

磷酸镁混凝土路面快速修补材料的耐水性试验

俞家欢, 闫林伟

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究不同外加剂对磷酸镁混凝土耐水性能的影响. 方法 掺入无机外加剂磷酸盐、硅灰、聚丙烯纤维等外加剂来对磷酸镁混凝土的力学性能、体积稳定性和强度保留率进行分析,与基准混凝土进行对比,从而确定各种外加剂磷酸镁混凝土的耐水性优劣. 结果 当掺入的磷酸二氢钾与原材料磷酸二氢铵质量比为2:3时,磷酸镁混凝土力学强度发展较好,且在水中体积稳定性较为理想;当硅灰掺量为5%时,强度保留率达到最高值80.5%;当硅灰掺量为10%时,试件抗压强度低于基准试件,且在水养条件下强度产生倒缩,耐水性较差. 结论 磷酸盐对磷酸镁混凝土耐水性改性效果优于掺加铁盐和铝盐的耐水性,适当掺量的硅灰能够有效改善磷酸镁混凝土的耐水性能,聚丙烯纤维能够与磷酸镁混凝土产生协同作用耐水性能更为显著.

关键词 磷酸镁混凝土;力学性能;体积稳定性;强度保留率;耐水性

中图分类号 TU528.37;U414

文献标志码 A

Water Resistance of Magnesium Phosphate Concrete Pavement with Rapid Repairing Materials

YU Jiahuan, YAN Linwei

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this paper is to study the effect of different admixtures on the water resistance of magnesium phosphate concrete. The mechanical properties, volume stability and strength retention of magnesium phosphate concrete are studied and analyzed with different admixtures phosphate, silica fume and polypropylene fiber, and the water resistance of various additive magnesium phosphate concrete is determined by comparing with the reference concrete. When the mass ratio of potassium dihydrogen phosphate and ammonium hydrogen phosphate of raw materials is 2:3, the mechanical strength of magnesium phosphate concrete is the best, and the volume stability in water is ideal. When the content of silica fume is 5%, the strength retention rate is reached the maximum value which is 80.5%. When the silica fume content is 10%, the compressive strength of the specimen is lower than that of the reference specimen, and the strength falls down and the water resistance is poor under the condition of water culture. The effect of phosphate on the water resistance of magnesium phosphate concrete is better than that of adding iron salt and aluminum

收稿日期:2017-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51478276)

作者简介:俞家欢(1974—),男,教授,博士,主要从事新型修补材料方面研究.

salt. The appropriate amount of silica fume can effectively improve the water resistance of magnesium phosphate concrete, and the polypropylene fiber can produce synergistic effect with magnesium phosphate concrete, and the water resistance performance is more significant.

Key words: magnesium phosphate concrete; mechanical properties; volume stability; strength retention rate; water resistance

磷酸镁水泥基混凝土(简称磷酸镁混凝土)是以磷酸镁水泥为主要胶结材料,砂、石为骨料,与水按一定比例配合,经过搅拌、振捣、养护等工序后,凝结成整体的工程复合材料.具有早强快硬、粘结力强、体积稳定性好、耐久性好及环境适应性广等优点.磷酸镁混凝土被广泛应用于公路、桥梁、机场跑道等混凝土结构的应急修补,并作为可持续发展的材料^[1].但磷酸镁混凝土作为一种高强快硬土木工程材料,使用期间,环境中的水、高湿度的气体可通过毛细孔浸入到混凝土内部,之后产生的物理和化学反应会导致混凝土逐渐劣化.混凝土耐水性实质上就是抵抗这种劣化作用的能力.磷酸镁混凝土作为结构混凝土的快速修补材料,其耐水性差的特点会对其耐久性产生影响,并在很大程度上影响其推广应用.目前磷酸镁混凝土没有实现大范围的推广应用,因此针对其耐水性能的研究较少,笔者通过引入无机外加剂磷酸盐^[2]、硅灰、聚丙烯纤维等外加剂来对磷酸镁混凝土的力学性能和体积稳定性和强度保留率进行分析,与基准混凝土进行对比,从而确定各种外加剂磷酸镁混凝土的耐水性优劣.

1 磷酸镁混凝土试件制备

1.1 原材料

磷酸盐快补材料是由氧化镁、磷酸二氢铵和缓凝剂按适当比例配制而成.其中氧化镁(MgO):采用2.4 μm的MgO颗粒作为原材料,比表面积为2 475 cm²/g,经1 500 ℃高温煅烧而成^[3];磷酸二氢铵(NH₄H₂PO₄):工业级,纯度为98%;硼砂(Na₂B₄O₇·

10H₂O):工业级,纯度为99%;粉煤灰是Ⅱ级优质粉煤灰,比表面积为5 380 cm²/g;砂为标准石英砂;拌合水为自来水.

