

磷酸镁水泥快速修补材料的性能试验

温金保^{1,2},唐修生^{1,2},黄国泓^{1,2},祝烨然^{1,2},马进南^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院瑞迪高新技术有限公司,江苏 南京 210024;

2. 江苏省(瑞迪)水工新材料工程技术研究中心,江苏 南京 210024)

摘要:为了客观评价磷酸镁水泥材料的快速修补性能,以普通硅酸盐水泥砂浆为基准,在两种砂浆 28 d 抗压强度相当的条件进行了磷酸镁水泥砂浆快速修补应用性能的对比试验。结果表明,相对于普通硅酸盐水泥砂浆,磷酸镁水泥砂浆作为快速修补材料具有更为优异的性能:新拌砂浆具有高流动度及快速凝结硬化的特点,凝结时间不到 20 min;硬化砂浆早期力学性能好,3 h 抗压强度和黏结强度分别为 42.5 MPa 和 1.45 MPa;弹性模量低,28 d 静力抗压弹性模量和抗拉弹性模量分别降低了 13.5% 和 8.9%;拉伸应变高,28 d 极限拉伸值提高了 38.8%;耐久性优异,56 d 干缩应变仅为 118 μm/m,降低了 86.4%,28 d 抗冲磨强度则提高了 45.8%。

关键词:磷酸镁水泥;快速修补材料;凝结时间;黏结强度;抗冲磨强度

中图分类号:TQ172.79

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2017)02-0082-06

Performance testing on rapid repair materials of magnesium phosphate cement//WEN Jinbao^{1,2}, TANG Xiusheng^{1,2}, HUANG Guohong^{1,2}, ZHU Yeran^{1,2}, MA Jinnan^{1,2} (1. *Nanjing R&D High Technology Co., Ltd., Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China*; 2. *R&D Research Center on New Materials in Hydraulic Structures of Jiangsu Province, Nanjing 210024, China*)

Abstract: In order to evaluate the performance of magnesium phosphate cement for rapid repair objectively and effectively, ordinary Portland cement mortar was used as a reference mortar, and comparative tests were conducted on the performances of the two kinds of cement mortar for rapid repair with 28 d compressive strength. Test results show that, compared with the ordinary Portland cement mortar, magnesium phosphate cement mortar, as a rapid repair material, shows superior performance. The fresh mortar has a high fluidity and the property of rapid setting and hardening, with a setting time of less than 20 min; the hardened mortar has good mechanical properties in the early stage, with 3 h compressive strength and bonding strength of 42.5 MPa and 1.45 MPa, respectively; the elastic modulus of the magnesium phosphate cement mortar is low, with 28 d static compressive elastic modulus and tensile elastic modulus decreasing by 13.5% and 8.9%, respectively; the tensile strain is high, with 28 d ultimate tensile strain increasing by 38.8%; with the excellent durability, 56 d dry shrinkage strain of the magnesium phosphate cement mortar decreases by 86.4%, with a value of 118 μm/m, while 28 d abrasion resistance strength increases by 45.8%.

Key words: magnesium phosphate cement; rapid repair material; setting time; bonding strength; abrasion resistance strength

目前,混凝土高性能修补材料的应用研究是热点,用于混凝土结构工程修补的材料种类很多^[1-6],主要有无机材料、有机材料以及有机聚合物改性材料三大类。无机类修补材料主要以传统水泥基材料为主,该类修补材料小时强度偏低,早期需要严格的养护措施,且与普通水泥一样干缩大,与基材之间的界面过渡区相对薄弱,易出现脱落而导致修补失效;而采用特种水泥则存在水泥不易保存^[7],且有的特种水泥水化产物高温下不稳定,容易发生晶型转变

而破坏^[8]等缺陷。有机修补材料以环氧树脂类以及沥青修补材料为主,环氧树脂类修补材料与基材之间存在较大的相容性差异,二者的变形不一致,容易导致脱落,且易老化,耐久性差。有机聚合物改性材料存在有机聚合物影响水泥水化,导致聚合物改性修补砂浆早期水化程度低和砂浆早期强度低等问题。此外,上述材料都无法满足工程真正意义上的快速修补需要,因此势必影响结构工程投入应用的速度。

