强度的影响一致,故水灰比为 0.13 时,龄期为 1 h、3 h 和 24 h 抗折强度最大;水灰比 0.16 次之,水灰比 0.19 最小。

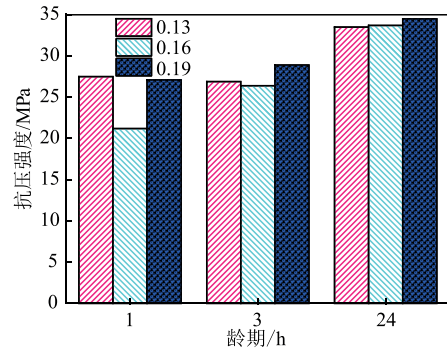


图 7 水灰比对抗压强度的影响

Fig. 7 Effect of W/C on compressive strength

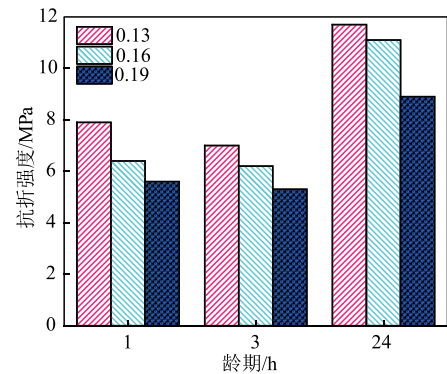


图 8 水灰比对抗折强度的影响

Fig. 8 Effect of W/C on flexural strength

工作性能如图 9 所示,水灰比在 0.13~0.19 之间时,凝结时间逐渐延长,水灰比为 0.13 时,MPC 的凝结时间达到了 8.18 min;而水灰比为 0.16 时,MPC 的凝结时间已经达到 15.52 min,此时 MPC 已具备小规模修补工程的工作性要求;水灰比增大到 0.19 时,MPC 的凝结时间为 17.63 min。

水灰比在 0.13~0.19 之间时,砂浆流动度逐渐提高,水灰比为 0.13 时,MPC 砂浆流动度达到了 131 mm;而水灰比为 0.16 时,MPC 砂浆流动度已经达到 181 mm,此时 MPC 已具备小规模修补工程的工作性要求;水灰比增大到 0.19 时,MPC 的砂浆流动度为 202 mm。但试验实际情况显示,水灰比为 0.13 时,拌合物呈颗粒状无法形成整体,工作性能不佳。因此,在后续试验中选择水灰比为 0.16。

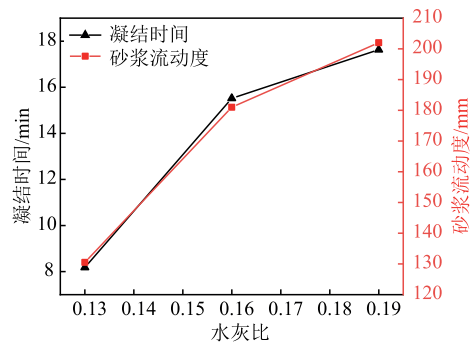


图 9 水灰比对工作性能的影响

Fig. 9 Effect of W/C on working performance

## 2.2 硼砂掺量对 MPC 早期强度的影响

硼砂掺量对 MPC 性能影响较大,不仅是硼砂作为缓凝剂对水泥凝结时间的影响,同时也会对水泥的强度产生影响,特别是早期强度。

硼砂对 MPC 砂浆抗压强度的影响如图 10 所示。由图 10 可知,水泥在 3 h 的抗压强度,硼砂掺量为 3% 时达到最高的 30.3 MPa;硼砂掺量为 7% 时,3 h 抗压强度最低,为 19.6 MPa。龄期为 24 h 时,5% 硼砂掺量的水泥强度最高为 33.7 MPa,相比于之前,3% 掺量的水泥强度增长减缓,但仍高于硼砂掺量为 7% 的 MPC。

