

养护温度对丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆物理力学性能的影响

王 茹, 许运东

(同济大学材料科学与工程学院, 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘 要: 采用丁苯乳液改性硫铝酸盐水泥砂浆, 测试其力学性能、干燥收缩以及毛细孔吸水率, 并对比了低温(0、5 °C)、室温(20 °C)和高温(40 °C)养护对丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆性能的影响。结果表明: 不同养护温度下, 丁苯乳液对砂浆性能都有明显改善, 随乳液掺量增加, 抗压、抗折、粘结强度均先减小后增大, 其中抗折强度和粘结强度提高显著, 且压折比降低、韧性提高, 毛细孔吸水率降低。养护温度升高, 抗压、抗折、粘结强度均提高, 但不同龄期不同乳液掺量时温度的影响程度不同。高温养护使对比砂浆在早期产生膨胀, 但是无论何种养护温度均不会使改性砂浆发生膨胀。特定龄期下高温和低温养护都有利于改善砂浆的柔韧性。养护温度对对比砂浆和改性砂浆的收缩率影响不同。丁苯乳液不仅在室温下改善了硫铝酸盐水泥砂浆性能, 而且显著增强了其耐低温和高温性能。

关键词: 低温; 室温; 高温; 丁苯乳液; 硫铝酸盐水泥; 物理力学性能

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2017)02-0227-08

网络出版时间: 网络出版地址:

Influence of Curing Temperature on Physical and Mechanical Properties of Styrene-butadiene Rubber Latex/Sulphoaluminate Cement Mortar

WANG Ru, XU Yundong

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Styrene-butadiene rubber (SBR) latex was used to modify sulphoaluminate cement (CSA) mortar and the mechanical properties, drying shrinkage and water absorption rate were investigated. The effect of curing temperature (*i.e.*, low (0, 5 °C), room (20 °C) and high (40 °C)) temperatures on the properties of the SBR/CSA mortar was also analyzed. The results show that SBR latex improves the properties of the CSA mortar at different curing temperatures. The compressive, flexural and tensile bond strengths of mortar firstly decrease and then increase with the increase of SBR dosage. The flexural strength and tensile bond strength increase, the ratio of compressive strength to flexural strength decreases, the flexibility improves and the water absorption rate decreases in the case of appropriate addition of SBR. The compressive, flexural and tensile bond strengths increase with curing temperature, but the curing temperature has different effects at different ages and SBR dosages. At certain ages, high and low curing temperature both can favor the improvement of the flexibility. The curing temperature has different effects on the shrinkage rate of the control and modified mortar. The control mortar expands in early age under high curing temperature, but the modified mortars don't expand under all curing temperatures. SBR latex can improve the performance of CSA mortar at room temperature and enhances its performance at low and high temperatures.

Keywords: low temperature; room temperature; high temperature; styrene-butadiene rubber latex; sulphoaluminate cement; physical and mechanical properties

收稿日期: 2016-07-03。 修订日期: 2016-09-10。

基金项目: 国家自然科学基金(51572196); 中央高校基本科研业务费专项资金(0500219229); 中德科学中心项目(GZ 1290)资助。

第一作者: 王 茹(1975—), 女, 博士, 教授。

Received date: 2016-07-03. Revised date: 2016-09-10.

First author: WANG Ru (1975-), female, Ph.D., Professor.

E-mail: ruwang@mail.tongji.edu.cn

硫铝酸盐水泥是 20 世纪 70 年代研制的新品种水泥, 自 1974 年投入工业化生产以来, 已有 40 多年的历史^[1]。硫铝酸盐水泥的主要水化产物是钙矾石(AFt)晶体, 约占水化相的 65%, 而该晶体是一种高温不稳定相^[2]。Mehta^[3]曾指出, 在干燥环境中加热时, AFt 在 65 °C 时是稳定的, 但到 93 °C 出现部分分解, 当 AFt 中的结晶水消失后, 转变为无定形物质, 并且其后期强度存在增长不明显甚至倒缩现象。在硫铝酸盐水泥中加入一定比例的石膏可以提高其各龄期的强度, 并可以抑制强度倒缩^[4]。但是, 关于硫铝酸盐水泥温度稳定性仍存在许多争议, 使其大规模工程应用受到限制, 因此相关研究也从未停止。有研究发现早期养护温度相同的情况下, 后期养护温度不会影响硫铝酸盐水泥 28 d 抗压强度^[5]。周华新等^[6]发现低碱硫铝酸盐水泥对温度非常敏感, 温度越高钙矾石晶体越容易成核和生长, 强度发展越快; 相反, 温度越低, 钙矾石晶体越难成核和生长, 强度发展越慢。张彩文等^[7]发现, 早期的养护温度对硫铝酸盐水泥浆体中二次 AFt 的形成有显著影响, 适当提高早期养护温度, 虽然由于水化加快而有可能导致水化产物分布不均匀, 容易产生干缩裂纹, 为二次 AFt 的形成提供非均态成核的位置, 但因水化初期 C-S-H 凝胶吸附的硫酸盐含量低, 在硬化后期二次 AFt 的总生成量反而比早期养护温度低的少, 这样就会减少硫铝酸盐水泥后期的膨胀开裂可能性。

