

ICS

F 83

备案号: 57422—2017

NB

中 华 人 民 共 和 国 能 源 行 业 标 准

NB/T 20421.2—2017

核电厂安全重要电缆状态监测方法
第2部分: 压痕模量

The condition monitoring methods of cable important to safety
in nuclear power plants Part 2: Indenter modulus

2017-02-10 发布

2017-07-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 术语和定义 1

3 缩略语 1

4 基本原理 1

5 适用性、重现性及复杂性的要求 1

 5.1 概述 1

 5.2 适用性 2

 5.3 重现性 2

 5.4 复杂性 2

6 测量程序 2

 6.1 聚合物材料性能的稳定 2

 6.2 取样和测量位置 2

 6.3 测量的条件 3

 6.4 仪器 3

 6.5 校准和偏差 4

 6.6 测量点的选取 4

 6.7 压针移动速度及最大力值的选取 4

 6.8 夹具 4

 6.9 压痕模量值的计算 4

 6.10 报告 5

附录 A（资料性附录） 影响压痕模量值变化的因素 6

附录 B（资料性附录） 实验室压痕模量测量报告示例 10

参考文献 11

前 言

NB/T 20421《核电厂安全重要电缆状态监测方法》分为5个部分：

- 第1部分：总则；
- 第2部分：压痕模量；
- 第3部分：断裂伸长率；
- 第4部分：氧化诱导技术；
- 第5部分：光时域反射。

本部分为NB/T 20421的第2部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分由能源行业核电标准化技术委员会提出。

本部分由核工业标准化研究所归口。

本部分起草单位：中广核核电运营有限公司，苏州热工研究院有限公司，中国核电工程有限公司，核动力运行研究所，上海核工程研究设计院。

本部分主要起草人：周凌波、孙强、刘志强、刘斌、高超、朱斌、袁炜、张益舟、赵鹏宇、陈磊。

核电厂安全重要电缆状态监测方法 第2部分：压痕模量

1 范围

NB/T 20421的本部分规定了采用压痕模量对核电厂安全重要电缆进行状态监测的要求,包括试样选择、测量系统、测量条件以及测量结果报告。

本部分适用于有机或聚合物材料结构的核电厂安全重要电缆,也适用于含有机或聚合材料的其他设备。

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.1

压痕模量 indenter modulus (IM)

所施加外力的变化量与标准形状压针(压头)在材料中的位移(压痕深度)之比。

注:“模量”通常指材料的弹性模量,其定义为材料在受力状态下,应力和应变之比,其单位为 N/m^2 (Pa)。然而,在压头的实际应用中,压痕模量通常用以描述对材料施加的应力变化量和材料变形之比,其单位为 N/mm 。

3 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CSPE: 氯磺化聚乙烯 (Chlorosulphonated Polyethylene)

DBE: 设计基准事件 (Design Basis Event)

EPDM: 三元乙丙橡胶 (Ethylene Propylene Diene Monomer)

SiR: 硅橡胶 (Silicone Rubber)

XLPE: 交联聚乙烯 (Crosslinked Polyethylene)

4 基本原理

典型压痕模量仪通常带有恒定速率压入材料的压针和连接压针的测力装置。压针以恒定速率压入材料,而测力装置则测量保持恒定速率所需力的大小。压针的位移通过一个匹配的传感器测量。位移和力的大小应限制在一个合理范围内,以保证材料在过程中不受到永久性伤害。

5 适用性、重现性及复杂性的要求

5.1 概述

当有机或聚合物材料老化时，材料通常会硬化，从而导致压痕模量增大。但有些材料，如某些配方的丁基橡胶，在热老化或辐照老化期间会软化。监测压痕模量变化的目的是用来评估材料因老化而导致的性能降质速度和程度。

5.2 适用性

压痕模量测量在电缆的护套或绝缘上进行。在测量时应根据试样的几何形状选取对应的夹具。

压痕模量测量方法仅适用于由老化所产生的硬度变化为单调性的材料。

压痕模量测量时应尽量采取不破坏电缆整体性的方式进行。然而，现场设备的压痕模量测量过程中允许压针或为取得合适测量点的处理所造成的损伤，损伤须在控制范围内。

现场对电缆的压痕模量测量通常只能在护套材料上进行。若已知护套材料的老化与绝缘材料老化之间的关系，则可通过测量护套的压痕模量变化来评价电缆绝缘的老化状况，前提是护套材料与绝缘材料之间老化关系是验证有效的，且在电缆寿命内具有足够灵敏度，从而保证对电缆的状态监测是有效的。

5.3 重现性

压痕模量受很多因素影响，主要包括试样的尺寸和结构，试样的温度和水分含量，试样稳定性以及试样的维护情况。如果在外部振动的环境下进行测量，测量值也会受到影响。在电缆上的测量容易受到试样尺寸和结构的影响，如测量点可能恰好位于下方存在间隙的护套表面处。典型的电缆截面明显不同于一个理想软管模型，测量点位置的不同会导致压痕模量测量值有差异。沿长度方向不同部位测量值有差异，测量中应在电缆上取多个点以补偿修正此局限性。附录A.1说明了试样尺寸和结构的不同导致测量结果有差异。

注：对设备结构的了解对于测量点的选择非常重要。在松散结构的电缆测量过程中，测量结果通常较为分散，此时测量点应选在护套紧贴导体的位置，而应避开护套下方有间隙的位置。

