

丁苯胶乳改性水泥基材料的性能与机理研究进展

衡艳阳¹, 赵文杰²

1. 南阳理工学院建筑与城市规划学院, 河南南阳 473004

2. 长春工业大学化学工程学院, 长春 130012

摘要 丁苯胶乳(SBL)改性水泥基材料具有较好的流动性、保水性、与基材的黏结性、水密性、耐久性、抗化学腐蚀性、抗冻融性、良好的力学强度及延伸性能,而且其成本较低、使用便捷,得到较为广泛的应用。综述了SBL改性水泥基材料的性能和机理,介绍了SBL单独改性、SBL和其他胶乳共混改性、SBL和纤维改性、SBL和外加剂复合改性时,水泥基材料的物理和力学性能。从3个方面探讨了SBL改性机理:SBL对水泥水化过程的影响存在物理作用和化学作用;SBL对微观结构的主要影响是由乳胶粒子的分散和聚合物薄膜的形成所产生的;从孔洞结构看,SBL改变水泥基材料的孔径分布、特征孔径、平均孔径、最可几孔径、孔隙率等,提高了材料的内聚强度。分析表明,SBL改性水泥基材料具有性价比高、环境友好、使用寿命长、循环利用率高等优点。

关键词 丁苯胶乳;改性水泥基材料;微观结构

中图分类号 TU529.41

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.34.014

Progress of Research on Properties and Mechanism of SBL Modified Cement Based Materials

HENG Yanyang¹, ZHAO Wenjie²

1. School of architecture and urban planning of Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, Henan Province, China

2. Institute of Chemical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China

Abstract The styrene-butadiene latex (SBL) modified cement based materials have good mobility, water retention, cohesiveness to base material, water tightness, durability, resistance to chemical corrosion, freezing and thawing resistances, good mechanical strength and extension properties. They are low cost and easy to use, therefore, are becoming more widely used. In this paper, the mixed mode and mechanism research on SBL modified cement-based materials are reviewed; the physical and mechanical properties of cement-based materials are introduced for the SBL separate modification, SBL and other latex blending modification, the SBL and fiber modification, and the SBL and admixture modification, respectively. The modified mechanisms of the SBL are discussed from three aspects: the influence of SBL on cement hydration process is due to the interactions of physics and chemistry; the latex particle dispersion and the formation of polymer film are the major cause of the effect of SBL on the microstructure; SBL changes the pore diameter, average pore diameter, pore size distribution, the most probable aperture, and the porosity of the cement based material, increasing the cohesion strength of the material. Finally, the analysis indicates that the SBL modified cement-based materials are cost-effective and environment friendly, and have a long service life and recycling value.

Keywords styrene-butadiene latex; modified cement based materials; microstructure

0 引言

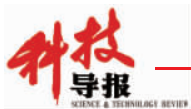
1923年,Cressons^[1]将天然橡胶添加到水泥中作为铺路材料,初步探索了聚合物改性的应用。1924年,Lefebure^[2]提出用

聚合物对水泥砂浆及混凝土进行改性,并获得英国专利。1932年,Bend等^[3]将人造橡胶乳液应用于水泥混凝土改性,把改性物质由天然聚合物改为人工合成的聚合物,开始了聚

收稿日期:2013-06-05;修回日期:2013-10-24

基金项目:长春工业大学科技发展基金项目(2011028)

作者简介:衡艳阳,讲师,研究方向为建筑材料,电子信箱:hengyanyang@126.com;赵文杰(通信作者),副教授,研究方向为聚合物水泥基复合材料,电子信箱:zhaowenjie@mail.ccut.edu.cn



合物混凝土复合材料的研究,使聚合物改性水泥砂浆和混凝土得到了有效发展,作为地面和路面材料、自防水材料 and 防水薄膜、胶黏剂、装饰涂层、修补材料等,广泛应用于工程建设中。

近年来,人们采用各种物理或化学方法探测识别材料的组成和结构等信息,使聚合物改性水泥基材料机理研究的角度和深度得到扩展^[4]。不同聚合物分子链的化学组成和结构不同,用作改性水泥基材料的聚合物,按状态可分为4种:可再分散性粉末、乳液、水溶性聚合物、液体聚合物。不同聚合物的极性、亲水性、反应性、电性、分散性等均不同,对水泥水化、凝结硬化有不同的影响。由于丁二烯苯乙烯胶乳(丁苯胶乳, Styrene-Butadiene Latex, SBL)的价格相对较低,在实际应用中使用较为广泛。本文针对改性水泥基材料的性能和改性机理,综述近几年 SBL 改性水泥基材料的研究进展。

