

文章编号:1007-9629(2022)09-0885-08

基于 X-CT 的蒸养大掺量矿物掺合料砂浆孔结构

郭玉柱¹, 陈徐东^{1,*}, 宁英杰², 陈育志³

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310051; 3. 金陵科技学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要:采用 80 °C 下恒温 12 h 的蒸养制度对砂浆进行了蒸养, 蒸养结束后采用自然养护、水养和标养 3 种方式进行后续养护, 同时设置了全程标养砂浆作为对照组. 研究了不同养护制度下砂浆的早期强度发展规律, 并基于 X 射线计算机断层扫描(X-CT)技术对砂浆的孔结构特征进行了分析. 结果表明: 80 °C 下恒温 12 h 蒸养使砂浆孔隙率增大, 最终导致蒸养砂浆 28 d 抗压强度低于全程标养砂浆; 蒸养砂浆抗压强度随孔隙率增大而快速降低, 两者之间呈现良好的线性关系; 蒸养后水养和标养可以有效降低蒸养砂浆的孔隙率, 使其 28 d 抗压强度高于蒸养后自然养护的砂浆; 砂浆孔隙的孔体积与球形度存在明显的负相关关系, 且蒸养会使孔体积-球形度分布规律中的异常值增多.

关键词:蒸养; X 射线计算机断层扫描; 活动轮廓模型; 孔结构; 球形度

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.001

Pore Structure of Steam Cured High Volume Mineral Admixture Mortar Based on X-CT Technology

GUO Yuzhu¹, CHEN Xudong^{1,*}, NING Yingjie², CHEN Yuzhi³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, China; 3. Architecture Engineering Institute, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: The mortar was steam cured using a constant temperature of 80 °C for 12 h steam curing system. After the completion of steam curing, three types of subsequent curing were used: natural curing, water curing and standard curing, while the whole standard cured mortar was set as a comparison group. The early strength development patterns of mortars under different curing regimes were studied, and the pore structure characteristics of mortar were analyzed based on X-ray computed tomography (X-CT) technique. The results show that steam curing at a constant temperature of 80 °C for 12 h increases the porosity of the mortar, which eventually leads to a lower 28 d compressive strength of the steam cured mortar than that of the whole standard cured mortar. The compressive strength of the steam cured mortar decreases rapidly with the increase of porosity, and a good linear relationship is shown between them. The water curing and standard curing after steam curing can effectively reduce the porosity of the steam cured mortar and make its 28 d compressive strength higher than that of the mortar naturally cured after steam curing. In addition, there is an obviously negative correlation between the pore volume and sphericity of mortar pores, and the steam curing system will increase the outliers in this distribution law of pore volume-sphericity.

Key words: steam curing; X-ray computed tomography; active contour model; pore structure; sphericity

收稿日期: 2021-07-26; 修订日期: 2021-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979090); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200202076)

第一作者: 郭玉柱(1991—), 男, 山西临汾人, 河海大学博士生. E-mail: guoyuzhu5185@163.com

通讯作者: 陈徐东(1985—), 男, 江苏南通人, 河海大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: cxdong1985@163.com

蒸汽养护(蒸养)是混凝土预制构件工业化生产中一种常用的养护方式^[1].高温、高湿度的蒸养环境不仅可以加速胶凝材料水化反应和微观结构的形成,使蒸养混凝土预制构件具有较高的早期强度^[2],而且可以有效提高混凝土预制构件的生产率.但是,过快的水化反应速率会使胶凝材料在局部形成致密的壳状水化产物,造成水化产物的不均匀分布^[3-4].Lothenbach等^[5]的研究也表明,水化产物的不均匀分布和钙矾石含量的减少增加了蒸养混凝土中的毛细气孔数量.因此,由蒸养过程造成的热损伤会导致混凝土孔结构的劣化^[6],甚至影响工程结构的耐久性^[7].

矿物掺合料的火山灰效应可以改善混凝土孔结构,从而降低蒸养过程中造成的热损伤^[8-10].粉煤灰-矿渣粉复掺体系不仅能有效降低胶凝材料水化热,改善混凝土的微观结构,而且可以保证混凝土构件在蒸养后达到足够的强度^[11-12].此外,后续养护中保证足够的湿度也可以改善蒸养阶段对混凝土微观结构造成的不利影响^[13].为了提高预制混凝土构件蒸养质量,保证工程结构的耐久性,研究高温蒸养以及后续养护方式对蒸养大掺量矿物掺合料砂浆孔结构的影响具有重要的工程意义.

然而,目前关于高温蒸养及后续养护方式对大掺量矿物掺合料砂浆孔结构影响的相关研究较少.X射线计算机断层扫描(X-CT)是一种具有较高分辨率的无损检测技术,能清晰直观地检测砂浆内部细观孔隙分布和孔隙形态^[14],可用于蒸养砂浆孔结构的分析.本研究以80℃下恒温蒸养12 h的大掺量矿物掺合料砂浆作为研究对象,后续养护制度采用自然养护、标准养护(标养)和水养3种方式,同时设置全程标养砂浆作为对照组.基于X-CT技术对各养护制度下的砂浆孔结构特征进行了分析,并将孔隙参数与砂浆的宏观力学性能建立了联系,研究结果可以为改善蒸养混凝土的性能提供有益参考.