5.4 复杂性

现场压痕模量测量的复杂程度通常取决于电缆是否便于接触。现有仪器一般用于现场方便接触的电缆，在此情况下，短时即可完成大量位置点的测量并可通过仪器设置直接生成并储存大量测量数据。对于具有较复杂几何结构和难以接触的电缆，此时测量可能需要开发特殊的固定夹具。重复的压痕模量测量工作应使用相同的夹具。

6 测量程序

6.1 聚合物材料性能的稳定

在状态监测或加速老化试验之前，新制造电缆的材料需要一段合适的时间来保证性能已达到稳定状态，材料性能稳定所需时间一般取决于工艺助剂和聚合物成分，此段时间为材料性能的稳定周期。制造商无法提供材料的稳定周期，则一般将稳定周期设定为6个月。

6.2 取样和测量位置

从现场取样在实验室进行压痕模量测量和直接在现场进行压痕模量测量都只能表明特定位置电缆的状态信息。采用现场测量时，对现场具有代表性区域运行环境的了解是选择现场测量点的前提条件，因为在最接近热源、辐射源的部位热效应、辐照效应最为明显，因此测量点应考虑选择热源和辐射源附近有显著老化影响的试样部位，测量中应记录试样测量部位的位置及该部位的历史运行环境信息。

取样和测量过程中应遵循现场安全指示，保证现场人身及设备安全。测量时或从现场移动试样时对电缆的动作应尽可能小，如不应为测量或是移动试样而过分弯曲电缆。

6.3 测量的条件

待测量的试样需进行表面清理。现场一般可通过干擦去除试样表面的灰尘杂质，以防压痕模量测量仪器受到污染。在任何情况下都不得用溶剂进行表面清洁。

如附录A所示，压痕模量测量值会随试样温度和水分含量的变化而变化。

实验室中进行压痕模量测量时，如在加速热老化试验后，环境温度应控制在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度应控制在45%~75%。在测量开始前，试样需在实验室放置一段时间以使其与环境温湿度达到平衡。

注：对于吸湿性材料，其长期在老化箱的高温中进行加速热老化试验后，材料会变得极其干燥，此时压痕模量值会明显高于在正常实验室环境中试样与环境温湿度达到平衡时测量的压痕模量值。在对吸湿性材料的状态监测中，一般试样接受DBE测试之前会进行加速热老化试验，而压痕模量的最终测量值将作为其合格与否的重要判据，因此对于吸湿性材料试样在进行压痕模量测量前使其与环境温湿度达到平衡就显得非常重要和必要。附录A.3提供了具体处理这种情况的指导。

在现场测量时一般较难具备标准大气条件，应记录周围环境的温度和试样表面的温度。

注：附录A.2提供了在不同温度下测量的压痕模量值折算成标准温度（ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）下压痕模量值的方法，测量报告应记录测量值及 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的折算值。

6.4 仪器

压痕模量仪的工作原理为，仪器压针被驱动以恒定速率压入待测材料时，与其连接的测力元件或类似装置测量其所受到的力。压针应为截头钢锥的形状，几何尺寸见图1。压针的位移通过匹配的传感器测量，根据力的变化来感知压针的顶端与材料的接触程度。压针的总位移通常设置为1 mm以内，以避免材料发生永久变形，同时保证在该区间内力与位移的近似线性关系。测量过程中压针移动速度和加载的力都应较小，避免压针对材料造成永久性影响，具体选择见6.7。

