

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.01.020

# 无缓凝剂磷酸镁修补砂浆的力学性能实验研究

谭永山<sup>1</sup> 余红发<sup>1,2</sup> 姚祥<sup>1</sup> 肖卫<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁, 810008;  
3. 温州市公共建筑建设投资有限公司, 温州, 325000)

**摘要:**磷酸镁水泥(Magnesium phosphate cement, MPC)是一种快速修补型胶凝材料,具备快硬、早强、高强、粘结力强、耐久性好等优点。首先运用正交试验方法,通过控制胶砂比、氧化镁与磷酸二氢盐的物质的量比(M/P)和水胶比,确定了基准 MPC 修补砂浆的最优配合比。然后研究了粉煤灰和磨细矿渣对 MPC 修补砂浆抗压强度和抗折强度的影响,分析了其强度特征。结果表明,MPC 修补砂浆的最佳 M/P 比为 6:1,胶砂比 1:1。掺加粉煤灰的 MPC 修补砂浆具有较高的强度尤其是抗折强度,适宜作为道路与机场道面的快速修补材料。掺加磨细矿渣的 MPC 修补砂浆,其力学性能不如掺加粉煤灰的 MPC 修补砂浆。此外,MPC 修补砂浆的抗折强度和抗压强度之间具有密切的线性相关关系,且与养护龄期、原材料来源与烧结温度、是否掺加缓凝剂和矿物掺合料、M/P 比和水胶比等因素无关。

**关键词:**快速修补材料;磷酸镁水泥;含硼氧化镁;矿物掺合料;强度

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2018)01-0138-07

## Experimental Study on Mechanics Properties of Magnesium Phosphate Repair Mortar Without Retarder

TAN Yongshan<sup>1</sup>, YU Hongfa<sup>1,2</sup>, YAO Xiang<sup>1</sup>, XIAO Wei<sup>3</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;  
2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;  
3. Wenzhou Public Building Construction Investment Co., LTD., Wenzhou, 325000, China)

**Abstract:** Magnesium phosphate cement (MPC) is a kind of rapid repairing cementitious materials, and it has many advantages, such as rapid setting, high early strength, high strength, and bonding strength and good durability. Firstly, we use the orthogonal test design method. By controlling the binder-sand ratio (B/S), molar ratio of magnesium and phosphate (M/P), and water-binder ratio, we find the MPC repair mortar benchmark optimal mixture. Afterwards, based on the optimal proportion of the MPC repair mortar, the influence of fly ash and slag on the compressive strength and flexural strength of MPC rapid repair mortar are studied. The results show that the optimum proportion of rapid repairing mortar is M/P=6:1 and B/S=1:1. Besides, the addition of fly ash can improve the strength of MPC mortar, especially the flexural strength. Thus, the MPC repair mortar blended with fly ash is suitable as a rapid repairing material. However, when the MPC mortar mixed with slag, the mechanical properties are not performing as well as the MPC mortar mixed with fly ash. In addition, the flexural strength of MPC

**基金项目:**国家自然科学基金(21276264)资助项目。

**收稿日期:**2016-11-11;**修订日期:**2017-03-13

**通信作者:**余红发,男,教授,博士生导师,E-mail:yuhongfa@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**谭永山,余红发,姚祥,等. 无缓凝剂磷酸镁修补砂浆的力学性能实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2018,50(1):138-144. TAN Yongshan, YU Hongfa, YAO Xiang, et al. Experimental study on mechanics properties of magnesium phosphate repair mortar without retarder[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018,50(1):138-144.

mortar has close linearity correlation in the compressive strength. And there is no correlation between strength and factors including curing period, source of raw materials, sintering temperature, adding retarder or mineral admixtures, M/P ratio and water-binder ratio.