1 试验

1.1 原材料及配合比

C50是预制构件混凝土最常见的强度等级之一,掺加矿物掺合料可以降低混凝土成本且对其耐久性有利,因此大掺量矿物掺合料混凝土用于生产混凝土预制构件具有极大优势.高温蒸养会使水泥砂浆孔结构劣化,这是其不利影响的主要表现形式之一.而X-CT的高精度扫描需要样品体积足够小,为了避免粗骨料的存在对小体积样品均匀性的影响,本试验设计了C50强度等级的大掺量矿物掺合料砂浆,

对其进行蒸养和孔结构研究.

水泥采用海螺牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥,矿物掺合料为S95粒化高炉矿渣粉,粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰,砂子采用细度模数为2.6的河砂,水为实验室自来水,减水剂采用聚羧酸高效减水剂.砂浆配合比为 $m(\text{水泥}):m(\text{矿渣粉}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{砂子}):m(\text{水}):m(\text{减水剂})=250.0:150.0:100.0:1\,350.0:160.0:3.5$.胶凝材料的化学组成见表1.砂子的粒径级配如图1所示.

表1 胶凝材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of cementitious materials

Material	$w/\%$						
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SO ₃
Cement	54.65	2.58	22.07	4.32	1.03	6.30	2.59
Slag	45.09	6.99	27.33	0.45	0.13	13.66	4.03
Fly ash	8.18	0.30	41.11	6.28	1.15	38.62	0.42

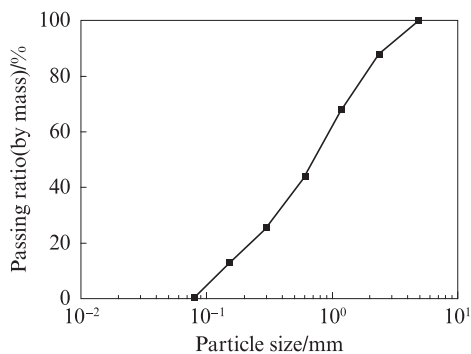


图1 砂子的粒径级配

Fig. 1 Grading curve of sand particle size

1.2 蒸养制度

参照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》拌制砂浆,将搅拌均匀后的砂浆装入尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的钢模中振捣成型.对于成型后的砂浆,其中1组放入标养箱内进行标养(编号为SD),另外3组放入蒸养箱内进行蒸养.蒸养制度的制定主要考虑2个因素:一方面考虑实际生产过程中为了加快模具的循环利用,应尽量在24 h之内结束整个蒸养过程;另一方面考虑预制构件后续预应力的张拉要求,在蒸养结束后强度应尽量达到设计强度的70%左右,这样可以实现在拆模后2~3 d内进行预应力张拉工序.最后,通过预试验确定了基本满足上述需求的蒸养制度,即:20℃下静置3 h、升温2 h、80℃下恒温12 h和降温2 h共4个阶段,如图2所示.蒸养结束的砂浆在1 h内拆模,然后分成3组分别进行自然养护(编号为ST-NA)、标养(编号为ST-SD)和水养(编号为ST-WA).

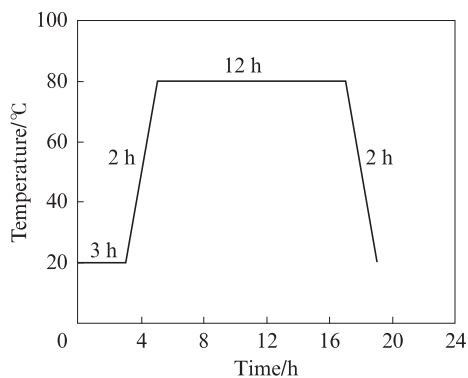


图2 蒸养制度

Fig. 2 Steam curing system

1.3 抗压强度测试

参照 GB/T 17671—2021 标准,采用万测微机控制电子万能试验机对各养护制度下砂浆 1、3、7、14、28 d 龄期的抗压强度进行测试。

1.4 X-CT 测试

X-CT 扫描采用德国 Vtomexs 微焦点 X-CT 系统,设置电压为 120 kV,电流为 150 μ A,功率为 18 W。砂浆养护 28 d 后取样进行 X-CT 扫描,样品采用边长 20 mm 的立方体,获得的 2D 图像分辨率为

38.8 μ m/体素,像素数量为 1 024 $\times$ 1 024。

由于射束硬化,CT 图像会出现中间黑、边缘亮的伪影,此时若直接通过一个固定的灰度阈值分割来提取孔隙,将使 CT 图像上较亮区域的部分孔隙被漏掉或者较暗区域的孔隙被过度放大。为了更好地对孔隙进行提取分割,采用活动轮廓模型(active contour model)对图像进行预处理。该方法是通过在目标周围区域构造 1 条可变形的初始活动轮廓曲线,并建立相应的能量泛函方程,曲线在自身变形能和轮廓外部势能的共同作用下,通过最小化能量泛函,使轮廓曲线收敛到目标图像的边缘,找出最佳可能的边界轮廓曲线^[15]。初始活动轮廓曲线控制点上的能量函数 E_{tot} 定义为^[16]:

$$E_{\text{tot}} = \int_0^1 [E_{\text{int}}(v(s)) + E_{\text{ext}}(v(s))] ds \quad (1)$$