1.2 磷酸镁混凝土的配合比

选择磷酸镁水泥砂浆的配合比为:磷酸二氢铵和氧化镁的 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$: $m(\text{MgO}) = 1:4$,缓凝剂占氧化镁质量的10%;然后调整石子掺量和水胶质量比,粗骨料石子掺量分别为15%、20%、25%、30%,得到如表1所示的A1、A2、A3、A4四组配合比,把混凝土的工作性能和力学强度作为主要技术指标^[4],从而得到磷酸镁混凝土的最佳配合比.

表1 磷酸镁混凝土的配合设计

Table 1 Coordination design of magnesium phosphate concrete

编号	磷酸镁水泥砂浆/%	石子掺量/%	水胶质量比
A1	85	15	0.20
A2	80	20	0.22
A3	75	25	0.24
A4	70	30	0.26

按照表1的配合比制备磷酸镁混凝土,制备过程中测定混凝土的初凝时间和塌落度,用于评价其工作性能^[5];然后将制备得到的混凝土进行自然空气养护,温度(22±5)℃,相对湿度70%以下,养护到规定龄期进行抗压强度的测定,其结果如表2所示.

由表1和表2可知,随着粗骨料石子掺量的增加,水胶比逐渐变大,磷酸镁混凝土的初凝时间越来越长,塌落度从A1组的180 mm下降到A4组的100 mm,且磷酸镁混凝土1 h抗压强度从A1组的37.2 MPa下降到A4组的28.1 MPa.从试验结果和技术经济分析表明,采用粗骨料石子掺量为

表 2 磷酸镁混凝土的性能测定结果

Table 2 Performance measurement of magnesium phosphate concrete							
编号	初凝时间/ min	塌落度/ mm	试件不同龄期抗压强度/MPa				
			1 h	3 d	14 d	28 d	60 d
A1	20	180	37.2	41.9	47.6	52.1	57.1
A2	21	160	35.7	40.2	45.5	49.7	54.6
A3	23	130	33.6	37.8	42.7	46.5	50.9
A4	26	100	28.1	31.5	36.0	39.4	42.6

15%、20%、25% 三组配比的磷酸镁混凝土 1 h抗压强度均在 30 MPa 以上,作为快速修补材料其强度可以满足一小时开放交通的要求,而且三种配比后期强度发展较好.同时,磷酸镁水泥作为建筑材料价格较贵,要考虑其经济适用性. A3 组混凝土配比中,粗骨料石子在混凝土中占比为 25%,是在保证材料满足强度要求的基础上^[6],最为经济合理的磷酸镁混凝土配比.

2 磷酸镁混凝土耐水性评价指标

耐水性是指硬化体抵御外界侵蚀的能力,亦及浸泡水中硬化体结构、组成及水化物的稳定性,笔者提出能够准确和直观的反映磷酸镁水泥基混凝土的耐水性.具有现实工程意义的三种评价指标.①强度保留率:用磷酸镁混凝土试件浸水后的强度保留率来直接表征材料的耐水性.强度保留率 K_t 值^[7-8]越低,表示试件浸水后强度保留越少,耐水性越差;反之亦好.因此,强度保留率 K_t 可以直接用来评定其耐水性的优劣.②力学性能:抗折强度、抗压强度为磷酸镁混凝土重要的力学指标,根据强度随浸水时间的变化规律能更加直观地反映出材料的耐水性.③体积稳定性:磷酸镁混凝土的水化产物在水中稳定性^[9]会有一定程度衰减,致密结构被水侵蚀导致孔隙率增加,使材料吸水肿胀.体积稳定性可以直接用来表征材料耐水性,材料膨胀率越低,耐水性越好^[10];反之则越差.

3 无机外加剂对磷酸镁水泥基混凝土耐水性的影响

试验采用的是掺加磷酸盐(KH_2PO_4)对磷酸镁水泥基混凝土进行耐水性研究^[11].

3.1 磷酸盐对磷酸镁混凝土耐水性影响

试验在保持磷酸镁混凝土配比中磷酸盐总量不变的前提下^[12-17],使用磷酸二氢铵($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)和磷酸二氢钾(KH_2PO_4)按比例复配后作为磷酸盐的原材料,对其耐水性能进行研究^[7].按照不同磷酸二氢铵与磷酸二氢钾之比,划分成 B1 ~ B6 六组,六组中 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 比值依次为不掺加 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、4:1、3:2、2:3、1:4、不掺加 KH_2PO_4 .

