

美国重大事故——美国混凝土热膨胀系数测试方法重大错误的验证和分析

Verification and Analysis of Major Errors in Testing Methods for Thermal Expansion Coefficient of Concrete in USA



摘要：针对路面混凝土热膨胀系数（CTE）测试，国内外普遍使用的测试方法 AASHTO TP60 因被发现由重大错误，后经过重大修改并由 AASHTO T336 所替代。本文将回顾发现 AASHTO TP60 中重大错误的整个过程，指出在制订 TP60 测试方法过程中存在的问题，提醒国内混凝土 CTE 测试机构和相关单位及时更改测试方法和相关设计数据，并对新的 AASHTO T336 测试方法提出进一步完善的建议，并为今后高温和低温环境下的混凝土热膨胀系数测试提供借鉴。

关键词：热膨胀系数,混凝土,路面混凝土设计,测试方法

1. 引言

随着我国基础建设的飞速发展，越来越多的公路路面采用了水泥混凝土，这主要是因为水泥混凝土具有高强度和高稳定性等优点，但路面板边缘过早破坏、面板开裂、横缝错台等危害一直困扰着道路工程界。大量研究发现混凝土的热膨胀系数（CTE）是影响路面水平裂缝以及其它危害发生的主要原因，CTE 越大，路面越容易出现开裂和疲劳破坏。在近些几年中对 CTE 测试的兴趣显著增加，因为它被认为是用于混凝土路面设计最重要的输入参数之一。

有多种测试方法可用于测定混凝土的 CTE，文献[1,2]做了详细的综述介绍。纵观各种混凝土 CTE 测试方法，最广泛使用的是 AASHTO TP60，它是所有混凝土 CTE 测试的基础，AASHTO TP60 测试方法广泛使用的另外一个原因是其测量装置也可以被其它测试方法使用。

TP60 的测量原理非常简单，它测量垂直放置在金属框架内的饱和混凝土样品的长度变化，该金属框架受特定温度变化的影响。控温水浴用于改变测试方法规定的温度范围，通过测量已知 CTE 的校准样品长度变化来消除框架的变形影响。

对于任何材料性能测试方法和测量装置的测量准确性考核和评价，一般都采用以下几种方式：

- （1）测试可计量溯源的标准参考材料，测试结果与标准值比较；

- (2) 测试经更高等级测试设备验证过的参考材料，测试结果与参考值比较；
- (3) 多个实验室不同测试设备之间的比对测试。

美国联邦公路管理局(FHWA)的 Turner-Fairbank 高速公路研究中心(TFHRC) 为了评估 AASHTO TP60 测试方法的准确性，采用了上述第二种方式，选择了几种参考材料并经第三方实验室采用更高等级的测试设备对参考材料 CTE 进行测量[3]。在此评价过程中发现了使用了近十多年之久的 AASHTO TP60 存在着重大错误，并及时做出了修改，从而推出了新的测试方法 AASHTO T336，但以往错误所带来的影响和后果非常严重，造成大面积的数据库和设计软件的修改等。

本文将回顾发现混凝土 CTE 测试方法 AASHTO TP60 中重大错误的整个过程，指出在制订 TP60 测试方法过程中存在的问题，提醒国内混凝土 CTE 测试机构和相关单位及时更改测试方法和相关设计数据，并对新的 AASHTO T336 测试方法提出进一步完善的建议，并为今后高温和低温环境下的混凝土热膨胀系数测试提供借鉴。

2. 参考材料

为了评估 AASHTO TP60 测试方法和相应测试设备测量精度和测量重复性，以及实验室间的比对测试，美国联邦公路管理局(FHWA)的 Turner-Fairbank 高速公路研究中心(TFHRC) 准备了三种参考材料，这三种参考材料的 CTE 值范围基本都在 TFHRC 先前测试过的混凝土样品范围内。三种参考材料如下：

- (1) 氧化铝陶瓷：根据文献其 CTE 为 $5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。这种氧化铝陶瓷一种多孔陶瓷，在测试之前需要饱和。
- (2) 钛合金(Ti-6Al-4V)：根据文献其 CTE 为 $9.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。
- (3) 410 不锈钢：根据文献其 CTE 为 $10.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