式中: E_{int} 为内部能量,控制着活动轮廓曲线的弹性变形; E_{ext} 为外部势能,外部势能吸引活动轮廓曲线到图像上的目标特征区域; s 为归一化弧长; $v(s) = (x(s), y(s))$,为活动轮廓曲线控制点的二维坐标。

实际计算过程中,常采用能量函数的离散方程来计算 E_{tot} ^[17]:

$$E_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n [\alpha(v_i) |v_i - v_{i-1}|^2 + \beta(v_i) |v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}|^2 + E_{\text{ext}}(v_i)] \quad (2)$$

式中: v_i 为活动轮廓曲线上第 i 个离散的控制点; $v_i - v_{i-1}$ 为活动轮廓曲线控制点的 1 阶导数; $v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}$ 为活动轮廓曲线控制点的 2 阶导数; n 为控制点数; α 为弹力系数; β 为强度系数。

利用欧拉方程求解能量函数的最小值:

$$\alpha v''(s) - \beta v^{(4)}(s) - \nabla E_{\text{ext}} = 0 \quad (3)$$

式中: $v''(s)$ 、 $v^{(4)}(s)$ 分别为控制点在图像空间中的 2 阶

微分和 4 阶微分。

此时,图像分割问题转化为变分问题,在灰度数字图像离散条件下,通过构造线性方程组,采用 Matlab 软件进行迭代计算求解。通过活动轮廓模型分割出孔隙后,对孔隙结构进行了三维重构,并对孔隙结构特征进行了统计分析。上述 CT 图像处理流程如图 3 所示。

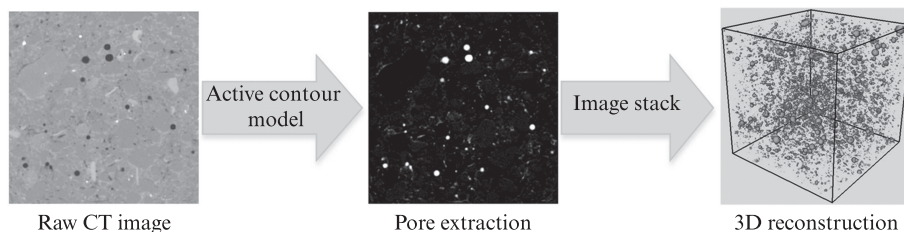


图3 CT 图像处理流程

Fig. 3 CT image processing flow

2 结果与讨论

2.1 孔隙率与抗压强度

为了分析不同养护制度对大掺量矿物掺合料砂浆孔隙率的影响,沿着竖直方向(z 轴)由表及里对 4 种养护制度下砂浆的二维孔隙率进行了分析,结果

如图 4 所示。由图 4 可见,蒸养制度对砂浆不同深度范围的二维孔隙率产生了较明显的影响。从 ST-NA、ST-WA 和 ST-SD 这 3 种砂浆二维孔隙率的变化趋势可知,高温蒸养导致砂浆表层的孔隙率明显变大,二维孔隙率沿着砂浆 z 轴由表及里逐渐减小,直至 14 mm 深度时基本趋于一致,表明蒸养使其表层孔

结构粗化,这与文献[18]的结论一致.而全程标养砂浆SD的二维孔隙率较为均衡,孔隙率也最小.计算二维孔隙率的平均值可以得出砂浆的三维孔隙率,ST-NA、ST-WA、ST-SD和SD砂浆的三维孔隙率分别为2.41%、2.03%、2.09%、1.63%.对比蒸养后自然养护、标养和水养的砂浆孔隙率发现,合理的后续养护制度对粗化后的孔结构有明显改善作用.以全程标养砂浆的平均孔隙率为基础,蒸养后自然养护的砂浆孔隙率增大了0.78%,而通过后续标养和水养,砂浆孔隙率的增长值降低至0.40%、0.46%.这是由于后续标养和水养为胶凝材料的水化反应提供了必要的湿度和水分,充分的水化反应生成了大量水化产物,使砂浆的孔隙率明显降低.

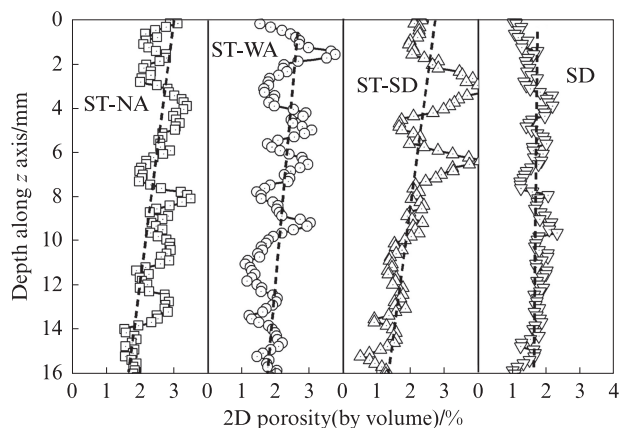


图4 沿竖直方向的二维孔隙率

Fig. 4 2D porosity along vertical direction

4种养护制度下,砂浆不同龄期抗压强度测试结果如图5所示.由图5可见:80℃下恒温12h蒸养使砂浆的1d抗压强度增长到35.5 MPa,达到了全程标养SD砂浆28d抗压强度的67.1%;而全程标养SD砂浆1d抗压强度仅仅达到了其28d抗压强度的30.5%.这是由于高温蒸养使水泥水化反应速率加剧,生成了堆积密度更加致密的C-S-H凝胶^[19];

