

闫东星. 硬化水泥砂浆热膨胀系数影响因素[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(3): 45-49. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.007

Yan D X. Study on Influence Parameters of Thermal Expansion Coefficient of Hardened Mortar [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35(3): 45-49. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.007

# 硬化水泥砂浆热膨胀系数影响因素

闫东星\*

(内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** 热膨胀性能是影响水泥基材料温度变形和开裂的重要指标. 通过对硬化砂浆不同龄期热膨胀系数的测定, 研究了水胶比、胶集比、矿物掺合料种类、粉煤灰掺量和细集料种类对砂浆热膨胀系数的影响规律. 结果表明, 硬化砂浆的热膨胀系数随水胶比和胶集比的增加而增大, 其本质区别是用水量和水泥用量增加导致的水泥石热膨胀系数变化. 矿粉能够增加砂浆的热膨胀系数, 而粉煤灰则起抑制作用, 热膨胀系数随着粉煤灰掺量的增加而降低. 在对砂浆热膨胀系数的降低效果方面, 大理岩砂 > 玄武岩砂 > 砂岩砂 > 天然砂.

**关键词:** 砂浆; 热膨胀系数; 水胶比; 胶集比; 掺合料

**中图分类号:** TU528.01      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2020)03-0045-05

## Study on Influence Parameters of Thermal Expansion Coefficient of Hardened Mortar

Yan Dongxing

(Inner Mongolia traffic design research institute limited liability company, Hohhot 010010, China)

**Abstract:** Thermal expansion is a key parameter on anti-thermal deformation and cracking within cementitious materials. The influences of cement binder ratio, binder aggregate ratio, mineral admixture type, fly ash content and fine aggregate type on thermal expansion coefficient of hardened mortar were studied. The results showed that the thermal expansion coefficient increased with cement binder ratio increasing and binder aggregate ratio increasing. The slag promote the thermal expansion increasing, while the fly ash show inhibitory effect. The thermal expansion coefficient decrease with fly ash content increasing. Different fine aggregate show different decreasing effect on thermal expansion coefficient. The mortar compose marble fine aggregate show larger thermal expansion coefficient than basalt, sandstone and river aggregate.

**Keywords:** mortar; thermal expansion coefficient; water binder ratio; binder aggregate ratio; admixture

混凝土作为一种重要的建筑材料广泛地应用于各类建设工程, 而混凝土裂缝也成为影响结构安全和耐久性的重要因素之一. 温度变形是影响混凝土开裂的重要原因之一, 特别是在大体积混凝土结构中, 由于水泥水化热较高、混凝土导热系数较低、混凝土内外形成温度梯度等原因, 更容易导致温度裂缝的出现.

热膨胀系数是表征混凝土热膨胀变形的重要参数, 也是影响混凝土温度开裂的重要因素, 准确评定热膨胀系数是解决混凝土开裂问题的重要手段<sup>[1-3]</sup>. 水工混凝土中, 由于水泥水化导致的温升一般为

10~50 ℃,水泥掺量较高的普通混凝土内温升则可达到30~70 ℃<sup>[4]</sup>.结构设计中将热膨胀系数作为固定值并不准确,产生的误差影响混凝土施工过程中变形缝的准确设置.水泥石和水泥砂浆热膨胀系数,对于准确评价混凝土热膨胀系数及其发展规律具有重要的作用.但与水泥石和混凝土相比,目前对水泥砂浆热膨胀系数的相关研究较少<sup>[5-7]</sup>,且在其影响因素、准确数值的确定等方面仍然存在一些差异.如Sarkis等人的研究表明,水泥砂浆的热膨胀系数范围是 $(13 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6}) / \text{℃}$ <sup>[8]</sup>,Ahmed等人测定的结果是 $(15 \times 10^{-6} \sim 87 \times 10^{-6}) / \text{℃}$ <sup>[9]</sup>,而江晨晖等人的测试结果为 $(13 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6}) / \text{℃}$ <sup>[6,10]</sup>.