3. 参考材料热膨胀系数测试

美国 TFHRC 首先使用自己实验室的两台不同的混凝土热膨胀系数测试设备，按照 TP60 方法对上述三种参考材料进行了测试，测试结果如表 3-1 所示。

从表 3-1 可以看出，针对氧化铝陶瓷、钛合金和 410 不锈钢三种参考材料，采用 AASHTO TP60 测试方法测量得到的 CTE 值与文献报道值并不一致，它们普遍比文献值高约 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

当发现测量值与文献值之间存在较大差异后，TFHRC 首先认为造成这种差异的可能原因是氧化铝陶瓷、钛合金和 410 不锈钢这些参考材料与文献报道的材料并不完全相同，或者在测试期间位移探测器（LVDT）受温度或湿气（或两者）变化的影响。

表 3-1 参考材料文献值和不同测试方法（AASHTO TP60 和 ASTM E228）结果

样品代码	材料	CTE 文献值 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	AASHTO TP60		ASTM E228
			设备 1 结果 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	设备 2 结果 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	第三方结果 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
A	氧化铝陶瓷	5.5	6.5	6.7	5.4
T	钛合金	9.2	10.0	10.2	8.9
S	410 不锈钢	10.5	11.8	11.5	10.4
SS743	304 不锈钢 (校准样品)	17.3	17.3	17.3	15.8
M1	304 不锈钢 (仪器 厂家 1 校准样品)	17.3	17.3	17.3	15.9
M2	304 不锈钢 (仪器 厂家 2 校准样品)	17.3	17.3	17.3	16.2

4. 第三方实验室测试

上述三种参考材料测试结果与文献值的较大差异使得 TFHRC 决定选择独立的第三方实验室对 CTE 测试进行验证，参考样品被送到专门从事航天工业金属 CTE 测试的实验室进行了测试，测试按照 ASTM E228 测试方法（顶杆法）的修改版进行，以适应高度 180mm、直径 80mm 或 100mm 样品和 TP60 中相同的温度范围 10~50°C。除了发送新获得的参考材料外，用于校准 FHWA 手动测量装置和两台商业测量装置的几个 304 不锈钢校准样品也被送到此第三方实验室进行测试验证。

在 ASTM E228 测试方法中，顶杆法热膨胀仪用于测量线性热膨胀。测量样品和已知标准参考材料之间作为温度函数的膨胀差异，样品的膨胀是根据这种膨胀差异和标准膨胀来计算的。

表 3-1 显示了 CTE 文献值和 TFHRC 及第三方独立实验室获得的测量结果。可以看出，按照 TP60 在 TFHRC 获得的 CTE 结果远高于按照 ASTM E228 在第三方实验室的测量结果。按照 TP60 规定，三种 304 不锈钢校准样品（SS743、M1 和 M2）设定的热膨胀系数都为 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，所以采用 TP60 方法测试得到的 CTE 结果也都为 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

从表 3-1 可以看出 根据 TP60 获得的结果远高于根据 ASTM E228 获得的结果。此外，除了 304 不锈钢校准样品外，第三方实验室报告的结果与文献值基本一致。而对于所有 304 不锈钢校准样品，第三方实验室报告的 CTE 测试结果都要明显低于 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

5. 对比分析

通过上述第三方实验室的对比测量，TFHRC 终于认识到出现 TP60 测试结果较高的原因是：304 不锈钢校准样品的 CTE 值可能在测试温度范围内设定（或选择）的并不正确。当发现这个灾难性的可能原因后，TFHRC 感觉到了事态的严重性，这是因为无论是定制装置还是商用测量装置，所有执行 AASHTO TP60 和类似测试方法的实验室所使用的 304 不锈钢校准样品 CTE 值均为 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，如果发生错误则会带来大范围的影响。