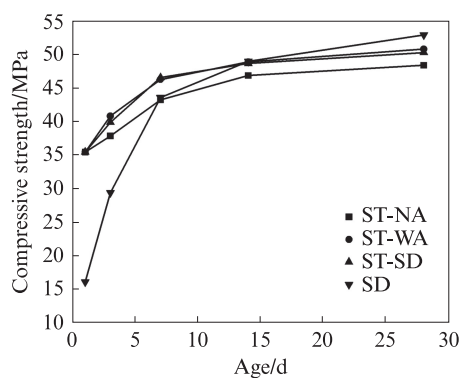


图5 砂浆不同龄期抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of mortar at different ages

同时,高温蒸养促进了矿渣粉和粉煤灰的火山灰效应,短时间内生成了更多的C-S-H凝胶^[11,20].这种双重促进作用使砂浆在蒸养后获得了较高的抗压强度.而全程标养条件下,水化反应速率相对较慢,矿物掺合料的活性也相对较低,此时水化反应易生成絮状或颗粒状的C-S-H凝胶,其聚合度低于蒸养条件下生成的蜂窝状或网状C-S-H凝胶^[21-22],导致全程标养砂浆的早期强度明显低于蒸养砂浆.对比ST-NA、ST-WA和ST-SD砂浆的强度增长规律还可以发现,蒸养后的不同养护制度对砂浆后续强度的增长有明显影响.ST-NA砂浆在后续自然养护过程中,由于缺少胶凝材料水化反应所需要的湿度条件,导致后续水化反应不充分,其28d抗压强度最低.ST-WA和ST-SD砂浆的后续养护制度保证了充分的湿度,更好地促进了胶凝材料的水化,两者后续强度增长明显优于ST-NA砂浆.然而,蒸养后不同后续养护制度下砂浆28d抗压强度均小于全程标养砂浆28d抗压强度.这是由于高温蒸养砂浆的孔隙率较大,密实度低于全程标养砂浆.

为了验证砂浆孔隙率与抗压强度的相关性,在每个扫描的砂浆样品中提取4个部位的代表体积分素(REV),计算其孔隙率,并与对应砂浆28d抗压强度进行相关性分析,如图6所示.由图6可见,随着孔隙率的增大,蒸养砂浆的28d抗压强度线性降低,文献[23]也得到了相同的结论.

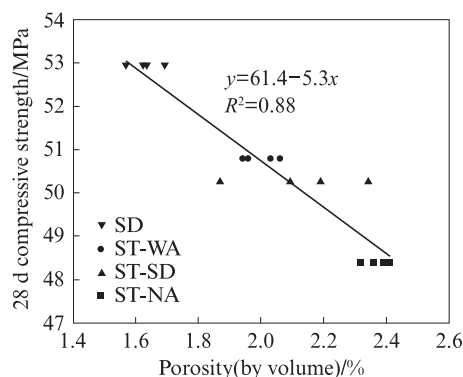


图6 砂浆28d抗压强度与孔隙率的关系

Fig. 6 Relationship between 28 d compressive strength and porosity of mortar

2.2 孔径分布

采用X-CT技术分析了不同养护制度下砂浆的孔径分布特征,结果如图7所示.由图7可见:与蒸养后自然养护相比,蒸养后水养或标养均可有效减少蒸养砂浆中的微米级孔隙;与蒸养后标养相比,蒸养后水养对孔隙直径为100~250 μm的孔隙作用更明

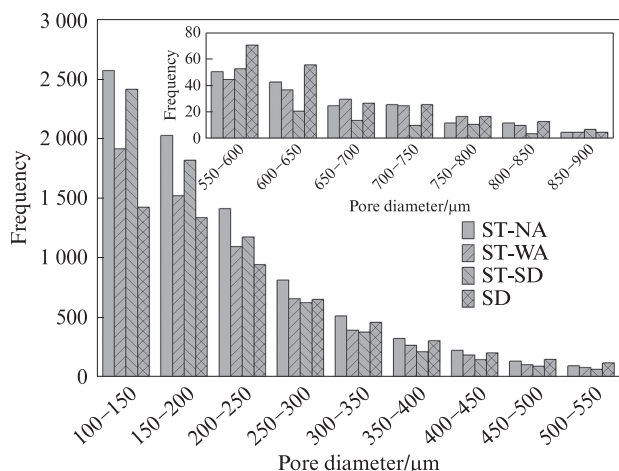


图7 基于X-CT的孔径分布图

Fig. 7 Pore diameter distribution diagram based on X-CT

显,而当孔隙直径大于250 μm时,蒸养后标养的作用更明显;对比蒸养砂浆与全程标养砂浆的孔径分布

可以发现,蒸养有利于消除500 μm以上的大孔。

2.3 孔体积分布特征

为了从三维视角分析不同养护制度下砂浆的孔隙特征,对砂浆孔体积分布特征进行了分析,结果如图8所示。根据图8的孔体积-数量拟合结果,4种砂浆的孔体积-数量关系在对数坐标下均符合单指数分布。当孔体积小于0.01 mm³时,随着孔体积的减小,孔数量呈指数形式增加。图8同时还统计了不同体积孔隙的累计总体积。由图8可以看出:虽然统计范围内孔体积处于10⁻⁴~10⁻² mm³的孔隙数量随着孔体积的减小呈指数增加,但是该范围内孔隙的累计孔体积却基本维持平稳,处在0.02~0.20 mm³之间;当孔体积大于0.10 mm³时,单个孔隙的体积占据了绝对优势(单孔体积远大于孔体积小于0.01 mm³的孔隙),累计孔体积在对数坐标下呈指数增加。