总体来说,目前关于水泥砂浆热膨胀系数的研究还存在一定的争议,进一步深入研究养生龄期、矿物掺合料、水胶比、胶集比、细集料种类等因素对砂浆热膨胀系数的影响规律,以及砂浆与水泥石热膨胀系数的内在关系,能够为准确评价混凝土热膨胀系数的影响因素和发展规律、抑制混凝土温度开裂提供数据支撑.

## 1 试验概况

### 1.1 试验原料

水泥采用P·O42.5水泥,表观密度2.989 g/cm<sup>3</sup>,比表面积350 m<sup>2</sup>/kg.粉煤灰为II级粉煤灰,需水量比96.8%,比表面积410 m<sup>2</sup>/kg.矿粉为S95级矿粉,比表面积446 m<sup>2</sup>/kg,表观密度2.910 g/cm<sup>3</sup>.减水剂采用聚羧酸高效减水剂,固含量22.3%,减水率25%.细集料采用天然河砂、砂岩机制砂、大理岩机制砂、玄武岩机制砂,表观密度分别为2.672, 2.741, 2.688, 2.876 g/cm<sup>3</sup>.胶凝材料的化学成分见表1所示.

表1 胶结材料的化学成分

材料名称	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Loss
水泥	21.50	3.10	61.30	7.80	0.12	0.68	0.41	1.80	1.50
粉煤灰	58.20	10.52	3.10	23.30	1.49	0.70	1.28	1.32	1.48
矿粉	33.56	0.90	37.40	14.13	8.92	—	—	2.15	0.76

### 1.2 试验方法

试件制作养生方法:试验环境参照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671-1999)的相关要求.根据设计配合比成型并制作砂浆试件,试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,每组3条试件.于初凝之前埋设两对测头用于试件的长度测试,取3条试件的平均值为测试结果.试件脱模后即刻测定基准长度,随后按照规范的要求进行标准养生.

试件长度测试方法:采用手持式应变仪测试试件的长度变化,精度0.001 mm,测试基准长度250 mm,即测头初始埋距250 mm.在养生的3,7,14,28 d,将试件从标准养护室中取出后立即水平浸没于带有恒温功能的加热水箱中.保持水面高出试件上表面约10 mm,水温及环境温度均为20 ℃.约3 h后,将试件取出,快速测定初始长度并记录初始水温.测试完毕后,立刻将试件重新浸没于水中,并以恒定速率将水温加热至60 ℃,并保温约3 h,随后再次将试件取出,快速测定试件长度并记录相应的水温.

保温时间的确定:对于水泥基材料,试件长度随温度的变化存在“滞后效应”,即试件宏观的长度变化和体积变化要滞后于环境的温度变化.研究表明,对于截面尺寸为100 mm×100 mm的混凝土试件,在60 ℃水中保温3 h后,试件内部温度可达到环境温度<sup>[7-8]</sup>.

### 1.3 试验方案

本研究重点测试水胶比、胶集比、矿物掺合料种类、粉煤灰掺量、砂的类型对硬化砂浆热膨胀系数的影响规律,砂浆配合比的设计均围绕此目标开展,如表2所示.考虑到集料的掺量和热膨胀系数、水泥掺量对水泥基材料的热膨胀性能具有较大的影响,因此,所有配合比中均固定砂的体积分数为27%.M1~M3组对比水胶比因素,固定胶砂比为0.5,粉煤灰掺量为30%;M4~M6组对比胶砂比因素,固定水胶比为0.4,粉煤灰掺量为30%;M7~M9组对比矿物掺合料因素,M9~M13组对比粉煤灰掺量因素,M14~M17对比砂类型因素,固定胶砂比为0.5和水胶比为0.4.各组均采用减水剂将砂浆流动度调节至相近水平.