根据 TP60，如果用作校正系数所输入的 304 不锈钢校准样品 CTE 值不正确，则所测试材料的 CTE 值也不正确。作为验证，TFHRC 使用了第三方 CTE 测试结果 $15.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 作为 304 不锈钢校准样品的 CTE 作为新的校正因子。使用新的校正因子，TFHRC 重新计算了表 3-1 中报告的 CTE，如表 5-1 所示。

从表 5-1 可以看出，当使用 TP60 建议的 304 不锈钢 CTE 默认值来计算校正系数时，氧化铝陶瓷、钛合金和 410 不锈钢的 CTE 高于预期，但是当使用由第三方实验室测量确定的 304 不锈钢 CTE 值计算校正系数时，获得的氧化铝陶瓷、钛合金和

410 不锈钢的 CTE 更接近预期值，与预期值的差异并不是由于温度或湿度变化对 LVDT 读数的影响。相反，这种较大差异主要是由于使用 304 不锈钢校准样品的不适当 CTE 值作为输入来计算校正因子，从而导致测量参考材料 CTE 的错误。

表 5-1 第三方实验室和 TFHRC 的 CTE 测量值比较，假设校准样品有两个 CTE 值

样品代码	材料	第三方实验室 1 结果 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	设备 1 结果 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 基于 $15.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的不锈钢校准样品	设备 1 结果 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 基于 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的不锈钢校准样品
A	氧化铝陶瓷	5.4	5.0	6.5
T	钛合金	8.9	8.5	10.0
S	410 不锈钢	10.4	10.3	11.8

6. 第三方实验室再次测试

为了进一步确认 304 不锈钢校准样品的 CTE，TFHRC 将校准样品送到另一家第三方独立实验室进行测试。由于发现此实验室虽然可以采用 ASTM E228 进行 CTE 测量，但无法对高 180mm、直径 80mm 或 100mm 的样品进行测量，因此送到此第二家第三方实验室的较小尺寸样品是将先前发送到第一家第三方实验室的样品进行了切短，切短后的样品尺寸约为 $51 \times 51 \times 6\text{mm}$ 。该实验室在比以前实验室更宽的温度范围内 ($-40 \sim 300^{\circ}\text{C}$) 测量了 304 不锈钢校准样品的 CTE，结果如表 6-1 所示。

表 6-1 两家第三方实验室的 CTE 测试结果比较 (测试方法 ASTM E228)

样品代码	材料	第三方实验室 1 结果 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	第三方实验室 2 结果 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
T	钛合金	8.9	9.2
S	410 不锈钢	10.4	10.2
SS743	304 不锈钢 (校准样品)	15.8	15.9
M1	304 不锈钢 (仪器厂家 1 校准样品)	15.9	15.7

表 6-1 清楚地显示，从第二个独立实验室收到的结果与从第一个独立实验室获得的结果一致，观察到的微小差异可归因于可接受的测试系统误差。表 6-1 中显示的 CTE 测试结果表明在与 TP60 相同温度范围内的 CTE 值，并不包括第 2 个独立实验室使用的全温度范围。

图 6-1 显示了第二家独立实验室在测试期间使用的整个温度范围内的平均 CTE。从中可以看出，CTE 值随温度而变化在-40~300°C 温度范围内呈现最稳定 CTE 的材料是钛合金。同样清楚的是，在 300°C 左右，304 不锈钢样品的 CTE 试验结果接近 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的文献报道。

