第 48 卷第 2 期
2020 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 2
February，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190471

综 合 评 述

波纹管法测试水泥基材料自收缩的关键问题综述

冷发光，关青锋，贺 阳，周永祥

(1. 中国建筑科学研究院有限公司，北京 100013；2. 建研建材有限公司，北京 100013；
3. 建筑安全与环境国家重点实验室，北京 100013)

摘 要：水泥基材料早期收缩变形的科学测试是正确评估开裂风险的基本前提，针对国内尚无统一的自收缩测试方法现状，本文从体积–长度转换系数、自收缩变形起点、浆体早期微膨胀特征、模具的摩擦、试件密封性、温度控制、测试装置等方面出发，分析了国内外以波纹管测试自收缩的研究进展，在此基础上梳理了已有研究中相对模糊的概念，并总结了波纹管方法和其他方法的对比研究，为今后在国内推广应用波纹管法提供若干建议。

关键词：水泥基材料；自收缩；波纹管；体积法；长度法
中图分类号：TU528.01　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)02–0273–10
网络出版时间：2019–12–12

Corrugated Tubes Method to Test Autogenous Shrinkage of Cement-based Materials–A Short Review

LENG Faguang, *GUAN Qingfeng*, *HE Yang*, *ZHOU Yongxiang*
(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. CABR Building Materials Co., LTD, Beijing 100013, China;
3. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China)

Abstract: Testing the early-age shrinkage deformation of cement-based materials is the basis to estimate the risk of cracking correctly. In fact, there exists no uniform on the autogenous shrinkage test in China. This review analyzed the articles testing autogenous shrinkage with corrugated tubes based on the volume-to-length conversion coefficient, the time-zero of autogenous shrinkage, the characteristics of early micro-expansion, the friction between corrugated tube and ground, the sealing property of the end corrugated tube, the control of testing temperature and the testing apparatus. Some vague concepts in the existing research were discriminated when the corrugated tubes method was compared with other methods, giving some suggestions for the future application of the corrugated tubes method in China.

Keywords: cement-based materials; autogenous shrinkage; corrugated tube; volumetric methods; linear methods

目前混凝土发展进入高性能化阶段，高性能混凝土最重要的特征之一便是水胶比普遍较低。普通混凝土水胶比一般为 0.40~0.55，干燥收缩在混凝土总体收缩中占主要地位。但随着水胶比下降，自收缩的比率越来越高。Tazawa 等[1]研究表明，当混凝土水灰比为 0.40 时，自收缩占总收缩 40%，若水灰比降到 0.30、0.23、0.17，自收缩占比将分别达到 50%、80%、100%。因此，混凝土自收缩问题得到越来越多的关注，研究学者提出了各种有效的控制方法，而统一、科学的测试方法和技术，是正确评估体积变形乃至开裂风险的前提。

针对水泥基材料自收缩测试，常用到的方法有体积法和长度法[2]，体积法[3–4]的操作是将新拌混凝土装进不透水橡胶膜中，封好橡胶膜口后，将其放进水缸中，通过记录重量变化来计算体积变形。体积法能够在浆体搅拌完毕后立即开始测试，但是往往难以排除浆体内气泡、泌水带来的浮力干扰，另外质量不好的橡胶膜不能完全防水，而且容易被骨料刺穿[5]。

长度法[6–10]则是将混凝土浆体浇筑在摩擦约束

收稿日期：2019–07–05。　修订日期：2019–10–15。
基金项目：国家重点研发计划(2017YFB0310100)。
第一作者：冷发光(1968—)，男，博士，研究员。

Received date: 2019–07–05.　**Revised date:** 2019–10–15.
First author: LENG Faguang (1968–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: lengfaguang@126.com

较低的钢质模具中，养护 1~3 d 后再测量长轴向长度变化的方法。此类方法需要在浆体凝结后才开始测试，无法记录塑性阶段的体积变形[11]。

国外学者 Jensen 等[2]提出了用波纹管测试混凝土自收缩的方法，其采用的波纹管属于柔性塑料圆柱形波纹管，且要求纵向刚度远小于横向刚度。混凝土灌入波纹管后，所产生的体积变形可通过波纹管的纵向伸缩来转化成长度变化，同时集体积法和长度法优点于一身，不仅可实现自浇筑成型开始自收缩的连续监测，而且能有效地避免重力、温度变化以及模具约束对测试结果的影响[12]。基于此，美国于 2009 年公布 ASTM C1698[13]规范文件，为混凝土自收缩测试提供了标准的波纹管法。国内目前尚无针对性规范，主流的自收缩测试参考较通用的 GB/T 50082《棱柱体接触法/非接触法》，研究者使用各自研发的自收缩测试装置，测试、评价影响因素不一致，为行业交流带来障碍。

为此，从测试原理、测试关键影响因素、波纹管法与其他方法测试结果的对比等方面概述国内外波纹管法的应用情况，并在此基础上总结在国内引入波纹管法的必要性和可行性。

1 波纹管自收缩测试方法研究应用情况

Jensen 等[2, 14–15]最早提出将波纹管用于混凝土自收缩测试的想法，并探讨了具体的测试技术和相对湿度等影响因素，在此基础上，美国 ASTM C1698 规范规定了用于测试在恒温密封和无荷载条件下净浆、砂浆从终凝至某一龄期自生体积变形的标准方法。试验采用低密度聚乙烯波纹管进行试件成型，所用波纹管长(420.0±5) mm，外径(80.0±0.5) mm，内径(58.5±0.5) mm，厚度(0.5±0.2) mm，每组应为 3 个试件。在试件成型的同时，利用维卡仪测试凝结时间。试件成型后，将其置于(23.0±1.0) ℃环境中，待试件终凝时取值作为基准长度。需要指出的是，该标准中采用接触式数字千分表自动读数。近年来，有研究[16]将千分表替换为电涡流非接触式位移传感器以实现自动采集数据，使得测试更为方便。

田倩等[17]对波纹管自收缩测试法进行详细探讨，该文献介绍了波纹管测试样品长度的原理，采用粗细不一、材质不同的波纹管研究了波纹管刚度、尺寸、内部空气对测试结果的影响，并认为终凝后这些因素就可以忽略不计。

朱建强等[18–21]均使用了自行设计的波纹管模具，Bouasker 等[22–34]从 ASTM C1698 出发，分别探讨了体积–长度转化率、温度、泌水、自收缩起点、模具的密封与摩擦等因素对波纹管法测试精度的影响。本文将分别对这些因素进行详细概述，辨析波纹管法应用中将会面临的各种干扰，为国内水泥基材料自收缩测试方法标准化提供参考。