表 2 试验配合比

编号	水胶比/%	胶砂比/%	每立方米原材料用量/(kg/m <sup>3</sup> )					备注
			水泥	粉煤灰	矿粉	砂	水	
M1	0.35	0.50	253.0	108	—	721	126	天然砂、FA = 30%
M2	0.40	0.50	253.0	108	—	721	144	天然砂、FA = 30%
M3	0.45	0.50	253.0	108	—	721	162	天然砂、FA = 30%
M4	0.40	0.55	278.0	119	—	721	144	天然砂、FA = 30%
M5	0.40	0.50	253.0	108	—	721	144	天然砂、FA = 30%
M6	0.40	0.45	227.0	97	—	721	144	天然砂、FA = 30%
M7	0.40	0.50	253.0	108	—	721	144	天然砂、FA = 30%
M8	0.40	0.50	253.0	—	108	721	144	天然砂、Slag = 30%
M9	0.40	0.50	361.0	—	—	721	149	天然砂、FA = 0
M10	0.40	0.50	307.0	54	—	721	146	天然砂、FA = 15%
M11	0.40	0.50	253.0	108	—	721	144	天然砂、FA = 30%
M12	0.40	0.50	199.0	162	—	721	140	天然砂、FA = 45%
M13	0.40	0.50	145.0	216	—	721	137	天然砂、FA = 60%
M14	0.40	0.50	253.0	108	—	721	144	天然砂
M15	0.40	0.50	259.0	111	—	740	144	砂岩机制砂
M16	0.40	0.50	254.0	109	—	726	144	大理岩机制砂
M17	0.40	0.50	271.5	117	—	777	144	玄武岩机制砂

注:M2,M5,M7,M11,M14 这 5 组配合比相同,试验时采用同一组试件,表中重复列出仅用于说明

## 2 试验结果与分析

### 2.1 水胶比对硬化砂浆热膨胀系数的影响

图 1 为不同水胶比下,硬化砂浆热膨胀系数随龄期的发展规律.由图 1 可知:在试验研究设定的水胶比范围内,各龄期硬化砂浆的热膨胀系数最小值为  $9.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,最大值为  $11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .总体规律上,硬化砂浆在各龄期的热膨胀系数均随水胶比的增加而增大,相差幅度为  $(0.5 \times 10^{-6} \sim 0.7 \times 10^{-6})/^{\circ}\text{C}$ .以 28 d 为例,水胶比每增加 0.05,硬化砂浆的热膨胀系数则相应增加  $(0.2 \times 10^{-6} \sim 0.3 \times 10^{-6})/^{\circ}\text{C}$ .

本研究为了孤立分析水胶比对热膨胀系数的影响规律,固定了胶砂比、胶凝材料用量.因此,水胶比增加的本质是,胶凝材料用量固定下的用水量增加(参见表 2).研究表明<sup>[11-12]</sup>,砂浆内部孔隙率随着水胶比的增加而增加.随着温度的升高,水泥石与孔隙结构中的水分同时膨胀.考虑到水的热膨胀系数  $(210 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$  远高于水泥石  $((11 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6})/^{\circ}\text{C})$ ,此时,砂浆孔隙内的水受热膨胀占据主导地位,凝胶水的热膨胀变形已经远超过孔隙的承受能力,宏观表现为热膨胀系数随水胶比的增加而增大.