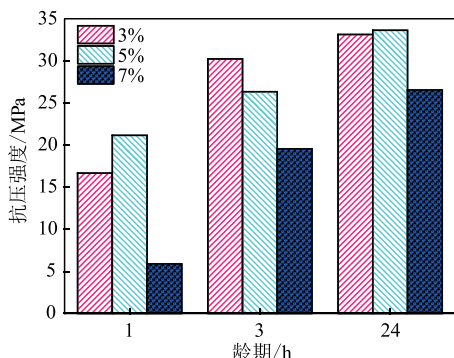


图 10 硼砂掺量对抗压强度的影响

Fig. 10 Effect of borax content on compressive strength

硼砂对 MPC 砂浆抗折强度的影响如图 11 所示。由图 11 可知,水泥在 3 h 的抗折强度,硼砂掺量为 5% 时达到最高的 8.2 MPa;硼砂掺量为 7% 时,3 h 抗折强度最低,为 5.2 MPa。龄期为 24 h 时,5% 硼砂掺量的水泥强度最高为 11.1 MPa,相比于之前,3% 掺量的水泥强度增长减缓,低于硼砂掺量为 7% 的配合比水泥。这是由于硼砂掺量为 3% 时,水化反应由于少量缓凝剂的参与,反应特别迅速,快速高热反应的发生,使得水泥在极短时间内凝结形成强度,而这样过快的反应会使得水化产物容易形成团簇,使得后期的水化反应难以进行,且过快反应会造成水泥孔隙率大,致密性不好,这些都会影响水泥的后期强度,故掺入 3% 硼砂时,MPC 的后期强度较低。而 3 h 龄期之后,硼砂掺量为 5% 的水泥强度始终保持最高。

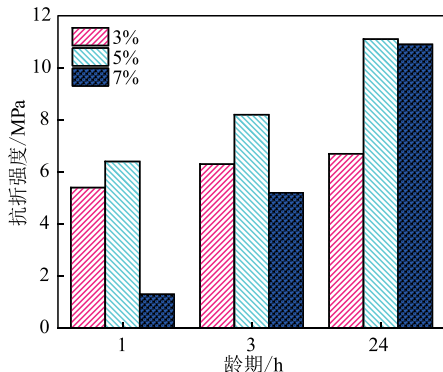


图 11 硼砂掺量对抗折强度的影响

Fig. 11 Effect of borax content on flexural strength

由图 12 可知,硼砂对 MPC 凝结时间存在较大影响,硼砂掺入量越大,凝结时间越长,硼砂掺量为 3% 时,MPC 的凝结时间达到了 10.28 min;而硼砂掺量为 5% 时,MPC 的凝结时间已经达到 15.52 min,此时 MPC 已具备小规模修补工程的要求;硼砂掺量增大到 7% 时,MPC 的凝结时间为 25.63 min。硼砂对 MPC 的砂浆流动度存在较大影响,硼砂掺入量越大,砂浆流动度越大,硼砂掺量为 3% 时,MPC 的砂浆流动度达到了 172 mm;而硼砂掺量为 5% 时,MPC 的砂浆流动度达到 181 mm,此时 MPC 已具备小规模修补工程的工作性要求;硼砂掺量增大到 7% 时,MPC 的砂浆流动度为 189 mm。根据试验结果可知,MPC 的砂浆流动度在试验范围(硼砂掺量为 3%~7%)内,与硼砂掺量基本呈线性关系,但是由于硼砂的缓凝作用存在峰值,故推测 MPC 的砂浆流动度随硼砂掺量的增加,先增大后基本不变,硼砂掺量对 MPC 的砂浆流动度的提高存在峰值。

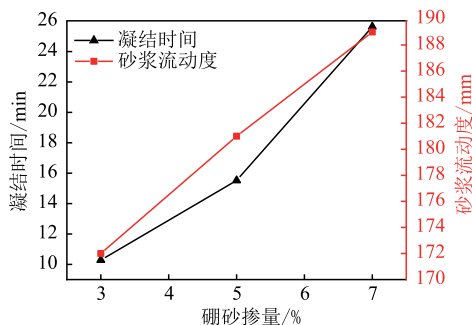


图 12 硼砂掺量对工作性能的影响

Fig. 12 Effect of borax content on working performance

综合考虑以上试验结果,硼砂掺量为 3% 时早期抗压强度不满足抢修要求,凝结时间过短;硼砂掺量为 7% 时早期抗压强度、抗折强度不满足要求;5% 的硼砂掺量不仅在早期力学性能方面能够更好地满足抢修的要求,同时也能具备小规模修补工程的工作性要求,因此,在后续的试验中选择硼砂掺量为 5%。

