

磷酸镁水泥及其修补砂浆耐水性研究进展

刘俊霞¹, 燕依梦¹, 海 然¹, 王雪平²

(1. 中原工学院建筑工程学院, 河南 郑州 450007; 2. 天津城建大学材料科学与工程学院, 天津 300384)

摘要:在总结磷酸镁水泥(MPC)及其修补砂浆耐水性破坏机理的基础上,综述了水胶比、重烧氧化镁和磷酸盐的质量比(M/P)、原材料颗粒级配、矿物掺合料种类与掺量、外加剂种类和养护温湿度条件等对MPC耐水性的影响机制,分析了MPC及其修补砂浆耐水性研究和应用等领域中亟待解决的问题,并提出了掺入矿物掺合料、纳米粒子改性和优选并提升细集料品质等改善MPC及其修补砂浆耐水性和经济性的技术途径。

关键词:磷酸镁水泥; 修补砂浆; 耐水性; 水化产物; 破坏机理

中图分类号:TQ172.79 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0094-07

Research progress on water resistance of magnesium phosphate cement and its repair mortar//LIU Junxia¹, YAN Yimeng¹, HAI Ran¹, WANG Xueping² (1. School of Architectural Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: On the basis of summarizing the mechanism of water resistance destruction of magnesium phosphate cement (MPC) and its repair mortar, the proportion of raw materials, mineral admixtures, additives and curing conditions, such as the effects of water-cement ratio, mass ratio of dead-burned magnesium oxide and phosphate (M/P), particle gradation of raw materials, type and amount of mineral admixture, type of admixture and maintenance temperature and humidity conditions on the water resistance mechanism were reviewed. The urgent problems in the research and application field of MPC water resistance and its repair mortar were analyzed. The technical ways to improve the water resistance and cost of MPC and its repair mortar were proposed, including incorporating mineral dopants, nanoparticle modification, and preferring and upgrading the quality of fine aggregates.

Key words: magnesium phosphate cement; repair mortar; water resistance; hydration products; destruction mechanism

磷酸镁水泥(magnesium phosphate cement, MPC)由重烧MgO、酸式磷酸盐和缓凝剂按适当比例配制而成,具有快硬高强、高水化热和低膨胀的特性,兼具良好的耐磨性和抗冻性^[14]。MPC修补砂浆是以MPC为主要胶凝材料,以单粒径或连续级配砂为骨料,辅以矿物掺合料和外加剂,按物理力学性能和施工环境要求设计配制而成的具有早强、快硬、高强和界面黏结强度高等特性的修补砂浆。与传统快速修补砂浆相比,MPC修补砂浆具有良好的力学性能、耐化学腐蚀性能和钢筋防锈能力^[5-6],并与硫酸盐水泥基体表面的Ca(OH)₂反应生成无定形态的水化产物,新旧水泥间形成了化学键黏结,进一步提高了黏结强度^[7]。此外,在低温施工、早期强度和养护环境等方面MPC具有显著的优势,但当修补

构件长期处于潮湿或者水环境时强度发展缓慢甚至衰减^[8-9]。

MPC修补砂浆价格昂贵,主要用于高速公路、军事工程、海事工程和市区交通要道路段路面等重点工程的短期抢修作业。由于修补构件的服役环境限制并决定了施工和养护方法,水工结构和海事工程结构对MPC修补砂浆耐水性提出了更高的要求^[10-11]。为了改善MPC及其修补砂浆的耐水性,相关学者从MPC的水蚀损伤机理、配合比设计、改性措施和养护工艺等方面展开了广泛研究,并取得了可喜成果。本文在总结MPC及其修补砂浆耐水性破坏机理的基础上,总结了MPC原材料组成、矿物掺合料、外加剂和养护温度等对MPC修补砂浆水化过程、水化产物组成、物理力学性能和耐水性的影响

规律,分析了 MPC 及其修补砂浆耐水性研究和应用中存在的问题,以期为促进 MPC 修补砂浆的应用推广提供参考。

1 MPC 及其修补砂浆耐水性破坏机制

硬化 MPC 是由 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (鸟粪石) 或 $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (K 型鸟粪石)、未水化的 MgO 颗粒和少量的 $\text{MgNH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 等组成的以磷酸盐结晶水化物为主的结构网,具有良好的力学性能。空气养护条件下,MPC 的水化产物呈柱状相互搭接,与少量未反应磷酸盐将未反应的重烧 MgO 包裹连接形成致密整体^[10]。在潮湿或水养条件下,MPC 硬化结构中磷酸盐首先被溶蚀,在孔溶液中形成酸性环境,致使鸟粪石晶体和凝胶部分溶解, MgO 颗粒表面胶结的水化产物也逐渐减少,并在浆体表面和内部形成孔隙和裂纹,结构孔隙率增大,特别是有害孔的数量明显增多,从而导致 MPC 力学性能降低^[12-13]。相关学者^[14-18]进一步试验研究发现,延长空气养护时间可使 MPC 水化更充分,结构更致密,从而大幅减少浸水后磷酸盐的溶出,提高 MPC 的耐水性。