2 应用波纹管法的关键问题

2.1 体积、长度转化系数

用于测试水泥基材料早期自收缩的波纹管理想状态应该是：管壁具有优良的密封性，在测试过程中内部浆体与外界的空气、水分交换可忽略不计；长轴向刚度非常小，当试样浇筑、密封完毕后，浆体能自由沿着长轴向自由伸缩而不受波纹管的刚度约束；而沿径向刚度则应能保证卧置灌满浆体的波纹管时，波纹管不会被浆体自重压扁。换而言之，波纹管长轴向刚度相对于沿径向刚度可忽略不计，且长轴向变形能力远大于沿径向变形能力。

当满足以上理想条件时，波纹管内的体积变形将完全转化成长度变形[17]，选取波纹管的结构单元 *abcd* (见图 1a)，变形后的结构为 a_1b_1cd。则该结构单元的体积变化率为：

$$\Delta V=\frac{V_{abcd}-V_{a_1b_1cd}}{V_{abcd}}=\frac{\frac{1}{3}\pi\frac{l_1}{2}(r_1^2+r_1r_2+r_2^2)-\frac{1}{3}\pi\frac{l_2}{2}(r_1^2+r_1r_2+r_2^2)}{\frac{1}{3}\pi\frac{l_1}{2}(r_1^2+r_1r_2+r_2^2)}=\frac{l_1-l_2}{l_1}=\Delta l \tag{1}$$

即

$$k=\frac{\Delta V}{\Delta l}=1 \tag{2}$$

通过上式的计算，可从数学角度证明，如果管内浆体能与理想的波纹管同步变形，则测到的波纹管长度变化率等于管内浆体的体积变化率[14]。

为了验证该证明过程，田倩等[17, 24, 30]采用蒸馏水进行模拟测试。如图 1b 所示，将蒸馏水谨慎地灌入波纹管中，操作期间尽量降低气体混入量(或使用真空排气法)，灌满后密封管端，并置于测试架，记录初始波纹管初始长度。接着用 5~20 mL 容量的注射器从波纹管中部顶面逐级抽水(例如可按 1、2、3、…、10 mL 分别抽水)，每次抽水后均采用位移传感器及时地测量、记录波纹管长度变化。以 ΔV 为横坐标，ΔL 为纵坐标，绘出散点图，并拟合出直线，

该直线斜率便为波纹管体积–长度转化系数 k。田倩等[17, 24, 30]各自测出的 k 值分别为 0.87、0.72、0.97，可见实际测试的 k 值低于 1，体积变形没有按照预期完全地转化成长度变形。Tao 等[24]通过在成型 24 h 后除掉波纹管并覆盖塑料薄膜于样品表面，进一步探究转化率达不到 1 的因素，认为“波纹管长轴向刚度不够小”是关键原因。通过综合对比[17, 24, 30]，可发现除了波纹管长轴向刚度，波纹管与试验架的摩擦、波纹管端塞和位移传感器之间的接触均有可能是蒸馏水模拟试验中的误差源。因此，若进一步改进波纹管的生产工艺以制造出长轴向刚度更低的波纹管(建议以波纹管在单位力下的均匀伸缩长度量化其长轴向刚度)，通过辅助措施降低波纹管与测试架之间的摩擦，以及尝试采用非接触式传感器进行测量，理论上能令实际转化率 k 最大程度地接近 1。

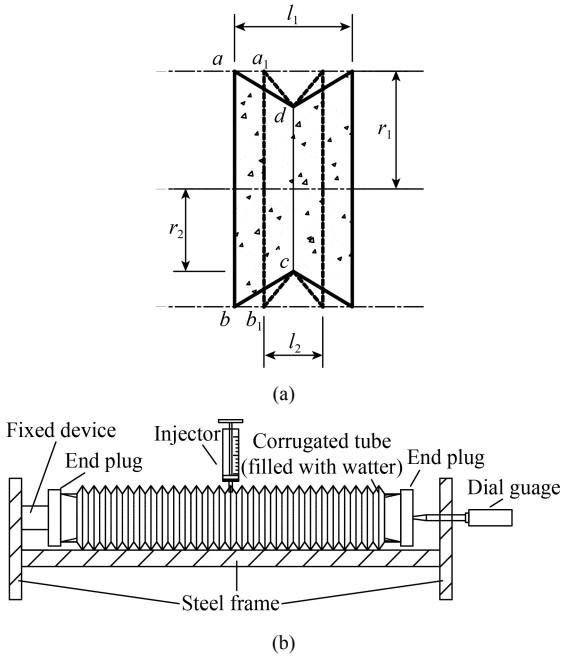


图 1　波纹管测试混凝土收缩变形原理示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the principle of concrete shrinkage deformation testing with corrugated tube

2.2　自收缩起始时间(Time-zero)

Time-zero(零时刻)，对应于自收缩起始时间点，标志着水泥基材料浆体内能承受应力传递的稳定骨架网络的形成[35]。Darquennes 等[36]认为自收缩的表征很大程度上取决于 Time-zero 的选定和测试方法，准确合理的自收缩起始时刻定义对于自收缩测试精度至关重要。ASTM C1698 建议采用以维卡仪测定的终凝时间作为 Time-zero，但是有学者对此有不同发现：Sant 等[37]发现“Time-zero”大致等于终凝时间，但不完全相同；Miao 等[38]认为机械针入测试、量热法、收缩测试、电阻法等均不能直接测定自收缩起始时刻；Huang 等[26]认为维卡仪测定的终凝时间点不代表着稳定的固体受力骨架已经形成，而且此时内部相对湿度也未必立刻开始下降，因此以终凝时间作为 Time-zero 不合适；Jensen 等[33, 39]认为，在终凝时刻甚至完全不能观察到自收缩的产生，因为此时浆体收缩速率依旧很大，自收缩起点应是极早期收缩曲线拐点。总体来看，虽然相关标准(如 ASTM C1698 标准)有所规定，但业内对 Time-zero 的选定仍未达成基本共识，而这一点也是影响波纹管自收缩测试方法应用的关键所在。

笔者认为，以水泥基材料内部水蒸气相对湿度开始下降的时刻作为自收缩测试的 Time-zero，更具有理论依据。从水泥浆体凝固前后的水化行为来看，当连通的稳定骨架形成后，化学减缩受到骨架的约束而不能完全转化成外部体积变形，毛细孔饱水程度开始下降，并随着浆体进一步硬化。此时毛细孔液柱出现弯液面，毛细张力便出现，从而引发宏观的自干燥变形，也就是所要测试的自收缩变形。从表面物理化学相关理论可知，液柱一旦出现弯液面，其上方的水蒸气便进入相对湿度不饱和状态。因此，可以认为，内部水蒸气相对湿度开始下降的那一刻，即标志着自收缩开始。