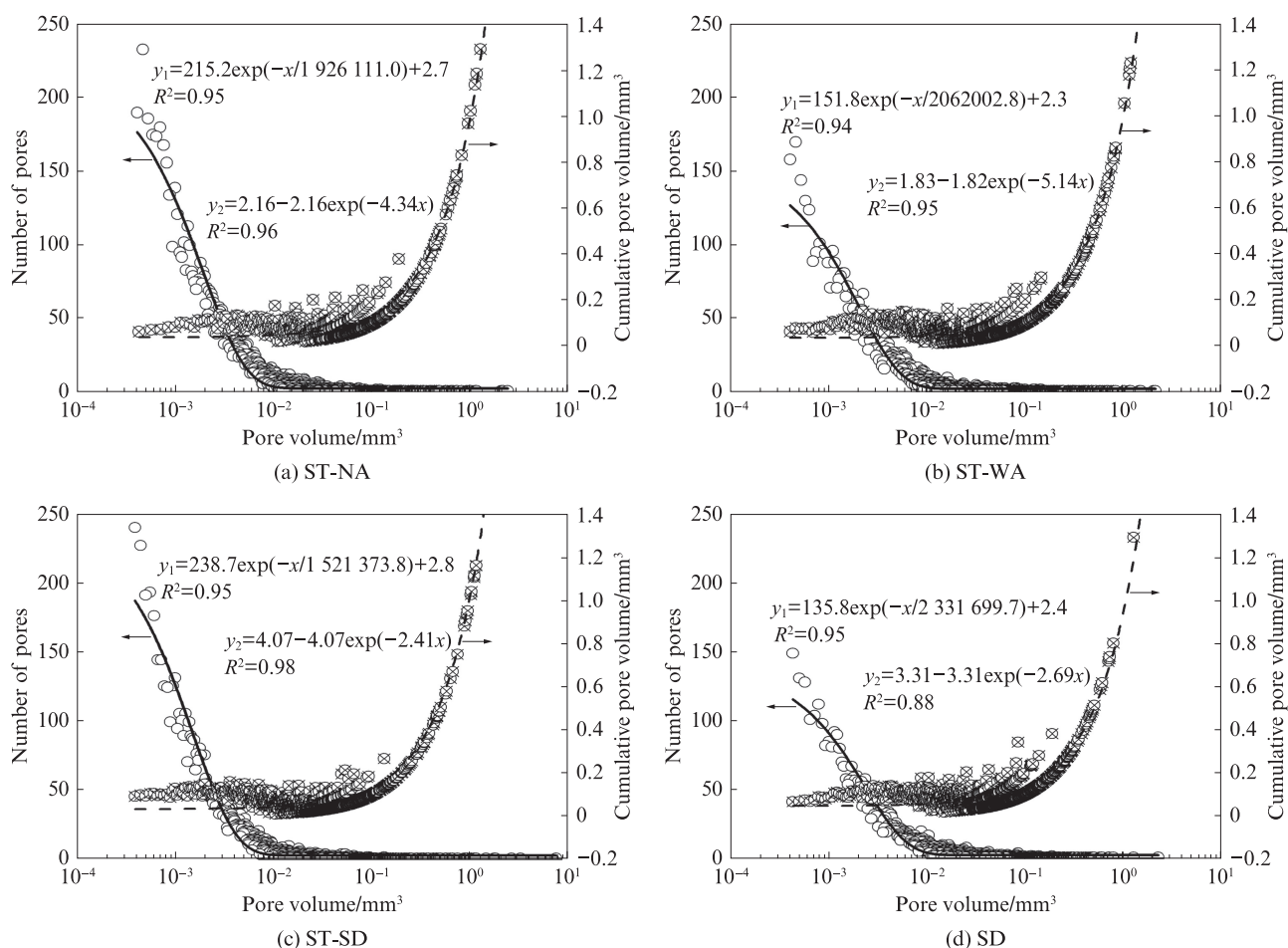


图8 砂浆孔体积分布

Fig. 8 Pore volume distribution of mortars

2.4 球形度-孔体积特征

水泥基材料中的孔隙形态非常复杂,并不都是圆形或椭圆形孔隙。为了评价养护制度对孔隙三维

形态的影响,采用球形度(S)对孔隙进行统计分析。孔隙的球形度是孔隙的表面积与孔体积对应的球体表面积之比^[24]。根据球形度的大小可以对孔隙形态的

不规则程度进行描述.球形度 S 的计算公式为^[25]:

$$S = \frac{\pi^{\frac{1}{3}}(6 \times V)^{\frac{2}{3}}}{A} \quad (4)$$

式中: V 为孔隙三维体积; A 为孔隙三维表面积.

图9给出了砂浆孔隙球形度与孔体积的关系.由图9可以直观地看出,绝大多数孔隙的球形度均大于0.6,且各个体积范围内均有球形度较大的孔隙,而球形度较小的孔隙仅仅分布于孔体积较大的孔隙.