近年来, 随着水泥基材料绿色化、功能化需求的发展, 基于硫铝酸盐水泥的高早期强度和快凝快硬特性, 可以通过聚合物改性开发出许多高附加值的系列材料以达到功能化应用的目的^[8]。聚合物一方面可以改善砂浆或混凝土的工作性能, 使其能够满足不同的施工条件, 扩大应用范围; 另一方面, 不同聚合物可以在不同程度上改变硫铝酸盐水泥体系的水化, 使其具有不同特性, 实现功能化应用的目标^[9]。史淑兰等^[10]研究发现, 在不同养护制度下, 与聚合物硅酸盐水泥砂浆相比, 聚合物硫铝酸盐水泥砂浆的早期粘结强度要高得多, 主要原因是硫铝酸盐水泥水化速度比较快, 聚合物能较快成膜, 与低温相比室温下这种效果更明显。郭向阳等^[11]发现硫铝酸盐水泥砂浆中添加苯丙乳液后其抗渗性得到了改善。王稷良等^[12]对比研究了 4 种聚合物胶粉对硫铝酸盐水

泥凝结时间、工作性、力学性能的影响, 发现聚合物胶粉可以明显改善硫铝酸盐水泥砂浆的工作性能, 提高砂浆的抗折强度, 降低压折比, 提高韧性。李云超等^[13]研究了苯丙乳液硫铝酸盐水泥的防腐抗渗性能和力学性能, 发现随着苯丙乳液掺量的增加, 硫铝酸盐水泥的抗侵蚀系数增大, 其抗硫酸盐侵蚀性能逐渐增强。孟祥谦等^[14]研究了不同掺量的可再分散乳胶粉对硫铝酸盐水泥砂浆力学性能的影响, 发现掺入乳胶粉后, 砂浆力学性能改性效果明显。

值得注意的是, 虽然聚合物改性硫铝酸盐水泥基材料具有很多优良性能, 但目前, 关于温度对聚合物硫铝酸盐水泥砂浆和混凝土性能影响的报道还很有有限。硫铝酸盐水泥基材料具有很好的抗低温性, 而加入聚合物后这种优势是否依然存在? 聚合物硫铝酸盐水泥砂浆的高温性能又如何? 都是有待探讨的问题。据此, 研究了低温(0、5 °C)、室温(20 °C)和高温(40 °C)养护丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的物理力学性能。

1 实验

1.1 原料和配合比

水泥: 52.5 级快硬硫铝酸盐水泥(CSA), 其矿物组成和化学组成分别列于表 1 和表 2。砂: ISO 标准砂。聚合物: ECO7623 丁苯乳液(SBR), 其性能见表 3。CSA 和 SBR 的粒度分析结果如表 4 所示。水为自来水。消泡剂: Foamaster® MO NXZ 矿物油类消泡剂。

表 1 硫铝酸盐水泥矿物组成

Table 1 Mineral composition of sulphoaluminate cement (CSA)

									w/%
C ₄ A ₃ S	C ₂ S	CS	C ₄ AF	C ₁₂ A ₇	CT	CaMg(CO ₃) ₂	MgO	Amorphous	
35.4	26.4	14.3	4.6	3.1	1.0	1.5	1.9	11.7	

w is mass fraction.

实验所用灰砂比为 1:3, 丁苯乳液掺量(以乳液固含量计)为水泥质量的 0、2.5%、5%、7.5%、10%、12.5%、15%、17.5%、20%, 消泡剂按照乳液质量的 2%加入, 流动度均控制在(170±5) mm, 并由此确定水灰比(m_w/m_c , 包括了乳液中的水)随乳液掺量增加依次为 0.500、0.450、0.415、0.390、0.365、0.340、0.318、0.306 和 0.295。

表 2 硫铝酸盐水泥化学组成

Table 2 Chemical composition of sulphoaluminate cement (CSA)

											w/%	
Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Mn ₂ O ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SrO	TiO ₂	LOI
23.84	44.20	15.04	9.82	1.95	0.26	2.46	0.02	0.08	0.11	0.10	0.95	1.17

w is mass fraction.

表 3 丁苯乳液的性能

Table 3 Properties of styrene-butadiene rubber (SBR) latex

Average particle size/ μm	pH value	Lowest film-forming temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Solid content/%	Viscosity/ $(\text{mPa}\cdot\text{s}^{-1})$	Glass transition temperature/ $^{\circ}\text{C}$
0.112	7.0~9.0	15	51 \pm 1	35~150	14

表 4 硫酸盐水泥和丁苯乳液的粒径

Table 4 Particle size of CSA and SBR

Material	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
CSA	1.815	9.038	34.002
SBR	0.076	0.112	0.168

Note: Particle size distribution was measured by Hydro 2 000 Mu, and the dispersion medium is ethanol. D_{10} : Diameter of 10% particles is smaller than D_{10} ; D_{50} : Average particle size; D_{90} : Diameter of 90% particles is smaller than D_{90} .

1.2 方法

按 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》测流动度。按 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》测定抗折、抗压强度。按 DL/T 5126—2001《聚合物改性水泥砂浆试验规程》测定粘结抗拉强度。

按 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》测定干缩率。以试件成型后 12 h 的长度为初始长度, 然后在不同养护温度下进行养护, 分别测定 1、3、7、28 d 试件的长度, 并计算各龄期的干缩率。

按德国标准 DIN 52617 测试毛细孔吸水率。试件养护到 28 d 龄期后, 在 40 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内烘 48 h。取出后只保留上下表面, 周围四面用石蜡密封, 然后将成型面浸入水中 5 mm, 开始测试。初始阶段每隔 6 min 测量 1 次试块质量; 1 h 后, 每隔 10 min 测量 1 次; 2 h 后, 每隔 15 min 测量 1 次; 4 h 后, 分别测量 24 h 和 48 h 的试块质量。最后, 根据所测得的质量计算试块的单位面积吸水量。