一些研究结论也与这一观点相呼应。张君等[40]通过试验发现，从浇筑开始，材料内部湿度经历早期水气饱和期(相对湿度 100%)和随后的湿度下降期，湿度下降期的起始点基本上与收缩发展的第二阶段起始点相对应，而收缩发展的第二阶段正是由相对湿度控制的收缩阶段。进一步地，高原等[41]认为混凝土内部湿度变化可以看作是其自收缩变化的驱动力。有文献[26]结合波纹管模具、湿度探测器、超声波脉冲速度测量法(UPV)以及 HYMOSTRUC 3D 模型等对 Time-zero 进行了详细的研究，同样发现不同水灰比浆体的相对湿度下降起始点接近于早期自由收缩曲线的转折点(即张君等[40]所述的收缩发展第二阶段起始点)，并且该转折点——化学减缩与自收缩的分界点[23, 42]，标志着稳定的固体受力骨架已经形成，这意味着自收缩已经开始。Lv 等[39]利用 LVDT、温湿度计、ASTM C1698 规定的波纹管装置对水泥基材料自收缩进行研究，发现早期收缩曲线的转折点和内部相对湿度下降时间点、相对湿度曲线一阶导数零点、变形速率第二峰值所在时

刻一致，并将该转折点对应的时间选定为自收缩起始时刻(Time-zero)。

关于水泥基材料内部相对湿度的测试，Jensen 等[14]较早地对相关测试方法可靠性进行了探讨，并提出典型的测试步骤：将与用于自收缩测试的样品具有相同制备、养护历史的小部分浆体置于小密封保温保湿容器，而这部分浆体的内部相对湿度和容器内空气的相对湿度相一致，而空气的相对湿度则可通过湿度传感器来测定。此外，该文献强调了湿度传感器飘移、容器内空气的逃逸、保湿容器内浆体与自收缩测试样品之间的温度差、水蒸气在探测器上液化等对测试精度的影响。Tao 等[24, 38–39]根据此思路分别设计了相对湿度测试方法，均发现浆体内部湿度下降起始时间点基本对应着早期收缩曲线的转折点时间。

Ma 等[43–44]建议以浆体内部毛细孔出现毛细张力的时刻作为自收缩起始时刻，并从土壤物理学、Laplace 方程等理论出发，研制出能测定毛细孔负压的仪器。从理论上而言，浆体内部出现的毛细张力是自收缩发生的根源，其形成时刻亦对应于水蒸气相对湿度下降的时刻。但是从测试角度而言，监测毛细孔负压的出现远不如监测水蒸气相对湿度的下降容易，因为毛细管负压测试技术受微孔陶瓷头的位置、传感器内气体含量、出水管硬度等影响因素较为敏感。所以，就准确性、操作性和推广性而言，通过测定混凝土内部水蒸气相对湿度来确定自收缩起始时刻(Time-zero)显然更有实践价值。

另外，Darquennes 等[36]建议通过超声波脉冲速度测量等方法，以能传递拉应力的稳定骨架形成时间为 Time-zero。但 Huang 等[26]指出，对于高水灰比浆体，即使稳定的固体受力骨架已经形成，毛细孔依旧充满自由水，尚未出现弯液面和毛细张力，不能表示自收缩已经开始。例如，采用高吸水树脂(SAP)对高水灰比/超高水灰比混凝土进行内养护，可基本消除自收缩，然而这不意味着浆体减缩未造成微孔隙。硬化的内养护混凝土同样存在毛细孔，由于其内部充满了 SAP 释放的自由水[45]，以至于内部不出现毛细孔弯液面和水蒸气相对湿度下降现象，最终的结果便是自收缩基本可忽略不计，证明了以稳定的固体受力骨架形成时刻为 Time-zero 不够合理。

最后，韩宇栋等[46]指出，相对湿度高于 50%时，毛细孔张力作为混凝土收缩内因已取得共识。事实上，大量试验研究[14, 47–50]表明，随着水灰比降低，密封的水泥基材料内部相对湿度降低到 60%时便趋于稳定，不再下降。

综合以上分析，认为以水泥基材料早期内部相对湿度下降起始点作为自收缩起始时刻(Time-zero)最为合理。需要讨论的是，包括波纹管法在内的现有早龄期水泥基材料自收缩测试方法，均只能测试到水泥基材料外部宏观体积收缩，不能很好地测试到内部空腔(气相)体积变化，换而言之，波纹管法等现有自收缩测试方法得到的数据仅是化学减缩的宏观表现部分[51]。除此之外，波纹管法测试自收缩数据时，会受到泌水、温度、摩擦约束、端塞密封性及测量仪器约束力等非自收缩因素导致的变形影响，下文将逐一对其进行讨论，并初步提出相应克服思路。

2.3 早期微膨胀特征——泌水的影响

仔细分析利用波纹管测试水泥净浆早期自收缩的文献数据[23–24, 30]可发现，在收缩曲线转折点后的局部时间段内，出现高达 250×10^{-6}~750×10^{-6}[22–23]的微膨胀变形，即使不采用波纹管而采用其他测试方法，同样能发现该微膨胀阶段[52–55]，该现象应当引起重视，因为自收缩会因其而滞后显现，最终导致低估自收缩程度。

目前对该微膨胀阶段的来源主要有三种看法：水化产物(如氢氧化钙、钙矾石)析晶造成的膨胀压[56–58]；水化放热导致的热膨胀[59–60]；浆体泌水及其重吸收[61–62]。Bjontegaard 等[25, 61]认为，在多数情况下，泌水重吸收是其中最重要的原因，另两个原因则相对次要。有研究表明，新拌浆体泌水以及水分重吸收对自收缩测试结果有显著影响[62]；Charron 等[63]指出，体积法测试过程中，若不除去泌出的水分，则泌出水分的重吸收将会使得自收缩测试结果偏小。有研究[38]表明，泌水及其重吸收推迟了弯液面的出现。Bouasker 等[22–23]在借助橡胶膜测试浆体自收缩过程中，发现泌水膜的存在令化学减缩持续时间延长了接近一倍，化学减缩的数值增大了 5 倍以上。此外，在水灰比较低的水泥净浆自收缩试验[5, 64]中，该微膨胀段基本不存在，这与低水灰比浆体泌水程度低有一定关联。