1 丁苯胶乳改性水泥基材料性能

SBL 改性水泥基材料具有良好的黏接能力、防水能力、变形适应性、耐久性,在建筑、电气、机械、化工等工业领域中已得到广泛应用。其主要改性方法有:SBL 单独改性、SBL 与纤维复合改性、SBL 与其他胶乳共混复合改性、SBL 与外加剂复合改性。SBL 改性水泥基材料的性能研究,主要集中在改性砂浆的弯曲性能、收缩性能、断裂性能、耐久性能、吸水性能、碳化性能、减水性能、保水性能、耐氯离子渗透性能、刚性和耐磨性、硬度和抗压抗折强度等。

1.1 丁苯胶乳单独改性水泥基材料

SBL 单独改性水泥基材料,是把 SBL 加入水泥砂浆中进行改性的方法。只需在制备水泥砂浆时,将 SBL 直接加入水泥砂浆中,其制备方法与制备传统水泥砂浆相同,较为简便。

SBL 可以改善砂浆的弯曲性能^[5]、收缩性能^[6]、断裂性能^[7]、吸水率和碳化性能^[8]、耐久性^[9]、减水和保水性^[10]、刚性与耐磨性^[11]、力学性能^[12]。

(1) 弯曲强度。当添加 SBL 的质量分数为 7.5% 时,水泥的弯曲强度达到最大值,在大于 10% 时开始下降,大于 12.5% 后,水泥的弯曲强度变得很低。

(2) 收缩性能。当 SBL 的质量分数是水泥质量分数的 3% 或大于 3% 时,才能有效改善砂浆的长期收缩性能,特别是改善砂浆 28d 龄期前的收缩变形。

(3) 断裂性能。当增加 SBL 的质量分数时,砂浆收缩长期变形减小,临界荷载、相应变形、裂缝嘴张开位移增大,SBL 质量分数增加 18% 时,临界荷载量提高了 0.122kN,而变形及裂缝嘴张开位移则分别增加了 0.049mm 和 0.013mm。

(4) 吸水率和碳化性能。SBL 的掺入明显降低了砂浆的吸水率及碳化深度。

(5) 耐久性。SBL 还可以改善传统水泥混凝土的耐久性,有效地提高混凝土的抗水性、防腐性、抗硫酸盐侵蚀性。加入质量分数为 15% 的 SBL 可以有效地提高混凝土的抗氯离子渗透性,防止钢筋混凝土中钢筋的锈蚀。

(6) 减水和保水性。减水率指流动度相同时的基准砂浆和掺聚合物砂浆单位体积用水量之差与基准砂浆单位体积用水量之比,是表征减水效果的一项重要指标。保水率是指砂浆剩余水分占砂浆初始含水总量的分率。王茹^[10]研究了 SBL 改性砂浆的减水和保水性能,如图 1 和图 2 所示,当聚灰比增加到 20% 时,砂浆中的减水率达到 50%,保水率达 99%。

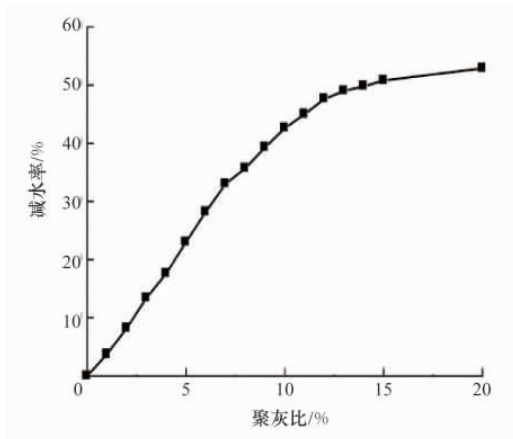


图 1 流动度为 (170±5)mm 时减水率与 SBL 胶乳改性砂浆的聚灰比的关系
Fig. 1 Change of the water-reduction rate with the m_p/m_c of mortars SBL latex-modified mortars with constant flow of (170±5)mm