3.2 磷酸盐对磷酸镁混凝土力学强度的影响

图 1 为不同 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 复合对磷酸镁混凝土试件抗压强度的影响.从图 1 可以看出:不同比例复配的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KH_2PO_4 对磷酸镁混凝土试件抗压强度影响效果不同.在两种养护条件下,试件抗压强度由高到低依次为: B3、B4、B1、B2、B5、B6,其中 B3 组即 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)=3:2$ 时,在自然养护和水养条件下,60 d 抗压强度分别为 68.1 MPa、55.7 MPa,试件抗压强度提高幅度较大;而后试件抗压强度随着 KH_2PO_4 掺量的增加而逐渐降低.当磷酸盐全部为 KH_2PO_4 ,即 B6 组时,试件抗压强度最低,在自然养护和水养条件下,试件 60 d 抗压强度分别为

47.9 MPa、31.1 MPa。这说明磷酸二氢铵与磷酸二氢钾质量比为 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)=3:2$ 时磷酸镁混凝土力学性

能最佳;同时,可以发现 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 配制的磷酸镁混凝土强度发展优于 KH_2PO_4 配制的磷酸镁混凝土。

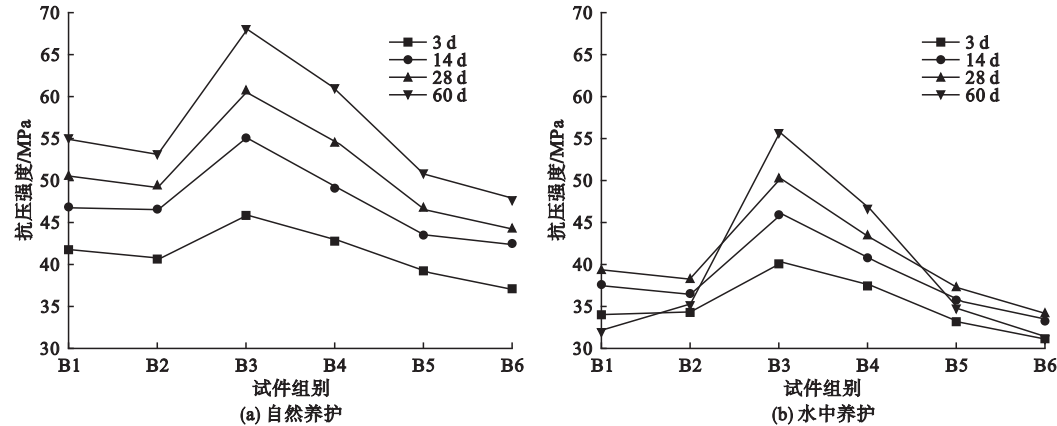


图1 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 对抗压强度影响

Fig. 1 Effect of $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ on the compressive strength

3.3 磷酸盐对磷酸镁混凝土体积稳定性的影响

图2为不同 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 复合对磷酸镁混凝土试件体积稳定性的影响。由图2(b)可知,水养条件下,随着磷酸盐中 KH_2PO_4 所占比例的增大,试件膨胀率的发展趋势为先降低后升高,60 d 的体积膨胀率由基准试件的 9.9×10^{-4} 下降至最低值,

即 B3 组的 8.4×10^{-4} , 这说明 B3 组,即 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)=3:2$ 时,磷酸镁混凝土试件在水中的体积稳定性最好。当磷酸盐全部为 KH_2PO_4 , 试件 60 d 的膨胀率与同龄期基准试件相当, 这说明单独使用 KH_2PO_4 为原料制备的磷酸镁混凝土在水中的体积稳定性不理想^[6]。

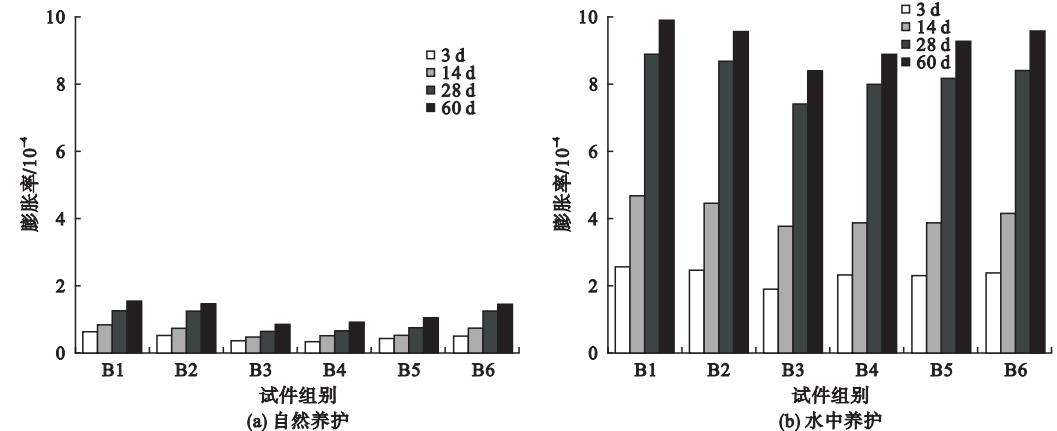


图2 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 对体积稳定性影响

Fig. 2 Effect of $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ on the volume stability