**Key words:** rapid repairing material; magnesium phosphate cement; boron magnesium oxide; mineral admixtures; strength

磷酸镁水泥(Magnesium phosphate cement, MPC)通常由烧结氧化镁、磷酸盐和缓凝剂(硼酸盐)按一定的比例配制而成。MPC 凝结硬化快、强度高、与原有混凝土材性相近,而且施工方便、耐磨性高、耐久性好,易于养护,价格适中,可以在较低的温度下施工,是道路路面快速抢修的一种理想材料。MPC 不需要特别的养护,在大气环境中即可凝结硬化,节约了养护的时间,加速了道路修补的速度。20 世纪 80 年代,欧洲等发达国家就利用 MPC 材料的快硬高强性质,把它大量应用于桥梁、道路及飞机跑道等工程的快速修补。Yang 等<sup>[1]</sup>研究了 MPC 作为修补混凝土抗盐冻剥蚀的性能,发现 MPC 修补混凝土具有较好的抗盐剥蚀性能和抗冻融性能。香港科技大学 Qiao 等<sup>[2]</sup>将 MPC 用于修补建筑框架的梁柱等构件。

目前,为了获得高性能的 MPC 修补材料,主要从以下方面开展制备技术研究工作:氧化镁与磷酸二氢盐的物质的量比(M/P),缓凝剂掺量,胶砂比,水胶比,矿物掺合料等。李鹏晓等<sup>[3-4]</sup>采用  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  取代  $\text{NH}_2\text{PO}_4$ ,并研究了水胶比对 MPC 早期强度的影响,按照抗压强度评价方法,发现 MPC 修补材料的最佳 M/P 比为 4~5。谭永山等<sup>[5]</sup>研究发现,通常硼砂掺量为 10% 时可以满足现场施工要求,但是当硼砂掺量达到 10% 时,MPC 的 3 h 强度仅为 30 MPa,远不能满足快速修补材料的早期强度要求。姜洪义等<sup>[6]</sup>研究表明,当水胶比为 0.1 时,MPC 的 28 d 的抗压强度达到最大值。林玮等<sup>[7]</sup>研究了 MPC 材料的粉煤灰效应,发现掺加粉煤灰不仅可以使结构更密实,还可以减少 MPC 材料的用水量,大大改善其工作性能。侯磊等<sup>[8]</sup>研究表明,掺加矿渣能够缩短 MPC 材料的凝结时间,但同时可改善 MPC 的力学性能,当矿渣掺量为 40% 时,其净浆 28 d 抗压强度可以达到 99.4 MPa。陈兵等<sup>[9]</sup>研究表明,掺加粉煤灰不但可以降低 MPC 的成本,还可显著改善 MPC 材料的流动性和延长凝结时间,粉煤灰的最佳掺量为 40%~50%。

鉴于硼酸(盐)与烧结氧化镁用量占 MPC 胶凝材料总量的 60% 以上,导致 MPC 造价非常昂贵,严重制约其工程应用。谭永山等<sup>[10]</sup>首次利用

盐湖提锂副产品含硼氧化镁作为重烧 MgO 的替代原料用来制备 MPC,其烧结温度仅 1 000~1 200 °C,而且不掺加硼酸盐类缓凝剂,不仅能够变废为宝,而且可以节约成本。肖卫<sup>[11]</sup>继续研究了盐湖副产含硼氧化镁 MPC 的力学性能。本文重点研究盐湖副产含硼氧化镁 MPC 修补砂浆的抗压抗折强度及其强度特征。

## 1 实 验

### 1.1 原材料

#### (1) 氧化镁

所用的白色氧化镁(简称 M)原料来自青海中信国安科技公司提取  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  工艺过程中的副产品——含硼氧化镁,其化学成分见表 1。含硼氧化镁经过 1 000 °C KSF-10-14 高温炉煅烧 3 h 后,自然冷却,然后在 QM-3SP4(4L)行星式球磨机中球磨 5 min,其细度(0.080 mm 筛余率)为 5.1%。

#### (2) 磷酸二氢钾

磷酸二氢钾(简称 P)为分析纯, $\text{KH}_2\text{PO}_4$  含量不低于 99.5%,先在 100 °C 烘箱中将其烘干,待其冷却后,再放入 QM-3SP4(4L)行星式球磨机中球磨 5 min,其细度(0.080 mm 筛余率)为 9.8%。

#### (3) 粉煤灰

江苏镇江谏壁电厂苏源公司 I 级粉煤灰(Fly ash, FA),细度(45  $\mu\text{m}$  方孔筛筛余率)不大于 4.6%,烧失量 3.1%,需水比 92%,化学成分见表 2。在通过正交试验得到基准配比(编号 F0)的基础上,分别掺加 10%,20%,30%,40% 的粉煤灰,编号分别为 F10, F20, F30 和 F40。