## 2.3 不同减水剂掺量对 MPC 早期性能的影响

### 2.3.1 聚羧酸减水剂

减水剂通常用于普通混凝土中,在水灰比不变的情况下,提高混凝土的工作性能,或在保证工作性能不变的情况下,通过减小水灰比来提高混凝土的力学性能。为明确减水剂对 MPC 的作用效果,采用固定水灰比及硼砂掺量,聚羧酸减水剂掺量范围为 0.2%~0.6% 进行试验,得到 MPC 胶砂的早期性能如下。

聚羧酸减水剂对 MPC 砂浆抗压强度的影响如图 13 所示,在 1 h 和 3 h 龄期时 MPC 的抗压强度

随聚羧酸减水剂掺量呈增大而先上升后下降的趋势,且在掺量为 0.2%左右时达到峰值,而在 24 h 龄期时不加聚羧酸减水剂的 MPC 抗压强度最高。聚羧酸减水剂掺量为 0.2%时,在 1 h 和 3 h 龄期时抗压强度均最高且满足规范要求,在 24 h 龄期时达到了 28.9 MPa,仅次于对照组的强度。聚羧酸减水剂掺量为 0.4%时,抗压强度在 1 h 和 3 h 龄期时均仅次于 0.2%聚羧酸减水剂掺量,但也满足规范要求,且在 24 h 时较 0.2%聚羧酸减水剂掺量下降不多,为 27.7 MPa。聚羧酸减水剂掺量为 0.6%时,抗压强度在所有龄期时均为最低值,且在 1 h 和 3 h 龄期时未达到规范要求。

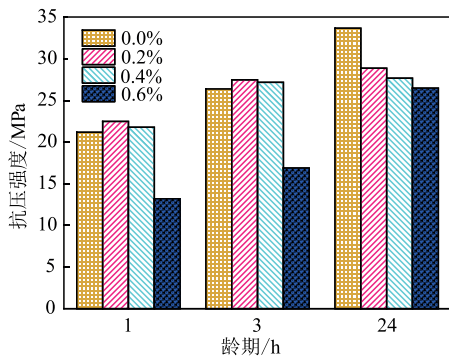


图 13 聚羧酸减水剂掺量对抗压强度的影响

Fig. 13 Effect of polycarboxylate superplasticizer content on compressive strength

聚羧酸减水剂对 MPC 砂浆抗折强度的影响如图 14 所示,在试验范围内,MPC 的抗折强度在 1 h 龄期时随聚羧酸减水剂掺量的增大而先上升后下降,而在 3 h 和 24 h 龄期时随聚羧酸减水剂掺量的增大而逐步下降。在所有聚羧酸减水剂掺量下,抗折强度均随实验范围内龄期增加而上升,且掺量为 0.2%和 0.4%时在各龄期时均满足规范要求,而聚羧酸减水剂掺量为 0.6%时,抗折强度在 1 h 龄期时未达到规范要求,仅为 4.8 MPa,在 3 h 龄期时增长到 5.3 MPa,满足抢修要求。

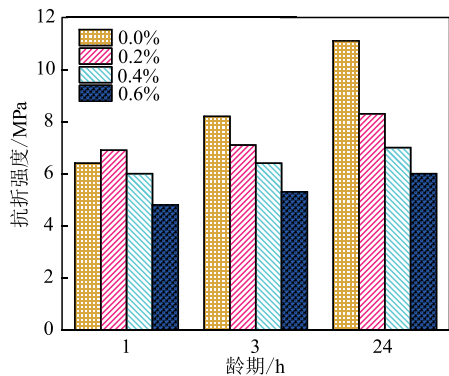


图 14 聚羧酸减水剂掺量对抗折强度的影响

Fig. 14 Effect of polycarboxylate superplasticizer content on flexural strength

由于在水灰比不变的条件下,减水剂的加入相当于水量的相对增加即水灰比相对增大,据水灰比相对 MPC 的影响规律可知,水灰比越大,MPC 的强度越低,故随聚羧酸减水剂掺量的增加,MPC 的强度逐渐降低;但龄期为 1 h 和 3 h,聚羧酸减水剂掺量为 0.2%和 0.4%时,MPC 的抗压强度较对照组略高,原因可能为加入减水剂后 MPC 工作性能有很大提高,使 MPC 的振实效果更好,试件内部气泡减少,自身缺陷减少,整体性提高,使 MPC 试件的抗压强度得到提高。抗折强度基本为对照组最大,其余随减水剂掺量增加而减小,原因同抗压强度下降相同,水灰比随减水剂掺量增加而相对增大,自由水增多,水化反应完成后 MPC 中因自由水消耗或蒸发产生的空隙增加,最终导致 MPC 强度下降。