3.4 磷酸盐对磷酸镁混凝土强度保留率的影响

表3是不同 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 复合对磷酸镁混凝土试件强度保留率的影响,可以反映其耐水性优劣。

由表3可知,①相比60 d 自然养护试件

的抗压强度,在水养环境下单掺 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 或 KH_2PO_4 时,磷酸镁混凝土试件强度保留率在 64.9% 以下,强度倒缩接近一半,这说明单独使用一种磷酸盐材料耐水性较差。②当磷酸盐复配比例中 KH_2PO_4 含量逐渐增加

时,磷酸镁混凝土的强度保留率先减小后增大,其中B3组,即 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)=3:2$ 时,磷酸镁混凝土强度保留率达到最大值81.7%,耐水性最佳。

表3 不同 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 复合对磷酸镁混凝土试件强度保留率的影响

编 号	试件不同龄期强度保留率/%			
	3 d	14 d	28 d	60 d
B1	81.5	80.2	77.8	58.6
B2	84.5	78.2	77.2	65.9
B3	87.5	83.3	82.6	81.7
B4	87.2	82.3	79.6	76.3
B5	84.4	81.8	79.6	68.3
B6	83.8	78.5	77.1	64.9

不同 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 复合对磷酸镁混凝土试件抗压强度和体积稳定性的影响可知,无论是自然养护还是水养条件下,当 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)=3:2$ 时,磷酸镁混凝土力学强度和体积稳定性均为最优,对磷酸镁混凝土耐水性的改性效果最好。

4 矿物掺合料对磷酸镁混凝土耐水性的影响

矿物掺合料是指在配制混凝土时加入的能改变新拌混凝土和硬化混凝土性能的矿

物细粉^[18],涉及的矿物掺合料包括了粉煤灰、硅灰、矿渣粉等。硅灰是工业电炉在高温熔炼工业硅及硅铁过程中,通过回收工业废气处理而成的粉尘。由于硅粉颗粒比较细,可以填充到反应物颗粒的空隙中,同时与碱性原材料氧化镁反应生成胶凝物,从而使混凝土强度及其他力学性能指标得以改善,提高耐久性。因此,试验在磷酸镁混凝土中掺入2.5%、5%、7.5%、10%的硅灰,研究其对磷酸镁混凝土耐水性能的影响。

4.1 硅灰对磷酸镁混凝土力学强度的影响

图3为不同掺量硅灰对磷酸镁混凝土抗压强度的影响。从图3可以看出,硅灰对磷酸镁混凝土的强度有显著影响,无论是在自然养护还是水养条件下,与基准试件抗压强度相比,掺加硅灰试件的抗压强度随着硅灰掺量的增加而升高,当硅灰掺量为5%时,试件早期抗压强度达到最高值43.7 MPa,且后期强度发展最好,在自然养护和水养条件下60 d的抗压强度分别是58.6 MPa、47.2 MPa。硅灰掺量继续增加,达到7.5%时,混凝土和易性变差,拌合物变干稠,硅灰掺量为10%时,试件的抗压强度出现大幅下降,强度发展不及基准试件。这说明,硅灰可以提高磷酸镁混凝土试件的抗压强度。但是掺量过大时,未参加水化反应的硅灰会降低硬化体的强度。