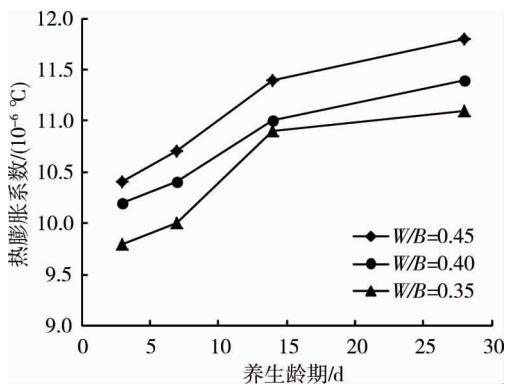


图 1 水胶比对热膨胀系数的影响规律

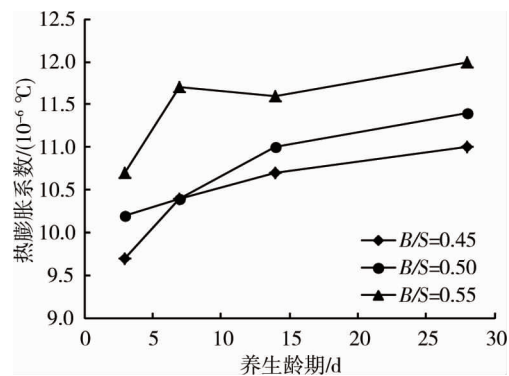


图 2 胶集比对热膨胀系数的影响规律

### 2.2 胶集比对硬化砂浆热膨胀系数的影响

图 2 为不同胶集比下,硬化砂浆热膨胀系数随龄期的发展规律.由图 2 可知:总体规律上,硬化砂浆在

各龄期的热膨胀系数均随胶集比的增加而增大.在热膨胀系数的增长幅度方面,以 28 d 为例,胶集比每增加 0.05,硬化砂浆的热膨胀系数则相应增大( $0.3 \times 10^{-6} \sim 0.6 \times 10^{-6}$ )/ $^{\circ}\text{C}$ .研究中为了突出胶集比的影响,固定了细骨料的体积分数、水胶比、用水量、粉煤灰掺量.此时,不同胶集比试件中,细骨料对水泥石热膨胀变形的限制作用基本相同.随着胶集比的增加,砂浆中水泥用量增加(参见表 2),单位体积砂浆中水泥石数量相对增加.水泥石具有高于天然砂的热膨胀系数,从而导致硬化砂浆热膨胀系数随胶集比的增加而增大.

### 2.3 矿物掺合料对硬化砂浆热膨胀系数的影响

图 3 为采用不同掺合料时,硬化砂浆热膨胀系数随龄期的发展规律.由图 3 可知:掺入粉煤灰和矿渣粉后,硬化砂浆热膨胀系数随龄期的发展规律相似.热膨胀系数的数值及发展规律方面,矿渣粉砂浆>普通砂浆>粉煤灰砂浆.在相同龄期,矿渣粉砂浆的热膨胀系数比普通砂浆高出( $0.7 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-6}$ )/ $^{\circ}\text{C}$ ,粉煤灰砂浆的热膨胀系数比普通砂浆降低( $0.8 \times 10^{-6} \sim 0.9 \times 10^{-6}$ )/ $^{\circ}\text{C}$ .

作为同样具有胶凝特性的矿物掺合料,矿渣粉的活性显著高于粉煤灰,掺入水泥基材料后,早龄期的水化程度比粉煤灰高,此时,强度、弹性模量的发展和密实度的增加占据主导地位.此外,矿渣粉的粒径小于粉煤灰,未水化部分微粉颗粒对孔隙的填充作用更加显著,砂浆内部密实度更高.通常来说,水泥基材料结构越致密,强度越高,热膨胀系数也越大.粉煤灰活性低于矿渣粉,但同样能够消耗掉一定数量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的热膨胀系数高于 CSH 凝胶.同时,粉煤灰中含有大量具备高弹性模量、高强度特性的沉珠颗粒,在水化反应相对较慢的条件下,未水化的部分颗粒对于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和 CSH 凝胶的膨胀起到限制作用.综上所述,掺入矿渣粉则对砂浆热膨胀系数的降低不利,掺入粉煤灰有利于降低砂浆的热膨胀系数,与现有研究成果是一致的<sup>[13, 15]</sup>.

### 2.4 粉煤灰掺量对硬化砂浆热膨胀系数的影响

图 4 为不同粉煤灰掺量下,硬化砂浆热膨胀系数随龄期的发展规律.由图 4 可知:粉煤灰对砂浆的热膨胀系数具有较为显著的降低作用,热膨胀系数随着粉煤灰掺量的增加而降低.在掺加 15% 粉煤灰的情况下,热膨胀系数降低( $0.4 \times 10^{-6} \sim 0.7 \times 10^{-6}$ )/ $^{\circ}\text{C}$ .随后,随着粉煤灰掺量的增加,热膨胀系数降低幅度减小.当粉煤灰掺量达到 60% 的情况下,热膨胀系数比未掺加粉煤灰的砂浆降低( $1.1 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-6}$ )/ $^{\circ}\text{C}$ .