如图 15 所示,在聚羧酸减水剂掺量 0.0%~0.6%之间,凝结时间逐渐延长且存在凝结时间最长的掺量,聚羧酸减水剂掺量为 0.0%时,MPC 的凝结时间达到了 15.52 min;聚羧酸减水剂掺量为 0.2%时,MPC 的凝结时间达到了 15.67 min;而聚羧酸减水剂掺量为 0.4%时,MPC 的凝结时间已经达到 17.55 min;聚羧酸减水剂掺量增大到 0.6%时,MPC 的凝结时间为 17.18 min。根据试验结果分析,在聚羧酸减水剂掺量为 0.4%附近存在凝结时间最长的掺量;相对于对照组,聚羧酸减水剂的掺入使 MPC 的凝结时间延长 1~2 min,验证了在力学性能试验中减水剂对 MPC 具有一定的缓凝作用的猜想,其作用机理可能为水灰比相对增大导致,但缓凝效果仍达不到缓凝剂(硼砂)对 MPC 的缓凝效果。

在聚羧酸减水剂掺量 0.0%~0.6%之间,砂浆流动度逐渐增大。根据试验结果分析,MPC 砂浆流动度随聚羧酸减水剂掺量的增加而增大,增长的趋势随聚羧酸减水剂的掺量增加而减缓,但是对砂浆流动度的提高明显强于硼砂对其的提高。

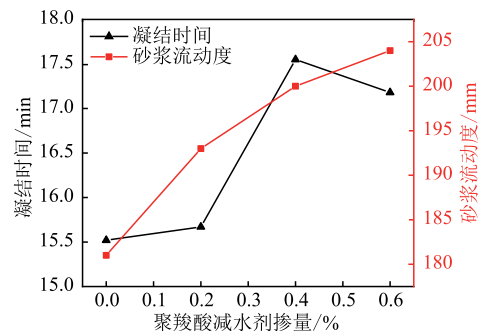


图 15 聚羧酸减水剂对工作性能的影响

Fig. 15 Effect of polycarboxylate superplasticizer content on working performance

### 2.3.2 萘系减水剂

在 MPC 砂浆的力学性能试验中发现萘系减水



剂的掺加也会对水泥的工作性能产生较大的影响。

萘系减水剂对 MPC 砂浆抗压强度、抗折强度的影响如图 16、图 17 所示。由图 16 和图 17 可知,相较于对照组,MPC 的力学性能随萘系减水剂掺量的增加而大幅减少。试验结果中,仅有 0.50% 萘系减水剂掺量的 MPC 在 24 h 龄期时同时满足规范中对抗压强度和抗折强度的要求。且对于抗折强度,0.50% 萘系减水剂掺量的 MPC 在 1 h 龄期时为 4.9 MPa,在可控范围内,在 3 h 龄期时能够达到规范要求。