#### (4) 矿渣

江南粉磨有限公司 S95 级高性能矿渣微粉(Slag, SG),比表面积 416  $\text{m}^2/\text{kg}$ ,其化学成分如表 2 所示。在通过正交试验得到基准配比 F0 的基础上,分别掺加 10%,20%,30% 的磨细矿渣,编号分别为 S10, S20 和 S30。

#### (5) 砂

南京产河砂,表观密度 2 520  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,堆积密度 1 600  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,含泥量 1.0%,细度模数 2.7,属于 II 区级配,中砂。

表1 含硼氧化镁的化学成分

成分	MgO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Li <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
含量	82.63	4.63	1.24	0.77	0.27	0.14	0.031	0.76	9.53

表2 粉煤灰和矿渣的化学成分

矿物掺合料	化学成分								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI
FA	4.77	54.88	26.89	6.49	1.31	1.16	1.05	0.88	3.1
Slag (SG)	34.54	28.15	16.00	1.10	6.00	0.32	0.45	0.46	2.88

## 1.2 试件制备

按照设计配比,将 MPC 各种原材料倒入胶砂搅拌机中,先干拌 30 s,再加水搅拌 90 s,然后迅速浇注、振动成形 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体试件,30 min 后脱模。

## 1.3 实验方法

凝结时间的测试方法参照 GB/T1346—2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》执行。抗压强度和抗折强度采用 300 kN 万能伺服试验机测定,具体测试方法参照《GB/T17671—1999 水泥胶砂强度检验方法》执行。

# 2 结果与讨论

## 2.1 基准 MPC 修补砂浆的配合比优化设计

按照正交试验方法设计,考虑的试验因素主要有胶砂比、M/P 比、水胶比。考核指标为 3 h 和 1 d 抗压强度。表 3 为因素水平表。试验方案与试验结果详见表 4,其中 R 表示极差。由表可见,3 h 和

1 d 抗压强度最高的 MPC 修补砂浆配合比组合条件为 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>,即胶砂比为 1:1,M/P 比为 4,水胶比为 0.22。

表3 因素水平表

因素水平	A 胶砂比	BM/P	C 水胶比
1	1:1.0	4:1	0.22
2	1:1.5	5:1	0.24
3	1:2.0	6:1	0.26

图 1 是基准 MPC 修补砂浆的抗压强度影响因素趋势图。由图 1 可见,对于 3 h 抗压强度指标来说,胶砂比影响最显著,其次是水胶比,M/P 比影响较小;对于 1 d 抗压强度,水胶比影响最为显著,胶砂比次之,M/P 比的影响最小。根据图 1 所示的因素影响趋势图,发现 3 h 抗压强度最高的组合条件是 A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>(1#实验),而 1 d 抗压强度最高的组合条件是 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>。无论是对于 3 h,还是 1 d

表4 磷酸镁水泥抗压强度正交试验表

Tab. 4 Orthogonal test results of compressive strength of MPC

编号	胶砂比	M/P	水胶比	空列	凝结时间/ min	抗压强度/MPa	
						3 h	1 d
J <sub>1</sub>	1(1:1)	1(4:1)	1(0.22)	1	22	61.7	64.5
J <sub>2</sub>	1(1:1)	2(5:1)	2(0.24)	2	20	51.8	59.0
J <sub>3</sub>	1(1:1)	3(6:1)	3(0.26)	3	15	47.7	47.9
J <sub>4</sub>	2(1:1.5)	1(4:1)	2(0.24)	3	19	43.8	60.7
J <sub>5</sub>	2(1:1.5)	2(5:1)	3(0.26)	1	17	33.0	58.2
J <sub>6</sub>	2(1:1.5)	3(6:1)	1(0.22)	2	16	42.3	60.3
J <sub>7</sub>	3(1:2)	1(4:1)	3(0.26)	2	18	19.9	51.2
J <sub>8</sub>	3(1:2)	2(5:1)	1(0.22)	3	19	25.0	55.1
J <sub>9</sub>	3(1:2)	3(6:1)	2(0.24)	1	16	21.2	54.3
$\bar{K}_1$	53.7(57.1)	41.8(58.8)	43.0(60.0)	38.6(59.0)			
$\bar{K}_2$	39.7(59.7)	36.6(57.4)	38.9(58.0)	38.0(56.8)			
$\bar{K}_3$	18.7(53.5)	37.1(54.2)	33.5(52.4)	38.8(54.6)		346.4	511.2
R	35(6.2)	5.2(4.6)	9.5(7.5)	0.2(4.4)			