波纹管法本身可看作是一种特殊的体积法，从上文可知，体积法固有的影响因素之一正是泌水现象及水分重吸收，在水灰比大于 0.4 的浆体中尤为明显[22]。由此可见，在水化初期的收缩测试过程中，若不考虑泌水及其重吸收对于测试结果的影响，将会得出关于收缩机理的错误解释。目前降低泌水程

度的常规思路包括降低水灰比、使用化学外加剂、提高材料比表面积等，而针对波纹管法自收缩测试中的泌水问题，Wyrzykowski 等[22, 25, 28]认为旋转波纹管样品对消除泌水干扰较为有效,且在其文中展示了所设计的独特旋转装置，美国规范 ASTM C1698 则直接建议采用 1~3 r/min 的旋转速度令水平放置的波纹管产生定轴转动，克服静置样品时重力的单向作用，防止水膜形成，使自由水分布更加平衡，利于浆体均匀地充分水化。

关于旋转的持续时间，美国规范 ASTM C1698 建议旋转至浆体终凝，Bouasker 等[22]从其设计的配合比出发，观察到浆体水化 15 h 后，不管是否旋转样品，测到的自收缩曲线基本重合，说明对样品的旋转操作只需要在试样成型至浆体完全凝结期间执行。此外，必须结合配合比中用水量、水灰比、胶凝材料及骨料细度等参数确保旋转速度维持在适合范围(Mohr 等[25]设置的旋转速度为 45~60 r/min)，否则离心力过大、密封不牢固等可能会造成凝结中的试样微结构出现松动、损伤；速度过低则起不到转动样品应有的效果。

综上所述，当采用波纹管测试存在泌水风险的水泥基材料自收缩数值，或者需要排除泌水影响以观察掺合料、外加剂等的膨胀效应时，不妨考虑通过缓慢地定轴旋转样品来克服泌水及其重吸收的影响，该操作不仅可以基本消除自收缩阶段的微膨胀干扰效应，也能令浆体在浇筑成型后正常凝结、硬化，但是应提前设计好旋转速度和旋转时间。

2.4　波纹管与支撑面之间的摩擦

从上文关于体积–长度转化系数的讨论中可知，波纹管及其支撑面之间的摩擦会显著影响自收缩测试精度。田倩等[17]讨论了直型圆筒模具、方锯齿型波纹模具、三角锯齿型波纹模具受支撑面约束的程度，发现三角锯齿型波纹模具与支撑面之间为点接触，接触面积最小，因而该类型波纹管与接触面之间的摩擦最小，并且通过在波纹管与测试架之间涂上油脂来降低摩擦力，操作简单。李国栋等[65]将成型后的波纹管一端固定在倾斜 3°的测试架上(郑秀梅等[66]设置的倾斜角为 30°)，借助波纹管的重力分量抵消摩擦力。此类方法构思巧妙，但操作需谨慎，假设在不同配合比的试验中，波纹管的尺寸、刚度等因素均为无关变量，一旦波纹管内浆体重量不同，则测试架的倾斜角度便需要重新验算，若采用统一的倾斜角度或验算后的角度不能精确设置于测试架，将会面临重力分量压迫波纹管以致浆体轴向变形的情况，造成试验数据出现误差。

程可佳[67]为了隔绝波纹管与支撑面之间的摩擦，用垂直的细线将波纹管悬吊起来，形成类似钟摆的系统。但是，当波纹管发生轴向变形时，细线会从垂直缓慢变成倾斜，倾斜角会造成细线拉力水平分量，该分量与波纹管浆体收缩方向相反，会约束浆体变形；对于低水灰比的水泥净浆、砂浆等，其试样在浇筑后 1 d 内收缩值可达到 3×10^{-3}，细线的水平约束将不容忽视。

总体而言，为了降低波纹管模具与支撑面之间的摩擦，尽可能采用三角锯齿型波纹管，将其水平放置后，在底部涂上润滑油，并且采用支撑表面光滑的支撑架，是一种简便有效的方法。

2.5　试件的密封

从自收缩定义可知，自收缩测试必须严格保证试件的密封性，而且现有的收缩测试常常用到预埋于浆体端部的传感器测头，测头与端塞之间的缝隙存在漏浆风险。所以，用波纹管测试水泥基材料自收缩时，必须采取可靠的端塞来封住波纹管端口，否则浆体存在与外界发生物质交换的风险；其次，传感器测头与浆体的锚固粘结效果是长度测量能否成功的关键[68]，端塞若不能与浆体紧密地协同变形，将会与浆体之间逐渐出现空隙，受端塞约束的传感器测头极可能会脱离浆体，以至于无法准确捕捉浆体的体积变形。

美国规范 ASTM C1698 采用圆台型塑料端塞密封波纹管，简便直接，Mohr 等[25–28, 69]均采用该种端塞。Gao 等[23–24, 30]在其基础上，将塑料端塞挖空，然后将金属测头埋进端塞内部，使测试结果精度与可重复性提高。李国栋等[65]自行设计了铝质端扣，并用硅胶固定在波纹管端部。张彬彬等[70]采用铁片类的薄板封住波纹管端部，然后与千分表接触。Snoeck 等[33]采用了螺丝钉、密封橡胶圈、可拆卸螺钉等设计了高密封性端塞，不但能将测头和混凝土紧密连接，还实现了“测头–波纹管–浆体”三位一体的协同变形。此外，Hansen 等[2]借助端部的波纹皱褶，利用紧固螺钉、黄铜端盖对波纹管进行密封；Bouasker 等[22]采用粗金属螺帽与配套螺钉密封灌满净浆的波纹管。

对于自收缩测试而言，保证浆体与环境不存在物质交换是基本的要求，因此，必须重视波纹管端塞密封性的处理工作。

2.6　温度的控制

利用波纹管测试水泥基材料自收缩变形时，测

试对象具体是浆体内部毛细张力控制的体积变形，水化热、环境温度升降导致的温度变形不在考虑范围内。事实上，当波纹管应用在混凝土自收缩测试中时，自身管径将比 ASTM C1698 中的小波纹管管径增大 3~4 倍，这将导致管内的水化热很难及时释放，笔者认为这是波纹管法应用于水泥混凝土自收缩测试中的潜在缺点。因此，试验员应当通过流体介质、浆体内置电热偶等方式，保证浆体整体温度维持在适当的温度波动、温度梯度范围内，以排除温度变化带来的干扰。目前波纹管法的控温方式主要有三种：油浴控温、恒温室控温、水浴控温。