MPC 硬化浆体长期处于潮湿或水环境下,强度和体积稳定性降低,结构内部密实度和水化产物含量下降,鸟粪石晶体的表面出现腐蚀现象,且腐蚀程度随养护湿度的增大而加剧^[19]。Yang 等^[20]将 MPC 修补砂浆养护 7 d 和 28 d 后浸泡到水中继续养护,硬化浆体的强度损失率随浸泡龄期的增长而增大,养护 7 d 浸泡 90 d 的强度损失最为严重。Fan 等^[21]发现大尺寸晶体在水的作用下逐渐分解为小晶体,微观结构疏松和孔隙率增大,MPC 致密性和耐水性下降。

2 配合比对 MPC 修补砂浆耐水性的影响

MPC 修补砂浆的配合比直接影响水化产物的种类、微观形貌和孔结构,其中酸式磷酸盐种类、重烧氧化镁和磷酸盐的质量比 (M/P) 和水胶比的影响尤为显著,胶砂比和骨料性质也在一定程度上影响其密实性和界面黏结性能,此外,原材料的颗粒大小能够改变水化速率、水化热以及水化产物的种类、形貌、孔隙率和孔径分布。因此,合理的配合比参数和原材料特征不仅有利于 MPC 水化,还能够降低 MPC 水化过程中的气泡释放量和孔隙率,从而改善 MPC 修补砂浆的孔结构、密实度和耐水性。

MPC 水化产物中磷酸盐的含量对 MPC 耐水性有显著影响,但不同研究者的试验结果存在一定的差异 (图 1^[12,22-25])。净浆试件的抗压强度随着 M/P

的增大呈上升趋势,水养条件下抗压强度损失率降低^[12]。M/P 在很大程度上影响 MPC 水化产物的结晶度和硬化结构的密实度,随着 M/P 的增大鸟粪石晶体由针状逐渐变为板状、棱柱状至最终无序分布形状,从而显著影响 MPC 的耐水性^[26]。赵晓聪^[22]试验研究表明,M/P 过低时,磷酸盐电离出的 H^+ 会降低溶液的 pH 值,使得鸟粪石在酸性环境下水解;M/P 过高时, K^+ 浓度减小不利于鸟粪石生成,导致水化产物结构疏松以及水化初期的膨胀量增大,对 MPC 的耐水性造成显著影响。

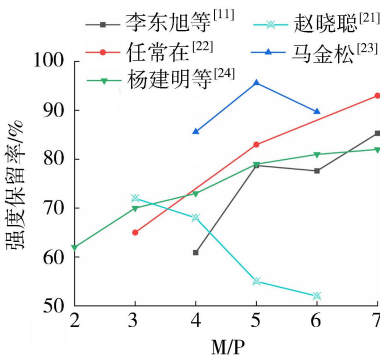


图 1 M/P 对 MPC 耐水性的影响

水胶比影响 MPC 的水化过程、水化产物、孔结构、凝结时间和强度等,原材料组成确定时,通过优选水胶比可使 MPC 具备最佳的物理力学性能^[27-28]。随着水胶比的提高,水化早期 MPC 中磷酸盐溶解程度逐渐增大,水化后期与剩余 MgO 继续反应的磷酸盐减少,硬化浆体内部孔隙得不到有效填充,MPC 的耐水性降低^[16]。而水胶比过低时 MPC 水化反应不充分,新拌料的流动性差,成型过程中产生的气泡不易排出,硬化体中大孔的数量增多。

重烧 MgO 和酸式磷酸盐等的粒径直接影响 MPC 浆体的流动性、水化反应速度和水化产物的大小、分布、结晶程度和孔结构,进而影响其抗渗性和耐水性。降低重烧 MgO 粒径会显著降低 MPC 水化产物的密实性,硬化结构中连通的毛细孔增多,水分浸入后未反应的磷酸盐和 MgO 颗粒发生二次溶解,削弱了水化产物之间的黏结力,导致 MPC 力学性能降低^[29]。 KH_2PO_4 在水中的溶解速率随其粒径减小而加快,水化反应生成的 K 型鸟粪石增多,胶结于未完全反应的重烧 MgO 和无机填料之间,细化硬化结构的孔径,显著提高 MPC 致密性和耐水性^[30]。