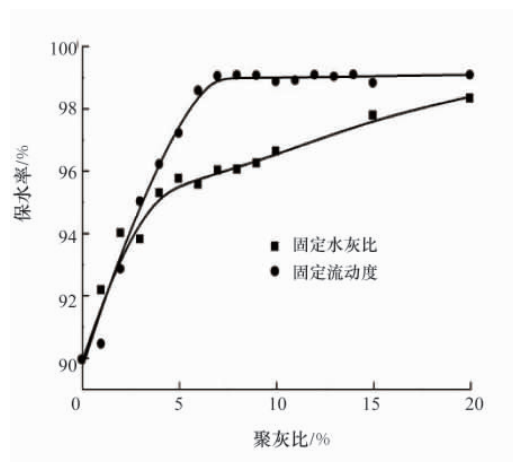


图 2 保水率与 SBL 胶乳改性砂浆的聚灰比的关系
Fig. 2 Relation between water-retention rate with the m_p/m_c of SBL latex-modified mortars

(7) 刚性和耐磨性。SBL 可提高水泥砂浆及水泥混凝土的刚性和耐磨性,随着 SBL 含量的增加,水泥砂浆和混凝土的弹性模量逐渐降低,磨损重量损失也降低。

(8) 力学性能。SBL 还可以影响改性砂浆的力学性能,在固定水灰比时,抗压强度随胶乳加入量的增加而降低,而抗折强度不依赖胶乳的加入量;在固定流动度时,抗压强度不依赖胶乳的加入量,抗折强度随胶乳加入量的增加而降低。

Rozenbaum 等^[13]认为,与纯水泥相比,胶乳的加入降低了 SBL 水泥混合物的硬度,改善了复合材料的韧性。Pascal 等^[14]进行了压缩实验,发现 SBL 改性水泥砂浆的硬度和抗压强度随聚合物对水泥的质量比(聚灰比, polymer-cement ratio, *P/C*)的增加而降低;在 *P/C* 比大于 10% 时,三点弯曲实验(将条形样品放在有一定距离的 2 个支撑点上,在 2 个支撑点中点的上方向样品施加向下载荷,样品的 3 个接触点形成相等的 2 个力矩时即发生 3 点弯曲,样品将于中点处发生断裂)表明,抗折强度随 *P/C* 比的增加而增加。

1.2 丁苯胶乳与纤维复合改性水泥基材料

SBL 与纤维复合改性水泥基材料是把 SBL 加入到水泥砂浆后,再加入纤维进行改性的材料。在制备水泥砂浆时,将 SBL 和纤维同时加入到水泥砂浆中,其制备方法与制备普通水泥砂浆相同。目前,SBL 与纤维复合改性水泥基材料的研究,主要集中在 SBL 与纤维素、聚丙烯(Polypropylene, PP)纤维改性、碳纤维、钢纤维的复合改性等。SBL 与一种纤维改性时,材料的强度不高,其应用范围受限。为了增加复合材料的强度,有时常加入其他组分,如碳纤维。对于强度要求特别的场合,除加入碳纤维之外还要加入钢纤维。

(1) SBL 与纤维素及不锈钢纤维复合改性^[15]。加入 SBL 和甲基纤维素进行复合改性后,水泥净浆的热软化温度和热膨胀性均有降低。加入质量分数为 0.4% 的甲基纤维素和 20% 的 SBL,还可增加不锈钢纤维和水泥浆之间的黏接强度。

(2) SBL 与 PP 复合改性^[16]。SBL 和 PP 纤维的复掺效果优于 2 者单掺的情况,复掺对水泥砂浆起到了双重改性的效果。PP 纤维的掺入大幅度提高了 SBL 砂浆的抗冲击、抗磨损性能和干缩性能,提高 SBL 砂浆抗磨损性能的最佳纤维掺量为 0.1%;纤维掺量越大,对提高 SBL 砂浆的抗冲击性能越有利。添加 SBL 还可以改善聚丙烯纤维与水泥基体之间的界面黏结,增强掺纤维砂浆的长期力学性能。