注:括弧内数值为 1 d 抗压强度的统计数据。

抗压强度的影响,M/P比均属于次要因素,考虑到降低MPC成本,M/P比可取6。

为了实现早强高强与快速修补的目的,确保3 h具有较高的抗压强度,综合确定基准MPC修补砂浆的最优基准配合比为胶砂比1:1,M/P比6。当水胶比为0.26,基准MPC修补砂浆的实测凝结时间能达到15 min。

对于1 d抗压强度指标来说,水胶比影响最为显著,胶砂比显著,M/P的影响最小。依据图1,达

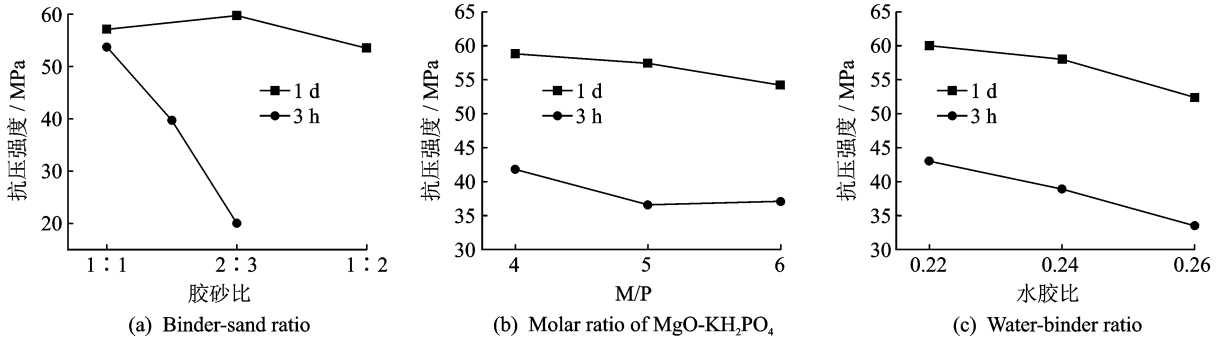


图1 MPC 修补砂浆配合比因素对3 h和1 d抗压强度的影响

Fig. 1 Influence of mix proportion on 3 h and 1 d compressive strength of MPC repair mortar

## 2.2 实用型MPC修补砂浆

### 2.2.1 粉煤灰对MPC修补砂浆力学性能的影响

图2是不同粉煤灰掺量时MPC修补砂浆的抗压与抗折强度。其中,胶砂比为1:1,M/P为6,水胶比为0.24,粉煤灰掺加方式为内掺。由图可见,对于不掺加粉煤灰的基准MPC修补砂浆,其3 h,1 d,7 d和28 d抗压强度分别达到47.6,53.1,55.3和59.0 MPa,相应龄期的抗折强度分别达到6.9,7.3,7.5和7.9 MPa。当MPC修补砂浆中掺加粉煤灰以后,随着粉煤灰掺量的增加,MPC修补砂浆在龄期7 d之内的抗压强度逐渐降低,在粉煤灰掺量为20%和40%时其7 d抗压强度分别为48.4和25.8 MPa,比基准MPC修补砂浆分别降低了12.5%和53.3%。但是,粉煤灰掺量对于抗折强度的影响规律与抗压强度影响规律则有所差异。在粉煤灰掺量为10%时其7 d抗折强度比基准MPC修补砂浆反而提高了5.3%(达到7.9 MPa),当粉煤灰掺量超过10%以后才随着粉煤灰掺量的增大而下降。在粉煤灰掺量达到40%时7 d抗折强度比基准MPC修补砂浆降低了29.3%。在养护龄期延长到28 d时,粉煤灰掺量对于抗压与抗折强度的影响规律,与7 d之内有很大的区别。随着粉煤灰掺量的增加,MPC修补砂浆的28 d抗压强度是先提高、后降低,其最高抗压强度67.0 MPa所对应的粉煤灰掺量为10%~

到最高抗压强度的组合条件为A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>。考虑到MPC水泥成本问题且M/P对3 h抗压强度影响较小,故M/P可取6,即以1 d抗压强度为指标来看,胶砂比为1:1.5,水胶比为0.22,M/P为6,此时实测凝结时间能达到16 min。