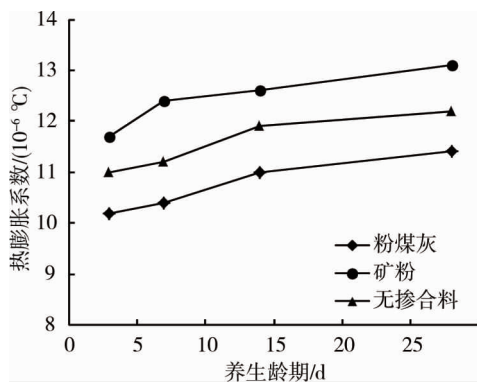


图 3 掺合料种类对热膨胀系数的影响规律

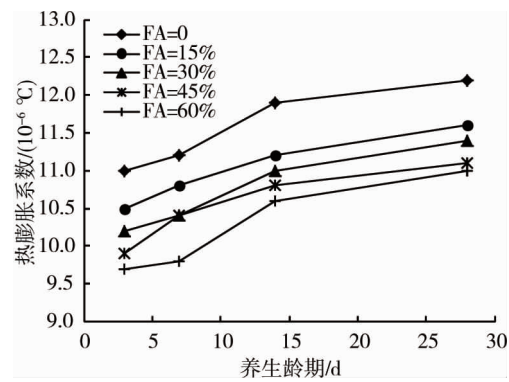


图 4 粉煤灰掺量对热膨胀系数的影响规律

如前所述,粉煤灰能将水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  转变为热膨胀系数更小的 CSH 凝胶<sup>[4, 14]</sup>.另一方面,粉煤灰掺入后,浆体孔隙率增加,水泥石密实性、强度等下降,从而导致水泥石本身的热膨胀能力降低.随着粉煤灰掺量的增加,上述两方面因素作用更加强烈,最终表现为砂浆热膨胀系数的降低.

### 2.5 砂的类型对硬化砂浆热膨胀系数的影响

图 5 为采用不同类型细骨料条件下,硬化砂浆热膨胀系数随龄期的发展规律.从图 5 可知:在对砂浆热膨胀系数的降低效果方面,大理岩砂>玄武岩砂>砂岩砂>天然砂.与采用天然砂配制的砂浆热膨胀系数相比,采用砂岩砂、玄武岩砂和大理岩砂配制的砂浆,热膨胀系数降低幅度分别为( $0.9 \times 10^{-6} \sim 1.7 \times 10^{-6}$ )/ $^{\circ}\text{C}$ ,( $3.4 \times 10^{-6} \sim 3.8 \times 10^{-6}$ )/ $^{\circ}\text{C}$ 和( $3.9 \times 10^{-6} \sim 4.2 \times 10^{-6}$ )/ $^{\circ}\text{C}$ .

本研究固定了水胶比、胶砂比、砂的体积分数和单位用水量,测定的热膨胀系数能够更加准确衡量砂

类型对硬化砂浆热膨胀系数的影响程度.在复合材料体系中,水泥砂浆可视为水泥石与细集料组成的2项夹杂体,水泥石和细集料本身的热膨胀系数对于砂浆的热膨胀系数具有重要的影响作用.在水泥石热膨胀性能相同的情况下,砂浆的热膨胀系数取决于细集料的热膨胀系数,即与细集料本身的矿物组成密切相关,与现有文献结论一致<sup>[15]</sup>.本文选用的4种细骨料的热膨胀系数数值方面,天然砂>砂岩砂>玄武岩砂>大理岩砂,这也直接影响了硬化砂浆热膨胀系数的大小.

### 3 结论

1) 硬化砂浆的热膨胀系数随水胶比和胶集比的增加而增大,以28 d为例,水胶比和胶集比每增加0.05,硬化砂浆的28 d热膨胀系数分别增大 $(0.2 \times 10^{-6} \sim 0.3 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$ , $(0.3 \times 10^{-6} \sim 0.6 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$ .