MPC 修补砂浆中的砂除了起到骨架作用之外,还可以填充 MPC 结构内部的孔隙,抑制裂缝的产生和发展,提高基体的抗压强度,同时降低 MPC 的制备成本^[31]。但砂含量过高会导致 MPC 修补砂浆中的胶凝材料相对含量降低,生成的鸟粪石减少,结构的致密度下降,导致强度降低,降低结构的水稳定

性^[23]。MPC 修补砂浆砂胶比为 1 时强度最高,且 MPC 修补砂浆抗压强度随着细骨料含量的增加而下降^[32]。随着砂胶比的增大胶凝材料用量减小,生成的水化产物不足以完全包裹未水化的 MgO 和砂,难以形成稳定牢固的结晶结构网,结构致密度显著下降,从而影响 MPC 的耐水能力^[33-34];而 MPC 修补砂浆中砂的增加会削弱硬化浆体的胶结作用,砂子间水化产物含量减少,MPC 修补砂浆的孔隙率增大而耐水性降低^[35]。

3 矿物掺合料对 MPC 及其修补砂浆耐水性的影响

粉煤灰、硅灰、偏高岭土、矿渣和赤泥等矿物掺合料的参与,一方面能够显著降低 MPC 修补砂浆的生产成本,另一方面则通过形态和填充效应提高 MPC 硬化体的致密度,虽然水化后期 MPC 修补砂浆的主要水化产物并未发生改变,但其生成量降低^[36]。不同研究中矿物掺合料掺量对 MPC 耐水性的影响规律如图 2^[13,24,37-41]所示,可以看出不同研究结果之间存在一定的差异。球状粉煤灰颗粒填充在无定形态水化产物中间并黏结成一体,细化 MPC 硬化结构内的毛细孔,硬化水泥浆体变得密实,能有效阻塞溢水通道从而改善耐水性^[42]。偏高岭土、矿渣和硅灰水化活性较高,颗粒更细,在 MPC 水化后期发生二次水化反应,生成 C-A-H 晶体、C-S-H 或磷酸铝类凝胶等水稳性水化产物填充于 MPC 的孔隙和裂纹中^[43-44]。

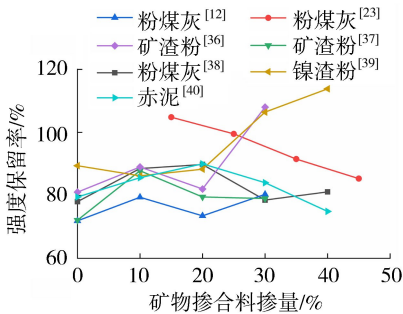


图 2 矿物掺合料掺量对 MPC 耐水性的影响

粉煤灰通过微集料效应改善 MPC 颗粒级配,细化硬化体的孔结构,提高基体的致密性,且硬化 MPC 致密性和耐水性随粉煤灰掺量的增加逐步提高^[14]。曾翠云等^[39]试验研究表明,MPC 强度保留系数随着粉煤灰掺量的增加而快速增大,粉煤灰掺量为 40% 时的强度仍高于基准组,说明大掺量粉煤灰影响 MPC 的水化反应,并在一定程度上改善耐水性。Sun 等^[45]进一步试验研究发现,粉煤灰改性 MPC 中未生成新的水化产物,在水中浸泡后,MgO 颗粒表面产生大量片状 MPC,表面裂缝和孔隙率降

低。汤云杰等^[46]试验研究发现,掺粉煤灰后 MPC 的水化产物为块状,与基准试样完全不同,水化产物将粉煤灰微球紧密包裹,晶体间无明显空隙,提高了 MPC 修补砂浆的耐水性。

Qin 等^[47]研究表明,当偏高岭土掺量高于 30% 时,MPC 总孔隙率随着偏高岭土掺量的增加而降低,且背散射电子成像显示未反应的偏高岭土颗粒可以嵌入水化产物的夹层,导致更紧密的结构,说明掺偏高岭土能够有效提高 MPC 的耐水性。高明等^[48]试验研究发现,水养 MPC 修补砂浆表面出现一层白色物质析出,微硅粉掺量 5.0% 时 MPC 修补砂浆析出物和内部孔隙减少,结构密实性和耐水性得到改善。MPC 水化产物晶体在微硅粉作用下呈堆叠的块状,空间排列更为整齐致密,耐水性得到有效改善^[49]。矿渣能显著改善 MPC 的耐水性,当矿渣掺量介于 0 ~ 40% 时,MPC 水中浸泡 28 d 和 60 d 的强度保留率随着矿渣掺量的增加而提高^[37]。MPC 早期水化速率和结晶度随着钢渣粉掺量的增加而提高,且硬度较高的钢渣粉可以填充硬化后 MPC 的孔隙和裂纹,提高 MPC 修补砂浆的致密性、MPC 水化产物生成量和耐水性^[50]。Wang 等^[40]试验研究表明,MPC 中镍渣粉掺量为 30% ~ 40% 时,60 d 抗压强度超过 70 MPa,在水环境条件下抗压强度保留率高于 100%,说明适量镍渣粉可显著改善 MPC 的耐水性。Liu 等^[41]试验研究表明,向 MPC 修补砂浆中掺入 20% 赤泥时,赤泥中含铁组分与磷酸盐反应生成非晶相胶凝物质填充体系的孔隙,对 MPC 耐水性的提高起到极大作用。