Mohr 等[24–25]采取恒温室控温，即将样品和测试仪器放置于温度恒定的气体氛围中(如恒温室、恒温箱内)，该类方法操作简单，不要求测试仪器具备极高的防水性能。美国规范 ASTM C1698 执行的温度控制方法同样是恒温室控温：采取内管径为 26 mm，外径为 29 mm 的小管径波纹管，并规定每根波纹管之间保持 30 mm 以上的间隔，以释放水化热。按照该规范设置好试样和测试仪器后，将其置于温度稳定在(23.0±1.0) ℃的恒温室或者恒温箱内。该规范不建议采用水浴控温，理由是波纹管可能会渗水。然而，Huang 等[22, 26, 71]采取了水浴控温，实现温度稳定在(20.0±0.1) ℃的同时，尚未发现波纹管出现渗水。

此外，Snoeck 等[33]将样品和测试仪器置于聚亚烷基热浴中，并将热电偶放置于浆体内部，实时监测波纹管内外的温度变化，最终实现了在整个测试周期内维持温度在(20.0±0.6) ℃内。Wyrzykowski 等[28]将测试架和波纹管均浸泡在配有循环泵的(19.8±0.1) ℃硅油热浴中，隔绝了样品往环境散失水分的路径，并且没有发现硅油渗透进波纹管内；此外，该文献认为仅将试样放置于恒温室气体中测试时，仍然会面临温度膨胀的影响。

在保证气体循环满足温度稳定控制的条件下，利用控温室来控温的方式最具有实用性。若遇到试验要求较高或者波纹管管径较大等情况，可根据试验条件选择水浴控温或者油浴控温，但是必须保证测试仪器具备良好的防渗性能。

2.7 测量装置

在采用波纹管测试自收缩的研究中，所用到的接触式仪器有：千分表、电位器式传感器 LVDT、埋入式电阻应变计等；非接触式仪器：电涡流位移传感器、激光位移传感器。

千分表测量自收缩的操作简单，经济成本低，适用于长期测量，但是人为误差大，本身对波纹管造成接触压力，且部分类型千分表尚未自动化。LVDT 操作简单且受人为干扰小，但是每个试件都要配备 2 个传感器，且测量过程中不能移动、共享传感器；埋入式电阻应变计的应用受其自身刚度影响较大，而且只能一次性使用。相对而言，电涡流位移传感器和激光位移传感器应用较为广泛。非接触式传感器测量价格较昂贵，但是精度高，人为误差小，能连续自动测量，具备足够的精度、防水性和稳定性。重要的是，非接触式仪器无须于试件接触，只要试件成型、测头埋置完毕后，可立刻进行采集数据，大大提前测试起点时间。近年来较多文献[72–75]采用非接触式电涡流位移传感器，测试范围为 0~4 mm，分辨率为 0.5 μm，精度为 0.05%，并使用多通道数据采集仪收录数据。

除了测量装置的选择以外，测量装置的数目亦需要做出选择。如果采用非接触测试仪器同时对波纹管两端进行采集数据，则需要注意测试前的校核工作是否到位，因为当校核一端仪器的零点完毕后，校核另一端仪器零点的动作容易对上一次校核工作产生扰动，妨碍试验顺畅性。如果采用固定波纹管一端，仅在另一端设置测试仪器的方法，虽然能克服上述困难，但是对测量仪器量程要求较高，这将提高测试成本。

总而言之，在波纹管测试方法中，应当尽量采用具备操作方便，精度高，对油污、尘埃、干扰磁场不敏感，带有温度补偿，自身防水，无损且经济实用等特点的传感器，以实现浆体早龄期体积变化的连续、稳定监测。

3 波纹管法与其他方法的对比

Roziere 等[29]在同一恒温的实验室同时采取 4 种不同的方法(棱柱体法、波纹管法、收缩锥法和 BTJADE 法)对完全密封的样品进行自收缩变形测试，以对比、评价不同方法对测试自收缩的影响，发现每种方法均表现出良好的重复性；对于各种配合比，4 种方法测到的自收缩数值均在同一数量级，其中波纹管法和收缩锥法测到的数值比棱柱体法和 BTJAD 法更高。

针对水灰比为 0.3 的水泥净浆，Sant 等[76]对比了 ASTM C157 非约束长度法、橡胶膜法、波纹管法和棱柱体法(采用激光测试)得出的自收缩数据，如图 2 所示。ASTM C157 法从拌合后 24 h 龄期开始读数，其它 3 种方法从拌合后 30 min 开始读数。

从图 2 可以看出，尽管 4 种方法的测试原理和操作方法各不相同，但测到的数据重合性较好。所以，如果橡胶膜法中的渗水、泌水及其重吸收等误差因素被最小化后，展现出来的规律和数值均可接近于波纹管法。此外，从图 2 还可以看出，在终凝之后，橡胶膜法、波纹管法两类体积法与 ASTM C157、棱柱体法两类长度法的数据存在相关性，并非如过去研究[77]中认为的“体积法测量结果可能是长度法的 3 至 10 倍高”。

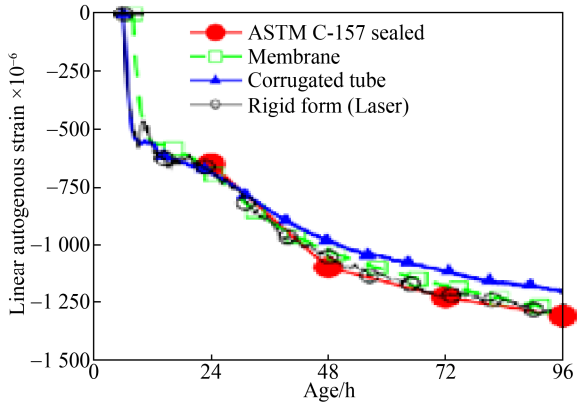


图 2　ASTM C157 非约束长度法、橡胶膜法、波纹管法和棱柱体法的自收缩数据对比图[76]

Fig. 2　Comparison of the autogenous shrinkage strain measured using the four testing protocols (ASTM C157, membrane, corrugated tube and rigid form)

施惠生等[20]采用尺寸为 ϕ25 mm×280 mm 的波纹管和 JC/T 313—1982 中的自收缩测试方法做了对比试验，发现波纹管法测到的试验数据均大于参照 JC/T 313—1982 测得的自收缩值，作者认为采用波纹管法能更直接、准确地测量硬化水泥浆体的早期自收缩，因为波纹管可以成型不久便允许开始测量，而且在整个测试期间不需要拆模。类似地，朱建强等[18]通过对比波纹管法数据和棱柱体法数据，认为波纹管能够准确、直观地测量初凝后 10 min 的收缩值，能够保留棱柱体法忽略的很大一部分极早期收缩变形数据。此外，施惠生等[20]提出波纹管法的操作性和测试可信度尚需进一步谨慎研究。