2 结果与讨论

2.1 抗折强度

图 1 为不同龄期不同养护温度下丁苯乳液/硫酸盐水泥砂浆的抗折强度和乳液掺量的关系。由图 1 可见: 在所有龄期和所有养护温度下, 当乳液掺量为 2.5% 时, 砂浆的抗折强度均出现下降, 而后抗折强度随乳液掺量增加呈现快速上升, 并在乳液掺量为 20% 时达到最高, 此时已远大于对比砂浆(乳液掺量为 0% 的对比砂浆)的抗折强度; 不同龄期不

同养护温度下, 乳液掺量对抗折强度的影响程度不同。总体来说, 在较短龄期, 比如 12 h 和 1 d, 乳液掺量大于 10% 时才会对砂浆的抗折强度有改善; 而在较长龄期, 比如 7 d 和 28 d, 更少的乳液掺量就可以提高抗折强度了。温度越高, 乳液对抗折强度的改善效果越大, 不同龄期下 40 $^{\circ}\text{C}$ 时乳液掺量为 20% 的改性砂浆的抗折强度相比于同龄期对比砂浆均提高近 1 倍。

不同龄期下养护温度对对比砂浆抗折强度的影响不同, 较短龄期(12 h 和 1 d)对比砂浆的抗折强度随养护温度的升高而提高, 而 3 d 以后养护温度对对比砂浆抗折强度不再有显著影响。但是, 不同龄期下改性砂浆的抗折强度随养护温度升高呈现上升趋势; 乳液掺量越大, 养护温度对抗折强度的影响越显著。这是由于, 提高温度会提高水泥的水化速率, 特别是早期, 当水化达到一定程度后, 变化就小了, 因此早期温度对强度影响显著, 较长龄期温度的影响不明显。另外, 聚合物成膜对温度敏感, 低温环境会影响聚合物膜的形成和完整性, 当温度低于乳液的最低成膜温度时, 聚合物没有相互凝结, 形成聚合物膜的碎片; 即使水泥颗粒和水化产物的存在会降低聚合物的成膜温度^[15], 低温下的成膜性能依然不如高温下的好。改性砂浆中形成的聚合物膜又是影响抗折强度的重要因素, 所以聚合物掺量越大温度对砂浆抗折强度的影响越显著。

不同龄期不同温度下在适当掺量时丁苯乳液均可以提高砂浆的抗折强度。说明丁苯乳液的加入能显著改善硫酸盐水泥砂浆的抗折性能。这是由于砂浆的抗折强度对缺陷比较敏感, 而乳液的加入具有减水效果, 减少了用水量, 从而降低了硬化砂浆内部的有害孔洞; 随着掺量增加乳液会逐渐形成连续的聚合物膜, 也有利于砂浆内部缺陷的改善, 且聚合物膜与水泥水化产物形成相互交织的网状结构, 又能起到“微纤维”的作用^[16], 从而提高砂浆的抗折强度。高温更有利于聚合物成膜, 因此较高养护温度下丁苯乳液对抗折强度的改善更显著。

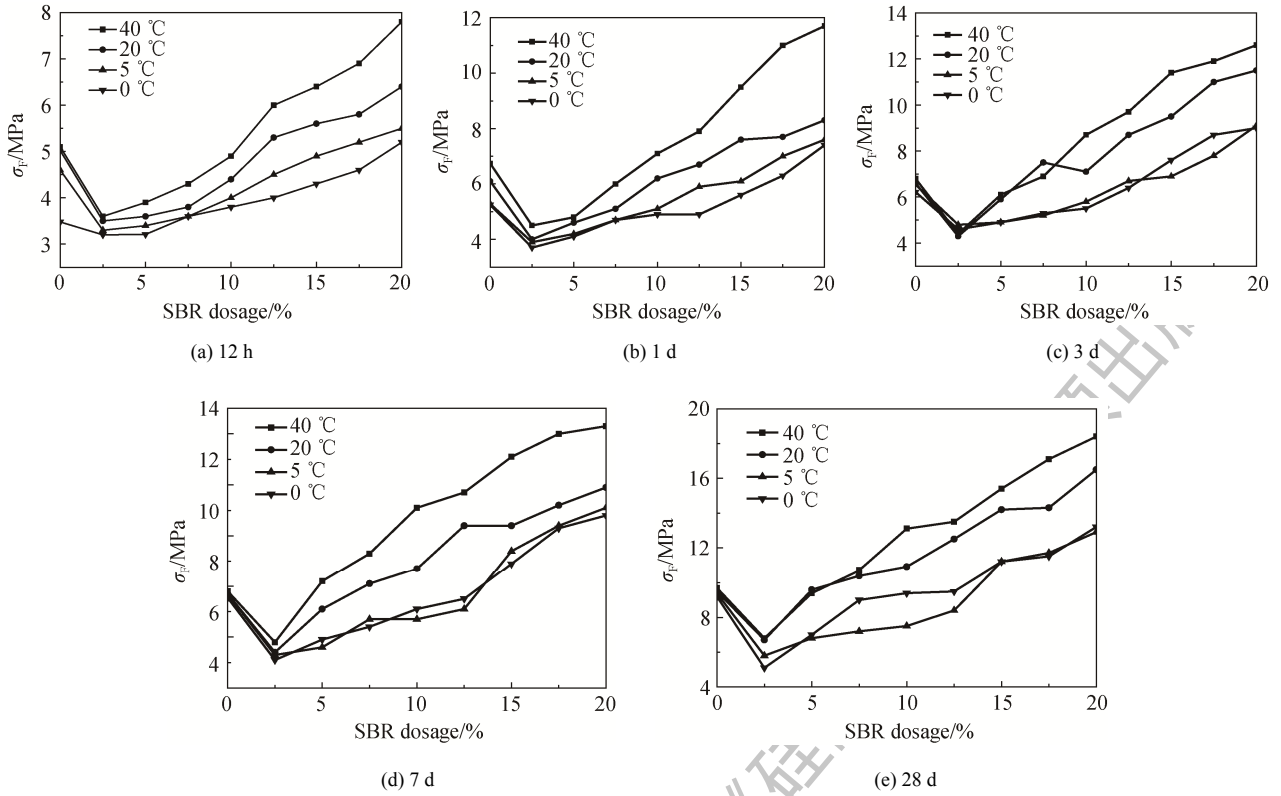


图1 不同龄期不同养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的抗折强度
 Fig. 1 Flexural strength σ_f of SBR/CSA mortar at different curing temperatures and ages