注：尽管总位移受到限制，但部分材料力与位移之间的关系仍然是明显非线性的。

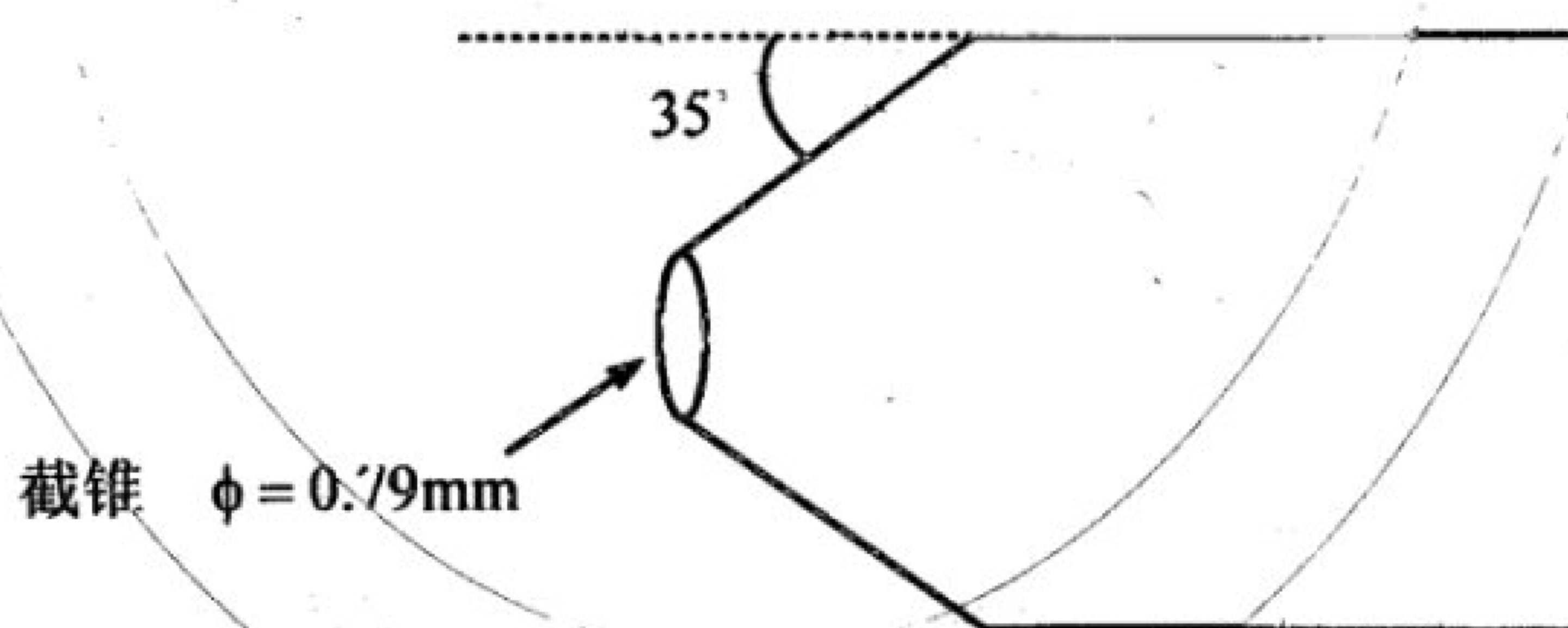


图1 压痕模量仪压针尺寸及形状的示意图

典型的压痕模量仪是一个手持式圆柱型仪器。采用合适的夹紧装置能够安全地固定电缆或电线，以便压针可以均匀地分别压入护套或绝缘。压针在仪器内连接着一个灵敏的测力元件。一台伺服控制电机配合相应齿轮减速箱提供驱动压针向试样移动的动力，压针的位置通过传感器测量。温度传感器安装在夹紧装置附近。电机的功率、伺服控制、测力元件、变送器和温度传感器的输出均由电线反馈至单独的控制单元。该控制单元可以直接连接到计算机或是其他可以实现计算机远程下载的数据储存设备。压针速率、最大力值、位移等参数必须在测量前完成预先设置。压痕模量仪的电缆夹具一般设计成可调节的，以便允许使用千分尺及适当的力和压针位移来实现仪器校准功能。

6.5 校准和偏差

压痕模量仪和测量系统应在每批次测量前按照制造商的说明进行校准,力值传感器和压针移动速度都应校准。力值测量的总偏差,包括仪表公差和读数误差,应在力值最大量程的3%以内。压针移动速度应是恒定的,与要求速度的总测量偏差应低于2%。

6.6 测量点的选取

现场测量时所选取的每个部位,应进行多点测量并记录平均值及标准差,如取点数多于7个,应去掉最高值和最低值后计算平均值和标准差。对电缆上的测量,应至少沿长度方向取三个部位,每个部位围绕圆周方向最少取三个点。当受到空间和试样尺寸限制,无法围绕圆周方向取点时,应每隔60 mm~100 mm距离沿电缆长度方向最少取9个点。

实验室测量电缆试样时,应至少沿长度方向取三个部位,每个部位围绕圆周方向最少取三个点,所有的测量点距离试样端部距离都不应小于100 mm。

6.7 压针移动速度及最大力值的选取

在测量开始前,应在测量系统中设定试验参数。特别是应设置好所允许的最大力值及最大位移值以避免被测电缆的损坏。

压针移动速率对压痕模量的测量值有明显影响。压针移动速率应在5.0 mm/min~5.2 mm/min之间,并记录测量中选取的压针移动速率。

所选择的最大力值应确保压痕深度在位移测量分辨范围内,同时避免压针损坏电缆。对于大部分聚合物材料,推荐的最大力值为10 N,一般会使压针压入深度明显小于1 mm。对于某些特定的绝缘材料,如SiR,要求最大力值小于10 N以避免压针过度压入。

6.8 夹具

在电缆上进行测量时,压痕模量的测量值可能会明显受到电缆夹紧力的影响。为了减少这种影响,应采用最小的夹紧力来固定电缆。夹具使用的异常状况应被记录。

6.9 压痕模量值的计算

压痕模量值为力-位移曲线的斜率,单位为N/mm。

$$IM = (F_2 - F_1) / (d_2 - d_1) \dots\dots\dots(1)$$

式中:

IM ——压痕模量值,单位为牛顿每毫米(N/mm);

F_i ——位移为 d_i 时对应的力值,单位为牛顿(N);