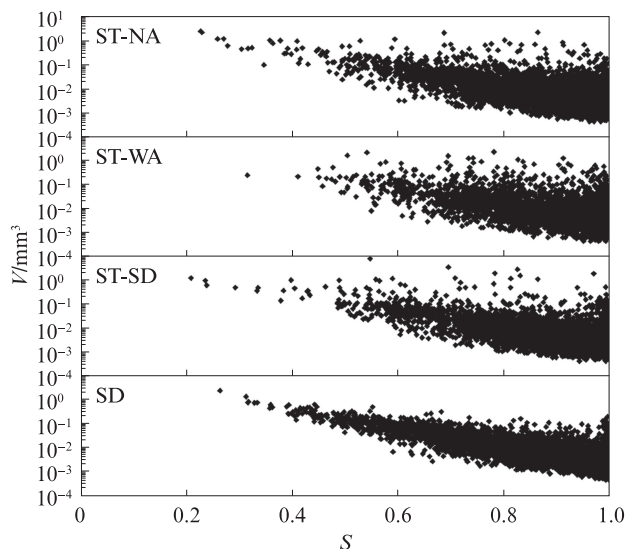


图9 砂浆孔隙球形度与孔体积的关系
Fig. 9 Relationship between sphericity and pore volume of mortar

图10为砂浆孔隙球形度分布图.由图10可知,砂浆孔隙球形度在0.9~1.0区间分布最多,ST-NA、ST-WA和ST-SD这3种砂浆的孔隙球形度在该区间的占比均超过了50.0%,分别为52.6%、55.9%、

52.3%,而全程标养砂浆SD在该区间的占比仅为40.8%.这说明蒸养可以使球形度在0.9~1.0区间的孔隙占比增加,但是后续不同养护制度对蒸养砂浆孔隙球形度的分布并没有明显的影响.此外,全程标养并没有使砂浆孔隙球形度提高.

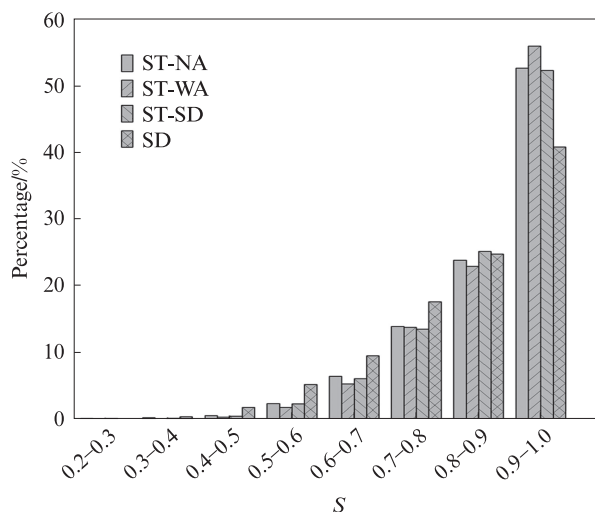
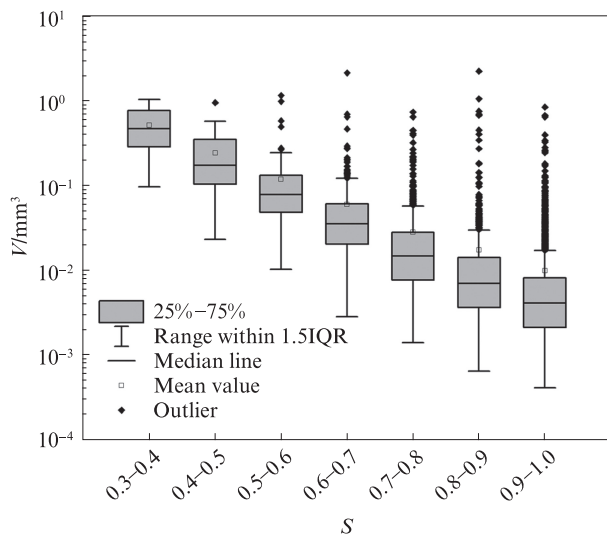
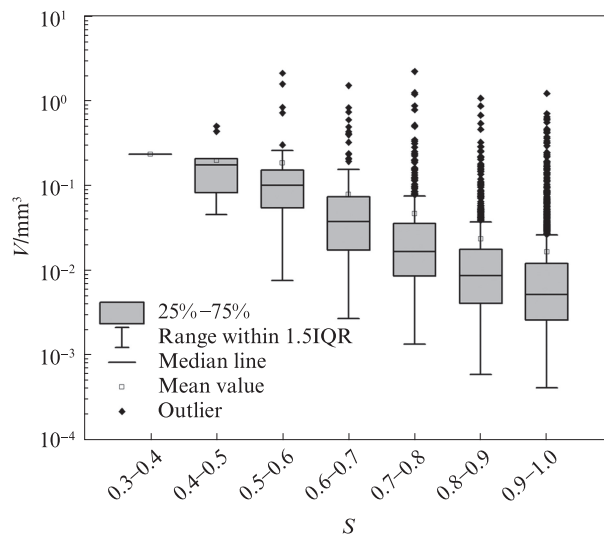


