

## 低温混凝土热膨胀系数测试方法研究

Research on Test Method of Thermal Expansion Coefficient of Low Temperature Concrete



摘要：本文针对低温环境，介绍了目前国内外测量混凝土热膨胀系数的标准测试方法，着重介绍低温环境下混凝土热膨胀系数测量的最新中国国家标准测试方法，对国家标准方法提出了改进建议，并介绍符合国家标准测试方法的大尺寸多样品混凝土低温热膨胀仪。

关键词：低温,混凝土,热膨胀系数,测试方法,膨胀仪

## 1. 引言

混凝土作为使用最广泛的建筑材料，它在室温和高温环境下的性能都得到了深入的研究。然而，在低温温度（即低于 $-165^{\circ}\text{C}$ 的温度）环境下混凝土的热物理性能尚未开展系统性研究。目前大多数液化天然气（LNG）储罐都采用了混凝土结构形式，利用混凝土进行 LNG 主要密封的罐体设计将是未来发展的趋势，这将大大降低罐体的建造成本。因此，为了提高混凝土结构 LNG 储罐的安全性和长期耐久性，必须从根本了解混凝土冷却到低温时的行为，而这些了解低温环境下混凝土的努力将集中于控制由于其部件的热膨胀系数引起的热变形和损伤增长的机制，因此准确测量低温环境下混凝土热膨胀系数是液化天然气储罐设计和建造的前提。

本文针对低温环境，将介绍目前国内外测量混凝土热膨胀系数（CTE）的标准测试方法，着重介绍低温环境下混凝土 CTE 测量的最新中国国家标准测试方法，对国家标准方法提出了改进建议，并介绍符合国家标准测试方法的大尺寸多样品混凝土低温热膨胀仪。

## 2. 国内外测试方法介绍

### 2.1. 国内标准测试方法

针对低温环境下的混凝土热膨胀系数测试，我国在 2015 年新制订了国家标准 GB 51081-2015 “低温环境混凝土应用技术规范”。

在 GB 51081 中对低温环境混凝土热膨胀系数的样品规定了应符合现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081，试件应为边长  $100\text{mm}\times 100\text{mm}$

×300mm 的棱柱体，每次检验应在相同条件下制作 12 个试件。

对低温环境下混凝土热膨胀系数测试设备 GB 51081 给出了下列规定：

(1) 低温设备应有同时容纳不少于 6 个试件的有效空间，应满足常温至-197℃ 区间各种温度的施加，应具有自动控温和给出各种降温速率的功能，恒温器件的温度波动范围应在±0.5℃内。