IM 应由 $F_1=1$ N和 $F_2=4$ N来确定,见图2。

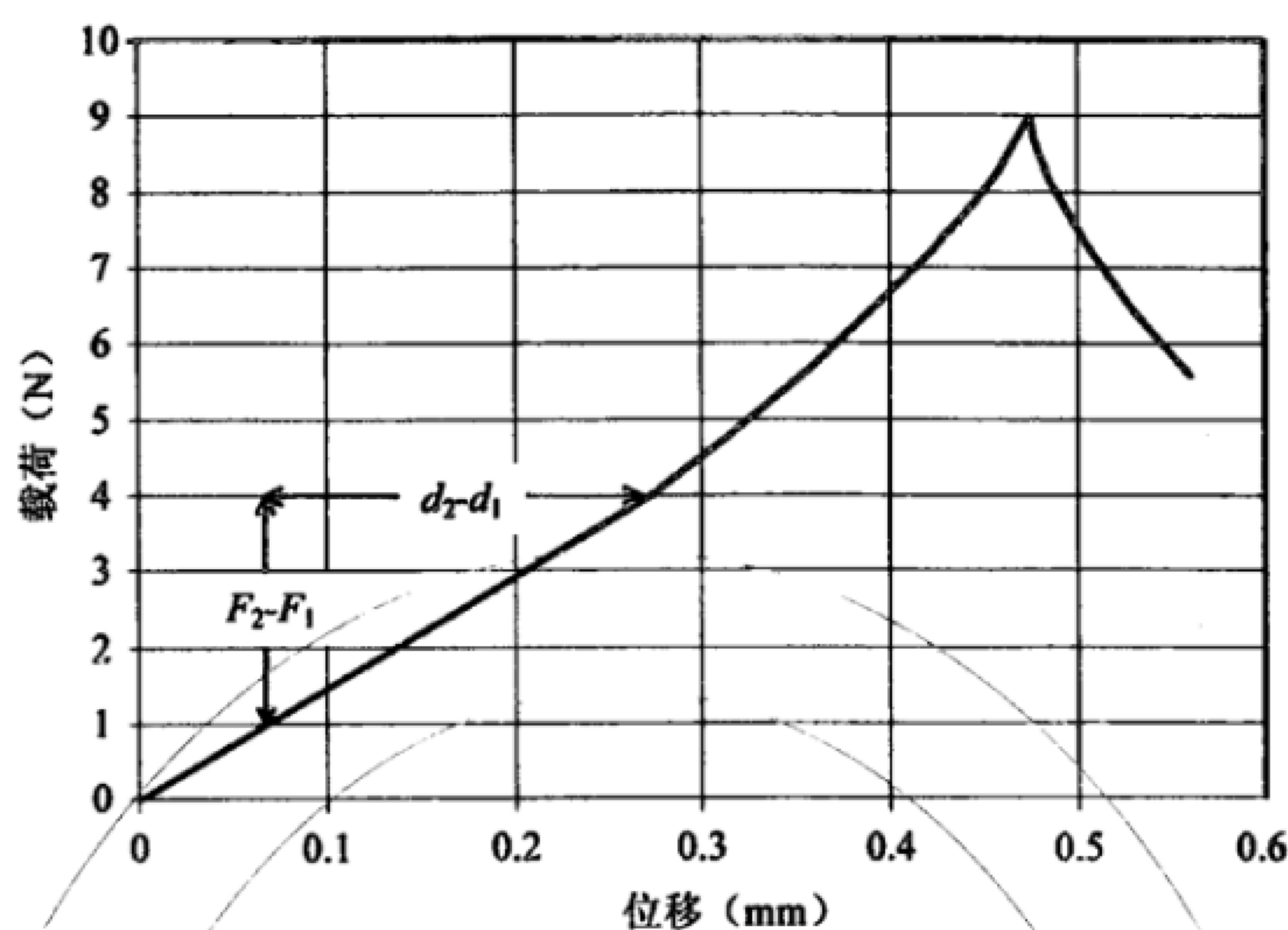


图1 图2 压痕模量值的计算

6.10 报告

压痕模量测量报告应最少包括以下条目：

- 被测量对象，包括试样材质、结构。如从现场取样或是现场测量时应包含其靠近热源和辐射源的部位（见 6.2）；
- 被测对象的历史数据，包括：
 - 新（未老化）试样的压痕模量测量：从制造到开始测量的储存和时间信息（见 6.1）；
 - 模拟老化后试样的压痕模量测量：试样的老化信息；
 - 自然老化后试样的压痕模量测量（例如，现场测量）：试样所处的历史环境信息（见 6.2）；
- 测量的地点和日期（实验室，现场）；
- 对于模拟老化试验后在实验室测量的试样：从试验箱中取出试样到开始测量的时间间隔（见 6.3）；
- 测量时的环境温度和试样表面温度（见 6.3）；
- 其他在测量中可能影响到结果的现场条件及情况；
- 测量仪器型号，包括计算软件版本（见 6.4）；
- 校准情况（见 6.5）；
- 测量点的部位分布（见 6.6）；
- 压针移动速度（见 6.7）；
- 最大力值（见 6.7）；
- 试样安装及夹紧时夹具使用及异常（见 6.8）；
- 对于现场测量：观察测量前后试样的状态（见 6.2）；
- 以 N/mm 为单位的压痕模量平均值和标准差（在去掉最高与最低值后）以及确定的应力范围（通常为 1 N~4 N）（见 6.6、6.7 和 6.9）；