(3) SBL 与碳纤维复合改性^[17]。碳纤维在 14d 龄期之前减小改性砂浆的干缩率,但 14d 龄期之后则略微增大改性砂浆的干缩率。

(4) SBL 与钢纤维复合改性^[17]。钢纤维能减小改性砂浆的长期干缩率。

(5) SBL 与 PP 及钢纤维复合改性^[17]。钢纤维与聚丙烯纤维的混掺,对限制改性砂浆的干缩性能起到了较好的效果。

(6) SBL 与碳纤维及钢纤维复合改性^[17]。钢纤维和碳纤维的混掺,对改性砂浆的干缩性能作用不太明显。

1.3 丁苯胶乳与其他胶乳共混复合改性水泥基材料

由于单一的胶乳改性具有多种缺陷,如 SBL 不耐紫外线辐射、苯丙胶乳(SAE)价格较高、偏氯乳液抗压强度较低等,所以采用 SBL 与其他胶乳共混复合改性的方法进行弥补。制备水泥基材料时,先把 SBL 与另外一种胶乳进行混合,再将共混的胶乳加入到水泥砂浆中。SBL 与其他胶乳共混改性水泥基材料的研究,主要集中在 SBL 与苯丙胶乳共混改性、SBL 与偏氯乳液共混改性等。2 种合适的胶乳以适当的比例进行

共混,可以降低砂浆中氯离子的扩散系数。

SAE 与 SBL 共混胶乳改性砂浆具有协同作用^[18],当质量比为 3:2~4:1 时,该共混胶乳的拉伸强度较高但断裂伸长率较低。而 SBL 与少量偏氯乳液共混改性时,该共混胶乳的拉伸强度较低但断裂伸长率较高^[19],此时的氯离子扩散系数高于前者。

1.4 丁苯胶乳与外加剂复合改性水泥基材料

SBL 与外加剂复合改性水泥基材料,是把 SBL 加入到水泥砂浆中后,再添加外加剂,可以弥补单一 SBL 改性时复合材料抗压强度下降的问题。目前,SBL 与外加剂复合改性水泥基材料的研究,主要集中在 SBL 与超塑化剂、硅灰以及和碳纳米管复合改性等。

(1) SBL 与超塑化剂复合改性。将 SBL 和超塑化剂同时加入到水泥砂浆中,改善了浆体的流动性^[20]。SBL 和超塑化剂复合增加了水泥水化速率,改善了抗压强度、形变,降低了孔隙率,改善了水泥基材料的韧性和耐水性^[21,22]。

(2) SBL 与硅灰复合改性。将硅灰加入到 SBL 改性混凝土中,可以改善混凝土的界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)。Rossignolo^[23]研究了硅灰和 SBL 对混凝土 ITZ 的影响,如图 3 所示。普通混凝土在骨料颗粒周围能观察到的 ITZ 为 55 μm ,单加硅灰或 SBL 时混凝土的 ITZ 为 35~40 μm ,变化并不是非常明显。但复合添加硅灰和 SBL 时,可以观察到混凝土的 ITZ 变为了 20~25 μm ,效果最好。

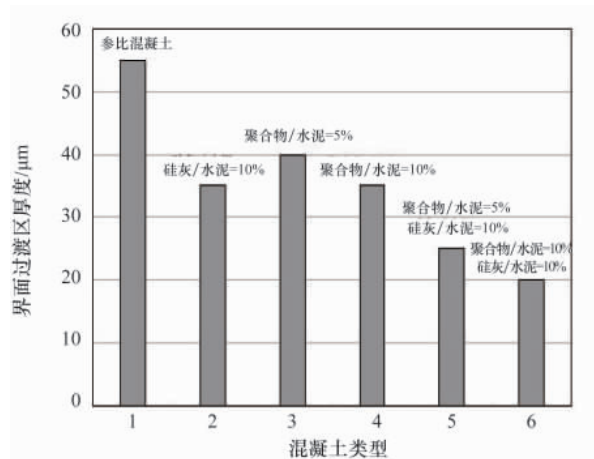


图 3 混凝土界面过渡区的厚度

Fig. 3 Interfacial transition zone thickness of concretes

(3) SBL 与碳纳米管复合改性。近年来,为改善 SBL 改性水泥基材料的力学性能、热稳定性、28d 抗张强度,人们将碳纳米(CNTs)材料引进建筑领域,使结构材料的力学性能有了飞跃性的增强^[24]。碳纳米管可分为多壁碳纳米管(MWCNTs)、单壁碳纳米管(SWCNTs)。虽然 SWCNTs 的力学性能优于 MWCNTs,但 MWCNTs 更便宜且生产工艺简单,更适合作为复合材料添加到水泥基材料中。研究表明,在不降低 SBL 改性水泥基材料早期抗压性能的前提下,添加 MWCNTs 可显著提高改性水泥砂浆的破坏应变力(至原来的 290%)和韧性(至原来的 105%)^[25]。