作者简介:温金保(1975—),男,高级工程师,主要从事混凝土及混凝土外加剂研究。E-mail:jbw@nhri.cn

磷酸镁水泥是一种以通过酸碱中和化学反应产生化学键而形成强度的胶凝材料,具有与陶瓷类似的结构性能特点,被称为“陶瓷水泥”,是一种很有应用潜力的新型胶凝材料,具有以下特点^[9-17]:①早期强度高;②能在-20~5℃的低温环境中快速凝结硬化;③与不同基材的黏结能力强;④变形性能、耐磨性和抗冻性良好;⑤耐化学侵蚀性能好;⑥防火耐高温;⑦固化有害和放射性物质的效果好。

目前磷酸镁水泥应用研究主要集中于作为快速修补材料的应用以及对重金属的固化等方面。马保国等^[18]研究了磷酸镁水泥对铅离子的固化,重点探讨了体系 pH 值对铅离子浸出率的影响。杨全兵等^[9]进行了磷酸镁水泥砂浆作为快速修补混凝土材料的研究,重点探讨了胶砂比、水灰比、粉煤灰掺量、拌和物体积量及温湿度对磷酸镁水泥砂浆的流动性及力学性能的影响。Qiao 等^[19]进行了磷酸镁水泥砂浆作为快速修补材料的性能研究,重点探讨了不同磷镁比下的抗压强度、黏结强度性能,并以普通硅酸盐水泥砂浆同流动度为前提,进行了磷酸镁水泥砂浆不同磷镁比、胶砂比对干缩性能影响的研究。磷酸镁水泥基材料的诸多优良特性使得其作为一种快速修补材料备受关注,但研究大都集中于磷酸镁水泥自身性能,较少与传统水泥基材料进行性能对比,使得性能的评价相对孤立,评价方式缺乏领域内横向的比较;偶有与传统水泥的比较,也未见以 28 d 抗压强度且强度限定在某个有限范围内为相同点的性能对比报道。对于水泥基材料而言,材料的强度对材料其他性能有着显著的影响,同样,不同的强度对其他性能的影响规律也不一样。本文基于快速修补材料的特性,通过与普通硅酸盐水泥对比试验,对磷酸镁水泥快速修补材料进行一个较为全面的性能评价,为磷酸镁水泥基材料的快速修补应用提供一个相对可靠的参考依据。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料及砂浆配合比的确定

1.1.1 原材料

利用磷酸二氢钾、重烧氧化镁、硼砂、I 级粉煤灰、木质素纤维 5 种原材料按一定比例混合均匀即制得磷酸镁水泥,其中磷酸二氢钾与重烧氧化镁的摩尔比为 1:5,硼砂用量为重烧氧化镁质量的 4%,木质素纤维用量为磷酸镁水泥总质量的 0.04%,I 级粉煤灰用量为磷酸镁水泥总质量的 20%。重烧氧化镁及中国海螺 P·O42.5 水泥的化学组成见表 1;砂为 ISO 标准砂。

表 1 原材料化学组成(质量分数)								%
原材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	其他
重烧氧化镁	1.80	3.18	0.36	0.67	93.56			0.43
中国海螺 P·O42.5 水泥	63.06	21.42	4.37	3.39	1.92	0.14	0.42	2.58

1.1.2 砂浆配合比的确定

相对于普通硅酸盐水泥,磷酸镁水泥价格较高,为了降低快速修补材料的成本,采用磷酸镁水泥、细骨料及水按一定比例拌和形成的砂浆作为磷酸盐类水泥基快速修补材料进行相应的试验研究。丁铸等^[20]进行了不同胶砂比对砂浆强度性能的影响试验研究,结果表明在胶砂比为 1 时强度最高,且砂浆抗压强度随着细骨料含量的增加而下降。因此,本试验选择胶砂比为 1,同时考虑到试验对比结果的可靠性,细骨料统一采用 ISO 标准砂。在胶砂比确定的前提下,进行磷酸镁水泥砂浆水胶比与强度关系的试验,结果见图 1。由图 1 可知,磷酸镁水泥砂浆的 1 d 和 28 d 抗压强度均随着水胶比的增大而降低。同时进行普通硅酸盐水泥砂浆(胶砂比为 1)水胶比与强度关系的试验,结果见图 2,可见普通硅酸盐水泥砂浆强度也随水胶比的增大而降低。