注：如果压痕模量测量是在高于 25 ℃ 条件下进行，建议折算成 20 ℃，折算值应被记录（见附录 A）

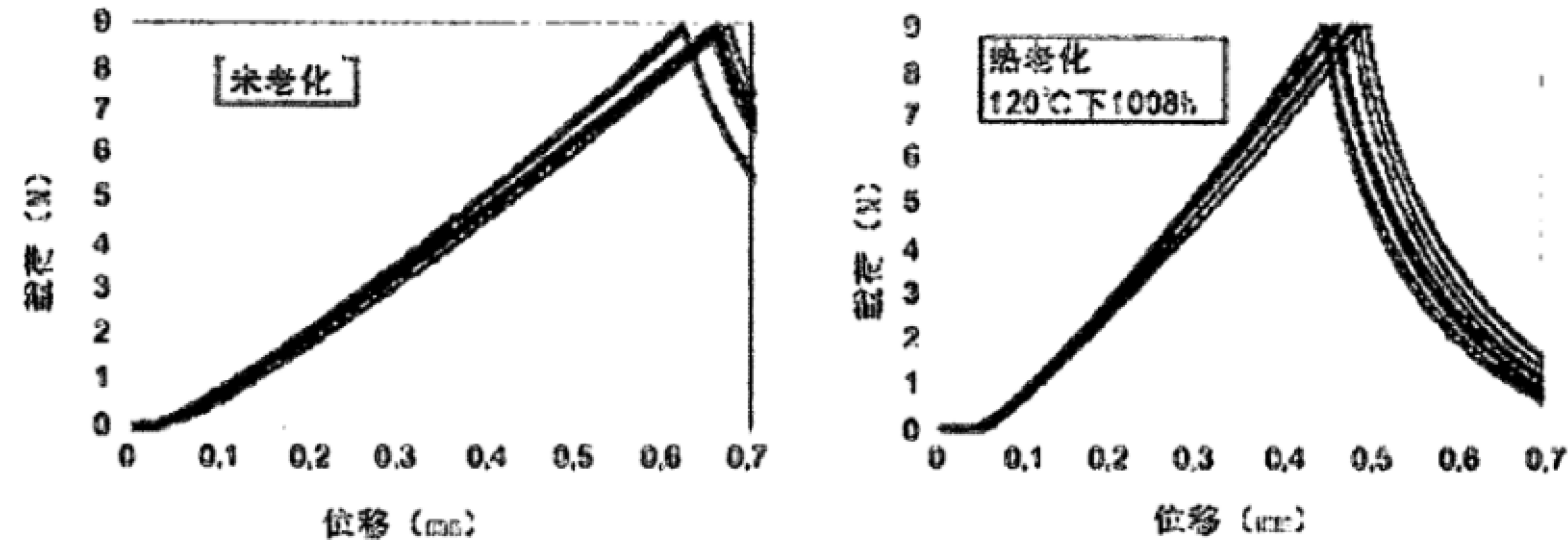
- 力—位移曲线图；
- 其它关系到测量结果的重要解释信息。

附录 B 中提供了一个实验室测量报告的示例。

附录 A
(资料性附录)
影响压痕模量值变化的因素

A.1 尺寸和结构不同的影响

图A.1说明了由于试样尺寸和结构不同所导致的压痕模量值的差异。图中记录了在护套材料为CSPE、绝缘材料为EPDM的7芯电缆护套上进行8个点的压痕模量测量所得到的一组数据。未老化电缆护套的压痕模量平均值和标准差分别是15.57 N/mm和0.58 N/mm，热老化后电缆护套的压痕模量平均值和标准差分别是23.21 N/mm和1.06 N/mm。