4 化学外加剂对 MPC 及其修补砂浆耐水性的影响

化学外加剂是水泥基材料不可或缺的组分,混凝土结构工程多采用减水剂、引气剂、早强剂、絮凝剂及复合型外加剂等来改善混凝土拌合物的工作性、力学性能和耐久性能;而 MPC 水化热大并集中放热,凝结时间短,必须掺入缓凝剂调整其凝结时间,以保证良好的施工性能。水玻璃、柠檬酸及壳聚糖等外加剂可通过自身胶结和填充作用大幅提高其密实度,有效抑制水分渗入 MPC 基体,明显改善 MPC 修补砂浆的物理力学性能,显著提高其耐水性,从而满足 MPC 修补砂浆的工程应用基本要求。

水玻璃可与 MPC 孔溶液中的 Mg^{2+} 反应生成水合硅酸镁凝胶,填充于 MPC 硬化结构的毛细孔中,从而阻止水分的渗入,降低水环境作用下 MPC 的强度损失率^[25]。通过外涂防水剂能够显著改善 MPC 试件的耐水性,涂有防水剂的 MPC 试件强度保留率

比未防护试件提高近 30%,且随着涂层厚度增加略微增大^[13]。纤维素在水中可发生溶胀作用,形成坚固而有弹性的胶体,包裹在未水化 MgO 颗粒表面,降低 MPC 孔隙率,使材料结构更加密实,减少外界水分子的渗入,MPC 抗水性能得以提高^[51]。柠檬酸在水化过程中释放的 H⁺促进了重烧 MgO 的充分反应,大量凝胶产物覆盖或填充于 MPC 晶体与 MgO 颗粒的表面和孔隙之间,提高了 MPC 致密性和耐水性^[52]。壳聚糖分子链上的游离氨基与 MPC 中 Mg²⁺配位形成配位化合物,提高了硬化结构致密性,壳聚糖包裹在水化产物表面的抑制水分子与可溶性离子的接触,会减少可溶性磷酸盐的溶解析出,提高 MPC 抗水性^[53]。

5 养护条件对 MPC 及其修补砂浆耐水性的影响

MPC 修补砂浆主要用于在役构件的紧急修补,建筑构件所处地理环境和气候条件限制并决定了环境的温度和湿度。养护环境条件会对 MPC 及其修补砂浆的水化过程、水化产物和孔隙结构、力学性能和耐水性产生一定的影响。MPC 通常在空气中自然养护,过高的养护湿度和水养对 MPC 强度的发展有不利影响。与普通的硫铝酸盐水泥、快硬硅酸盐修补材料相比,MPC 及其修补砂浆在低温下仍能够水化硬化,且具有良好的早期力学性能^[54]。在低温养护环境中,MPC 水化速率降低,硬化结构中游离水含量增多,特别是在负温下水分冻结形成大量孔隙,导致 100 nm 大孔的比例增加明显,小于 100 nm 的微孔则随着环境温度的降低而减少^[7],在潮湿或者水环境中的性能相应劣化。MPC 修补材料在不同养护方式和水中的耐水性由强到弱排序为自然养护、标准养护、自然水中养护、标准水中养护^[55]。

徐选臣等^[56]试验研究发现,磷酸钾镁水泥(MKPC)自然养护 3 d 后浸入呈弱碱性的海水养护,MKPC 浆体主要水化产物 MgKPO₄·6H₂O 的溶解度降低,随着 MgKPO₄·6H₂O 晶体的不断生成和填充硬化体孔隙,MKPC 硬化体的结构趋于致密,能有效改善 MKPC 耐水性。邓恺等^[14]试验研究表明,增加自然养护时间,MPC 强度保留率呈上升趋势,耐水性也会有所改善,延长其水中养护时间对 MPC 的强度保留率有不利影响。Lyu 等^[15]将 MPC 净浆试件分别在空气中养护 1 d 和 28 d,随后放置水中养护,发现短时间内试件水化反应还不够充分,强度还未完全发展,硬化水泥砂浆结构不够稳定,说明延长试件在空气中的养护时间,可明显降低孔隙率,提高 MPC 的耐水性。由此可见,MPC 基材料不适用于水