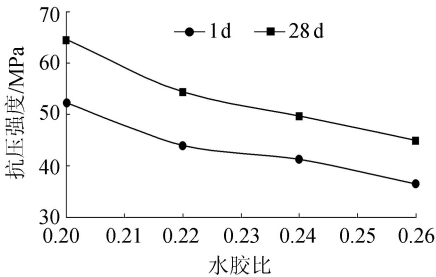


图 1 磷酸镁水泥砂浆水胶比与抗压强度的关系

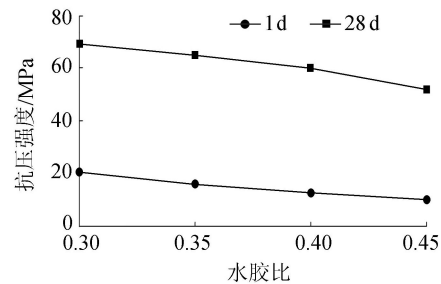


图 2 普通水泥砂浆水胶比与抗压强度的关系

为了保证磷酸镁水泥砂浆与普通硅酸盐水泥砂浆的性能具有可比性,应在两种砂浆 28 d 抗压强度相当的条件下进行性能对比试验,结合图 1 和图 2 的试验结果,选定两种砂浆的胶砂比均为 1,磷酸镁水泥砂浆和普通硅酸盐水泥砂浆的水胶比分别为 0.2 和 0.35,此时两种砂浆 28 d 抗压强度分别为 64.5 MPa 和 64.9 MPa,抗压强度相当,且均在 60~65 MPa 范围内。

1.2 试验方法

1.2.1 砂浆的制备

由相应的水泥与砂、水按一定配比混合并慢速搅拌 1 min, 然后快速搅拌 2 min 即可制得相应的砂浆。

1.2.2 流动度试验

将拌好的水泥砂浆分两层迅速装入截锥圆模内, 截锥圆模顶面直径、底面直径及高分别为 70 mm、100 mm 和 60 mm, 第一层装至截锥圆模高约 2/3 处, 用捣棒自边缘至中心均匀捣压 15 次, 继续装第二层砂浆, 装至高出截锥圆模 20 mm, 再用捣棒自边缘至中心均匀捣压 10 次, 把高出截锥圆模的部分砂浆刮除, 刮平表面之后轻轻提起截锥圆模, 当截锥圆模提起 30 s 时测试砂浆自坍落的圆形直径作为流动度值。

1.2.3 凝结时间试验

砂浆凝结时间测试参照 JGJ 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法》的规定进行。其中磷酸镁水泥砂浆贯入阻力值在 0.3 MPa 之前每 3 min 测 1 次, 贯入阻力值达到 0.3 MPa 时, 改为每 30 s 测 1 次, 直至贯入阻力值达到 0.7 MPa 时为止, 最终通过作图求得贯入阻力值为 0.5 MPa 时对应的时间即为砂浆凝结时间。

1.2.4 抗压强度和黏结强度试验

试验均参照 SL352—2006《水工混凝土试验规程》中的相应规定进行, 其中抗压强度试件尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm, 在规定龄期内取出试件进行抗压试验, 通过破坏荷载和受压面积计算抗压强度; 黏结强度试件采用“8”字形, 黏结基底采用标准养护 28 d 的半个“8”字形的普通硅酸盐水泥砂浆试件, 对黏结基底界面打磨去污后, 将按配比成型的砂浆与基底黏结成型, 并在规定龄期内取出试件进行抗拉试验, 通过破坏荷载和断面面积计算黏结强度。