Tao 等[24]仔细对比了波纹管法和棱柱体法，发现波纹管本身的材质和结构特点令其难以获得极低的、理想的长轴向刚度，这会对管内试样的长轴向收缩造成约束，导致体积-长度转化系数 k 远低于 1，以至于试样的自收缩程度被低估；波纹管法操作便捷性相对棱柱体法较低，因为灌浆过多会导致波纹管被拉伸，在波纹管以弹性恢复的形式恢复到平衡状态时，会使得收缩测试值偏大，而灌浆过少则会在管内留下过多气泡，使得测试结果受到空气的约束而偏低。

除了以上研究得出的结论，笔者认为在推广应用波纹管法之前，尚应对比研究粗骨料总体粒径对波纹管试样自由收缩的影响程度。明显地，若测试对象为混凝土，尤其是使用总体粒径较粗的骨料的混凝土，粗骨料可能会卡在波纹管皱褶上，通过机械咬合作用限制试样自由收缩。在此过程中，波纹管皱褶的宽度、深度、数量是否会影响波纹管法在混凝土自收缩测试种的应用，同样需要进行仔细的对比试验。此外，国内外对于利用波纹管测试高强混凝土自收缩性能的试验尚不充足，多为研究低水灰比水泥净浆、砂浆自收缩性能，美国 ASTM C1698 规范正是仅针对水泥净浆和砂浆，未将混凝土纳入考虑范围，因此有必要进一步针对高强混凝土采用波纹管法和其他方法作对比、验证研究。

4　结论

应用波纹管测试浆体早龄期自收缩时需要解决的关键问题包括：

1) 理论上，若能尽可能降低长轴向刚度、与支撑面之间的摩擦和测试仪器的约束作用，波纹管能通过自身特殊结构将浆体体积变化完全转换成长度变化；

2) 浆体内部毛细孔负压与相对湿度下降出现时刻均为自收缩变形的起点(Time-zero)的标志，但通过测定相对湿度下降来确定 Time-zero 的操作性更强；

3) 早期收缩曲线在转折点后常常出现微膨胀段，泌水及水分重吸收是关键原因，而旋转波纹管试样是该原因的有效解决方法；

4) 波纹管与支撑面之间的摩擦可通过涂抹润滑油、将波纹管微微倾斜等方式来降低；

5) 波纹管端塞的密封性是准确测定浆体早期体积变形的前提，同时应当采取水浴、油浴等措施令试样与周围环境的温度在测试期间内保持一致；

6) 安装非接触式传感器进行测量是目前学术研究中运用较为成熟且得到广泛认可的措施。

采用波纹管作为自收缩测试模具，成型后无需脱模即可测试，能集体积法和长度法优点于一身，满足早期收缩全过程、自动化、原位精准测试等要求。虽然波纹管法存在自身固有的潜在缺点，但只要进一步开展广泛、针对性的对比、改进研究，有希望将我国水泥基材料早期收缩测试技术提升到更

高的水平。

参考文献:

[1] TAZAWA E, MIYAZAWA S. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete[J]. Cem Concr Res, 1995, 8(25): 1633–1638.

[2] JENSEN O M, HANSEN P F. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste[J]. Mater Struct, 1995, 28(7): 406–409.

[3] MORIN V, COHEN-TENOUDJI F, FEYLESSOUFI A, et al. Evolution of the capillary network in a reactive powder concrete during hydration process[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(12): 1907–1914.

[4] SANT G, LURA P, WEISS J. Measurement of volume change in cementitious materials at early ages[J]. J Transp Res Board, 2006, 1979(1): 21–29.

[5] 肖江帆. 常规工艺下超高性能混凝土的制备及性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
XIAO Jiangfang. Study on the properties of ultra high performance concrete with common techniques (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2013.

[6] BAROGHEL-BOUNY V, MOUNANGA P, KHELIDJ A. Autogenous deformations of cement pastes: part ii. w/c effects, micro-macro correlations, and threshold values[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(1): 123–136.

[7] LI Y, BAO J, GUO Y. The relationship between autogenous shrinkage and pore structure of cement paste with mineral admixtures[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(10): 1855–1860.

[8] CHU I, KWON S, AMIN M, et al. Estimation of temperature effects on autogenous shrinkage of concrete by a new prediction model[J]. Constr Build Mater, 2012, 35: 171–182.

[9] PERSSON B, AVDELNINGEN F, LUND U, et al. Self-desiccation and its importance in concrete technology[J]. Mater Struct, 1997, 30(5): 293–305.

[10] YOO S, KOH K, KWON S, et al. Analysis technique for flexural behavior in rc beam considering autogenous shrinkage effect[J]. Constr Build Mater, 2013, 47: 560–568.

[11] 李鹏辉, 刘光廷, 高虎, 等. 自生体积变形试验方法研究及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(11): 114–117.
LI Penghui, LIU Guangting, GAO Hu, et al. J Tsinghua Univ: Sci Technol (in Chinese), 2001, 41(11): 114–117.

[12] 张云升, 张国荣, 李司晨. 超高性能水泥基复合材料早期自收缩特性研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 19–23.
ZHANG Yunsheng, ZHANG Guorong, LI Sichen. J Build Mater (in Chinese), 2014, 17(1): 19–23.

[13] ASTM C1698 standard test method for autogenous strain of cement paste and mortar[S]. New York, ASTM, 2009.

[14] JENSEN O M, HANSEN P F. Autogenous deformation and rh-change in perspective[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(12): 1859–1865.

[15] LURA P, JENSEN O M. Measuring techniques for autogenous strain of cement paste[J]. Mater Struct, 2007, 40(4): 431–440.

[16] 曾峥. 改性陶粒混凝土力学性能及收缩性能的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
ZENG Zheng. Study on mechanical properties and shrinkage properties of modified ceramsite concrete (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2018.

[17] 田倩, JENSEN O M. 采用波纹管测试水泥基材料早期自收缩方法[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(1): 39–45.
TIAN Qian, JENSEN O M. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(1): 39–45.

[18] 朱建强, 邓敏, 马惠珠, 等. 水泥浆体早期的自收缩和干燥收缩[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2007, 29(3): 30–33.
ZHU Jianqiang, DENG Min, MA Huizhu. J Nanjing Univ Nat Sci Ed (in Chinese), 2007, 29(3): 30–33.