工环境中,若工程需要,应在养护阶段保持干燥环境同时延长试件在空气中养护的时间,才能保证适宜的强度和耐久性。

MPC 修补砂浆的凝结硬化过程有可能在低温、常温和高温甚至冻融、侵蚀及其复合作用的严苛环境中完成。特别是我国北方冬季温度极低,道路桥梁快速修补工程所用原材料和拌合水的温度也很低,拌和过程有可能出现冻结和流动性差的现象,故应保证在拌和、施工、硬化过程中修补材料内部有足够的液态水分^[57]。MPC 水化时放热相对集中,在水化初期可达到最高水化温度 94.6℃^[41],因此,短时间内形成的水化放出的热量可以使负温环境中的 MPC 拌合物保持较高的温度,从而保证 MPC 水化所需的液态水分环境和适宜的早期强度^[9]。环境温度为 15~35℃时,温度越高 MPC 早期强度发展越快,凝结时间明显缩短^[58];环境温度在 0℃以下时,MPC 试块表面孔洞的自由水会凝结成冰并挤压周围自由水向试块内部迁移,并在迁移过程中形成一定的水压梯度和应力造成试块内部产生裂缝,降低 MPC 的耐水性^[35];低温养护下 MPC 表面生成的大量膨胀性针状物存在的膨胀应力使材料表面产生裂纹,并且试样孔洞内的自由水结冰形成冰晶,产生的结晶应力破坏了 MPC 结构,导致耐水性变差^[59]。

6 研究展望

普通混凝土耐久性问题的本质是硬化体的孔结构和水化产物的水稳性,MPC 及其修补砂浆的耐水性问题亦是源于其水化过程所形成的孔隙和反应剩余磷酸盐量。与普通混凝土不同的是,MPC 水化过程的本质是酸碱中和反应,其间放出水 and 大量热而导致拌合物迅速升温凝结,并生成结构密实的水化产物,在极短时间内水分和磷酸根离子在水化产物间的迁移和传输通道受阻,故而,MPC 水化硬化过程中孔结构优化程度受限。因此,在保证 MPC 及其修补砂浆早硬高强特性的前提下,通过以下技术措施改善其耐水性:一是通过微生物水泥、高活性矿物掺合料或纳米粉体,在 MPC 水化中后期局部消纳可溶性磷酸根的同时,生成胶凝性产物提高硬化体的致密性。二是通过矿物掺合料部分取代拌合物中重烧 MgO 和酸式磷酸盐,降低 MPC 早期的水化热和温升,降低气态水的生成量和硬化体的气孔率,水化中后期水化凝结进一步细化孔结构,从而改善 MPC 及其修补砂浆的耐水性和经济性。三是优选并提升细集料的品质,使之具备优良的颗粒级配和水稳性,或者具有与磷酸盐反应并生成不溶性产物的特性,改善集料与 MPC 的界面结构和耐水性。

参考文献:

[1] 刘进, 吕润华, 张增起. 磷酸镁水泥性能的研究进展 [J]. 材料导报, 2021, 35 (23) : 23068-23075. (LIU Jin, GUO Runhua, ZHANG Zengqi. Research progress of properties of magnesium phosphate cement [J]. Materials Reports, 2021, 35 (23) : 23068-23075. (in Chinese))

[2] 孟芹, 廖梓珺, 李云涛. 磷酸镁水泥的研究现状及发展趋势 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (4) : 1245-1253. (MENG Qin, LIAO Zijun, LI Yuntao. Research status and development trend of magnesium phosphate cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36 (4) : 1245-1253. (in Chinese))

[3] XU Biwan, LOTHENBACH B, WINNEFELD F. Influence of wollastonite on hydration and properties of magnesium potassium phosphate cements [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 131 : 106012.

[4] 陈玥, 房琦, 肖炳斐, 等. 磷酸镁水泥耐水性的影响因素及其改善: 研究进展 [J]. 科技通报, 2020, 36 (11) : 1-7. (CHEN Yue, FANG Qi, XIAO Bingfei, et al. Water resistance and improvement of magnesium phosphate cement; research progress [J]. Bulletin of Science and Technology, 2020, 36 (11) : 1-7. (in Chinese))

[5] TANG Hao, QIAN Jueshi, JI Ziwei, et al. The protective effect of magnesium phosphate cement on steel corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2020, 255 : 119422.

[6] 温金保, 唐修生, 黄国泓, 等. 磷酸镁水泥快速修补材料的性能试验 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (2) : 82-87. (WEN Jinbao, TANG Xiusheng, HUANG Guohong, et al. Performance testing on rapid repair materials of magnesium phosphate cement [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (2) : 82-87. (in Chinese))

[7] QIN Jihui, QIAN Jueshi, YOU Chao, et al. Bond behavior and interfacial micro-characteristics of magnesium phosphate cement onto old concrete substrate [J]. Construction and Building Materials, 2018, 167 : 166-176.