1.2.5 静力抗压弹性模量及轴向拉伸试验

试验均参照 SL352—2006《水工混凝土试验规程》中的相应规定进行, 其中静力抗压弹性模量试件尺寸为 100 mm×100 mm×200 mm, 测量标距为 100 mm, 通过测定变形数据及破坏荷载来计算静力抗压弹性模量。轴向拉伸试件为哑铃型, 试件在到达规定龄期时取出、晾干, 并贴上电阻应变片, 通过测定拉伸破坏荷载及由电阻应变仪测定拉伸应变值而求得抗拉强度、抗拉弹性模量及极限拉伸值。

1.2.6 干缩、抗冻及抗冲磨试验

砂浆干缩试验试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 砂浆试件成型 24 h 后脱模立即测初长, 并立即送至温度为 (20±1)℃、相对湿度为 55%~65%

的干缩室内存放, 按相应龄期进行长度测量。抗冻及抗冲磨试验均参照 SL352—2006《水工混凝土试验规程》中的相应规定进行, 其中抗冻试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 成型之后在相应的环境下养护 28 d, 然后取出进行冻融循环试验, 试件中心控制冻结温度为 (-18±2)℃、融解温度为 (5±2)℃。每经过 25 次循环进行相对动弹性模量和质量损失率测试, 总冻融循环次数为 150 次。抗冲磨试验采用水下钢球法, 试件为圆柱体, 内径为 300 mm, 高度为 100 mm, 试件下半部分 (高度 5 mm 以下) 为 C50 强度等级的混凝土, 上半部分 (高度 5 mm 以上部分) 为相应的砂浆。对上半部分砂浆用钢球在转速 1200 r/min 的条件下进行 72 h 水中冲磨, 冲磨完毕后洗净擦干表面水分进行质量损失测试, 由此可计算出单位面积上磨损单位质量所需的时间, 即抗冲磨强度。

2 结果与讨论

2.1 流动度和凝结时间

图 3 和图 4 分别为砂浆流动度及凝结时间的试验结果。图 3 显示出磷酸镁水泥在较低的水胶比条件下, 流动度明显大于水胶比较高的普通硅酸盐水泥, 可见, 磷酸镁水泥需水量明显低于普通硅酸盐水泥, 且流动度随着水胶比的升高而大幅度增大。图 4 表明磷酸镁水泥砂浆较普通硅酸盐水泥砂浆凝结时间明显要短, 凝结时间均在 20 min 以内, 且随着水胶比的上升而呈线性延长, 可见, 在一定条件下可以通过调控水胶比来调节凝结时间。磷酸镁水泥砂

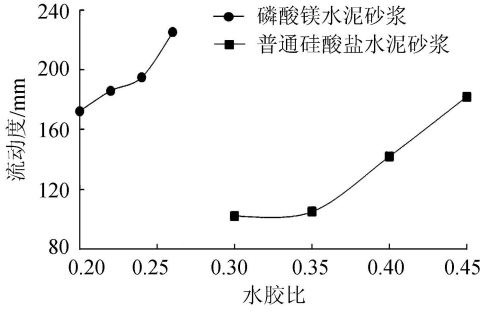


图 3 水胶比与流动度的关系

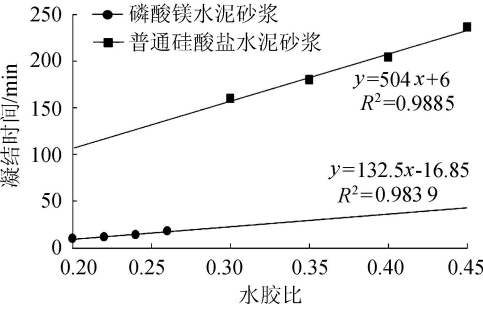


图 4 水胶比与凝结时间的关系

浆的高流动性及快速凝结的特点赋予了该材料快速修补的功能。

2.2 抗压强度和黏结强度

图 5 和图 6 分别为砂浆在不同龄期下的抗压强度和黏结强度试验结果。由图 5 可知,两种砂浆的 28 d 抗压强度相当,磷酸镁水泥砂浆为 63.9 MPa,普通硅酸盐水泥砂浆为 65.6 MPa,可见磷酸镁水泥具有高早强的特性,尤其是小时强度更为突出。