图A.1 试样尺寸和结构不同对压痕模量测量的影响

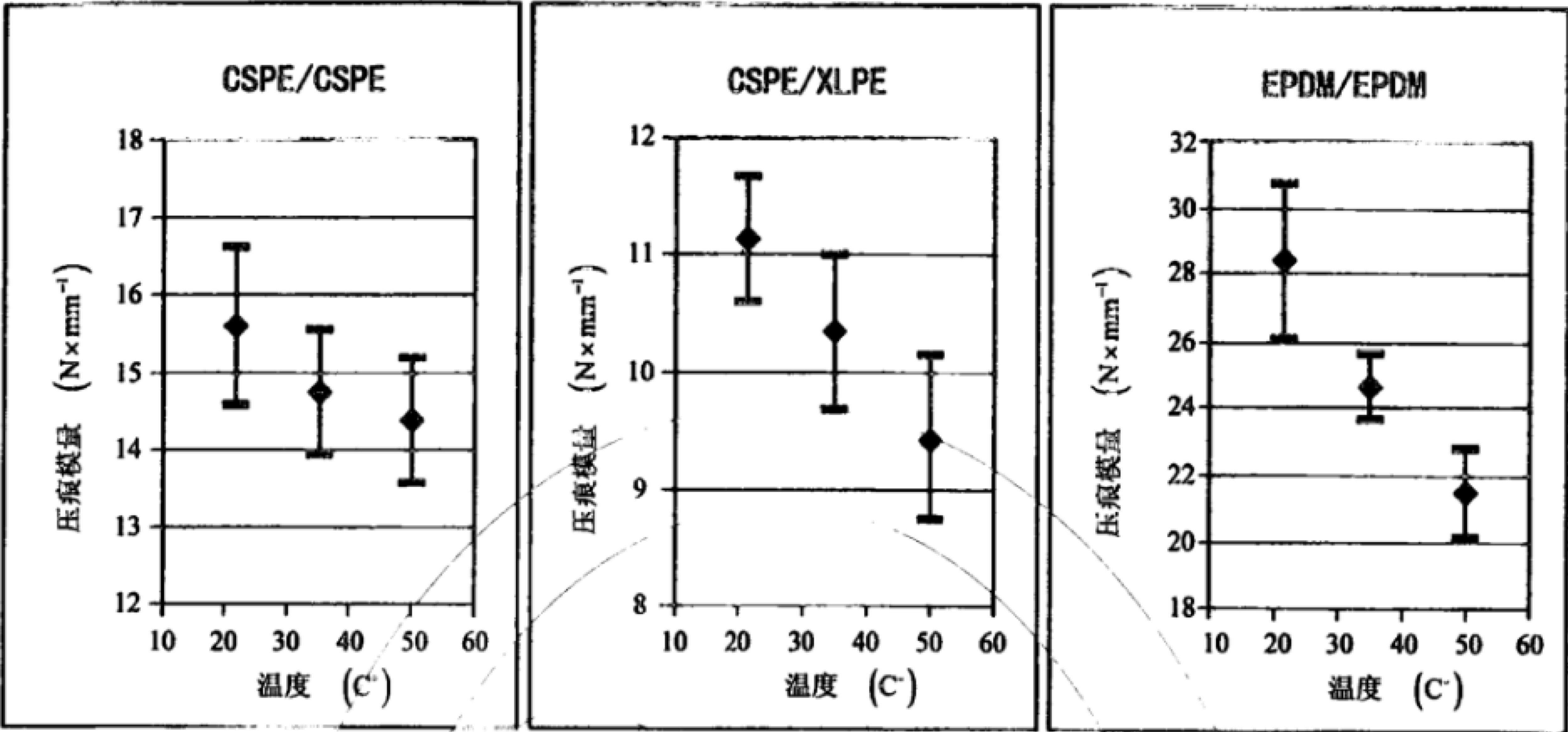
A.2 温度的影响

这些例子来自一个对压痕模量值受温度影响的研究，研究对象为经热老化后的三种型号电缆。

- 护套和绝缘材料均为CSPE；
- 护套材料为CSPE，绝缘材料为XLPE；
- 护套和绝缘材料均为EPDM。

测量在护套的9 (3×3) 个点上进行，压痕模量值由 (1 N—4 N区间) 力—位移曲线的斜率得到。所有的电缆都在120 ℃下进行48 d的热老化。测量在温度21 ℃，35 ℃，50 ℃下进行。

图A.2以压痕模量平均值和标准差的方式显示结果。



图A.2 不同温度下测得的压痕模量值

结果表明了压痕模量测量值受温度的影响。

当压痕模量测量值不是在标准试验温度 t_{ref} (20℃) 下测得时，可以折算成在标准试验温度下的值。折算公式为经验公式，见公式A.1：

$$IM_{ref} = [1 + A \times (t - t_{ref}) / (t_1 - t_2)] \times IM_t \dots\dots\dots (A.1)$$

$$A = (IM_2 - IM_1) / [(IM_2 + IM_1) / 2] \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