[8] 秦继辉, 钱觉时, 宋庆, 等. 磷酸镁水泥的研究进展与应用 [J]. 硅酸盐学报, 2022, 50 (6) : 1592-1606. (QIN Jihui, QIAN Jueshi, SONG Qing, et al. Research progress on magnesium phosphate cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50 (6) : 1592-1606. (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 Qi, WANG Yan. 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] 徐颖, 邓利蓉, 杨进超, 等. 磷酸镁水泥的制备及其快速修补应用研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33 (增刊 2) : 278-282. (XU Ying, DENG Lirong, YANG Jinchao, et al. Preparation and rapid repair application of magnesium phosphate cement [J]. Materials Reports, 2019, 33 (Sup2) : 278-282. (in Chinese))

[11] CHONG Linlin, YANG Jianming, SHI Caijun. Effect of curing regime on water resistance of magnesium-potassium phosphate cement [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151 : 43-51.

[12] 李东旭, 李鹏晓, 冯春花. 磷酸镁水泥耐水性的研究 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12 (5) : 505-510. (LI Dongxu, LI Pengxiao, FENG Chunhua. Research on water resistance of magnesium phosphate cement [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12 (5) : 505-510. (in Chinese))

[13] 毛敏, 王智, 贾兴文. 磷酸镁水泥耐水性能改善的研究 [J]. 非金属矿, 2012, 35 (6) : 1-3. (MAO Min, WANG Zhi, JIA Xingwen. Researching on water resistance improvement of magnesium phosphate cement [J]. Non-Metallic Mines, 2012, 35 (6) : 1-3. (in Chinese))

[14] 邓恺, 黎红兵, 李响, 等. 不同养护条件下钢渣与粉煤灰改性磷酸镁水泥的性能研究 [J]. 材料导报, 2019, 33 (增刊 1) : 264-268. (DENG Kai, LI Hongbing, LI Xiang, et al. Study on the performance of steel slag and fly ash modified magnesium phosphate cements under different curing condition [J]. Materials Reports, 2019, 33 (Sup1) : 264-268. (in Chinese))

[15] LYU Liming, HUANG Piao, MO Liwu, et al. Properties of magnesium potassium phosphate cement pastes exposed to water curing; a comparison study on the influences of fly ash and metakaolin [J]. Construction and Building Materials, 2019, 203 : 589-600.

[16] 苑兆瑜, 马旺坤, 付文静, 等. 侵蚀环境下磷酸镁基快速修补材料的力学性能研究 [J]. 混凝土世界, 2020 (9) : 73-79. (YUAN Zhaoyu, MA Wangkun, FU Wenjing, et al. Study on mechanical properties of magnesium phosphate-based rapid repair materials in erosive environment [J]. China Concrete, 2020 (9) : 73-79. (in Chinese))

[17] 施惠生, 李响, 吴凯. 垃圾焚烧飞灰对磷酸镁水泥性能的影响研究 [J]. 新型建筑材料, 2019, 46 (5) : 37-40. (SHI Huisheng, LI Xiang, WU Kai. Influence of municipal incineration fly ash on performance of magnesium phosphate cement [J]. New Building Materials, 2019, 46 (5) : 37-40. (in Chinese))

[18] 方圆, 陈兵. 玻璃纤维对磷酸镁水泥砂浆力学性能的增强作用及机理 [J]. 材料导报, 2017, 31 (24) : 6-9. (FANG Yuan, CHEN Bing. The enhancement and mechanism of glass fiber on mechanical properties of magnesium phosphate cement mortar [J]. Materials Reports, 2017, 31 (24) : 6-9. (in Chinese))