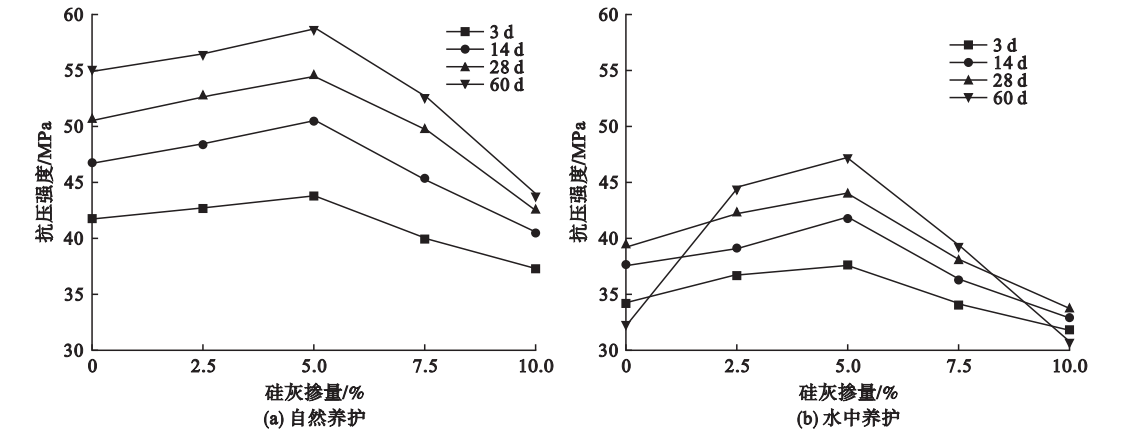


图3 硅灰掺量对抗压强度影响

Fig. 3 Effect of silica fume content on the compressive strength

4.2 硅灰对磷酸镁混凝土体积稳定性影响

图4为不同硅灰掺量对磷酸镁混凝土体积稳定性的影响.由图4可知,在自然养护和水中养护两种条件下,随着龄期的变化,硅灰对试件体积稳定性的影响呈现出相同的发展规律:试件的体积膨胀率随硅灰掺量的增加

而降低;在水养条件下,当硅灰掺量为10%时,试件60 d体积膨胀率由同龄期的基准试件的 10×10^{-4} 降低至 8.3×10^{-4} ,这说明掺加硅灰提高了磷酸镁混凝土的抗渗性能,改善了其在水养条件下的体积稳定性.

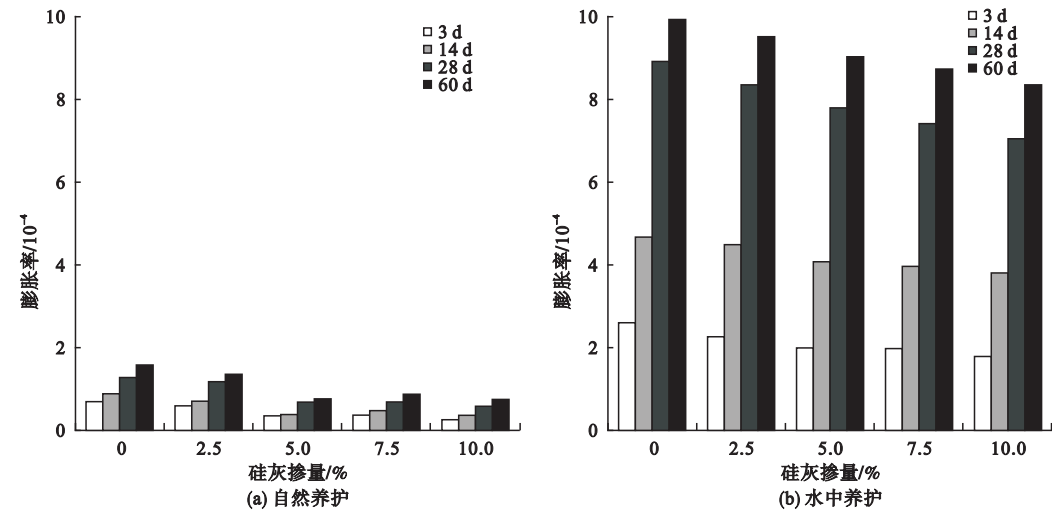


图4 硅灰掺量对体积稳定性影响

Fig.4 Effect of silica fume content on the volume stability

4.3 硅灰对磷酸镁混凝土强度保留率影响

表4为不同掺量的硅灰对磷酸镁混凝土试件强度保留率的影响.由表4可知,适当掺量的硅灰可以有效提高磷酸镁混凝土的强度保留率,即改善磷酸镁混凝土的耐水性.当硅灰掺量为5%时,60 d强度保留率达到最高值80.5%,比同龄期基准试件强度保留率提高了21.9%.硅灰掺量继续增加时,试件的强度保留率开始下降,当硅灰掺量为10%,强度保留率衰减了约1/3.主要原因是硅粉的比表面积大,能够吸附大量的水分,若要保持较好的流动度,需要增大水胶比,这就导致混凝土强度下降,耐水性降低.

在磷酸镁混凝土中加入硅灰,能显著提高磷酸镁混凝土试件在水中的体积稳定性和价格低施工成本,但如果硅灰掺量过多^[19],很可能导致混凝土和易性变差、强度下降,综合硅灰对磷酸镁混凝土力学强度和体积稳定性考虑,硅灰的最佳掺量为5%.