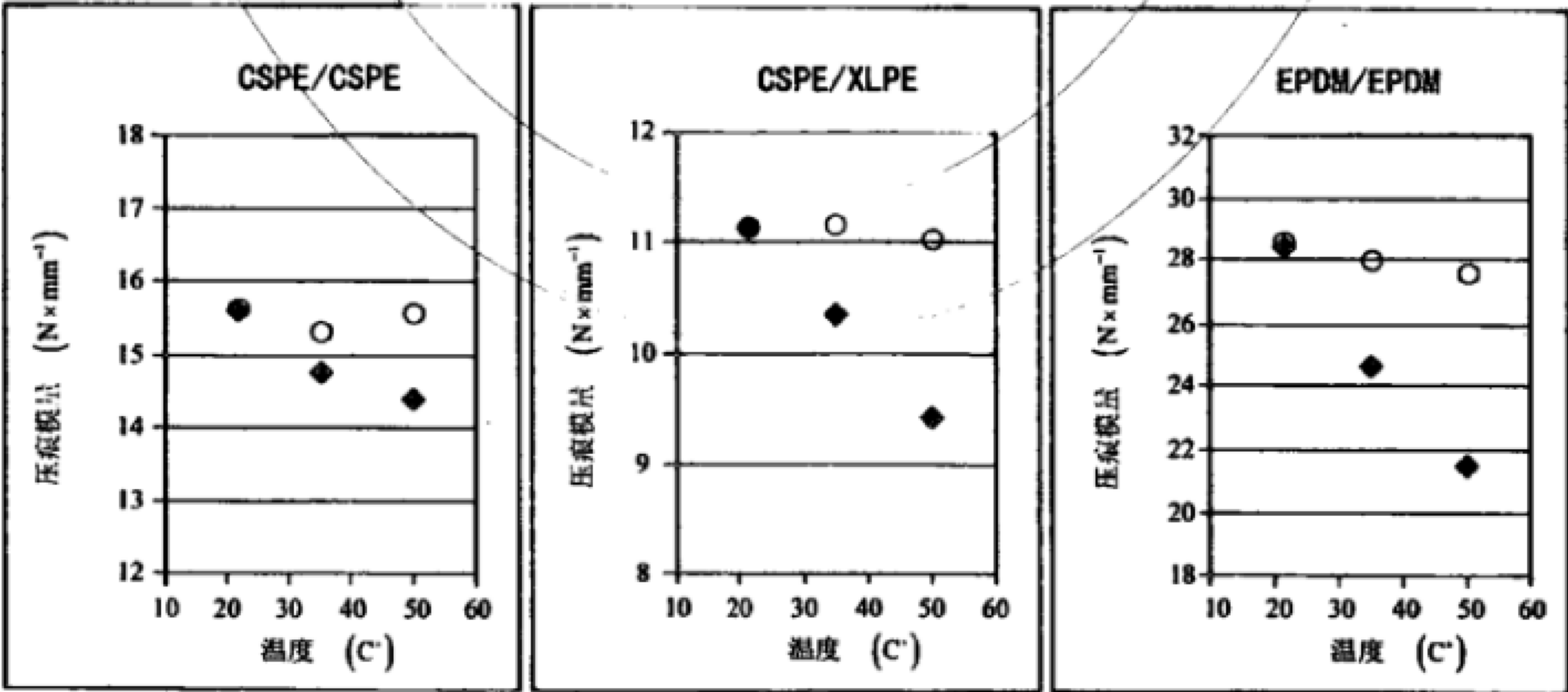
t ——现场测量时的温度，单位为摄氏度 (℃) ；

IM_t ——温度 t 下对应的IM值，单位为牛顿每毫米 (N/mm) ；

IM_1 和 IM_2 ——同一材料在实验室不同温度 t_1 和 t_2 下分别测得的压痕模量值，单位为牛顿每毫米 (N/mm) ；

t_1 ——一般取区间内接近现场温度的最大值， t_2 一般取20℃附近。

图A.3将图A.2中的平均值根据公式A.1进行了折算。



注：菱形代表所测量的值，圆形代表折算后的值。

图A.3 折算后的压痕模量平均值

折算公式适用于20℃~50℃区间的测量值。

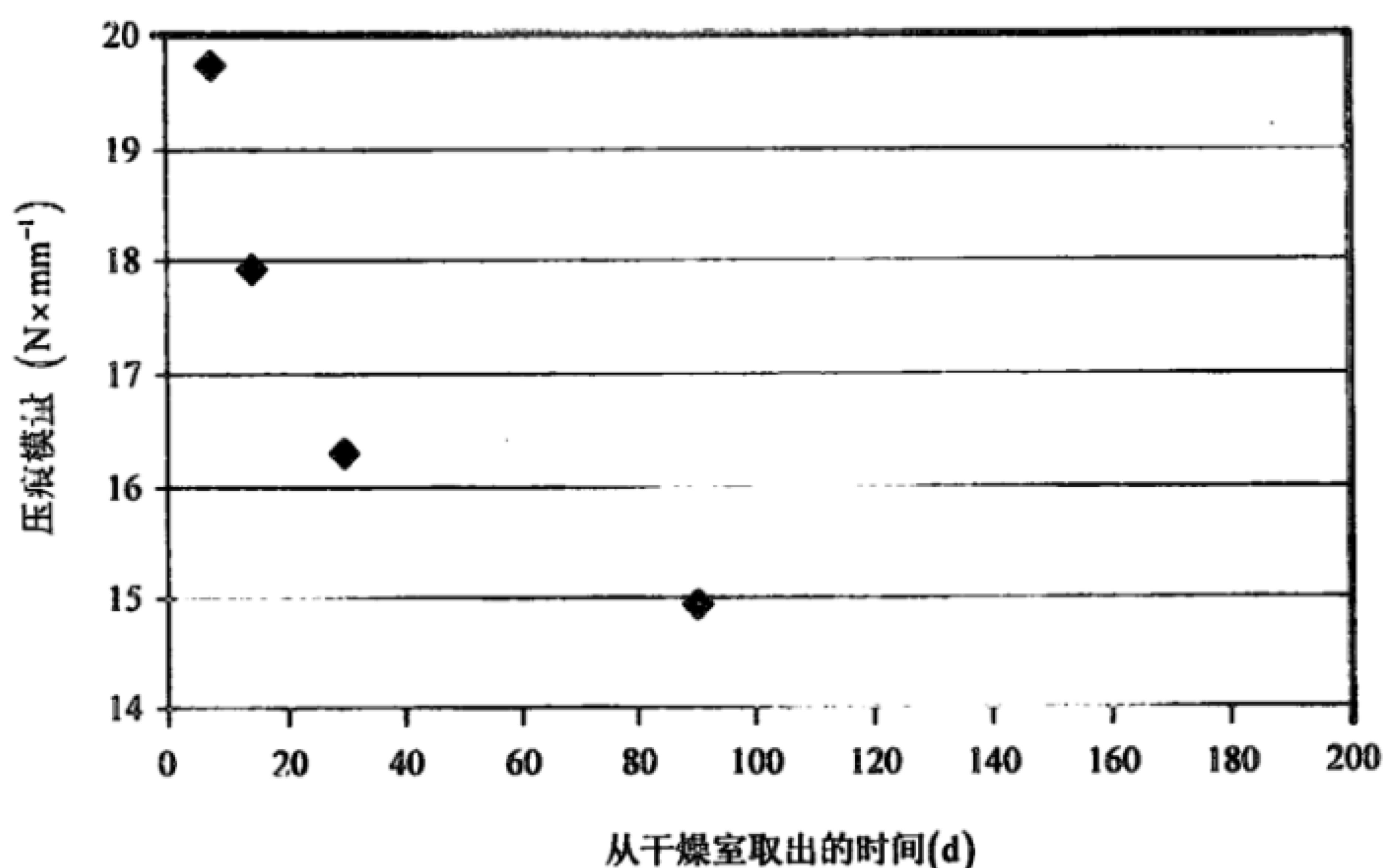
建议测量方式如下：

——如现场允许，在标准试验温度20℃下，试样性能稳定后再进行压痕模量测量。

——如果测量现场环境温度高于标准试验温度条件（如设备鉴定要求的环境条件），建议事先得出两个温度下的压痕模量值相关系数A（一个为实验室温度，一个为现场测量的最高温度）。该步骤应在设备鉴定加速老化试验后进行，并作为初始鉴定试验的一部分。