[19] 葛晓丽, 刘加平, 王育江, 等. 超低水胶比及硅灰对水泥净浆早期自收缩的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(4): 1–4.
GE Xiaoli, LIU Jiaping, WANG Yujiang, et al. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2016(4): 1–4.

[20] 施惠生, 郭晓潞, 黄小亚. 矿物外加剂及测试方法对硬化水泥浆体自收缩值的影响[J]. 水泥, 2010(6): 1–4.
SHI Huisheng, GUO Xiaolu, HUANG Xiaoya. Cement (in Chinese), 2010(6): 1–4.

[21] 刘永强. 掺膨胀剂 HCSA 的超高性能混凝土性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
LIU Yongqiang. Research of performance of UHPC incorporating HCSA expansion agent (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2014.

[22] BOUASKERM, GRONDIN F, MOUNANGA P, et al. Improved measurement methods for autogenous shrinkage of cement mortars at very early age[Z]. Québec, Canada: 2006.

[23] BOUASKER M, MOUNANGA P, KHELIDJ A, et al. Free autogenous strain of early-age cement paste: metrological development and critical analysis[J]. Adv Cem Res, 2008, 20(2): 75–84.

[24] TAO J, WEI X, LUO Y. Comparison of non-contact autogenous shrinkage measurements and the stress ratio of capillary stress to compressive strength[J]. Constr Build Mater, 2019, 206: 226–235.

[25] MOHR B, HOOD K. Influence of bleed water reabsorption on cement paste autogenous deformation[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(2): 220–225.

[26] HUANG H, YE G. Examining the “Time-zero” of autogenous shrinkage in high/ultra-high performance cement pastes[J]. Cem Concr Res, 2017, 97: 107–114.

[27] OSTERGAARD T, JENSEN O M. A thermal comparator sensor for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste[J]. Mater Struct, 2003, 36(264): 661–665.

[28] WYRZYKOWSKI M, HU Z, GHOURCHIAN S, et al. Corrugated tube protocol for autogenous shrinkage measurements: review and statistical assessment[J]. Mater Struct, 2017, 50(1): 57.

[29] ROZIERE E, DELSAUTE B, LOUKILI A, et al. Experimental assessment of autogenous shrinkage[Z]. 2015983–992.

[30] GAO P, ZHANG T, LUO R, et al. Improvement of autogenous shrinkage measurement for cement paste at very early age: corrugated tube method using non-contact sensors[J]. Constr Build Mater, 2014, 55: 57–62.

[31] JI T, ZHANG B, ZHUANG Y, et al. Effect of lightweight aggregate on early-age autogenous shrinkage of concrete[J]. Aci Mater J, 2014, 112(3). doi: 10.14359/51687229.

[32] ZHUANG Y, ZHENG D, NG Z, et al. Effect of lightweight aggregate type on early-age autogenous shrinkage of concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 120: 373–381.

[33] SNOECK D, JENSEN O M, BELIE N D. The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials[J]. Cem Concr Res, 2015, 74: 59–67.

[34] WANG Z, LI G. Experimental method and prediction model for autogenous shrinkage of high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2013, 49: 400–406.

[35] WEISS J. Experimental determination of the ‘Time zero’, T0 (‘Maturity-Zero’, M0)[Z]. Haifa: 2002195–206.

[36] DARQUENNES A, STAQUET S, DELPLANCKE-OGLETREE M, et al. Effect of autogenous deformation on the cracking risk of slag cement concretes[J]. Cem Concr Compos, 2011, 33(3): 368–379.

[37] SANT G, LURA P, WEISS J. A discussion of analysis approaches for determining ‘Time-zero’ from chemical shrinkage and autogenous strain measurements in cement paste[C]//Int RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation. 2006: 375–383.

[38] MIAO C, TIAN Q, SUN W, et al. Water consumption of the early-age paste and the determination of “Time-zero” of self-desiccation shrinkage[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(11): 1496–1501.

[39] LV Y, HUANG H, YE G, et al. Autogenous shrinkage of low water-binder ratio cement pastes with supplementary cementitious materials[Z]. Las Vegas, USA: 2016.

[40] 张君, 陈浩宇, 侯东伟. 水泥净浆、砂浆及混凝土早期收缩与内部湿度发展分析[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 287–292.
ZHANG Jun, CHEN Haoyu, HOU Dongwei. J Build Mater (in Chinese), 2011, 14(3): 287–292.

[41] 高原, 张君, 孙伟. 密封养护混凝土内部湿度与收缩的一体化试验与模拟[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 203–209.
GAO Yuan, ZHANG Jun, SUN Wei. J Build Mater (in Chinese), 2013, 16(2): 203–209.

[42] MOUNANGA P, BAROGHEL-BOUNY V, LOUKILI A, et al. Autogenous deformations of cement pastes:part i. temperature effects at early age and micro-macro correlations[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(1): 110–122.

[43] 缪昌文, 田倩, 刘加平, 等. 基于毛细管负压技术测试混凝土最早期的自干燥效应[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 509–516.
MIAO Changwen, TIAN Qian, LIU Jiaping, et al. J Chin Ceram Soc, 2007, 35(4): 509–516.

[44] MA Y, YANG X, HU J, et al. Accurate determination of the “Time-zero” of autogenous shrinkage in alkali-activated fly ash/slag system[J]. Compos Part B: Engineering, 2019, 177: 107367.

[45] 张蕊. 非洲干旱地区天然火山灰高性能混凝土内养护技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
ZHANG Rui. Study on internal curing technology of high performance concrete with natural volcanic ash in dry-zone of zone (in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.

[46] 韩宇栋, 张君, 岳清瑞, 等. 现代混凝土收缩研究评述[J]. 混凝土, 2019(2): 1–12.
HAN Yudong, ZHANG Jun, YUE Qingrui, et al. Concrete (in Chinese), 2019(2): 1–12.

[47] 张君, 侯东伟, 高原. 混凝土自收缩与干燥收缩的统一内因[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(9): 1321–1324.
ZHANG Jun, HOU Dongwei, GAO Yuan. J Tsinghua Univ: Sci Technol (in Chinese), 2010, 50(9): 1321–1324.

[48] 黄耀英, 蔡忍, 刘钰, 等. 不同水胶比高性能混凝土内部自干燥与干湿循环影响试验[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 311–316.
HUANG Yaoying, CAI Ren, LIU Yu, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019, 38(2): 311–316.