图10 砂浆孔隙球形度分布
Fig. 10 Sphericity distribution of mortar pore

为了研究3种蒸养砂浆与全程标养砂浆孔隙球形度的区别,采用箱线图分析了孔隙球形度与孔体积的关系,如图11所示.图11中IQR为四分位差,分布在 $\pm 1.5\text{IQR}$ 以外的值为异常值.由图11可以看出:砂浆的孔隙球形度与孔体积存在明显的负相关关系,文献[26-27]对泡沫混凝土的研究也得出了类似的结论;与全程标养砂浆孔隙球形度统计结果的不同之处在于,3种蒸养砂浆孔隙球形度分布中的异常值较多,且异常值与均值的偏离度较大.这可能是



(a) ST-NA



(b) ST-WA

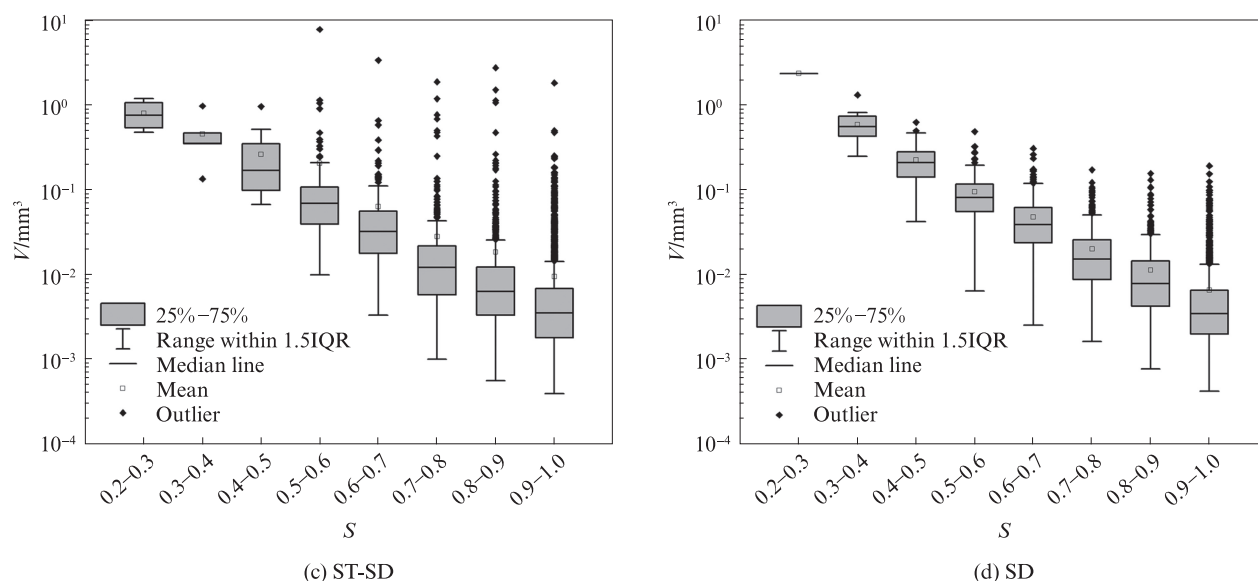


图11 球形度-孔体积关系箱线图

Fig. 11 Box diagram of sphericity-pore volume relationship

蒸养导致砂浆性能劣化的原因之一.因此,对于实际C50蒸养混凝土,蒸养导致的孔隙球形度变化也可能是影响蒸养混凝土服役性能的原因之一.

3 结论

(1)相对于全程标养砂浆,80℃下恒温12h蒸养会使砂浆孔隙率增大,对砂浆的抗压强度产生不利影响,导致蒸养砂浆的28d抗压强度低于全程标养砂浆.蒸养后水养和标养对后续水化反应有促进作用,可以有效降低蒸养砂浆的孔隙率,有利于抗压强度的增长.

(2)蒸养有利于消除500 μm以上的大孔,蒸养后再水养或标养可以有效减少蒸养砂浆中的微米级孔隙.因此合理的后续养护制度对蒸养砂浆的孔结构改善具有重要意义.

(3)砂浆孔隙的孔体积与球形度存在明显的负相关关系.孔隙的孔体积越小,球形度越好,而蒸养会使孔体积-球形度分布规律中的异常值增多,这可能是蒸养导致砂浆性能劣化的原因之一.

参考文献:

- [1] 姜本星,胡少伟,范向前,等.不同养护温度下蒸养混凝土断裂性能研究[J].建筑材料学报,2021,24(6):1163-1168.
LOU Benxing, HU Shaowei, FAN Xiangqian, et al. Fracture properties of steam-cured concrete under different curing temperatures[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1163-1168. (in Chinese)
- [2] KIM J K, HAN S H, SONG Y C. Effect of temperature and

- aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(7):1087-1094.
- [3] CASSAGNABERE F, MOURET M, ESCADEILLAS G. Early hydration of clinker-slag-metakaolin combination in steam curing conditions, relation with mechanical properties[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(12):1164-1173.
- [4] KJELSEN K O. Heat curing and post-heat curing regimes of high-performance concrete: Influence on microstructure and CSH composition[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(2): 295-307.
- [5] LOTHENBACH B, WINNEFELD F, ALDER C, et al. Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(4):483-491.
- [6] 马昆林,龙广成,谢友均.蒸养混凝土轨道板劣化机理研究[J].铁道学报,2018,40(8):116-121.
MA Kunlin, LONG Guangcheng, XIE Youjun. Deterioration mechanism of steam-cured concrete track slab[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(8):116-121. (in Chinese)
- [7] CAMPBELL G M, DETWILER R J. Development of mix designs for strength and durability of steam-cured concrete[J]. Concrete International, 1993, 15(7):37-39.
- [8] 贺智敏,龙广成,谢友均,等.蒸养混凝土的表层损伤效应[J].建筑材料学报,2014,17(6):994-1000,1008.
HE Zhimin, LONG Guangcheng, XIE Youjun, et al. Surface layer degradation effect of steam-cured concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6):994-1000,1008. (in Chinese)
- [9] BINGOL A F, TOHUMCU I. Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume[J]. Materials and Design, 2013, 51:12-18.
- [10] 曾俊杰,水中和,王胜年.掺偏高岭土和矿粉蒸养高强砂浆早

- 期水化特征和孔结构研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8):2857-2863.
- ZENG Junjie, SHUI Zhonghe, WANG Shengnian. Hydration and pore structure of steam cured high-strength mortar with metakaolin and slag at early age[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(8):2857-2863. (in Chinese)
- [11] 胡益彰. 蒸养条件下大掺量矿物掺合料混凝土的性能研究[D]. 济南:山东大学, 2016.
- HU Yizhang. Effect of high-volume mineral admixture on properties of steam-cured concrete [D]. Jinan: Shandong University, 2016. (in Chinese)
- [12] 李雪梅, 齐莉莉. 矿物掺合料对管片蒸养混凝土强度的影响[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(7):14-15, 18.
- LI Xuemei, QI Lili. The effects of mineral admixture on the strength of the subway segment concrete[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(7):14-15, 18. (in Chinese)
- [13] 李亚东, 路征远, 裴磊, 等. 后续养护制度对高强混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(7):2331-2335.
- LI Yadong, LU Zhengyuan, PEI Lei, et al. Influence of subsequent curing system on the mechanical properties of high-strength concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(7):2331-2335. (in Chinese)
- [14] 杜红秀, 樊亚男. 基于X-CT的C60高性能混凝土高温细观结构损伤研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):210-215.
- DU Hongxiu, FAN Yanan. Meso-structure damage of C60 high performance concrete at high temperature based on X-CT[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):210-215. (in Chinese)
- [15] 李天庆, 张毅, 刘志, 等. Snake模型综述[J]. 计算机工程, 2005, 31(9):1-3.
- LI Tianqing, ZHANG Yi, LIU Zhi, et al. An overview on snakes models[J]. Computer Engineering, 2005, 31(9):1-3. (in Chinese)
- [16] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4):321-331.
- [17] 李培华, 张田文. 主动轮廓线模型(蛇模型)综述[J]. 软件学报, 2000, 11(6):751-757.
- LI Peihua, ZHANG Tianwen. Review on active contour model (snake model)[J]. Journal of Software, 2000, 11(6):751-757. (in Chinese)
- [18] 韩松, 崔叶富, 郑玉飞, 等. 低水胶比水泥浆体的力学性能与水泥石微结构[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2):153-160.
- HAN Song, CUI Yefu, ZHENG Yufei, et al. Mechanical properties and pore-structure of hardened cement paste with low water-binder ratio[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(2):153-160. (in Chinese)
- [19] VANDAMME M, ULM F J, FONOLLOSA P. Nanogranular packing of C-S-H at substoichiometric conditions[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(1):14-26.
- [20] 刘友华. 蒸汽养护对水泥净浆和砂浆肿胀变形特性的影响[D]. 长沙:中南大学, 2008.
- LIU Youhua. Effect of steam curing on swelling and deformation characteristics of cement slurry and mortar[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- [21] HE Y J, MAO R T, LÜ L N, et al. Hydration products of cement-silica fume-quartz powder mixture under different curing regimes [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2017, 32(3):598-602.
- [22] SHEN P L, LÜ L N, HE Y J, et al. The effect of curing regimes on the mechanical properties, nano-mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 118:1-13.
- [23] 熊蓉蓉, 龙广成, 谢友均, 等. 矿物掺合料对蒸养高强浆体抗压强度及孔结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(2):175-181.
- XIONG Rongrong, LONG Guangcheng, XIE Youjun, et al. Influence of mineral admixtures on compressive strength and pore structure of steam-cured high-strength cement paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(2):175-181. (in Chinese)
- [24] HILAL A A, THOM N H, DAWSON A R. On entrained pore size distribution of foamed concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75:227-233.
- [25] 陈洁静, 秦拥军, 肖建庄, 等. 基于CT技术的掺锂渣再生混凝土孔隙特征研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1179-1186.
- CHEN Jiejing, QIN Yongjun, XIAO Jianzhuang, et al. Study on pore structure characteristics of recycled concrete with lithium slag based on CT technology[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1179-1186. (in Chinese)
- [26] 张振, 饶烽瑞, 叶观宝, 等. 基于X-CT技术的气泡轻质土孔隙结构研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5):1104-1112.
- ZHANG Zhen, RAO Fengrui, YE Guanbao, et al. Investigation on void structure of foamed light-weight soil with X-CT scanning technique [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1104-1112. (in Chinese)
- [27] GUO Y Z, CHEN X D, CHEN B, et al. Analysis of foamed concrete pore structure of railway roadbed based on X-ray computed tomography[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273:121773.