综合3 h和1 d抗压强度指标来看,为达到快速修补的目的,早强高强的目标,综合成本考虑,选取最优基准配合比为胶砂比1:1,水胶比0.22,M/P比6。

20%,此时MPC修补砂浆的28 d抗压强度提高了12.9%~13.6%。而28 d抗折强度则是随着粉煤灰掺量的增加而持续提高的,当粉煤灰掺量在10%,30%和40%时,MPC修补砂浆的28 d抗折强度分别提高了14.5%,22.4%和28.9%,分别达到8.7,9.3和9.8 MPa。究其原因可能是由于粉煤灰具有活性效应,在水化后期(28 d),新生成的含有镁、钾、磷、铝、硅的凝胶水化产物(简称MK-PAS凝胶),该凝胶产物是MgO与KMgPO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O(MPC主要水化产物和强度相)和粉煤灰铝硅玻璃相之间发生复杂的二次水化反应的产物<sup>[7,10]</sup>。该凝胶水化产物将会改善MPC砂浆的抗折强度。此外,MPC浆体不同于硅酸盐水泥,MPC浆体黏稠,不易流动,成形时大量包裹的气泡不易排出。由于粉煤灰存在形态效应和填充效应,掺加了粉煤灰后,粉煤灰球状形态的润滑作用使MPC浆体流动性显著改善,从而使MPC密实度提高,其形态效应使MPC体系的用水量降低,从而改善了粉煤灰MPC的后期抗折强度。

因此,对于道路与机场跑道的快速修补,以提高抗折强度为主要目标,为了尽早开放交通,可以采用较低的粉煤灰掺量如10%,对于不要求早期高抗折强度的场合,可以选择掺加40%粉煤灰的低成本MPC修补砂浆。对于建筑结构中混凝土梁柱结构的修补,以提高抗压强度为主要目标,可以选择掺加20%粉煤灰的MPC修补砂浆。