2.2 抗压强度

图2为不同龄期4种养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的抗压强度。从图2可见，无论龄期和养护温度如何，砂浆的抗压强度均随乳液掺量的增加先减小后增大。随着乳液掺量增加，单位体积内的水泥用量减少，水灰比降低。这两种材料组成上的变化对于强度的影响是相反的。而由于聚合物自身是柔韧性较好的材料，对砂浆抗压强度有一定的负面影响。当乳液掺量不大时水灰比的影响还不显著，因而表现为抗压强度下降。当乳液掺量增加使水灰比降低到一定程度起主要作用后，砂浆的抗压强度开始提高。当乳液掺量达到20%时抗压强度基本持平或略高于对比砂浆。水灰比对砂浆抗压强度有显著影响。然而由于乳液自身对抗压强度的负面影响，尽管乳液的加入改善了砂浆的工作性使水灰比减小，仍然不足以使砂浆的抗压强度提高。可见，丁苯乳液在显著提高硫铝酸盐水泥砂浆抗折强度的同时却对抗压强度提高没有贡献。

养护温度显著影响丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆抗压强度的发展，但不同龄期下影响不同。在较早龄期(12 h 和 1 d)养护温度对抗压强度影响显著，抗压强度随温度升高而明显提高。到3 d 和 7 d 龄

期时，高温养护下的抗压强度只略微高于室温养护，而低温养护砂浆的抗压强度仍然明显低于室温养护砂浆。到28 d 龄期时，抗压强度随着温度的升高而逐渐提高，但是各温度下抗压强度值之间的差异已经不像早龄期那么显著了。这主要是由于，早期提高温度会提高水泥的水化速率，但当水化达到一定程度后，水化速率变化变小。因此早期温度对抗压强度影响显著，较长龄期温度的影响则不明显。低温时抗压强度较低，主要是由于此时水泥水化很慢。

跟室温相比，高温养护仅对早期强度发展有利，在早龄期乳液掺量高(12 h, 20%掺量)时这种效果更明显。低温养护对强度发展的抑制作用在7 d 前明显，但是丁苯乳液的掺入能够在一定程度上对抗低温造成的负面影响，如在1 d 和 3 d 龄期时。

2.3 压折比

图3为不同龄期4种养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆压折比与乳液掺量的关系。由图3可见，在12 h 和 1 d 龄期下，乳液的掺入使压折比减小，温度对压折比的影响显著；12 h 时，低温养护使压折比降低，而高温养护使压折比增大；1 d 时，低温和高温养护都使压折比降低，低温作用更显著。