[49] 张巍, 杨全兵. 混凝土收缩研究综述[J]. 低温建筑技术, 2003(5): 4–6.
ZHANG Wei, YANG Quanbing. Low Temp Constr Technol (in Chinese), 2003(5): 4–6.

[50] 张震. 减缩剂和内养护对低水灰比水泥石自收缩的影响及其协同作用[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
ZHANG Zhen. Single and combined effects of shrinkage-reducing admixture and internal curing on autogenous shrinkage of hardened cement pastes with low water-cement ratio (in Chinese, dissertation). Chongqing: Chongqing University, 2017.

[51] 高小建, 巴恒静, 马保国. 混凝土早期自收缩、强度与水泥水化率的关系[J]. 工业建筑, 2006, 36(2): 64–67.
GAO Xiaojian, BA Hengjing, MA Baoguo. Ind Construct (in Chinese), 2006, 36(2): 64–67.

[52] 许利惟, 郑建岚. 高性能混凝土早龄期自干燥收缩测量方法的研究[J]. 福州大学学报(自然科学版). 2007(5): 725–730.
XU Liwei, ZHENG Jianlan. J Fuzhou Univ: Nat Sci Ed (in Chinese), 2007(5): 725–730.

[53] 祝瑜, 邓宏卫, 曾京生, 等. 混凝土自收缩测量方法的进展[J]. 低温建筑技术, 2010, 32(10): 7–9.
ZHU Yu, DENG Hongwei, ZENG Jingsheng, et al. Low Temp Constr Technol (in Chinese), 2010, 32(10): 7–9.

[54] 左义兵, 魏小胜. 粉煤灰水泥浆体的电阻率与化学收缩及自收缩的相互关系[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(4): 45–54.
ZUO Yibing, WEI Xiaosheng. J Chongqing Univ (in Chinese), 2015, 38(4): 45–54.

[55] 庄华夏, 冯小忠, 韦华, 等. 一种非接触式多通道混凝土早龄期收缩测试设备的研发与应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(4): 81–84.
ZHUANG Huaxia, FENG Xiaozhong, WEI Hua. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2018(4): 81–84.

[56] SANT G, LOTHENBACH B, JUILLAND P, et al. The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(3): 218–229.

[57] SENSALE G R, RIBEIROA B, GONCALVES A. Effects of RHA on autogenous shrinkage of portland cement pastes[J]. Cem Concr Compos, 2008, 30(10): 892–897.

[58] BAROGHEL-BOUNY V, MOUNANGA P, KHELIDJ A, et al. Autogenous deformations of cement pastes[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(1): 123–136.

[59] HOLT E. Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(3): 464–472.

[60] MARUYAMA I, TERAMOTO A. Temperature dependence of autogenous shrinkage of silica fume cement pastes with a very low water–binder ratio[J]. Cem Concr Res, 2013, 50: 41–50.

[61] BJONTEGAARD O, SELLEVOLD E. Thermal dilation and autogenous deformation as driving forced to self-induced stresses in high performance concrete[D]. Norwegian University of Science and Technology, 1999.

[62] BJØNTEGAARD Ø, HAMMER T A, SELLEVOLD E J. On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete[J]. Cem Concr Compos, 2004, 26(5): 427–435.

[63] CHARRONJ P, MARCHAND J, BISSONNEETEB. Early-age deformations of hydrating cement systems: comparison of linear and volumetric shrinkage measurements[J]. Concr Sci Eng, 2001(3):

168–173.

[64] 管娟. 高性能水泥浆体早期自收缩[D]. 南京: 南京工业大学, 2005.
GUAN Juan. Early-age autogenous shrinkage of high performance cement pastes (in Chinese, dissertation). Nanjing: Nanjing University of Technology, 2005.

[65] 李国栋, 王宗林. 高性能混凝土板式构件的早期收缩特性及预测模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(1): 93–100.
LI Guodong, WANG Zonglin. J Civ Archit Environ Eng (in Chinese), 2017, 39(1): 93–100.

[66] 郑秀梅, 农国才, 张皓. 减缩剂与膨胀剂对 UHPC 收缩性能影响研究[J]. 混凝土, 2017(9): 76–79.
ZHENG Xiumei, NONG Guocai, ZHANG Hao. Concrete (in Chinese), 2017(9): 76–79.

[67] 程可佳. 碱矿渣陶粒混凝土的自收缩及抗裂性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2016.
CHENG Kejia. Study on Autogenous shrinkage and crack resistance of alkali-activated slag ceramsite concrete (in Chinese, dissertation). Fuzhou, Fuzhou University, 2016.

[68] 江晨晖. 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.
JIANG Chenhui. Experimental Investigations and evaluations on early-age volume changes and mechanical properties of high performance concrete (in Chinese, dissertation). Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.

[69] RAJAYOGAN V. Autogenous shrinkage in cementitious systems[D]. Canberra: The University of New South Wales, 2009.

[70] 张彬彬, 季韬, 林旭健. 钢纤维掺量对陶粒混凝土早期自收缩的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 377–381.
ZHANG Binbin, JI Tao, LIN Xujian. J Fuzhou Univ: Nat Sci Ed (in Chinese), 2015, 43(3): 377–381.

[71] LU T. Autogenous shrinkage of early age cement paste and mortar[D]. Delft University of Technology, 2019.

[72] 曾剑波. 聚合物改性水泥砂浆收缩性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
ZENG Jianbo. Study on shrinkage of polymer modified cement mortar [dissertation, in Chinese]. Changsha: Hunan University, 2017.

[73] 曾玮. 减缩剂与聚丙烯纤维对陶粒混凝土收缩性能的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
ZENG Wei. Influence of shrinkage-reducinng agent annd polypropylene fiber on shrinkage of ceramsite concrete (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2017.

[74] 吕奎喜. 内养护对自密实混凝土收缩及渗透性的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
LV Kuixi. Effect of internal curing on the shrinkage and permeability of self-compacting concrete (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2015.

[75] 雷晓亮. 减缩剂与聚丙烯纤维对加气混凝土收缩性能的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
LEI Xiaoliang. Influence of shrinkage-reducing agent and polypropylene fiber on shrinkage of aerated concrete (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2018.

[76] SANT G, LURA P, WEISS J. Measurement of volume change in cementitious materials at early ages: review of testing protocols and interpretation of results[R]. Transportation Research Board, 2006.

[77] WUERPEL C. Laboratory studies of concrete containing air-entraining admixtures[J]. J Am Concr Inst, 1946, 42(2): 305–360.