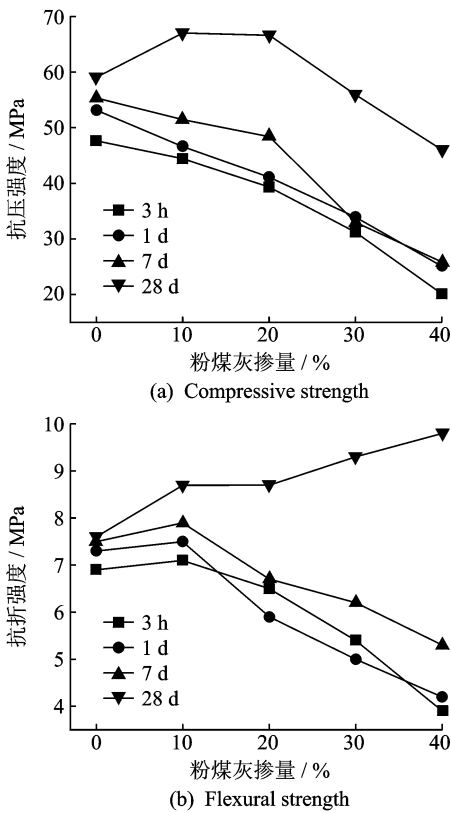


图2 MPC 修补砂浆的强度与粉煤灰掺量之间的关系

Fig. 2 Relationship between strength of MPC repair mortar and dosage of fly ash

### 2.2.2 磨细矿渣对 MPC 修补砂浆力学性能的影响

图3为不同磨细矿渣掺量下 MPC 修补砂浆的抗压强度和抗折强度。其中,胶砂比为 1:1, M/P 为 6,水胶比为 0.28,磨细矿渣掺量按照内掺法计算。由图可见,在水胶比为 0.28 时,基准 MPC 修补砂浆的 3 h,1 d,7 d 和 28 d 抗压强度分别达到 47.6,53.1,55.3 和 59.0 MPa,抗折强度分别为 6.9,7.3,7.5 和 7.9 MPa。对于掺加矿渣的 MPC 修补砂浆,不同龄期的抗压强度与抗折强度均随着矿渣掺量的增加而下降。对于掺加 10% 磨细矿渣的 MPC 修补砂浆,其 3 h 和 28 d 抗压强度分别为 27.4 和 51.9 MPa,比基准 MPC 修补砂浆分别降低了 42.4% 和 12.0%,比掺加 10% 粉煤灰的 MPC 修补砂浆分别降低了 38.3% 和 22.5%,其 3 h 和 28 d 抗折强度分别为 4.6 和 7.3 MPa,分别比基准 MPC 修补砂浆降低了 33.3% 和 7.6%,比掺加 10% 粉煤灰的 MPC 修补砂浆分别降低了 35.2% 和 16.1%。综上所述,在 MPC 修补砂浆中掺加矿渣影响了其力学强度,其增强效果明显不如掺加粉煤灰。这主要是由于矿渣微粉不规则的形貌不会降低 MPC 的流动性,使 MPC 体系用水量增加,从而降低了 MPC 浆体的密实度,进而致使

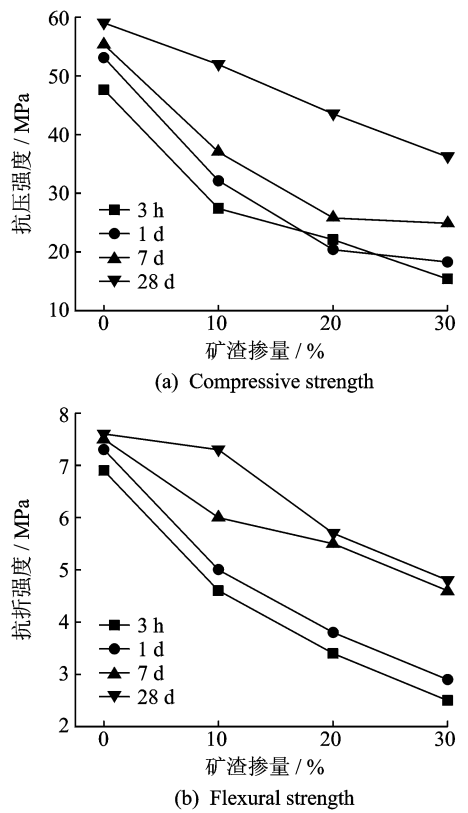


图3 不同磨细矿渣掺量下的 MPC 砂浆强度

Fig. 3 Compressive strength of MPC mortar blended with various contents of slag

MPC 强度下降。因此,相对而言,掺矿渣的 MPC 修补砂浆并非最佳选择。

### 2.3 MPC 修补砂浆的强度特征

#### 2.3.1 无缓凝剂 MPC 修补砂浆的强度特征

图4(a)是本文无缓凝剂 MPC 修补砂浆的抗折强度与抗压强度之间的关系。其中,包括 3 类 MPC 修补砂浆,第 1 类是基准 MPC 修补砂浆,其养护龄期包括 3 h 和 28 d;第 2 类和第 3 类分别是掺加粉煤灰和磨细矿渣的 MPC 修补砂浆,其养护龄期分别为 3 h,1 d,7 d 和 28 d。由图 4(a)可见,MPC 修补砂浆的抗折强度和抗压强度之间具有显著的线性关系,且与龄期、矿物掺合料、配比无关。

$$f_t = Af_{cc} + B \quad (1)$$

式中: $f_t$  为抗折强度 (MPa); $f_{cc}$  为抗压强度 (MPa); $A$  和  $B$  是回归系数,这里  $A=0.1097$ , $B=1.79115$ ,临界相关系数  $r_{(48,0.01)}=0.36103$ ,可见, $r \gg r_{(48,0.01)}$ ,表明式(1)非常显著。