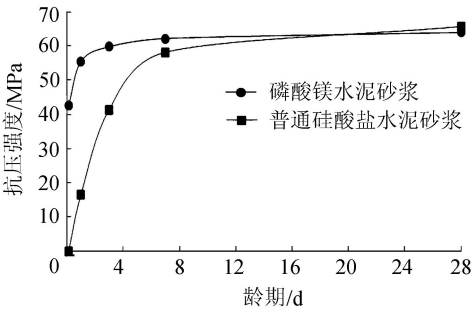


图 5 砂浆在不同龄期下的抗压强度

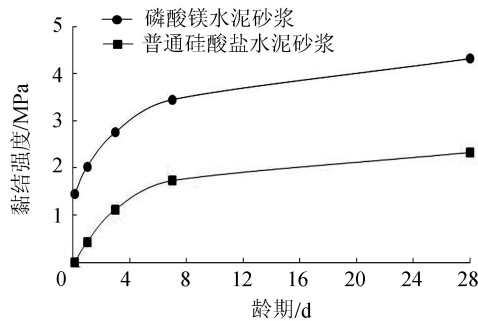


图 6 砂浆在不同龄期下的黏结强度

由图 6 可知,无论是早期的 3 h 黏结强度还是后期的 28 d 黏结强度,磷酸镁水泥砂浆均要明显高于普通硅酸盐水泥砂浆,磷酸镁水泥砂浆 3 h 黏结强度已达 1.45 MPa,接近普通硅酸盐水泥的 7 d 黏结强度 1.73 MPa,而磷酸镁水泥砂浆的 28 d 黏结强度更是高达 4.32 MPa,可见,相对于普通硅酸盐水泥砂浆,磷酸镁水泥砂浆具有明显优异的黏结性能。

2.3 静力抗压弹性模量、抗拉强度、抗拉弹性模量及极限拉伸值

表 3 为砂浆力学及变形性能试验结果,可以看出,相对于普通硅酸盐水泥砂浆,磷酸镁水泥砂浆的 3 d、7 d 和 28 d 静力抗压弹性模量分别降低了 17.4%、14.3% 和 13.5%,抗拉弹性模量分别降低了 9.4%、5.7% 和 8.9%,而抗拉强度则提高了 48.4%、52.0% 和 26.5%,极限拉伸值则提高了 55.3%、52.8% 和

38.8%。可见,磷酸镁水泥砂浆在力学变形性能上要明显优于普通硅酸盐水泥砂浆。

2.4 干缩

快速修补材料的体积稳定性对修补质量有着重要的影响,在混凝土结构服役期间,修补材料的收缩导致了拉应力的产生,而拉应力正是导致混凝土结构开裂的主要原因之一^[21]。同时由于修补材料主要依靠黏结力与被修补面黏接成整体,如果收缩得不到很好的控制,受限的收缩有可能导致黏结界面脱黏并开裂,从而造成修补质量的下降,甚至影响整个修补工程的性能。图 7 为两种砂浆的干缩性能试验结果,可知磷酸镁水泥砂浆的干缩值明显小于普通硅酸盐水泥砂浆,且收缩应变在 14 d 以后已趋于稳定,28 d 和 56 d 的收缩应变值分别为 113 $\mu\text{m}/\text{m}$ 和 118 $\mu\text{m}/\text{m}$,明显低于普通硅酸盐水泥砂浆的 752 $\mu\text{m}/\text{m}$ 和 870 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。可见,磷酸镁水泥砂浆相对普通硅酸盐水泥砂浆具有更为优异的体积稳定性,这有利于保证修补质量。