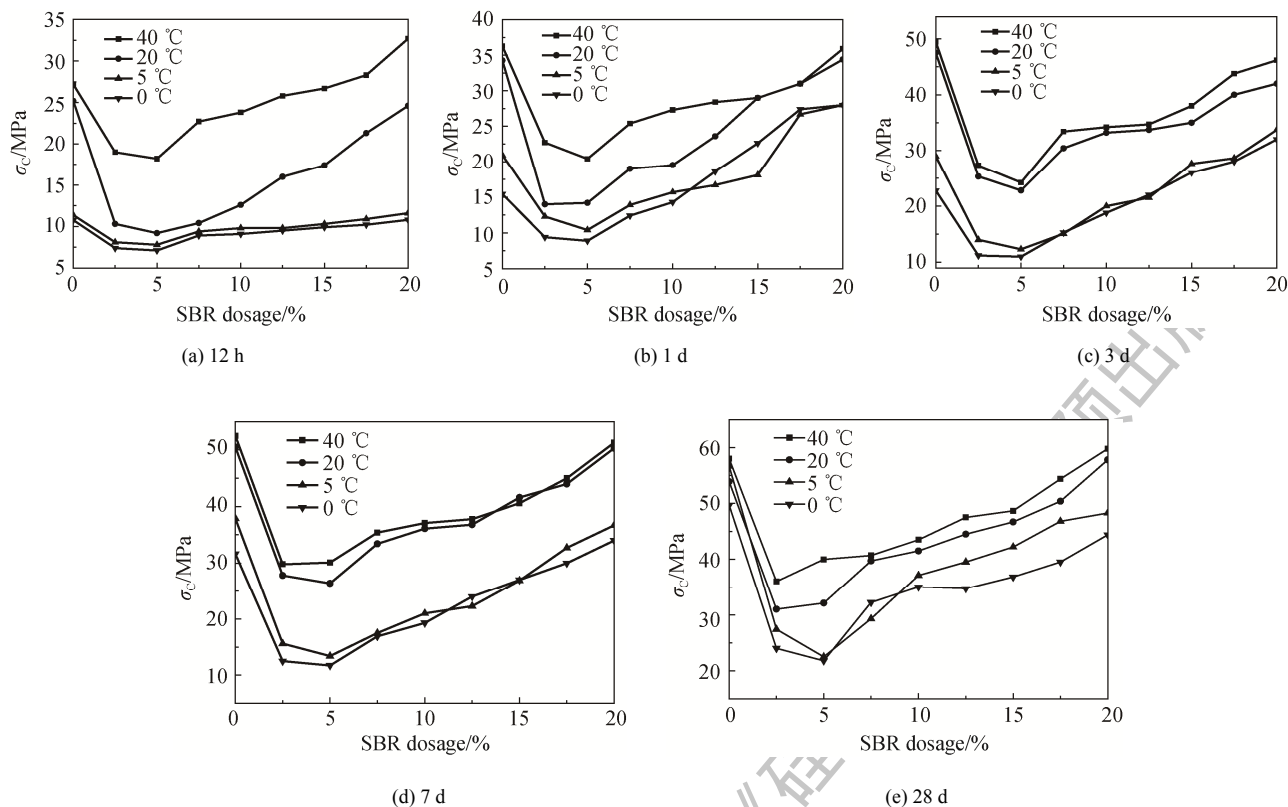


图 2 不同龄期不同养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的抗压强度
Fig. 2 Compressive strength σ_c of SBR/CSA mortar at different curing temperatures and ages

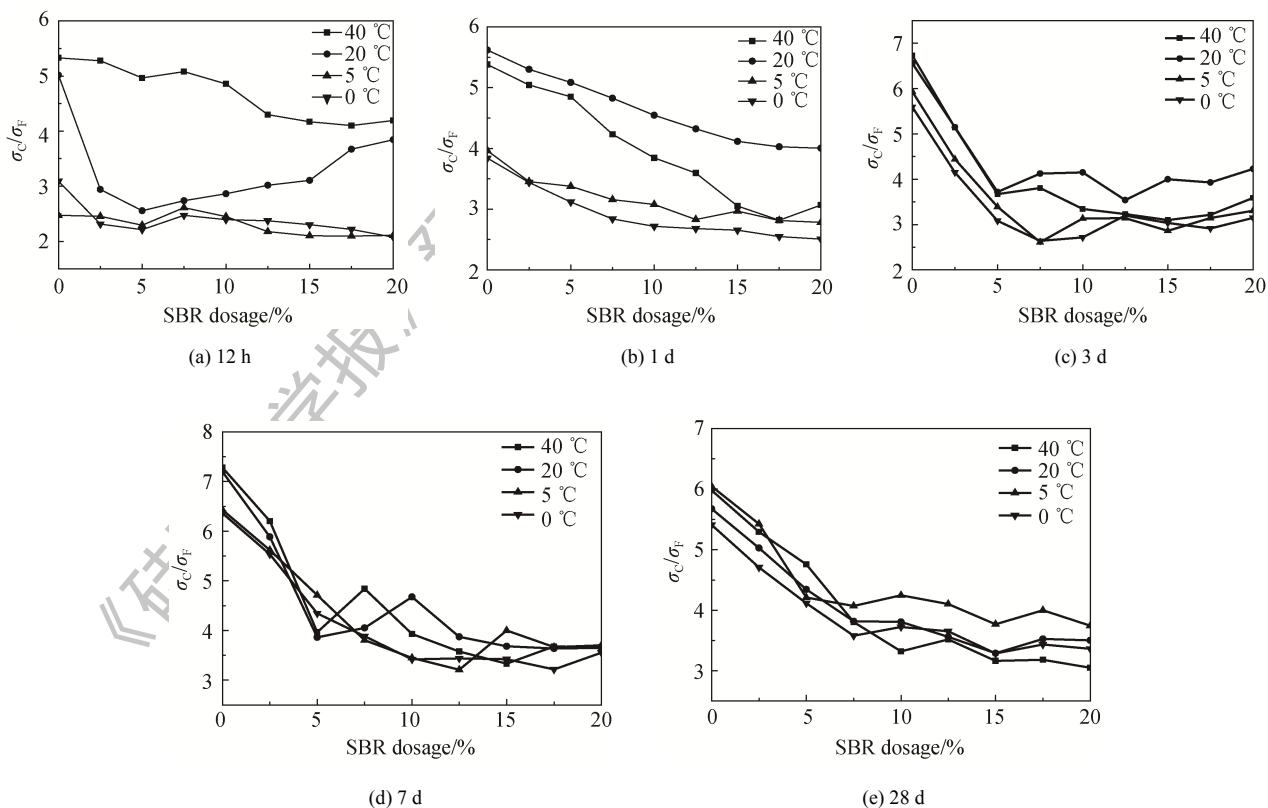


图 3 不同龄期不同养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的压折比
Fig. 3 Ratio of compressive strength to flexural strength (σ_c/σ_f) of SBR/CSA mortar at different curing temperatures and ages

3 d 后, 压折比随乳液掺量的变化趋势有所改变: 乳液掺量较低时, 压折比随乳液掺量的增加快速降低; 3 d 龄期砂浆压折比在乳液掺量大于 5% 后变化不再明显, 7 d 和 28 d 龄期砂浆压折比在乳液掺量分别大于 5% 和 7.5% 后下降速率变缓。此时, 温度的影响不再显著。

可见, 温度只对丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆早期压折比产生显著影响。不同温度不同龄期下, 丁苯乳液的加入均能明显降低硫铝酸盐水泥砂浆的压折比, 改善其柔韧性。

2.4 拉伸粘结强度

不同龄期 4 种养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的拉伸粘结强度和乳液掺量的关系如图 4 所示。从图 4 可见, 养护温度升高使砂浆的拉伸粘结强度提高, 龄期越短这种影响越显著。随龄期延长, 水化达到一定程度后, 不同养护温度下的拉伸粘结强度之间的差距缩小。