[19] 种霖霖. 磷酸钾镁水泥基材料水腐蚀行为及改性机理

- 研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [20] YANG Q, ZHU B, WU X. Characteristics and durability test of magnesium phosphate cement-based material for rapid repair of concrete[J]. Materials and Structures, 2000, 33(4): 229-234.
 - [21] FAN Shijian, CHEN Bing. Experimental research of water stability of magnesium alumina phosphate cements mortar[J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 164-171.
 - [22] 赵晓聪. 磷酸镁水泥砂浆与纤维粘结及其水稳定性试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
 - [23] 任常在. 固废基硫铝酸盐-磷酸钾镁复合胶凝材料的制备及应用试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
 - [24] 马金松. 改性磷酸镁水泥耐酸性的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
 - [25] 杨建明, 钱春香, 周启兆, 等. 水玻璃对磷酸钾镁水泥性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2): 227-233. (YANG Jianming, QIAN Chunxiang, ZHOU Qizhao, et al. Effect of waterglass on the performance of potassium and magnesium phosphate cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(2): 227-233. (in Chinese))
 - [26] LE ROUZIC M, CHAUSSADENT T, STEFAN L, et al. On the influence of Mg/P ratio on the properties and durability of magnesium potassium phosphate cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 96: 27-41.
 - [27] 孙春景, 林旭健, 季韬. 磷镁比、水灰比、硼砂掺量对磷酸钾镁水泥耐水性的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 856-862. (SUN Chunjing, LIN Xujian, JI Tao. Influence of the ratio of KH_2PO_4 to MgO , ratio of water to bind, content change of borax on water resistance of magnesium-potassium phosphate cement[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2016, 44(6): 856-862. (in Chinese))
 - [28] 姜自超, 丁建华, 张时豪, 等. 磷酸镁水泥耐水性研究进展[J]. 当代化工, 2016, 45(12): 2872-2875. (JIANG Zichao, DING Jianhua, ZHANG Shihao, et al. Research progresses in water resistance of magnesium phosphate cement[J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45(12): 2872-2875. (in Chinese))
 - [29] 齐召庆, 汪宏涛, 丁建华, 等. MgO 细度对磷酸镁水泥性能的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2014, 30(6): 50-54. (QI Zhaoqing, WANG Hongtao, DING Jianhua, et al. Effects of MgO fineness on magnesium-phosphate cement properties[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2014, 30(6): 50-54. (in Chinese))
 - [30] 段新勇. 磷酸镁水泥基快速屏蔽材料的制备及其性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
 - [31] 胡华洁, 杜骁, 陈兵. 原料配比参数对磷酸镁水泥性能的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(4): 73-78. (HU Huajie, DU Xiao, CHEN Bing. Factors influencing properties of magnesium phosphate cement[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(4): 73-78. (in Chinese))
 - [32] DING Zhu, LI Zongjin. Effect of aggregates and water contents on the properties of magnesium phospho-silicate cement[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(1): 11-18.
 - [33] 曹巨辉, 汪宏涛, 薛明. 磷酸镁水泥砂浆强度影响因素研究[J]. 建筑技术开发, 2010, 37(5): 19-20. (CAO Juhui, WANG Hongtao, XUE Ming. Study on the strength of magnesia-phosphate cement mortar[J]. Building Technique Development, 2010, 37(5): 19-20. (in Chinese))
 - [34] 马锋玲, 王刚, 徐耀, 等. 磷酸镁水泥砂浆性能试验研究[J]. 水利规划与设计, 2020(8): 62-67. (MA Fengling, WANG Gang, XU Yao, et al. Experimental study on properties of magnesium phosphate cement[J]. Water Resources Planning and Design, 2020(8): 62-67. (in Chinese))
 - [35] 沈世豪. 低温养护条件下高延性磷酸镁水泥基复合材料弯曲性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
 - [36] 任强, 蒋正武, 马敬畏. 矿物掺和料对磷酸镁水泥基修补砂浆强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6): 1062-1067. (REN Qiang, JIANG Zhengwu, MA Jingwei. Influence of mineral admixtures on the strength of magnesia phosphate cement-based rapid repair mortar[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 1062-1067. (in Chinese))
 - [37] TAN Yongshan, YU Hongfa, LI Ying, et al. The effect of slag on the properties of magnesium potassium phosphate cement[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 313-320.
 - [38] 丁耀堃, 王哲, 许四法, 等. 矿渣对磷酸镁水泥耐水性能的影响[J]. 科技通报, 2016, 32(10): 76-81. (DING Yaokun, WANG Zhe, XU Sifa, et al. Influence of slag on water resistance of magnesia phosphate cement[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(10): 76-81. (in Chinese))
 - [39] 曾翠云, 万德刚, 董峰亮, 等. 粉煤灰改性磷酸镁水泥耐久性能的试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2017(3): 27-30. (ZENG Cuiyun, WAN Degang, DONG Fengliang, et al. Experimental study on durability of fly ash modified magnesium phosphate cement[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2017(3): 27-30. (in Chinese))
 - [40] WANG Qi, YU Changjuan, YANG Jianming, et al. Influence of nickel slag powders on properties of magnesium potassium phosphate cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2019, 205: 668-678.
 - [41] LIU Yuantao, QIN Zhaohui, CHEN Bing. Experimental research on magnesium phosphate cements modified by red mud[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117131.