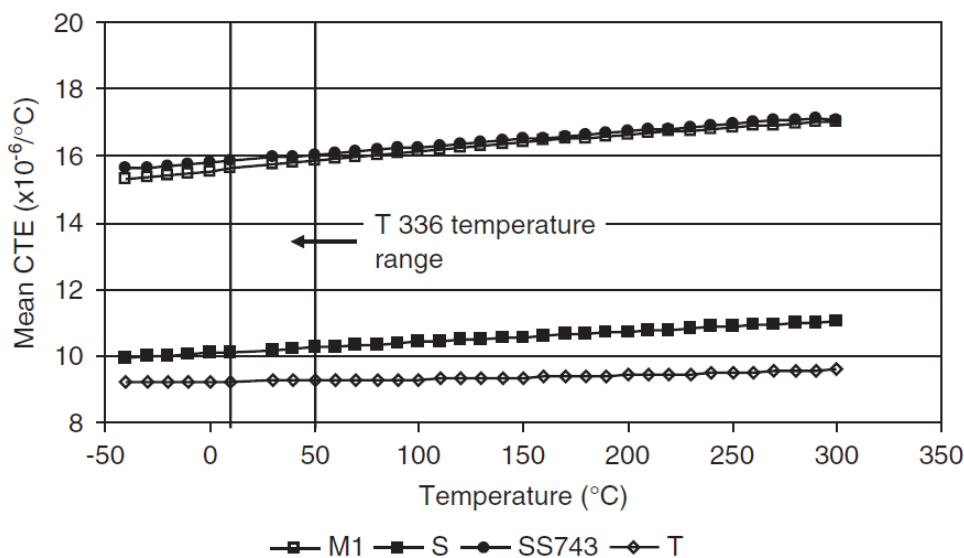


图 6-1 在宽温度范围内的平均 CTE (参考温度为 20°C)

通过这次第二家第三方实验室的测试，进一步验证了 TP60 方法中存在的问题，从而推进了新型测试方法的建立。

7. AASHTO 新旧标准之间的区别

AASHTO TP60 标准方法在 2000 年颁布，2009 年发现了 TP60 存在重大问题，2010 年在 AASHTO TP60 基础上颁布了新标准 AASHTO T336。TP60 方法与 T336 新方法的主要区别如下：

(1) 第三方测试：虽然 TP60 在非强制性附录中指出 304 不锈钢的 CTE 为 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，但 T336 要求任何校准样品的 CTE 应由拥有 ISO 9001 或同等认证的实验

室来确定。

(2) 校准样品的 CTE 测定：CTE 必须由第三方实验室测定，测试方法应采用 ASTM E228 或 ASTM E289。此外，第三方实验室的 CTE 测定必须在与 T336 相同的温度范围内进行，即 10~50°C。

(3) CTE 证书：校准样品必须具有第三方实验室颁发的证书，包括所测样品的批号。CTE 必须在相同的样品上或同一批次的样品上测定，因为材料的 CTE 可能会随批次发现变化。

(4) 力学经验路面设计指南 (MEPDG) 警示说明：在 1.0 版 MEPDG 软件中，模型的校准采用的是长效路面性能 (LTPP) 数据库中的 CTE 值，而这些 CTE 值则由 TP60 方法测试获得。由于根据 TP60 和 T336 获得的校准样品 CTE 值之间由很大差异，因此根据 T336 获得的 CTE 不应用作 1.0 版 MEPDG 软件的输入，以防止路面厚度的低估。

8. AASHTO 新旧标准更替所带来的影响

8.1. 对路面性能数据库的影响

目前的长效路面性能 (LTPP) 数据库中的 CTE 值是整个美国在 10 年期间对来自道路的数千个样芯采用 TP60 方法进行广泛测试的结果。在所测试的温度范围内如果假定校准样品的 CTE 不正确，那么 LTPP 数据库中的所有 CTE 值都高于预期温度范围内的实际 CTE 值，需要全部进行相应调整。

由于发现了校准样品的 CTE 差异，美国联邦公路管理局 (FHWA) 的 Turner-Fairbank 高速公路研究中心 (TFHRC) 已经努力反算所有测试结果，用特定的 CTE 值代替 $17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 用于每台热膨胀测试设备的校准样品。

8.2. 对力学经验路面设计指南的影响

美国一致将 CTE 确定为力学经验路面设计指南 (MEPDG) 中用于设计混凝土路面最重要输入或分类为极其敏感的输入参数，混凝土的 CTE 决定了影响整个路面

设计的路面卷曲应力、贴合移动和荷载传递效率的大小。在连续钢筋混凝土路面中，CTE 决定了裂缝间距和裂缝宽度，这些会影响裂缝荷载传递效率并影响最终冲孔。

由于 MEPDG 中的各种不同模型使用的都是来自 LTPP 数据库的 CTE 数据，因此需要根据校正数据调整这些模型（使用校准样品的正确 CTE）。由于 MEPDG 软件中的当前模型是基于 LTPP 数据库中错误的较高 CTE 值，因此无论是通过模型的全局重新校准还是通过局部校准过程，只有在模型重新校准后，才能使用正确的较低 CTE 值。如果没有解决这个问题，它可能会对预测的设计厚度产生负面影响。