随着乳液掺量增加, 砂浆的拉伸粘结强度呈现先减小后增大的规律。尤其是在 0 °C 时, 这种趋势很明显, 不同龄期下拉伸粘结强度均在乳液掺量为 7.5% 时出现极小值, 而后随乳液掺量增加逐渐提高。其它养护温度下, 拉伸粘结强度极小值出现在乳液掺量为 2.5%~7.5% 范围内, 这个范围内拉伸粘结强度变化不显著; 而当乳液掺量大于 10% 以后, 拉伸粘结强度逐渐上升。高温养护特别有利于提高较高乳液掺量改性砂浆的早期拉伸粘结强度。

所有养护龄期和养护温度下, 10% 以上丁苯乳液的掺入都可以提高硫铝酸盐水泥砂浆的拉伸粘结强度。乳液掺量越高, 拉伸粘结强度越大。当乳液掺量为 20% 时, 不同龄期不同养护温度下砂浆的拉伸粘结强度可以达到同龄期对比砂浆的 1.5 倍甚至 2 倍以上。这是由于聚合物分子具有较强的扩散能力, 能有效渗入到基体毛细孔中, 在聚合物脱水成膜后能在基体与改性砂浆之间形成较好的“桥接”作用, 从而提高两者之间的粘结性能^[17]。

2.5 收缩率

不同龄期 4 种养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的收缩率与乳液掺量的关系如图 5 所示。由图 5 可见, 砂浆的干缩率随乳液掺量的增加逐渐增大。养护温度对对比砂浆收缩率影响很大。与室温养护相比, 0 °C 养护显著降低所有龄期对比砂浆的收缩率。5 °C 养护明显降低 1 d 和 3 d 龄期的收缩率, 但对长龄期收缩率无影响。40 °C 养护使对比砂浆在早期产生膨胀, 到 28 d 膨胀消失。而加入丁苯乳

液后, 养护温度的影响发生了变化。无论何种养护温度都不会使改性砂浆发生膨胀。0 °C 养护可降低早期龄期改性砂浆的收缩率, 到 28 d 时优势不再存在。5 °C 养护增大所有龄期改性砂浆的收缩率。40 °C 养护, 对改性砂浆收缩率无明显影响。

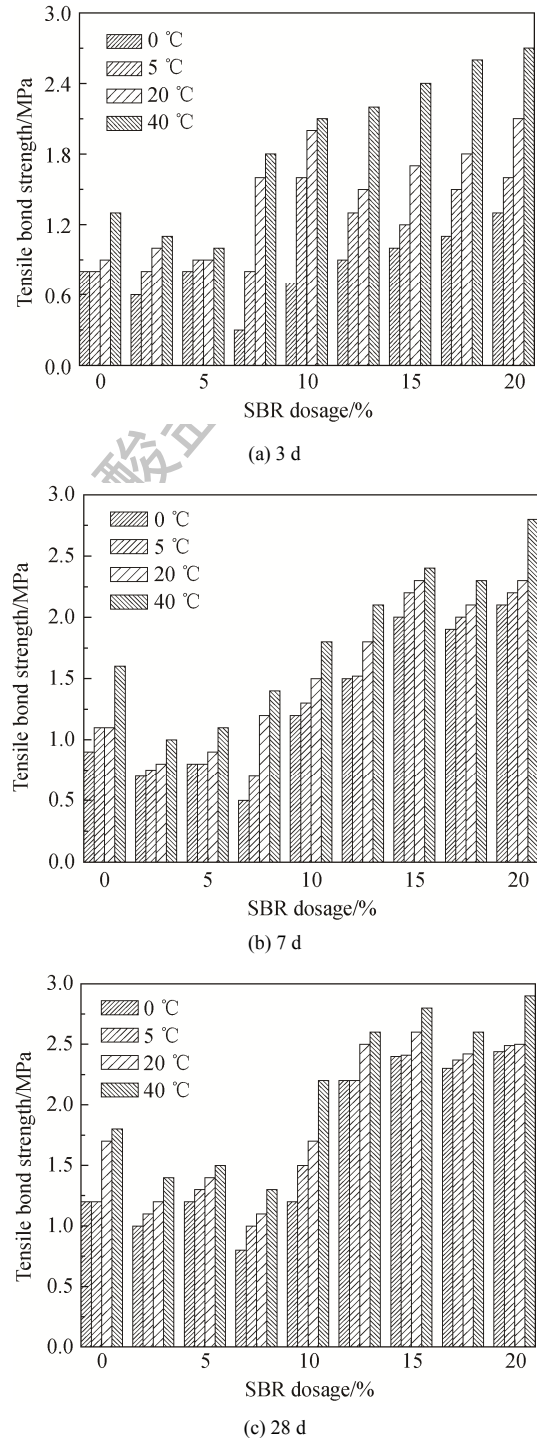


图 4 不同龄期不同养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的粘结强度

Fig. 4 Tensile bond strength of SBR/CSA mortar at different curing temperatures and ages