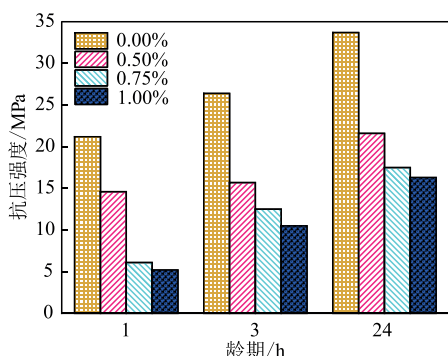


图 16 萘系减水剂掺量对抗压强度的影响

Fig. 16 Effect of naphthalene superplasticizer content on compressive strength

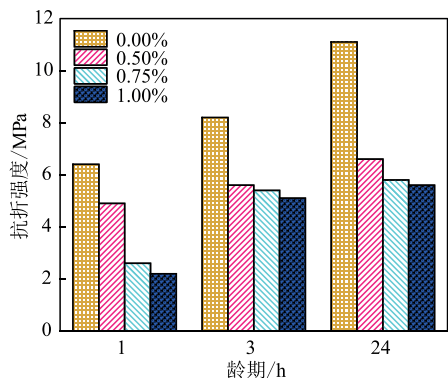


图 17 萘系减水剂掺量对抗折强度的影响

Fig. 17 Effect of naphthalene superplasticizer content on flexural strength

由试验结果可知萘系减水剂对 MPC 早期强度影响较大,其抗压强度和抗折强度下降明显,对比聚羧酸减水剂试验结果分析,可能有如下原因导致。萘系减水剂掺量过大,导致 MPC 水灰比相对过大,使其内部自由水过多,在水化反应后产生大量空隙,对 MPC 砂浆试件的整体性产生较大影响,促进其破坏时微裂缝扩展,使得 MPC 试件强度下降;水灰比的相对增大对 MPC 的凝结硬化产生了一定的缓凝效果,根据掺量为 0.50% 和掺量为 0.75% 作对比可知,掺量为 0.50% 的强度增长基本在 1 h 内完成,后期强度增长缓慢,掺量为 0.75% 的强度增长基本在 1~3 h 之间完成。3 h 后强度增长缓慢,则说明

萘系减水剂的加入具有一定的缓凝效果,使 MPC 的凝结硬化速度降低,使其强度快速增长的持续时间延长。

MPC 的凝结时间如图 18 所示,在萘系减水剂掺量 0.00%~1.00% 之间,凝结时间逐渐延长且存在凝结时间最长的掺量,萘系减水剂掺量为 0.00% 时,MPC 凝结时间达到了 15.52 min;萘系减水剂掺量为 0.50% 时,MPC 凝结时间达到了 16.50 min;而萘系减水剂掺量为 0.75% 时,MPC 的初凝时间已经达到 17.60 min;萘系减水剂掺量增大到 1.00% 时,MPC 的凝结时间为 17.33 min。根据试验结果分析,在萘系减水剂掺量为 0.75% 附近存在凝结时间最长的掺量;相对于对照组,萘系减水剂的掺入使 MPC 的凝结时间延长 1~2 min,验证在力学性能试验中减水剂对 MPC 具有一定的缓凝作用的猜想,其作用机理可能为水灰比相对增大导致,缓凝效果同样达不到缓凝剂(硼砂)对 MPC 的缓凝效果。

在萘系减水剂掺量 0.00%~1.00% 之间,砂浆流动度逐渐增大。根据试验结果分析,MPC 的砂浆流动度随萘系减水剂掺量的增加而增大,增长的趋势随萘系减水剂的掺量增加基本不变,因此推断当前萘系减水剂试验掺量未体现其对 MPC 砂浆流动度提高的峰值,但是对砂浆流动度的提高明显强于硼砂对其的提高。

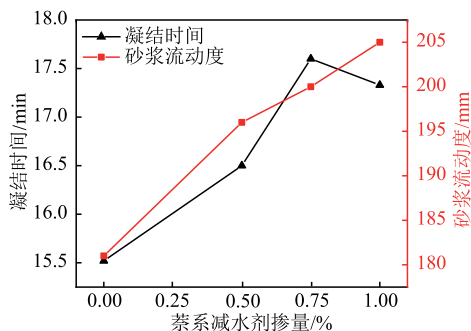


图 18 萘系减水剂对工作性能的影响

Fig. 18 Effect of naphthalene superplasticizer content on working performance

### 3 结论

通过对试验结果综合分析,将 MPC 的配合比进行优化设计,得出严寒环境下 MPC 的最优配合比及最优减水剂掺量。

1) MPC 抗压强度随水灰比增加,呈现先减小后增加的趋势,抗折强度与随水灰比增加呈反比。但在水灰比为 0.16 时,MPC 的力学性能较好,此外凝结时间达到 15.52 min,流动度为 181 mm,更符合抢修及施工的相关要求。

2)随硼砂掺量的增加,MPC力学性能基本呈先增后减的变化。在掺量5%时力学性能较好,1 h抗折强度仍控制在5 MPa以上,1 h抗压强度达到15 MPa以上,此外工作性能也满足抢修及施工的要求。