表4 不同掺量的硅灰对磷酸镁混凝土试件强度保留率的影响

Table 4 The strength retention rate of magnesium phosphate cement under different silica fume content

硅灰掺量/%	试件不同龄期强度保留率/%			
	3 d	14 d	28 d	60 d
0	81.5	80.2	77.8	58.6
2.5	85.9	80.9	80.0	79.0
5.0	86.0	82.7	80.9	80.5
7.5	85.2	80.1	76.8	74.8
10.0	85.2	81.0	79.2	69.4

5 聚丙烯纤维对磷酸镁凝土耐水性的影响

聚丙烯纤维可以弥补磷酸镁混凝土的脆性大、变形能力差、抗开裂能力不足等缺陷,原因是在磷酸镁混凝土中加入的聚丙烯纤维作用类似于纤维筋,其与硬化基体共同承受

外力,当产生裂缝时,可以有效阻止裂缝发展,并且能够在承受较大的荷载及变形情况下“带伤”工作,直至聚丙烯纤维被拉断或从基体中拔出而破坏。

试验在确定磷酸镁混凝土配合比的基础上,聚丙烯纤维以 0、0.7%、0.9%、1.1%、1.3% 为掺量制备混凝土试件,以考察聚丙烯纤维对磷酸镁混凝土耐水性的影响。

5.1 聚丙烯纤维对磷酸镁混凝土力学强度的影响

图 5 为不同掺量的聚丙烯纤维对磷酸镁混凝土抗压性能的影响。从图 5 可以看出:①在自然养护条件下,随着聚丙烯纤维掺量的增加,磷酸镁混凝土试件早期抗压强度逐渐降低,且后期强度增长缓慢。②在水养条件下,随着聚丙烯纤维掺量的增加,试件抗压强度先增加而后降低,当聚丙烯掺量在 0.7% ~

0.9%,试件早期抗压强度在 38.1 MPa 以上,且后期强度发展良好,聚丙烯纤维掺量继续增加,试件抗压强度开始下降,当聚丙烯纤维掺量为 1.3% 时,抗压强度达到最低,但并没有出现基准试件强度倒缩的情况。③在抗压试验中发现,基准试件由于环箍效应,加压达到最大荷载后边缘混凝土破裂脱落,试件呈棱锥体状;而加入聚丙烯纤维的试件,在抗压试验过程中,裂缝宽度明显降低,即使达到最大荷载试件仍然完整。因此,在磷酸镁混凝土中加入聚丙烯纤维,会对自然养护条件下的磷酸镁混凝土试件抗压强度有一定影响,可以通过控制聚丙烯纤维掺量来削弱这种影响;但在水养条件下,适量聚丙烯纤维可以抵抗磷酸镁混凝土在长期与水接触的环境下的强度的倒缩,而且能够增加其断裂韧性。

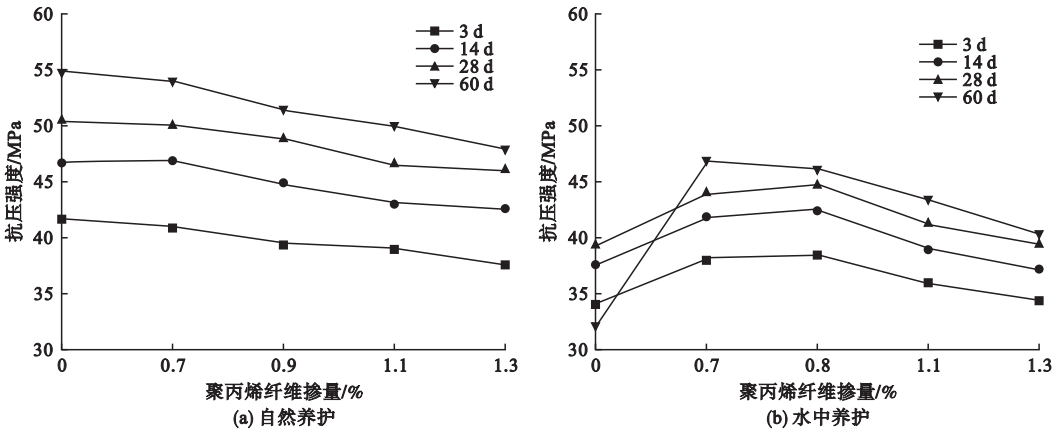


图 5 聚丙烯纤维掺量对抗压强度影响

Fig. 5 Effect of polypropylene fiber content on the compressive strength

5.2 聚丙烯纤维对磷酸镁混凝土体积稳定性的影响

图 6 为不同聚丙烯纤维掺量对磷酸镁混凝土试件体积稳定性的影响。从图 6 可以看出,在水养条件下,掺加聚丙烯纤维试件的体积膨胀率均低于同龄期基准试件的体积膨胀率,当聚丙烯纤维掺量为 0.9% 时,试件 60 d 体积膨胀率达到最低值 6.9×10^{-4} ,比同龄期基准试件体积膨胀减小 31%,这说明掺加适量的聚丙烯纤维可以提高磷酸镁混凝土试