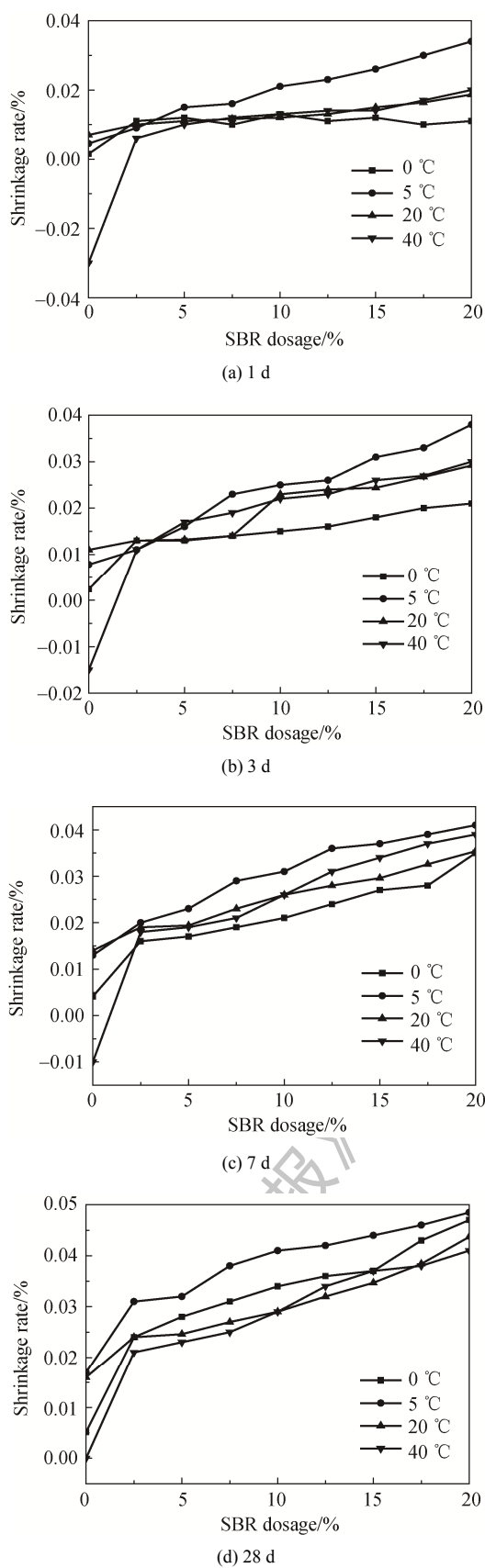


图 5 不同龄期不同养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的收缩率

Fig. 5 Shrinkage rate of SBR/CSA mortar at different curing temperatures and ages

2.6 毛细孔吸水率

图 6 为不同龄期 4 种养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的毛细孔吸水率。由图 6 可见，不同

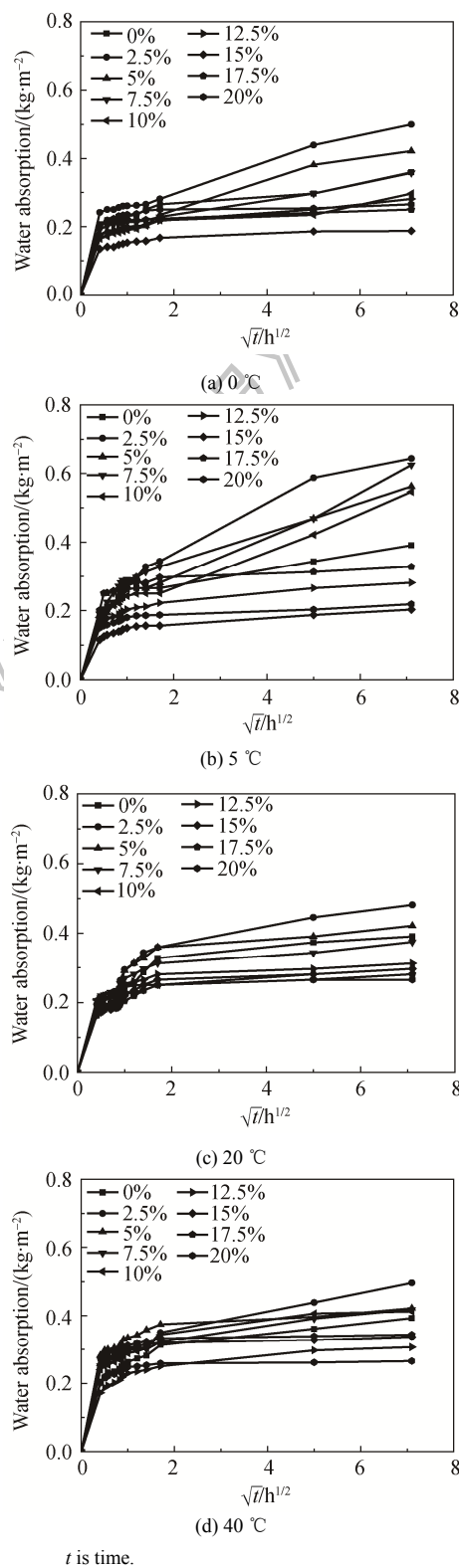


图 6 不同养护温度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的毛细孔吸水率

Fig. 6 Water absorption rate of SBR/CSA mortar at different curing temperatures

温度下, 2.5%丁苯乳液的掺入均使砂浆的毛细孔吸水率明显增大, 而后随乳液掺量的增加, 毛细孔吸水率逐渐减小。0 °C和 20 °C时, 当乳液掺量大于10%后, 改性砂浆的毛细孔吸水率已经明显小于对比砂浆。5 °C和 40 °C时, 当乳液掺量大于12.5%后, 改性砂浆的毛细孔吸水率才明显小于对比砂浆。硫铝酸盐水泥砂浆的毛细孔吸水率不高, 但适量丁苯乳液的加入可以进一步使其降低。这可能是由于较多乳液的加入使砂浆中形成的孔大多成为封闭孔, 从而阻碍了水的迁移^[18]。

与室温相比, 0 °C养护对毛细孔吸水率的影响不明显; 5 °C养护却使吸水率较大的砂浆的吸水率变得更大, 使吸水率较小砂浆的吸水率变得更小; 高温养护对吸水率的影响不显著。5 °C养护对收缩率和吸水率的影响原因还有待探究。