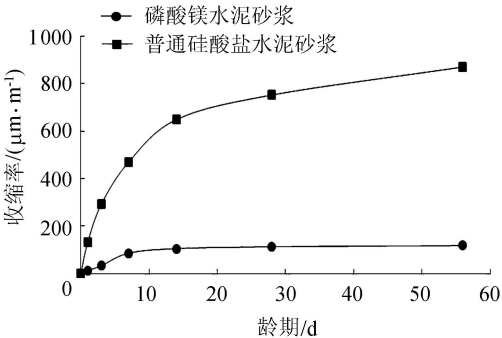


图 7 砂浆在不同龄期下的收缩应变

2.5 抗冻性能及抗冲磨性能

表 4 为砂浆 28 d 抗冻性能测试结果。可以看出,经过 150 次冻融循环后,磷酸镁水泥砂浆的质量损失率为 0.06%,相对动弹性模量为 79.6%,表现出了较好的抗冻性能,而普通硅酸盐水泥砂浆抗冻性能试验结果与磷酸镁水泥砂浆抗冻性能试验结果非常接近,可见,无论是磷酸镁水泥砂浆还是普通硅酸盐水泥砂浆,都具有较好的抗冻性能。另外,普通硅酸盐水泥砂浆抗冲磨强度为 10.30 $\text{h}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$,而磷酸镁水泥砂浆的抗冲磨强度达到 15.02 $\text{h}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$,提高了 45.8%,表明磷酸镁水泥砂浆具有优异的抗冲磨性能,这对于路面及水工大坝的修补是极为有利的。

表 3 不同龄期砂浆力学及变形性能试验结果

试 件	静力抗压弹性模量/GPa			抗拉强度/MPa			抗拉弹性模量/GPa			极限拉伸值/ 10^{-6}		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
磷酸镁水泥砂浆	20.9	23.3	25.6	2.82	4.12	5.06	17.1	24.7	30.6	160	165	168
普通硅酸盐水泥砂浆	25.3	27.2	29.6	1.9	2.71	4.0	18.8	26.2	33.6	103	108	121

表4 砂浆 28 d 抗冻性能测试结果

试 件	不同冻融循环次数的质量损失率/%						不同冻融循环次数的相对动弹性模量/%					
	25 次	50 次	75 次	100 次	125 次	150 次	25 次	50 次	75 次	100 次	125 次	150 次
磷酸镁水泥砂浆	0	0	0	0	0	0.06	100	98.1	94.5	90.4	85.8	79.6
普通硅酸盐水泥砂浆	0	0	0	0.34	0.80	1.78	100	100	97.3	93.8	90.6	80.6

3 结 论

- a. 磷酸镁水泥砂浆具有较好的快速修补施工性能,主要表现为需水量小,流动性好,凝结时间短。
- b. 磷酸镁水泥砂浆早期力学性能好,尤其是 3 h 抗压强度高达 42.5 MPa,3 h 黏结强度已达 1.45 MPa,3 d 抗拉强度比普通硅酸盐水泥砂浆提高了 48.4%。
- c. 磷酸镁水泥砂浆变形性能好,主要表现为低弹性模量和高极限拉伸值,相比普通硅酸盐水泥砂浆,28 d 静力抗压弹性模量降低了 13.5%,28 d 抗拉弹性模量降低了 8.9%,28 d 极限拉伸值则提高了 38.8%。
- d. 磷酸镁水泥砂浆耐久性能好:体积稳定性好,收缩应变变低,56 d 收缩应变值仅为 118 μm/m,收缩应变值比普通硅酸盐水泥砂浆降低了 86.4%;高抗冻性能,经过 150 次冻融循环后,相对动弹性模量为 79.6%,质量损失率仅为 0.06%;高耐磨性能,28 d 抗冲磨强度比普通硅酸盐水泥砂浆提高了 45.8%。

参考文献:

[1] 叶正茂,常钧,芦令超,等. 硫铝酸盐水泥基防渗堵漏材料的性能[J]. 济南大学学报(自然科学版),2007,21 (3): 189-192. (YE Zhengmao, CHANG Jun, LU Lingchao, et al. Waterproofing material based on sulphoaluminate cement [J]. Journal of Jinan University (Science & Technology), 2007, 21 (3): 189-192. (in Chinese))

[2] PERA J, AMBROISE J. New application of calcium sulfoaluminate cement [J]. Cement and Concrete Research,2004,34(4):671-676.