件在水中的体积稳定性。

5.3 聚丙烯纤维对磷酸镁混凝土强度保留率的影响

表 5 为不同掺量聚丙烯纤维对磷酸镁混凝土强度保留率的影响。从表 5 中可以看出,未掺加聚丙烯纤维的试件 60 d 强度保留率仅为 58.6%,这说明磷酸镁混凝土在水养环境下强度大幅下降,耐水性较差;而掺加聚丙烯纤维的试件 60 d 强度保留率均在 84.1% 以上,这说明聚丙烯纤维使磷酸镁混凝土试

件在水养条件下保持强度效果较好,能够明显改善其耐水性能。当聚丙烯纤维掺量为0.9%时,强度保留率达到最高值89.3%,而后随着聚丙烯纤维掺量的增加强度保留率呈下降趋势。适当掺量的聚丙烯纤维均匀分布于磷酸镁混凝土内部,充当纤维筋骨架作用,

与水化产物有极大的咬合力,增强了水化产物的稳定性,阻止了裂缝的产生和发展,在水养条件下强度损失较少,耐水性良好。若纤维掺量过大,则容易出现纤维“结团”,在硬化体内部无法与水化产物均匀地结合在一起,导致孔隙率增加,混凝土强度下降。

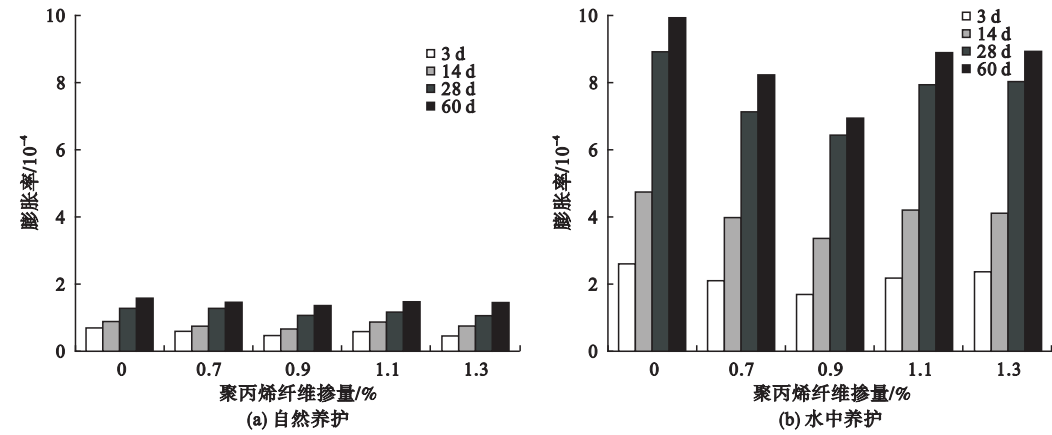


图6 聚丙烯纤维掺量对体积稳定性影响

Fig. 6 Effect of polypropylene fiber content on the volume stability

表5 不同掺量的聚丙烯纤维对磷酸镁混凝土试件强度保留率的影响

聚丙烯纤维掺量/%	试件不同龄期强度保留率/%			
	3 d	14 d	28 d	60 d
0	81.5	80.2	77.8	58.6
0.7	92.9	89.3	87.6	86.6
0.9	97.4	94.4	91.6	89.3
1.1	92.0	90.2	88.4	86.6
1.3	91.4	87.3	85.4	84.1

6 结 论

- (1)当磷酸二氢铵和磷酸二氢钾的质量比 $m(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):m(\text{KH}_2\text{PO}_4)=3:2$ 时,磷酸镁混凝土早期和后期强度发展较好,且在水中体积稳定性较为理想,其对磷酸镁混凝土耐水性改性效果较好。
- (2)随着硅灰掺量的增加,磷酸镁混凝土试件的强度和强度保留率呈先升高后降低

- 的趋势;当硅灰掺量为10%时,试件抗压强度低于基准试件,且在水养条件下强度产生倒缩,强度保留率为69.4%,耐水性较差。
- (3)水养条件下掺入聚丙烯纤维的磷酸镁混凝土60 d强度保留率均在84.1%以上;当聚丙烯纤维掺量为0.9%时,试件60 d体积膨胀率达到最低值 6.9×10^{-4} ,比同龄期基准试件体积膨胀减小31%,这说明聚丙烯纤维与磷酸镁混凝土协同效应更显著,耐水性能改善效果更明显。

参考文献

[1] CHAU C K, QIAO F, LI Z. Microstructure of magnesium potassium phosphate cement [J]. Construction & building materials, 2011, 25 (6):2911–2917.