(2) 微变形测量装置应满足各职能过低温下的测量要求，且测量精度不得低于 0.001mm。

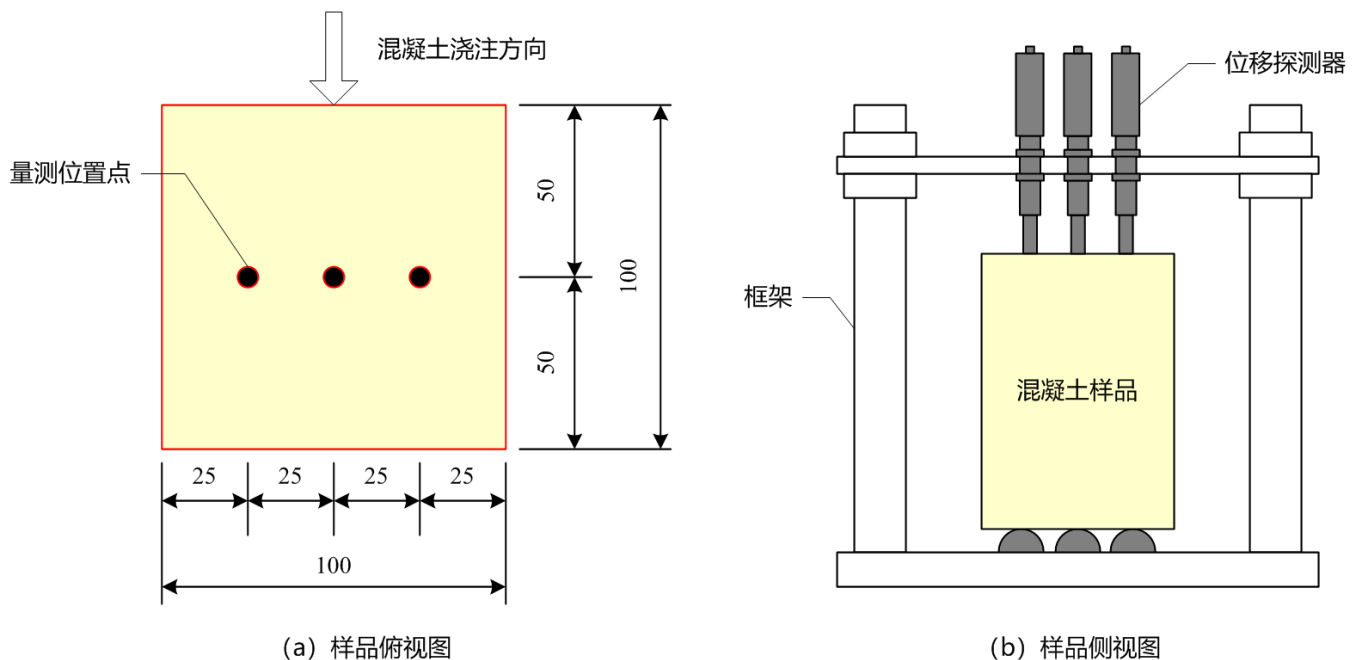


图 2-1 低温混凝土热膨胀系数测试棱柱体样品示意图

在 GB 51081 中对低温环境混凝土热膨胀系数的具体测量方法给出了如下规定：

(1) 试件标准养护应达到设计龄期时取出，并应用湿布擦去表面水分后静置于室内自然环境中。应静置 14 天后进行外观检查和尺寸测量，并将试件分成 2 组，每组 6 个试件。

(2) 应标识热膨胀系数检验棱柱体试件两端面的 3 个测量点位置 (图 2-1)，并应在这 3 个测量位置测量棱柱体试件的长度。

(3) 检验低温  $T_0$  时的低温环境混凝土热膨胀系数，第 1 组试件作用的温度值

应为  $T_1 = T_0 - 10^\circ\text{C}$ ，第 2 组试件作用的温度值应为  $T_2 = T_0 + 10^\circ\text{C}$ 。

(4) 测量第 1 组 6 个试件 3 个测量位置处的棱柱体试件长度后，应将试件全部放于低温设备内，按不高于  $1^\circ\text{C}/\text{min}$  速率降至  $T_1$ ，然后保持温度不变，且恒温器件的温度波动范围应在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  内。低温作用 48 小时后再测量试件 3 个测量位置处的棱柱体试件长度。

(5) 测量第 2 组 6 个试件 3 个测量位置处的棱柱体试件长度后，应将试件全部放于低温设备内，按与第 1 组试件相同的降温速率降至  $T_2$ ，然后保持温度不变，且恒温器件的温度波动范围应在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  内。低温作用 48 小时后再测量试件 3 个测量位置处的棱柱体试件长度。

综上所述，针对低温环境下混凝土热膨胀系数测试设备，国标 GB 51081 只给出了测量温度范围、温度波动大小、样品尺寸、测量位置点和热膨胀变形测量精度的规定，并没有测试设备更详细的内容，这使得很难具体执行国标 GB 51081 并有效保证测量准确性。

## 2.2. 国外标准测试方法

目前国际上并没有针对混凝土及其结构在低温环境下的热膨胀系数标准测试方法，对于液化天然气 (LNG) 储罐采用的混凝土及其结构，美国混凝土协会 (ACI, American Concrete Institute) 制订过相应的标准 ACI 376 (混凝土结构冷冻液化气体容器的设计和构造规范及说明)，其中关于热膨胀系数测试所推荐的标准测试方法是改进后的 CRD-C 39 测试方法。