[3] 彭小芹,杨涛,王开宇,等. 地聚合物混凝土及其在水泥混凝土路面快速修补中的应用[J]. 西南交通大学学报,2011,46(2):205-210. (PENG Xiaoqin, YANG Tao, WANG Kaiyu, et al. Preparation of geopolymeric concrete and its application to rapid repair of cement concrete pavement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(2):205-210. (in Chinese))

[4] 耿刚强,张亚明,毕伟涛,等. 有机硅异改性环氧水泥路面裂缝修补灌浆材料的研究[J]. 混凝土与水泥制品,2012(11):1-5. (GENG Gangqiang, ZHANG Yaming, BI Weitao, et al. Study on pavement cracks grouting material using silicone modified epoxy cement [J]. China Concrete

and Cement Products,2012(11):1-5. (in Chinese))

[5] 叶丹玫,孙振平,郑柏存,等. 聚合物改性水泥基修补材料的研究现状及发展措施 [J]. 材料导报,2012,26 (4): 131-135. (YE Danmei, SUN Zhenping, ZHENG Bocun, et al. Current research status and development initiative of polymermodified cementitious repair material [J]. Materials Review,2012,26(4):131-135. (in Chinese))

[6] 张水,于洋,宁超,等. 苯丙乳液改性水泥砂浆的性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品,2010 (2): 9-12. (ZHANG Shui, YU Yang, NING Chao, et al. Study on the properties of styrene-acrylic emulsion modified cement mortar [J]. China Concrete and Cement Products,2010(2):9-12. (in Chinese))

[7] FU Xinghua, YANG Chunxia, LIU Zongming. Studies on effects of activators on properties and mechanism of hydration of sulphoaluminate cement [J]. Cement and Concrete Research,2003,33(2):317-324.

[8] HUA Xu. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals [J]. Interanational Journal of Mineral Processing, 2000,59(3):247-266.

[9] YANG Quanbing, ZHU Beirong, ZHANG Shuqing, et al. Properties and applications of magnesia-phosphate cement mortar for rapid repair of concrete [J]. Cement and Concrete Research,2000,30(11):1807-1813.

[10] DING Zhu, LI Zongjin. High early strength magnesium phosphate cement with flyash [J]. ACI Material Journal, 2005,102(6):375-381.

[11] 丁铸,李宗津. 早强磷酸盐水泥的制备和性能 [J]. 材料研究学报,2006,20(2):141-147. (DING Zhu, LI Zongjin. High early strength phosphosilicate cement [J]. Chinese Journal of Materials Research,2006,20(2):141-147. (in Chinese))

[12] 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. (in Chinese))

[13] 汪宏涛,钱觉时,王建国. 磷酸镁水泥的研究进展 [J]. 材料导报,2005,19(12):46-47. (WANG Hongtao, QIAN Jueshi, WANG Jianguo. Review of magnesia-phosphate cement [J]. Materials Review,2005,19(12):46-47. (in Chinese))