[2] 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. Study on magnesium phosphate cement [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2001, 23(4): 32–34.)

[3] 丁铸,李宗津. 早强磷硅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. Preparation and prop-

- erties of early strength phosphosilicate cement [J]. Chinese journal of materials research, 2006, 20(2): 141 - 147.)
- [4] 毛敏,王智,王庆珍,等. 磷酸镁水泥耐水性的影响因素与改进措施[J]. 粉煤灰综合利用, 2011(6): 15 - 18.
(MAO Min, WANG Zhi, WANG Qingzhen, et al. Influencing factors and improving measures of water resistance of magnesium phosphate cement[J]. Fly ash comprehensive utilization, 2011(6): 15 - 18.)
- [5] 李中华,张佳良,蒋亚清. 磷酸盐快速修补材料性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(8): 8 - 11.
(LI Zhonghua, ZHANG Jialiang, JIANG Yaqing. Study on properties of phosphate rapid repair material[J]. China concrete and cement products, 2011(8): 8 - 11.)
- [6] QIAO F, CHAU C K, LI Z. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material[J]. Construction & building materials, 2010, 24(5): 695 - 700.
- [7] LI J, ZHANG W, CAO Y. Laboratory evaluation of magnesium phosphate cement paste and mortar for rapid repair of cement concrete pavement[J]. Construction & building materials, 2014, 58(4): 122 - 128.
- [8] CHANG Y, SHI C, YANG N, et al. Effect of fineness of magnesium oxide on properties of magnesium potassium phosphate cement[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2013, 41(4): 492 - 499.
- [9] 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.
- [10] LI J, ZHANG W, CAO Y. Laboratory evaluation of magnesium phosphate cement paste and mortar for rapid repair of cement concrete pavement[J]. Construction & building materials, 2014, 58(4): 122 - 128.
- [11] 杨建明,周启兆,钱春香,等. 新拌磷酸镁水泥浆体流动性测试方法及其流动特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(3): 624 - 629.
(YANG Jianming, ZHOU Qizhao, QIAN Chunxiang. Test method and flow characteristics of freshly mixed magnesium phosphate cement paste[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2009, 28(3): 624 - 629.)
- [12] 夏锦红,袁大伟,王立久. 磷酸镁水泥水化机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009(9): 25 - 28.
(XIA Jinhong, YUAN Dawei, WANG Lijiu. Study on hydration mechanism of magnesium phosphate cement[J]. Journal of wuhan university of technology, 2009(9): 25 - 28.)
- [13] 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 - 16.
(YANG Quanbing, WU Xueli. Study on new super fast hard phosphate repair material[J]. China concrete and cement products, 1995(6): 13 - 16.)
- [14] 张传镁,邓德华. 氯氧镁水泥耐水性及其改善的研究[J]. 硅酸盐学报, 1995(6): 673 - 679.
(ZHANG Chuanmei, DENG Dehua. Study on water resistance and improvement of magnesium oxychloride cement[J]. Journal of silicate science, 1995(6): 673 - 679.)
- [15] 苏柳铭. 磷酸镁水泥纤维改性及其路面修补应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
(SU Liuming. Study on modification of magnesium phosphate cement and pavement repair application[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.)
- [16] 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 high performance magnesium phosphate cement based materials[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.)
- [17] BEDDOE R E, DORNER H W. Modelling acid attack on concrete; Part I. The essential mechanisms[J]. Cement & concrete research, 2005, 35(12): 2333 - 2339.
- [18] 孙鑫鹏,李益进,尹健,等. 酸雨对桥梁用 C50 高强混凝土侵蚀性能影响分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2010(1): 9 - 12.
(SUN Xinpeng, LI Yijin, YIN Jian. Influence of acid rain on Erosion Behavior of C50 high strength concrete for bridges[J]. China concrete and cement products, 2010(1): 9 - 12.)
- [19] 范向前,朱海堂,胡少伟,等. 强碱溶液环境下混凝土力学性能试验研究[J]. 华北水利水电大学学报, 2013, 34(1): 54 - 58.
(FAN Xiangqian, ZHU Haitang, HU Shaowei, et al. Experimental study on mechanical properties of concrete under strong alkali solution environment[J]. Journal of north China institute of water conservancy and hydroelectric power, 2013, 34(1): 54 - 58.)