2 丁苯胶乳改性水泥基材料的改性机理

目前, SBL 改性水泥基材料改性机理的研究主要集中在 SBL 对水泥水化的影响、SBL 对水泥基材料微观结构的影响、SBL 对水泥基材料的孔结构影响 3 个方面。

2.1 丁苯胶乳对水泥水化的影响

关于 SBL 对水泥水化的影响机理, 有两种不同观点: 多数研究人员认为 SBL 对水泥混凝土性能的改善, 是基于其在水泥水化过程中的物理行为, SBL 成膜覆盖于水泥凝胶体的表面, 或者是 SBL 作为粒子填充于水泥水化物的缝隙之间, 阻隔了孔隙通道, 提高了水泥凝胶体的致密性, 增强了其抗渗性; 另一种观点则认为, 在 SBL 改性水泥混凝土中除发生上述物理过程外, SBL 与水泥水化物间还发生了化学反应, 如 SBL 中的各种活性基团与水泥水化产物中的 Ca^{2+} 发生反应, 形成特殊的桥键作用, 成为结构更为致密的螯合体, 或与凝胶纳米结构相互作用提高硅聚合度, 改善水泥砂浆硬化体的微观结构等, 从而改善了聚合物水泥混凝土的性能^[20]。

2.2 丁苯胶乳对水泥基材料微观结构的影响

近年来, 人们逐渐开始从微观结构方面对聚合物改性水泥基材料进行研究, 认为乳胶粒子的分散和聚合物薄膜的形成是聚合物改性的主要原因。根据胶乳的成膜特性, 有研究者提出了聚合物改性水泥基材料形态结构的形成过程, 如 Ohama 模型^[21]、Konietzko 模型^[22]。Konietzko 结构模型是将聚合物乳液改性水泥砂浆和混凝土的结构形成过程分为 4 个阶段, 即均匀分散、水泥水化、聚合物膜形成、硬化聚合物水泥共基体形成, 认为聚合物和水泥浆体相互贯穿形成了互穿网络结构。Ohama 模型把聚合物改性水泥砂浆和混凝土的结构形成过程分为 3 个阶段, 即聚合物颗粒均匀分散在水泥浆体中、聚合物颗粒在毛细孔中聚集、聚合物膜结构形成, 认为水泥硬化浆体被包裹在了聚合物网膜中。

此后, 不断有聚合物改性水泥砂浆微观结构的研究报道。例如, Fichet 等^[23]认为乳胶粒子分布在水泥水化产物中间和未水化水泥颗粒表面。Su 等^[24]认为, 在改性后, 一部分乳胶粒子吸附在水泥颗粒表面, 形成薄膜, 另一部分乳胶粒子分散在孔中的液相中(孔中含有水), 当自由水完全被水化和蒸发消耗掉后, 形成薄膜。这些结构模型机理具有普遍性, 对 SBL 同样适用。

研究表明, 聚合物所形成的薄膜分布在砂浆中不同的位置, 包括基层-砂浆界面区、骨料-浆体界面区、孔隙之间、孔隙周围、水泥水化产物之间。乳胶粒子的吸附性能与原料的混合情况及养护条件等有关, SBL 可以使水泥水化减缓; 聚合物膜的均匀分布可以防止或减少水分蒸发, 改善胶凝材料-骨料界面的黏结力; 互穿网状结构的形成, 有利于应力的分散和转移, 阻止或减弱了裂纹的增长。