3)随着聚羧酸掺量的增加,MPC强度呈下降趋势,流动度和凝结时间均有所增大。当聚羧酸减水剂掺量为0.4%时,MPC的凝结时间得到较小幅度的延长,流动度有较大提高,相比于0.2%掺量具有较好的工作性能。此外,0.4%掺量下MPC的力学性能仍可满足抢修及施工要求。

4)同样,随着聚羧酸掺量的增加,MPC强度呈下降趋势,流动度和凝结时间均有所增大,并且萘系减水剂造成MPC强度损失相比聚羧酸减水剂更明显,在3 h时0.5%掺量下的抗折强度勉强达到抢修要求。

5)在一定范围内水灰比对MPC早期性能影响规律为:早期力学性能随水灰比增大而减小,水灰比为0.16时,早期力学性能最优;工作性能随水灰比的增大而提高,水灰比为0.19时,工作性能最好。硼砂掺量对MPC早期性能影响规律为硼砂掺量越大工作性能越高,但力学性能降低明显,硼砂掺量为5%时为最优。减水剂的掺入会降低MPC力学性能,提高工作性能,聚羧酸减水剂效果优于萘系减水剂,最优掺量为0.4%。

## 参考文献

- [1] YEO S H, MO K H, HOSEN M A, et al. Properties of Cementitious Repair Materials for Concrete Pavement[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022(1): 3057801. (in Chinese)
- [2] HUANG X M, LIU G D, ZHENG Y, et al. The Performance of Magnesium Phosphate Cement in Negative Temperature Environment: a State-of-the-Art Review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76:107278.
- [3] FENG H, SHAUKAT A J, RIN D, et al. Mechanical Properties of High-Ductility Magnesium Phosphate Cement Composite Cured at Low Temperatures[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44:103275.
- [4] FENG H, NIE S, GUO A F, et al. Flexural Behavior of High Ductility MPC-Based Composites under Low-Temperature Curing [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 300: 124231.
- [5] LUO X Z, LAI Z Y, LIU Z, et al. Effect of Modified Magnesium Oxide on the Properties of Magnesium Phosphate Cement under a Negative Temperature Environment[J]. *Materials*, 2022, 15(24): 9047.
- [6] 伊海赫,张毅,陆建兵,等. 低温条件下磷酸镁水泥的失效研究[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(1): 197-201. YI H H, ZHANG Y, LU J B, et al. Failure Mechanism of Magnesium-Phosphate Cement under Low Temperature Curing Condition [J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2014, 33(1): 197-201. (in Chinese)
- [7] 路毅. 低温下粉煤灰改性磷酸镁水泥性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(12): 3596-3600. LU Y. Performance of Magnesium Phosphate Cement Modified with Fly Ash under Low Temperatures [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(12): 3596-3600. (in Chinese)
- [8] 陈歆,刘文,崔安琪,等. 高海拔地区低温成型磷酸镁水泥砂浆力学与抗冻性能[J]. *材料导报*, 2024, 38(17): 1-18. CHEN X, LIU W, CUI A Q, et al. Mechanical Properties and Freeze-Thaw Cycling Resistance of Magnesium Phosphate Cement Mortar Prepared at Low Temperatures in Highland Regions [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(17): 1-18. (in Chinese)
- [9] 陶琦,王岩. 负温下磷酸镁水泥混凝土的力学性能与抗冻性能[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1181-1186. TAO Q, WANG Y. Mechanical Properties and Frost Resistance of Magnesium Phosphate Cement Concrete under Negative Temperature [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1181-1186. (in Chinese)
- [10] 李茂,岳燕飞,钱觉时,等. 低温磷酸镁水泥混凝土的力学性能[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(2): 194-202. LI M, YUE Y F, QIAN J S, et al. Strength Properties of Low Temperature Magnesium Phosphate Cement Concrete [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(2): 194-202. (in Chinese)
- [11] YUAN J, HUANG X, CHEN X, et al. Early-Age Mechanical Properties and Hydration Degrees of Magnesium Phosphate Cement Paste in Freezing Winter of Cold Regions [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 345: 128337.
- [12] JIA X W, LI J M, WANG P, et al. Preparation and Mechanical Properties of Magnesium Phosphate Cement for Rapid Construction Repair in Ice and Snow [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 116927.
- [13] 袁杰,张志超,陈歆,等. 严寒环境冰水拌和磷酸镁水泥早期力学性能研究[J]. *混凝土*, 2022(8): 10-14. YUAN J, ZHANG Z C, CHEN X, et al. Early-Aged Mechanical Properties of Magnesium Phosphate Cement Mixed with Ice Water in Severe Cold [J]. *Concrete*, 2022(8): 10-14. (in Chinese)
- [14] JIA X W, LUO J Y, ZHANG W X, et al. Preparation and Application of Self-Curing Magnesium Phosphate Ce-