#### 2.3.2 不同原材料来源的 MPC 修补砂浆强度特征

对于盐湖提锂副产氧化镁低温烧结 MgO 制备的无缓凝剂 MPC 修补砂浆,其抗折强度与抗压强度之间具有非常显著的线性关系,该规律是否属

于 MPC 修补砂浆的共性规律,需要进一步分析研究。图 4(b)是不同原材料来源的 MPC 修补砂浆的抗折强度与其抗压强度之间的关系。其中,既包括本文的 1 000 °C 低温烧结氧化镁制备的无缓凝剂 MPC 修补砂浆,也包括采用 1 500~1 800 °C 高温烧结 MgO 和硼酸盐缓凝剂制备的 MPC 修补砂浆,强度数据包括养护龄期范围为 1 h~28 d。这里,其他学者研究 MPC 修补砂浆的配合比信息如下:杨全兵等<sup>[12]</sup>采用 M/P=4/1,硼砂内掺 5%,胶砂比 1:1,水胶比为 0.17;李鹏晓等<sup>[3]</sup>采用 M/P=4/1,硼砂掺量为氧化镁质量的 4%,胶砂比 1:1,水胶比为 0.20;汪宏涛等<sup>[4]</sup>采用 M/P=4/1,硼砂外掺 2%,胶砂比 1:1,水胶比为 0.18;Qiao 等<sup>[2]</sup>采用的 M/P 分别为 6:1,8:1,10:1 和 12:1,硼砂掺量为氧化镁质量的 7.5%,胶砂比 1.5:1,水胶比为 0.20;雒亚莉等<sup>[13]</sup>采用 M/P=4/1,硼砂掺量为氧化镁质量的 6%,胶砂比 1:1,水胶比为 0.11。

由图 4(b)可见,尽管烧结 MgO 的来源和烧结温度不同,是否参加硼酸盐缓凝剂,MPC 的配比也不同,但是,MPC 修补砂浆的抗折强度与抗压强度

之间仍然具有显著的线性关系,同样可以采用式(1)来表示,经过重新回归分析,式(1)的回归系数  $A=0.128\ 58, B=0.808\ 96$ ,此时临界相关系数  $r_{(91,0.01)}=0.265\ 87, r \gg r_{(91,0.01)}$ ,表明式(1)非常显著。

因此,MPC 修补砂浆的抗折强度与抗压强度之间的线性相关关系是 MPC 的共性规律。

### 3 结 论

(1) 普通 MPC 材料的主要原材料烧结 MgO 是由菱镁矿经 1 500~1 800 °C 高温烧结而成的,而本文 MPC 采用盐湖提锂副产氧化镁制备的烧结 MgO,其烧结温度仅需 1 000 °C。普通 MPC 因凝结太快,必须掺加一定数量的硼酸盐缓凝剂,而本文制备的 MPC 不需要缓凝剂。因此,本文制备的 MPC 可以用于制备低成本、低能耗的快速修补材料。

(2) 采用盐湖提锂副产氧化镁的 1 000 °C 低温烧结 MgO 制备 MPC 修补材料时,MPC 的基本 M/P 比为 6:1,基准 MPC 修补砂浆的胶砂比 1:1。

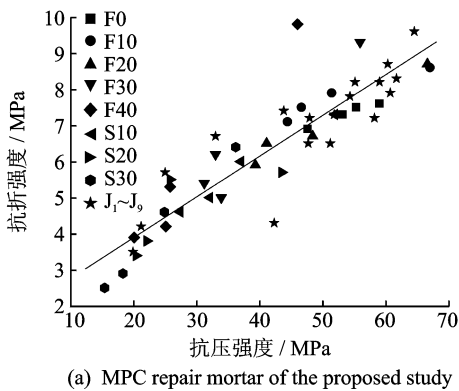
(3) 掺加一定掺量的粉煤灰,可以提高 MPC 修补砂浆的强度尤其是抗折强度,适宜作为道路与机场道面的快速修补材料。粉煤灰 MPC 修补砂浆的最佳配合比为 M/P=6:1,粉煤灰掺量为 10%,胶砂比为 1:1,在水胶比为 0.24 时该 MPC 修补砂浆的 3 h 抗压和抗折强度分别达到 44.4 和 7.1 MPa,28 d 抗压和抗折强度分别高达 67.0 和 8.7 MPa。当粉煤灰掺量达到 40%时,MPC 修补砂浆的 28 d 抗折强度为 9.8 MPa,属于高抗折强度的修补材料。

(4) 掺加磨细矿渣的 MPC 修补砂浆,其抗压强度与抗折强度受到了较大的影响,其力学性能不如掺加粉煤灰的 MPC 修补砂浆。在 10% 掺量条件下,与掺加粉煤灰的 MPC 修补砂浆相比,掺加磨细矿渣时的 3 h 抗压与抗折强度分别降低了 38.3% 和 35.2%,28 d 抗压与抗折强度降低幅度分别为 22.5% 和 16.1%。