[14] 姜洪义,梁波,张联盟. MPB 超早强混凝土修补材料的

- 研究[J]. 建筑材料学报,2001,4(2):196-198. (JIANG Hongyi, LIANG Bo, ZHANG Lianmeng. Investigation of MPB with super early strength for repair of concrete[J]. Journal of Building Materials,2001,4(2):196-198. (in Chinese))
- [15] 雒亚莉,陈兵. 磷酸镁水泥的研究与工程应用[J]. 水泥,2009(9):16-19. (LUO Yali, CHEN Bing. Research on magnesium-phosphate cement and its applications[J]. Cement,2009(9):16-19. (in Chinese))
- [16] 赖振宇,李倩. 磷酸镁水泥固化放射性废物研究现状[J]. 广东化工,2012,39(8):201. (LAI Zhenyu, LI Qian. Research Status on solid radioactive wastes of magnesium phosphate cement[J]. Guangdong Chemical Industry,2012,39(8):201. (in Chinese))
- [17] 赖振宇,钱觉时,卢忠远,等. 不同温度处理对磷酸镁水泥性能的影响[J]. 功能材料,2012,43(15):2065-2070. (LAI Zhenyu, QIAN Jueshi, LU Zhongyuan, et al. Effect of different temperature treatment to properties of magnesium phosphate cement[J]. Journal of Functional materials,2012,43(15):2065-2070. (in Chinese))
- [18] 马保国,王景然,李相国,等. 不同环境条件下磷酸镁水泥对硝酸铅的固化[J]. 功能材料,2013,44(21):3183-3185. (MA Baoguo, WANG Jingran, LI Xiangguo, et al. The solidification of magnesium phosphate cement with lead nitrate in different environmental [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44 (21): 3183-3185. (in Chinese))
- [19] QIAO Fei, CHAU C K, LI Zongjin. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24:695-700.
- [20] DING Zhu, LI Zongjin. Effect of aggregates and water contents on the properties of magnesium phospho-silicate cement[J]. Cement and Concrete Research,2005,27(1):11-18.
- [21] ROMILDO D, FILHO A T, GHAVAMI K. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibers[J]. Cement and Concrete Composites,2005,27(4):537-546.

(收稿日期:2016-02-15 编辑:熊水斌)

(上接第13页)

- [10] EATON B C, MILLAR R G, DAVIDSON S. Channel patterns: braided, anabranching, and single-thread [J]. Geomorphology,2010,120(3):353-364.
- [11] 钱宁. 关于河流分类及成因问题的讨论 [J]. 地理学报,1985,40(1):1-10. (QIAN Ning. On the classification and causes of formation of different channel patterns [J]. Acta Geographica Sinica, 1985, 40 (1): 1-10. (in Chinese))
- [12] KNIGHTON A D, NANSON G C. Anastomosis and the continuum of channel pattern [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1993,18(7):613-625.
- [13] MAKASKE B. Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products [J]. Earth Science Review,2001,53(3/4):149-196.
- [14] 王随继,任明达. 根据河道形态和沉积特征的河流新分类 [J]. 沉积学报,1999,17(2):240-246. (WANG Suiji, REN Mingda. A new classification of fluvial rivers according to channel planform and sediment characteristics [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17 (2): 240-246. (in Chinese))
- [15] 尹学良. 河型成因研究 [J]. 水利学报,1993,24(4):1-11. (YIN Xueliang. Formation of river patterns [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1993,24(4):1-11. (in Chinese))
- [16] TWIDALE C R. River patterns and their meaning [J]. Earth-Science Review,2004,67(3/4):159-218.
- [17] KLEINHANS M G. Sorting out river channel patterns [J]. Progress in Physical Geography,2004,34(3):287-326.
- [18] van den BERG J H. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers [J]. Geomorphology, 1995, 12 (4): 259-279.
- [19] ALABYAN A, CHALOV R S. Types of river channel patterns and their natural controls [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1998,23(5):467-474.
- [20] LEWIN J, BREWER P A. Predicting channel patterns [J]. Geomorphology,2001,40(3/4):329-339.
- [21] DADE W B. Grain size, sediment transport and alluvial channel pattern [J]. Geomorphology, 2001, 35 (1/2): 119-126.
- [22] 倪晋仁,王随继. 论顺直河流 [J]. 水利学报,2000,31(12):14-21. (NI Jinren, WANG Suiji. On straight river [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,31(12):14-21. (in Chinese))
- [23] LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, PAN Baozhu, et al. Analysis of controls upon channel planform at the First Great Bend of the upper Yellow River, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geographical Sciences,2013,23(5):833-848.
- [24] 王延贵,胡春宏,周文浩,等. 塔里木河干流的河床演变特点 [J]. 水利学报,2003,34(12):27-35. (WANG Yangui, HU Chunhong, ZHOU Wenhao, et al. Evolution characteristics of Tarim River [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(12):27-35. (in Chinese))

(收稿日期:2016-02-16 编辑:郑孝宇)