8.3. 其他影响

许多机构已经开始在 MEPDG 实施之前表征其典型混合物的材料特性，存储在这些数据库中的 CTE 值仍然有效。但是，这些 CTE 记录值需要根据校准样品的假定 CTE 值和根据 ASTM E228 获得的 CTE 值的差异进行调整。如上所述，这些经过调整的 CTE 值仅在模型重新校准后才能用于 MEPDG 软件的设计。

美国一些州已经开发了基于 MEPDG 和 CTE 的典型路面设计和设计表。在这种情况下，一旦重新校准 MEPDG，应根据需要对表格进行验证和更改。

9. AASHTO T336 的改进

2010 年颁布的 AASHTO T336 已经实施了将近十年，尽管 AASHTO T336 在这些年的实施中已经取得了很大成就，但基于广泛的测试应和研究经验，还是需要进一步的改进和完善。美国联邦公路管理局（FHWA）的 Turner-Fairbank 高速公路研究中心（TFHRC）对改进给出了如下建议：

（1）校正因子：T336 已经提出了确定校正因子的程序，然而它是测试方法中的非强制性附录内容。由于必须确定校正因子，因此应将其移至标准文本中进行强制性执行。此外，在当前的 T336 中，没有提供关于校准样品的讨论。为了获得准确结果，建议校准样品的长度与待测混凝土样品长度相差在 2mm 范围内。校准样品的直径应该是合适的直径，以牢固地放在框架的支撑按钮上。

（2）解决水位问题：当受控温度水浴中的水位影响 CTE 时，尤其是在测试期

间水位发生变化或者在混凝土测试期间水位与校准期间的水位不同时。这是因为当水位改变时，框架和浸没或暴露于环境空气的 LVDT 轴的长度将改变。因此，根据 TFHRC 研究，水位偏离上次校准水位以下不应超过 13mm。

(3) 设备验证。使用 LVDT 与水接触并在高温下，电子设备会受到影响。为了验证 LVDT 和整个设备操作的正常运行，建议每月通过测试已知 CTE 的参考样品（校准样品除外）来验证设置。参考样品的 CTE 值应至少为 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，与校准样品的 CTE 值不同。它将确保读数始终良好，因为能很容易的发现任何差异。

建议参考样品应由非腐蚀、非氧化、无孔和非磁性的材料组成，此外，在 $10\sim 50^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，其导热系数应接近混凝土的导热系数。与校准样品的 CTE 相同，参考材料的 CTE 应由独立的实验室测定。在研究中发现钛合金（Ti-6Al-4V）是比较合适的材料，如图 6-1 所示，其 CTE 值在整个温度范围内始终比较稳定，变化幅度小。

验证后，如果发现参考样品 CTE 与认证值相差超过 $0.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，则应采用 T336 中描述的程序再次确定修正系数。

(1) LVDT 的校准：目前的 T336 需要一个千分尺来校准 LVDT。然而，它没有提供任何校准指导，也没有提供校准频率。每 6 个月进行一次校准就足够了。

(2) 样品末端条件：混凝土样品的末端条件可能是某些试验误差的来源。T336 应提供有关最低要求的指导。建议采用 AASHTO T 22-07 对抗压强度样品的相同要求。

(3) 待测样品数量。不应根据单个测试结果确定混合物的 CTE，应提供有关待测样品数量的指导。据推测，至少要测试两个样品并报告平均值，以表征混合物。

10. 分析和建议

通过上述路面混凝土热膨胀系数（CTE）测试中测试方法 AASHTO TP60 重大问题发现和新测试方法 AASHTO T336 制订的全过程回顾，我们从以下几方面做出了分析，并给出相应的建议：