- [42] 田海涛,吴佳育,关博文. 粉煤灰对磷酸镁水泥早期性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2019,38(6):1812-1817. (TIAN Haitao, WU Jiayu, GUAN Bowen. Effect of fly ash on rheological properties of magnesium phosphate cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(6):1812-1817. (in Chinese))
- [43] 傅新雨,杨建明,单春明,等. 偏高岭土和粉煤灰对MKPC浆体与混凝土粘结性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2019,38(7):2242-2249. (FU Xinyu, YANG Jianming, SHAN Chunming, et al. Effect of metakaolin and fly ash on bond properties between MKPC paste and concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7):2242-2249. (in Chinese))
- [44] 石亚文,陈兵. 偏高岭土改性磷酸镁水泥[J]. 硅酸盐学报,2018,46(8):1111-1116. (SHI Yawen, CHEN Bing. Magnesium phosphate cement modified by metakaolin [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(8):1111-1116. (in Chinese))
- [45] SUN Sihui, LIU Runqing, ZHAO Xingke, et al. Investigation on the water resistance of the fly-ash modified magnesium phosphate cement [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019, 587:012007.
- [46] 汤云杰,单春明,顾华健,等. 矿物掺合料对自流平磷酸钾镁水泥砂浆性能的影响[J]. 材料科学与工程学报,2021,39(4):666-672. (TANG Yunjie, SHAN Chunming, GU Huajian, et al. Effect of mineral admixture on performance of self-leveling potassium magnesium phosphate cement mortar [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(4):666-672. (in Chinese))
- [47] QIN Zhaohui, ZHOU Shengbo, MA Cong, et al. Roles of metakaolin in magnesium phosphate cement: effect of the replacement ratio of magnesia by metakaolin with different particle sizes [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227:116675.
- [48] 高明,刘宁,陈兵. 微硅粉改性磷酸镁水泥砂浆试验研究[J]. 建筑材料学报,2020,23(1):29-34. (GAO Ming, LIU Ning, CHEN Bing. Effect of silica fume on properties of magnesium phosphate cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):29-34. (in Chinese))
- [49] GAO Ming, CHEN Bing, LANG Lei, et al. Influence of silica fume on mechanical properties and water resistance of magnesium-ammonium phosphate cement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(3):04019368.
- [50] JIANG Yu, AHMAD M R, CHEN Bing. Properties of magnesium phosphate cement containing steel slag powder [J]. Construction and Building Materials, 2019, 195:140-147.
- [51] 盖蔚,刘昌胜,王晓芝. 复合添加剂对磷酸镁骨粘结剂性能的影响[J]. 华东理工大学学报,2002,28(4):393-396. (GAI Wei, LIU Changsheng, WANG Xiaozhi. Influence of the compound additives on performances of magnesium phosphate bone cement [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2002, 28(4):393-396. (in Chinese))
- [52] 孙婧,王宏,兰建伟,等. 添加剂对磷酸镁水泥抗水性能影响的机理分析[J]. 河北建筑工程学院学报,2019,37(4):20-25. (SUN Jing, WANG Hong, LAN Jianwei, et al. Analysis of the effect of additives on water resistance of magnesium phosphate cement [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2019, 37(4):20-25. (in Chinese))
- [53] 廖建国,段星泽,李艳群,等. 壳聚糖对磷酸镁水泥抗水性能影响[J]. 功能材料,2015,46(20):20028-20033. (LIAO Jianguo, DUAN Xingze, LI Yanqun, et al. Effects of chitosan on water resistance of magnesium phosphate cement [J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(20):20028-20033. (in Chinese))
- [54] 王平. 严寒环境下磷酸镁水泥的反应进程与力学性能调控[D]. 重庆:重庆大学,2020.
- [55] 韩建博. 磷酸盐快补材料的耐水性试验研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2015.
- [56] 徐选臣,杨建明,谷明轩,等. 海水浸泡养护对磷酸钾镁水泥浆体微观结构和性能的影响[J]. 建筑材料学报,2017,20(5):673-679. (XU Xuanchen, YANG Jianming, GU Mingxuan, et al. Effect of seawater curing on microstructure and properties of magnesium potassium phosphate cement paste [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(5):673-679. (in Chinese))
- [57] 裴荔樵. 负温条件下双组份MPC快速修补材料的制备研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2018.
- [58] 王庆珍,钱觉时,秦继辉,等. 环境温度对磷酸镁水泥凝结时间和强度发展的影响[J]. 硅酸盐学报,2013,41(11):1493-1498. (WANG Qingzhen, QIAN Jueshi, QIN Jihui, et al. Effect of ambient temperature on setting time and strength development of magnesia-phosphate cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(11):1493-1498. (in Chinese))
- [59] 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 Haihe, ZHANG Yi, LU Jianbing, et al. Failure mechanism of magnesia-phosphate cement under low temperature curing condition [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(1):197-201. (in Chinese))

(收稿日期:2022-04-17 编辑:熊水斌)