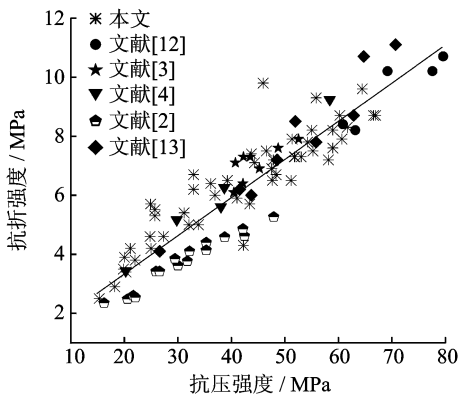
(5) MPC 修补砂浆的抗折强度和抗压强度之间具有密切的线性相关关系,且与养护龄期、原材料来源与烧结温度、是否掺加缓凝剂和矿物掺合料、M/P 比和水胶比等因素无关。

### 参考文献:

[1] YANG Q B, WU X L. Factors influencing properties of phosphate cement-based binder for rapid repair of



(a) MPC repair mortar of the proposed study



(b) MPC repair mortar from different sources

图 4 不同类型 MPC 修补砂浆的抗折强度与其抗压强度的关系

Fig. 4 Relationship between flexural strength and compressive strength for different types of MPC repair mortar

- concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(3): 389-396.
- [2] QIAO F, CHAU C K, LI Zongjin. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material[J]. *Construction and Building Materials*, 2009(24): 695-700.
- [3] 李鹏晓, 杜亮波, 李东旭. 新型早强磷酸镁水泥的制备和性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2008, 27(1): 20-25.  
LI Pengxiao, DU Liangbo, LI Dongxu. The preparation and study on the new high early strength magnesium phosphate cement[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 27(1): 20-25.
- [4] 汪宏涛. 高性能磷酸镁水泥基材料研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
WANG Hongtao. Study on the high performance magnesia-phosphate cement based composites [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [5] 谭永山, 余红发, 李颖, 等. 利用盐湖提锂副产含硼氧化镁制备粉煤灰磷酸钾镁水泥[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(11): 1362-1368.  
TAN Yongshan, YU Hongfa, LI Ying, et al. Preparation of fly ash magnesium potassium phosphate cement using byproduct magnesium oxide containing boron from salt lakes[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 42(11): 1362-1368.
- [6] 姜洪义, 张联盟. 磷酸镁水泥的研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2001, 23(4): 32-34.  
JIANG Hongyi, ZHANG Lianmeng. The study on magnesium phosphate cement[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2001, 23(4): 32-34.
- [7] 林玮, 孙伟, 李宗津. 磷酸镁水泥中的粉煤灰效应研究[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(6): 716-721.  
LIN Wei, SUN Wei, LI Zongjin. Study on the effects of fly ash in magnesium phosphate cement [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(6): 716-721.
- [8] 侯磊, 李金洪, 王浩林. 矿渣磷酸镁水泥的力学性能和水化机理[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(4): 721-726.  
HOU Lei, LI Jinhong, WANG Haolin. Mechanical property and hydration mechanism of slag blended magnesium phosphate cement[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(4): 721-726.
- [9] 陈兵, 吴震, 吴雪萍. 磷酸镁水泥改性试验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 31(4): 29-34.  
CHEN Bing, WU Zhen, WU Xueping. Experimental research on the properties of modified MPC [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 31(4): 29-34.
- [10] 谭永山. 利用盐湖提锂副产含硼氧化镁制备磷酸镁水泥的试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.  
TAN Yongshan. Experimental study on the magnesium potassium phosphate cement prepared by the by-product of magnesium oxide after producing  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  from salt lakes [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [11] 肖卫. 磷酸镁水泥机场快速修补材料的物理力学性能和耐久性[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
XIAO Wei. Physical mechanical properties and durability of airport rapid repairing materials of magnesium phosphate cement [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [12] 杨全兵, 吴学礼. 新型超快硬磷酸盐修补材料的研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 1995(6): 13-30.  
YANG Quanbing, WU Xueli. Study on a new type of super fast hard phosphate repair material [J]. *China Concrete and Cement Products*, 1995(6): 13-30.
- [13] 雒亚莉. 新型早强磷酸镁水泥的试验研究和工程应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.  
LUO Yali. Experimental study on magnesium phosphate cement with high early strength and its applications [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.

(编辑:张蓓)