(1) 采用参考样品（或标准参考材料）对测试方法和测试设备进行考核甚至

定期自校、多个实验室之间的比对测试，以及多种测试方法之间的比对测试等，这些都是材料物理性能测试工作中标准测试方法制订和实施的必要手段和过程，是保障测试准确性和稳定性的重要措施，在以往热膨胀系数标准测试方法（如 ASTM E228 等）的制订和实施过程中，都是按照以上过程进行实施。令人费劲的是美国在 AASHTO TP60 测试方法的制订和实施过程中明显缺少这些重要环节，此测试方法的制订和推广应用非常不严谨甚至不严肃，否则也不会发生 AASHTO TP60 在颁布十多年后才发现存在严重缺陷的重大问题。

(2) 尽管 AASHTO T336 针对校准样品规定要在有资质的第三方实验室采用 ASTM E228 或 ASTM E289 在 10~50°C 范围内进行 CTE 测试，并没有规定样品的尺寸大小、控温精度和温度变化形式等细节，而这些细节同样会在 ASTM E228 或 ASTM E289 的测试过程中带来较大误差。如一些采用 ASTM E228 方法的热膨胀仪，测温热电偶为热电偶，那么在 10~50°C 范围内仅热电偶带来的温度测量误差就会达到 10%。另外在样品温度变化形式上，采用台阶式还是线性形式的升降温方式，也会给 CTE 测量带来很大不同，如果采用线性升降温形式，往往会使样品内外存在温度梯度，而台阶式升降温形式则会使得样品在恒温阶段达到整体温度均匀。

(3) 尽管 AASHTO T336 在校准样品的 CTE 值准确性上得到了改进，纠正了 AASHTO TP60 中校准样品 CTE 值的错误，但 CTE 测试的装置并没有丝毫改变，测量装置还是基于校准样品来保证测量的准确性，整体设计思路并没有变。而从 CTE 测试的基本原理出发，几乎所有目前比较常用的 CTE 标准测试方法，除了采用校准样品（基线扣除法）来保证测量准确性之外，更有效的手段是降低测量装置自身热变形对样品 CTE 测量的影响，如 ASTM E228 顶杆法中采用热膨胀系数较低的石英（约 $0.53 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ），或热膨胀系数更低的钛石英（ $0.06 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）来作为样品支架。但在 AASHTO T336 方法中，还在沿用 AASHTO TP60 方法使用金属杆做样品固定支架，有些混凝土热膨胀仪已经做了改进，采用 CTE 约为 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的殷钢做样品固定支架。采用较大 CTE 的金属杆做样品固定支架，因为测试温度范围比较小，基本上能满足目前路面混凝土 CTE 的测试需求。但对于高温和低温环境下使用的混凝土 CTE 测试，再采用金属杆做样品固定支架则明显会带来巨大误差。因此，

今后 AASHTO T336 方法的改进,首先要考虑样品固定支架采用膨胀系数低的材料。

(4) 无论是 AASHTO TP60, 还是 AASHTO T336 方法, 混凝土样品 CTE 的测试温度范围都在 10~50°C。在这样接近室温的条件下, 样品和水浴的温度变化似乎对位移探测器的影响并不大, 在上述两种方法中也没对位移探测器的热防护做出规定。但在高温和低温环境条件下, 位移探测器的热防护问题则显着尤为凸出, 样品温度的大范围变化势必会给固定位移探测器的机械结构带来热变形。同样, 基于更严谨和更准确的目的, 建议在 AASHTO T336 增加上对位移探测器的热防护, 尽可能减少长时间 50°C 水浴温度对位移探测器固定装置的影响。

11. 参考文献

(1) 李清海, 姚燕, 孙蓓. 水泥基材料热膨胀性能测试方法发展现状[J]. 新型建筑材料, 2007, 34(6):10-12.

(2) 黄杰, 吴胜兴, 沈德建. 水泥基材料早期热膨胀系数试验系统现状研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(4):160-166.

(3) Tanesi J, Crawford G L, Nicolaescu M, et al. New AASHTO T336-09 Coefficient of Thermal Expansion Test Method: How Will It Affect You?[J]. Transportation Research Record, 2010, 2164(1): 52-57.