国外在以往混凝土常温下的热膨胀系数测试中，大多采用的测试方法为 ASTM C531、CRD-C 39、AASHTO T336 和 Protocol-P63，但这些方法在所测试的温度范围基本适用于常温条件下，并不能直接推广应用到低温环境。

在 ASTM C531 中规定了需要在烘干条件下测量 CTE，其中样品长度测量的温度范围为  $22.8\sim 93.9^\circ\text{C}$ ，通过样品长度变化量除以温度变化量来得到 CTE。而 CRD-C 39 中规定了将样品浸入水中 48 小时来达到饱和条件，然后在  $4.4\sim 60^\circ\text{C}$  温度范围内



测量样品长度。在 ASTM C531 和 CRD-C 39 中，样品长度测量都是离线式测量方式，即将达到一定恒温时间的样品从恒温器中取出，并放置在样品长度测量的比较器上。由此可见，ASTM C531 和 CRD-C 39 并不是连续测量热应变来得到热膨胀变化行为。

AASHTO T336 和 Protocol-P63 测试方法也规定了在饱和条件下测试 CTE，测试温度范围为 10~50°C。然而各种混凝土构件，特别是液化天然气 (LNG) 储罐采用的混凝土及其结构的实际应用温度会非常低，因此需要拓展测试温度范围以覆盖低温范围。

因此，对于液化天然气 (LNG) 储罐采用的混凝土及其结构，其热膨胀系数的测试需要重点考虑两方面的因素，一是温度范围的拓展以满足低温测试要求，二是样品要保持一定的湿度然后在低温下进行热膨胀系数的测量。

### 3. GB 51081 标准方法的改进建议

对于低温环境下的混凝土热膨胀系数测试，我国基本上基于 AASHTO T336 标准制订了 GB 51081-2015 “低温环境混凝土应用技术规范”。因此，AASHTO T336 中存在的问题在低温环境下会被放大，从而严重影响测量的准确性。另外，要使得 GB 51081 标准方法真正能推广应用并保证 CTE 测试的准确性，GB 51081 还需要进行重大改进，主要改进建议如下：

(1) 在 AASHTO T336 测试方法中，由于测试温度在 10~50°C 范围内，混凝土 CTE 测量装置中的辅助装置（如承台、导杆、支架等）的影响并不严重，这些辅助装置一般采用 CTE 较小的殷钢等材料制成就能满足要求。而按照 GB 51081 规定，低温环境下的最低温度要达到液氮温度 (-197°C)，在测试温度接近 200°C 这样大的温度变化范围内，CTE 为  $1 \times 10^{-6}/K$  量级的殷钢材料的热胀冷缩影响将非常凸出。这就需要采用 CTE 更小的超低膨胀系数材料制作热膨胀仪的相应辅助装置，同时还需要进行热膨胀仪的基线校准来进一步降低热膨胀仪的系统误差。

(2) 在 AASHTO T336 测试方法中，由于测试温度在 10~50°C 范围内，样品温度变化并不会对 LVDT 探测器带来明显的影响。同样，低温环境下的 CTE 测试，

低温环境就会对安装在室温环境下的 LVDT 探测器产生明显影响，特别是对探测器的支撑板和固定架的温度影响从而带来探测器自身位置的改变。因此，在测试方法中要规定出 LVDT 探测器及其相关装置的温度变化范围，这方面的影响往往是重要的测量误差源。

(3) 在 GB 51081 标准中缺乏校准样品相关条款，建议在 GB 51081 标准中增加与 AASHTO T336 类似的校准样品相关条款，即校准样品的 CTE 测定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 GB 51081 相同的温度范围内进行，即低温要达到 $-197^{\circ}\text{C}$ 。