- ment Concrete with High Early Strength in Severe Cold Environments[J]. *Materials*, 2020, 13(23): 5587.
- [15] HIPEDINGER N E, SCIAN A N, AGLIETTI E F. Magnesia-Ammonium Phosphate-Bonded Cordierite Refractory Castables: Phase Evolution on Heating and Mechanical Properties[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(1): 157-164.
- [16] DING Z, DONG B Q, XING F, et al. Cementing Mechanism of Potassium Phosphate Based Magnesium Phosphate Cement[J]. *Ceramics International*, 2012, 38(8): 6281-6288.
- [17] CHINDAPRASIRT P, HOMWUTTIWONG S, SIRIVIVATNANON V. Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(7): 1087-1092.
- [18] 吕炎, 白二雷, 王志航, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚合物混凝土不同龄期动态力学性能[J]. *空军工程大学学报*, 2022, 23(6): 99-106.
- LYU Y, BAI E L, WANG Z H, et al. Dynamic Mechanical Properties of Fly Ash-Slag Based Geopolymer Concrete at Different Ages[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2022, 23(6): 99-106. (in Chinese)
- [19] MA C, LIU Y T, SHI J Y, et al. Influencing Mechanism of Silica Fume on Early-Age Properties of Magnesium Phosphate Cement-Based Coating for Hydraulic Structure[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 54: 104623.
- [20] TAN H B, ZHANG X, GUO Y L, et al. Improvement in Fluidity Loss of Magnesia Phosphate Cement by Incorporating Polycarboxylate Superplasticizer[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 887-897.
- [21] 汪宏涛, 钱觉时, 曹巨辉. 磷酸镁水泥基材料复合减水剂的应用研究[J]. *建筑材料学报*, 2007, 10(1): 71-76.
- WANG H T, QIAN J S, CAO J H. Study on the Compound Water Reducing Admixture of Magnesia-Phosphate Cement-Based Material[J]. *Journal of Building Materials*, 2007(1): 71-76. (in Chinese)
- [22] SHAH V, SCOTT A. Hydration and Microstructural Characteristics of MgO in the Presence of Metakaolin and Silica Fume[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 121: 104068.
- [23] TANG Z B, CHEN D D, WANG X P, et al. Impact of Polyethylene Fiber on the Ductility and Durability of Magnesium Phosphate Cement[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 68: 106123.

(编辑: 韩茜)

## (上接第 9 页)

- [39] 曾孟源, 赵鸿铎, 吴获非, 等. 基于振动感知的混凝土铺面板底脱空识别方法[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(3): 42-52.
- ZENG M Y, ZHAO H D, WU D F, et al. Identification of Cavities Underneath Concrete Pavement Based on Pavement Vibration[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(3): 42-52. (in Chinese)
- [40] 金辰, 曾孟源, 吴获非. 基于振动传递的水泥混凝土路面接缝损伤感知[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(6): 1736-1745.
- JIN C, ZENG M Y, WU D F. Damage Identification of Concrete Pavement Joint Using Vibration Transmissibility[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(6): 1736-1745. (in Chinese)
- [41] HOFFMAN N, GARCIA L, RUSHING T. Evaluation of AM2 2-1 Lay Pattern over a 25 CBR Subgrade [R]. Vicksburg: The US Army Engineer Research and Development Center, 2018
- [42] GARTRELL C A, NEWMAN J K, ANDERTON G L. Performance Measurements of Pavement Matting Systems by Full-Scale Testing over Differing Soil Strengths[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21(10): 561-568.
- [43] EDWARDS L, BELL H, OPPERMAN M. Alternatives for Large Crater Repairs Using Rapid Set Concrete Mix[R]. Vicksburg: The US Army Engineer Research and Development Center, 2021.
- [44] PRIDDY L P, TINGLE J S. Development of Expedient Military Concrete Airfield Pavement Repairs[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2014, 66(1): 25-35

(编辑: 韩茜)