2.3 丁苯胶乳改性水泥基材料的孔结构分析

SBL 改性水泥基材料的孔结构包括孔径分布、特征孔径、平均孔径、最可几孔径、孔隙率等。

SBL 的掺入使砂浆的平均孔径、最可几孔径及中值孔径

等特征孔径减小、有害孔及多害孔数量减少, 无害孔增多, 砂浆的总孔隙率略有下降, 闭口孔隙率在总孔隙中所占比重大幅度增加^[6]。当添加 SBL 的质量分数超过 3% 后, 水泥石中 50nm 以上大孔数量有所减少, 20nm 以下的小孔数量明显增多, 平均孔径、最可几孔径及中值孔径都有较大幅度的下降; 当添加 SBL 的质量分数超过 6% 之后, 改性砂浆的开口孔隙率显著降低, 闭口孔隙率增多, 但总孔隙率变化不大^[21]。王茹等^[10]研究了 SBL 改性砂浆孔隙率和孔径, 固定水灰比时, 改性砂浆的孔隙率随 P/C 的增加而增加, 当 P/C 为 10% 时, 达最大值, 水养护时改性砂浆的孔隙率比混合养护时更低; 改性砂浆的平均孔径随 P/C 的增加而增加, 当 P/C 为 8% 时, 达最大值。水养护时改性砂浆的平均孔径比混合养护时更高; 当流动度不变时, 聚灰比对孔隙率及孔径的影响不明显。张金喜等^[23]研究认为, 二甲基硅油乳液和 SBL 都具有细化水泥砂浆孔隙的作用。SBL 的掺入, 可以改变水泥基材料的孔结构, 填充水泥浆体的毛细孔和大孔, 使浆体与集料界面过渡区结构紧密; 同时, 水灰比的减少和聚合物膜的形成也降低了体系的孔隙率, 提高了材料的内聚强度。

3 结论

SBL 在工业上采用连续生产工艺, 因而具有生产规模大、自动控制程度高的优势, 其生产成本较低, 且使用便捷, 所以得到了较为广泛的应用, SBL 改性水泥基材料具有性价比高、环境友好、使用寿命长、循环利用率高等优点, 发展前景广阔。通过 SBL 单独改性、SBL 与外加剂复合改性、SBL 与其他胶乳共混改性、SBL 与纤维复合改性等方法, 实现了砂浆的弯曲性能、收缩性能、断裂性能、吸水率、碳化性能、耐久性、减水和保水性、刚性与耐磨性、力学性能的改进。加强改性机理的研究, 将对新型 SBL 和乳胶粉、高性能多功能 SBL 改性水泥基材料的开发、设计及应用产生一定促进作用。

参考文献 (References)

- [1] Cresson L. Improved manufacture of rubber road-facing rubber-flooring, rubber-tiling or other rubber-lining: UK, 191474[P]. 1923-01-12.
- [2] Lefebure V. Improvements in orrelating to concrete, cement, plasters and the like: UK, 217279[P]. 1924-06-05.
- [3] 王茹. 聚合物乳液改性水泥砂浆性能及机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
Wang Ru. Study on mechanism and properties of polymer-modified cement mortars[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [4] 王茹, 姚丽娟, 王培铭. 水泥基材料聚合物改性机理研究的最新进展[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4): 818-821.
Wang Ru, Yao Lijuan, Wang Peiming. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(4): 818-821.
- [5] Bureau L, Alliche A, Pilvin P. Mechanical characterization of a styrene-butadiene modified mortar [J]. Materials Science Engineering A, 2001, 308(1/2): 233-240.
- [6] 梅迎军, 李志勇, 王培铭. SBR 乳液对水泥砂浆长期收缩性能影响及机理分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(3): 142-146.
Mei Yingjun, Li Zhiyong, Wang Peiming. Journal of Civil, Architectural