3 结论

1) 不同养护温度和龄期下, 丁苯乳液的加入都不会提高硫铝酸盐水泥砂浆的抗压强度, 但适量乳液的加入可以显著提高抗折强度和拉伸粘接强度, 降低压折比, 改善其柔韧性, 降低毛细孔吸水率。

2) 养护温度对丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的性能影响显著。养护温度升高使抗折强度提高, 乳液掺量越大这种作用越显著。养护温度升高使拉伸粘接强度提高, 龄期越短作用越显著。养护温度只对早龄期压折比产生显著影响, 一定龄期下高温或低温养护都有利于砂浆柔韧性的改善。养护温度对毛细孔吸水率无显著影响, 但对对比砂浆和改性砂浆的收缩率影响不同。

3) 丁苯乳液不仅在室温下对硫铝酸盐水泥砂浆的性能有改善, 而且显著增强了其耐低温和高温性能。

参考文献:

- [1] 李德栋. 硫铝酸盐水泥若干问题的探讨[J]. 水泥技术, 2001(4): 69–70.
LI Dedong. Cem Technol (in Chinese), 2001(4): 69–70.
- [2] HARTMAN M R, BRADY S K, BERLINER R, et al. The evolution of structural changes in ettringite during thermal decomposition[J]. J Solid State Chem, 2006, 179(4): 1259–1272.
- [3] MEHTA P K. Mechanism of expansion associated with ettringite formation[J]. Cem Concr Res, 1973, 3(1): 1–6.
- [4] 付兴华, 侯文萍, 杨春霞, 等. 改善硫铝酸盐水泥性能的研究[J]. 水泥技术, 2001(2): 10–15.
FU Xinghua, HOU Wenping, YANG Chunxia, et al. Cem Technol (in Chinese), 2001(2): 10–15.
- [5] LAN W, GLASSER F P. Hydration of calcium sulphoaluminate cements[J]. Adv Cem Res, 1996, 8(31): 127–134.
- [6] 周华新, 刘加平, 刘建忠. 低碱硫铝酸盐水泥水化硬化过程的温度敏感性及其对策[J]. 混凝土, 2011(12): 9–11.
ZHOU Huaxin, LIU Jiaping, LIU Jianzhong. Concretes (in Chinese), 2011(12): 9–11.
- [7] 张彩文, 杨克锐, 纪振辉, 等. 养护温度对阿利特硫铝酸盐水泥硬化浆体中二次钙矾石形成的影响[C]//中国硅酸盐学会第八届水泥化学会议, 2001: 125–135.
ZHANG Caiwen, YANG Kerui, JI Zhenhui, et al. Influence of curing temperature on secondary AFt formation of alitesulphoaluminate cement mortar[C]//The Eighth Cement Chemistry Conference of the Chinese Ceramic Society, 2001: 125–135.
- [8] PERA J, AMBROISE J. New applications of calcium sulfoaluminate cement[J]. Cem Concr Res, 2004, 34: 671–676.
- [9] 张金营, 张圣军. 我国硫铝酸盐水泥的生产市场现状与发展前景分析[J]. 水泥, 2011(6): 15–16.
ZHANG Jinying, ZHANG Shengjun. Cement (in Chinese), 2011(6): 15–16.
- [10] 史淑兰, 张量, 路永华, 等. 不同养护制度下聚合物改性砂浆与EPS板的粘结强度[J]. 新型建筑材料, 2006(5): 1–5.
SHI Shulan, ZHANG Liang, LU Yonghua. New Build Mater (in Chinese), 2006(5): 1–5.
- [11] 郭向阳, 李云超, 芦令超, 等. 苯丙乳液改性硫铝酸盐水泥的抗渗性能[C]//中国硅酸盐水泥分会学术年会, 2009: 278–281.
GUO Xiangyang, LI Yunchao. Impermeability of styrene-acrylate emulsion modified sulphoaluminate cement[C]//Academic Annual Conference of China Silicate Cement Branch, 2009: 278–281.
- [12] 王稷良, 周天笑, 廖华涛, 等. 聚合物胶粉对硫铝酸盐水泥砂浆性能的影响研究[J]. 混凝土, 2014(7): 114–117.
WANG Jiliang, ZHOU Tianxiao, LIAO Huatao, et al. Concrete (in Chinese), 2014(7): 114–117.
- [13] 李云超, 芦令超, 王守德. 聚合物改性硫铝酸盐水泥防腐抗渗性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2008, 27(5): 1014–1017.
LI Yunchao, LU Lingchao, WANG Shoude. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2008, 27(5): 1014–1017.
- [14] 孟祥谦, 叶正茂, 程新. 硫铝酸盐水泥基修补砂浆的力学性能[J]. 济南大学学报, 2010, 24(1): 1–4.
MENG Xiangqian, YE Zhengmao, CHENG Xin. J Univ Jinan (in Chinese), 2010, 24(1): 1–4.
- [15] BEELDENS A, VAN GEMERT D, SCHORN H. Form microstructure: an integrated model of structure formation in polymer-modified concrete[J]. Mater Struct, 38(2005): 601–607.
- [16] 钟世云, 袁华. 聚合物在水泥混凝土中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 118–126.
- [17] 买淑芳. 混凝土聚合物复合材料及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1996: 146–155.
- [18] 张国防, 王培铭, 吴建国. 聚合物干粉对水泥砂浆体积密度和吸水率的影响[J]. 新型建筑材料, 2004(2): 29–31.
ZHANG Guofang, WANG Peiming. New Build Mater (in Chinese), 2004(2): 29–31.