## 4. 低温环境混凝土热膨胀测定仪设计

为了实现低温环境下混凝土热膨胀系数测试，上海依阳实业有限公司专门设计了一种大尺寸多样品的低温混凝土热膨胀测定仪。混凝土低温膨胀仪一种测试混凝土块体低温下热膨胀系数的测试设备，测量方式为接触方式，整体结构如图 4-1 所示。此低温热膨胀仪依据测试标准为国家标准 GB 51081-2015 “低温环境混凝土应用技术规范”，测试温度范围为室温 $\sim 196^{\circ}\text{C}$ 。

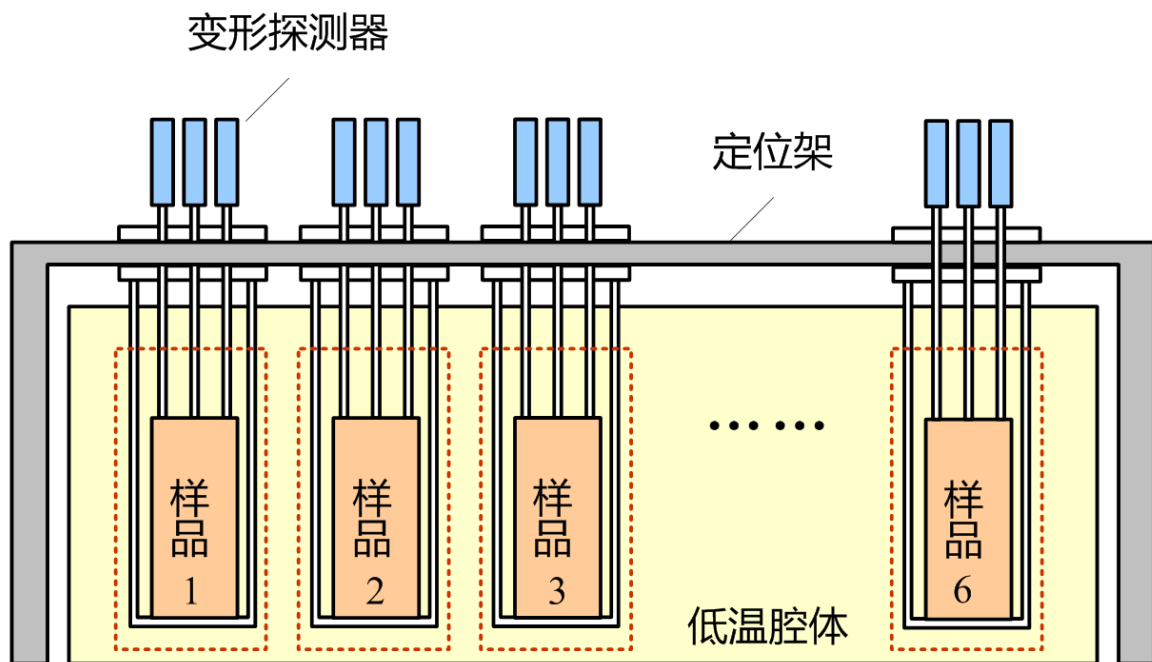


图 4-1 低温混凝土热膨胀系数测定仪结构示意图

此混凝土低温膨胀仪具有测试试样体积大、可多样品同时测量的特点，适合大

批量样品的连续测量。

混凝土低温膨胀仪由计算机进行自动控制和检测，自动进行样品温度的监控、自动进行样品变形量的监控以及自己进行测试结果计算。

按照标准方法规定每个样品需测试三个位置点处的热变形。“低温腔体”采用侧开门结构，开启侧门安装或取出样品，使得被测样品处于“低温腔体”内进行升降温。

## 5. 参考文献

AASHTO TP60, Standard Test Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete, In American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Washington, DC, 2000.

CRD-C 39-81, Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Concrete, US Corps OF ENGINEERS, 1981.

ASTM C531-00, Standard Test Method for Linear Shrinkage and Coefficient of Thermal Expansion of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