- & Environmental Engineering, 2009, 31(3): 142-146.
- [7] 梅迎军, 王培铭, 李志勇. SBR 乳液改性水泥砂浆断裂性能[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 77-81.
Mei Yingjun, Wang Peiming, Li Zhiyong. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(2): 77-81.
- [8] 梅迎军, 王培铭, 梁乃兴. 丁苯乳液对水泥砂浆吸水率和碳化深度的影响及其机理[J]. 建筑材料学报, 2007(3): 276-281.
Mei Yingjun, Wang Peiming, Liang Naixing. Journal of Building Materials, 2007(3): 276-281.
- [9] Shaker F A, Ei-Dieb A S, Reda M M. Durability of styrene butadiene latex modified concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(5): 711-720.
- [10] 王茹, 王培铭. 不同养护条件下丁苯乳胶改性水泥砂浆的物理性能[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2118-2123.
Wang Ru, Wang Peiming. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2009, 37(12): 2118-2123.
- [11] 李祝龙, 梁乃兴. 掺加丁苯胶乳对水泥砂浆及水泥混凝土刚性与耐磨性的影响[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 16(4): 38-41.
Li Zhulong, Liang Naixing. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 16(4): 38-41.
- [12] Barluenga G, Hemández-Olivares F. SBR latex modified mortar rheology and mechanical behaviour [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(3): 527-535.
- [13] Røzenbaum O, Pellenq R J M, Van Damme H. An experimental and mesoscopic lattice simulation study of styrene-butadiene latex-cement composites properties[J]. Materials and Structures, 2005, 38(4): 467-478.
- [14] Pascal S, Alliche A, Pilvin P. Mechanical behaviour of polymer modified mortars[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 380(1): 1-8.
- [15] Chen P W, Chung D D L. Effect of polymer addition on the thermal stability and thermal expansion of cement[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(3): 465-469.
- [16] 梅迎军, 王培铭, 李志勇. 聚丙烯纤维和丁苯乳胶对水泥砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(5): 260-265.
Mei Yingjun, Wang Peiming, Li Zhiyong. Journal of Building Materials, 2006, 9(5): 260-265.
- [17] 梅迎军, 王培铭, 马一平. 纤维对丁苯乳胶改性水泥砂浆干缩性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 614-618.
Mei Yingjun, Wang Peiming, Ma Yiping. Journal of Building Materials, 2006, 9(3): 614-618.
- [18] Zhong S Y, Chen Z Y. Properties of latex blends and its modified cement mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(10): 1515-1524.
- [19] 钟世云. 共混乳液改性水泥砂浆的氯离子扩散系数 [J]. 建筑材料学报, 2003, 6(3): 316-320.
Zhong Shiyun. Journal of Building Materials, 2003, 6(3): 316-320.
- [20] Colak A. Properties of plain and latex modified Portland cement pastes and concretes with and without superplasticizer[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(8): 1510-1521.
- [21] Ray I, Gupta A P, Biswas M. Physicochemical studies on single and combined effects of latex and superplasticiser on Portland cement mortar [J]. Cement and Concrete Composites, 1996, 18(5): 343-355.
- [22] Ray I, Gupta A P. Effect of latex and superplasticiser on Portland cement mortar in the hardened state[J]. Cement and Concrete Composites, 1995, 17(1): 9-21.
- [23] Rossignolo J A. Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (2): 817-821.
- [24] Sanchez F. Carbon nanofibre/cement composites: Challenges and promises as structural materials[J]. International Journal of Materials and Structural Integrity, 2009, 3(2): 217-226.
- [25] Eslam M, Soliman U F, Kandil M M. The significance of carbon nanotubes on styrene butadiene rubber (SBL) and SBL modified mortar[J]. Materials and Structures, 2012, 45(6): 803-813.
- [26] 王茹, 王培铭. 聚合物改性水泥基材料性能和机理研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(1): 93-96.
Wang Ru, Wang Peiming. Materials Review, 2007, 21(1): 93-96.
- [27] Ohama Y. Polymer modified mortars and concretes[M]/Ramachandran V S. Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology. Park Ridge: Noyes Publications, 1984: 343.
- [28] Konietszko A. Polymerspezifische auswirkungen auf das ragverhalten modifizierter zementgebundenen beton(PCC)[D]. Braunschweig, 1988.
- [29] Ollitrault-Fichet R, Gauthier C, Clamen G, et al. Microstructural aspects in a polymer-modified cement[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(12): 1687-1693.
- [30] Su Z, Sujata K, Bijen J M, et al. The evolution of the microstructure in styrene acrylate polymer-modified cement pastes at the early stage of cement hydration [J]. Advanced Cement Based Materials, 1996, 3(3/4): 87-93.
- [31] 梅迎军, 王培铭, 李志勇. SBR 乳液改性砂浆与水泥基体界面粘结性能[J]. 西安建筑科技大学学报, 2009, 41(3): 404-409.
Mei Yingjun, Wang Peiming, Li Zhiyong. Journal of Xi'an University of Architectural & Technology, 2009, 41(3): 404-409.
- [32] 张金喜, 金珊珊, 张江. 聚合物乳液改性水泥砂浆基本性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(8): 1062-1068.
Zhang Jinxi, Jin Shanshan, Zhang Jiang. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(8): 1062-1068.

(编辑 四恬)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。