2) 矿渣粉能够增大硬化砂浆的热膨胀系数,粉煤灰则与之相反,且热膨胀系数随着粉煤灰掺量的增加而降低.在相同龄期,矿渣粉砂浆的热膨胀系数比普通砂浆高 $(0.7 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$ ,粉煤灰砂浆的热膨胀系数比普通砂浆低 $(0.8 \times 10^{-6} \sim 0.9 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$ .

3) 在对砂浆热膨胀系数的降低效果方面,大理岩砂>玄武岩砂>砂岩砂>天然砂.与采用天然砂配制的砂浆热膨胀系数相比,采用砂岩砂、玄武岩砂和大理岩砂配制的砂浆,热膨胀系数降低幅度分别为 $(0.9 \times 10^{-6} \sim 1.7 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$ , $(3.4 \times 10^{-6} \sim 3.8 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$ 和 $(3.9 \times 10^{-6} \sim 4.2 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$ .

### 参考文献:

- [1] 危鼎. 水泥基材料早龄期热膨胀系数试验研究与理论分析[D]. 南京:河海大学,2007.
- [2] 黄杰, 帅映勇, 孙舒. 水泥基材料早期热膨胀系数试验结果的分析[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2016, 16(2): 10-13.
- [3] Turery P, Loukili A, Barcelo L, et al. Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age? [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9): 1143-1450.
- [4] 高桂波. 可降低大体积混凝土水化热温升的相变材料的制备与应用研究[D]. 南京:东南大学,2010.
- [5] 沈德建, 申嘉鑫, 黄杰. 早龄期及硬化阶段水泥基材料热膨胀系数研究[J]. 水利学报, 2012, 43(s1): 153-160.
- [6] 江晨晖, 杨杨, 李鹏, 等. 水泥砂浆的早龄期热膨胀系数的时变特征[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(5): 605-611.
- [7] Li Y, Li J. Capillary tension theory for prediction of early autogenous shrinkage of self-consolidating concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53(3): 511-516.
- [8] Sarkis M, Granju J, Arnaud M, et al. Coefficient of thermal dilation of a fresh mortar[J]. Materials and Structures, 2002, 35(251): 415-420.
- [9] Ahmed L, David C, Abdelhafid K, et al. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history[J]. Cement and Concrete Research, 2000(30): 915-922.
- [10] 江晨辉. 高性能混凝土早龄期体积变化与力学性能实验研究及评价[D]. 杭州:浙江工业大学, 2016.
- [11] 崔激, 冀天竹, 吴甲一. 热膨胀系数对早期混凝土生态影响试验及数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 355-362.
- [12] 姚武, 郑欣. 配合比参数对混凝土热膨胀系数的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 77-82.
- [13] Maruyama I, Teramoto A. 热膨胀系数对早龄期水泥浆体体积变化的影响[J]. 贾福杰, 武旭南, 李长成, 译. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2013(2): 22-30.
- [14] 李清海, 姚燕, 孙蓓. 粉煤灰对水泥基材料热膨胀性能影响的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(8): 17-20.
- [15] 王康, 张玉平, 章杰, 等. 大温差环境下混凝土抗热疲劳性能研究[J]. 建材世界, 2018, 39(1): 18-21.

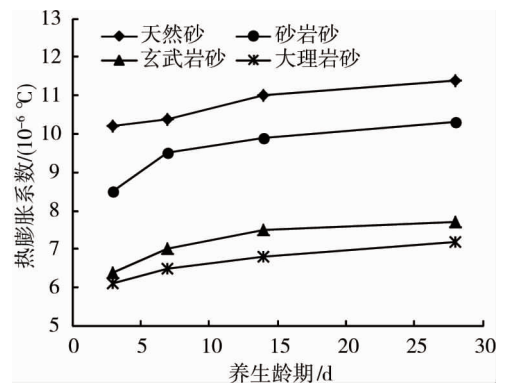


图5 砂的类型对热膨胀系数的影响规律