A.3 高温老化后的干燥对压痕模量测量的影响

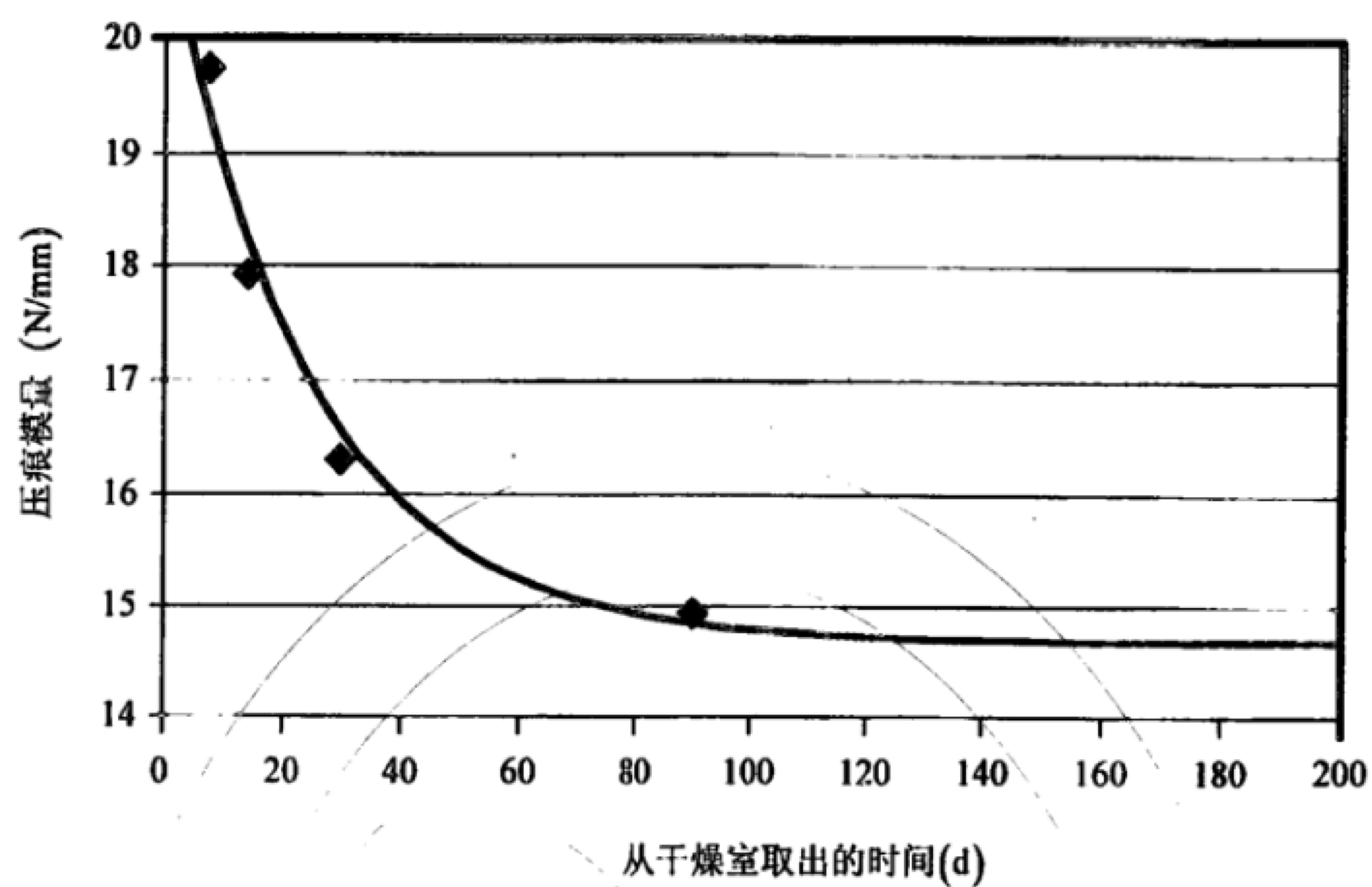
目前安全壳内使用的大多数有机和聚合物材料不具有明显的吸湿性。如果使用具有吸湿性的材料，则材料的水分含量对压痕模量值的影响会很明显。图A.4列举了一个吸湿性材料压痕模量随水分含量变化而变化的例子。该例显示了从进行模拟老化（120℃，46 d）的干燥室中拿出后压痕模量值的变化。变化的原因为材料在实验室环境放置过程中逐渐恢复了正常的水分含量。



图A.4 吸湿性试样从进行模拟老化的干燥室中取出后压痕模量值的变化

如图A.4所示，干燥后的吸湿性试样在实验室恢复水分稳定需要很长一段时间，而给予足够时间来让试样在设计基准条件下达到水分平衡是不现实的，实际上一般将一个试样用于加速老化下压痕模量-时间的测量，而其它试样在模拟DBE条件下进行。得到的曲线，如图A.4一样，可以被用于估测在正常湿度下的压痕模量值，这个值可作为鉴定状态的合格指标。

通过采用拟合的衰减曲线，实验室湿度条件下的压痕模量值可以被估测，如图A.5所示。



图A.5 图 A.4 中测得的压痕模量值所绘制衰减曲线

注：衰减曲线表达式为 $Ae^{-kt} + B$, 其中 t 表示推移的时间。在实验室环境下恢复水分含量后的压痕模量估计值为 14.7 N/mm。

附录 B
(资料性附录)
实验室压痕模量测量报告示例

该示例来自IAEA电缆老化合作研究项目一部分中的循环测试程序,详见表B.1和图B.1。

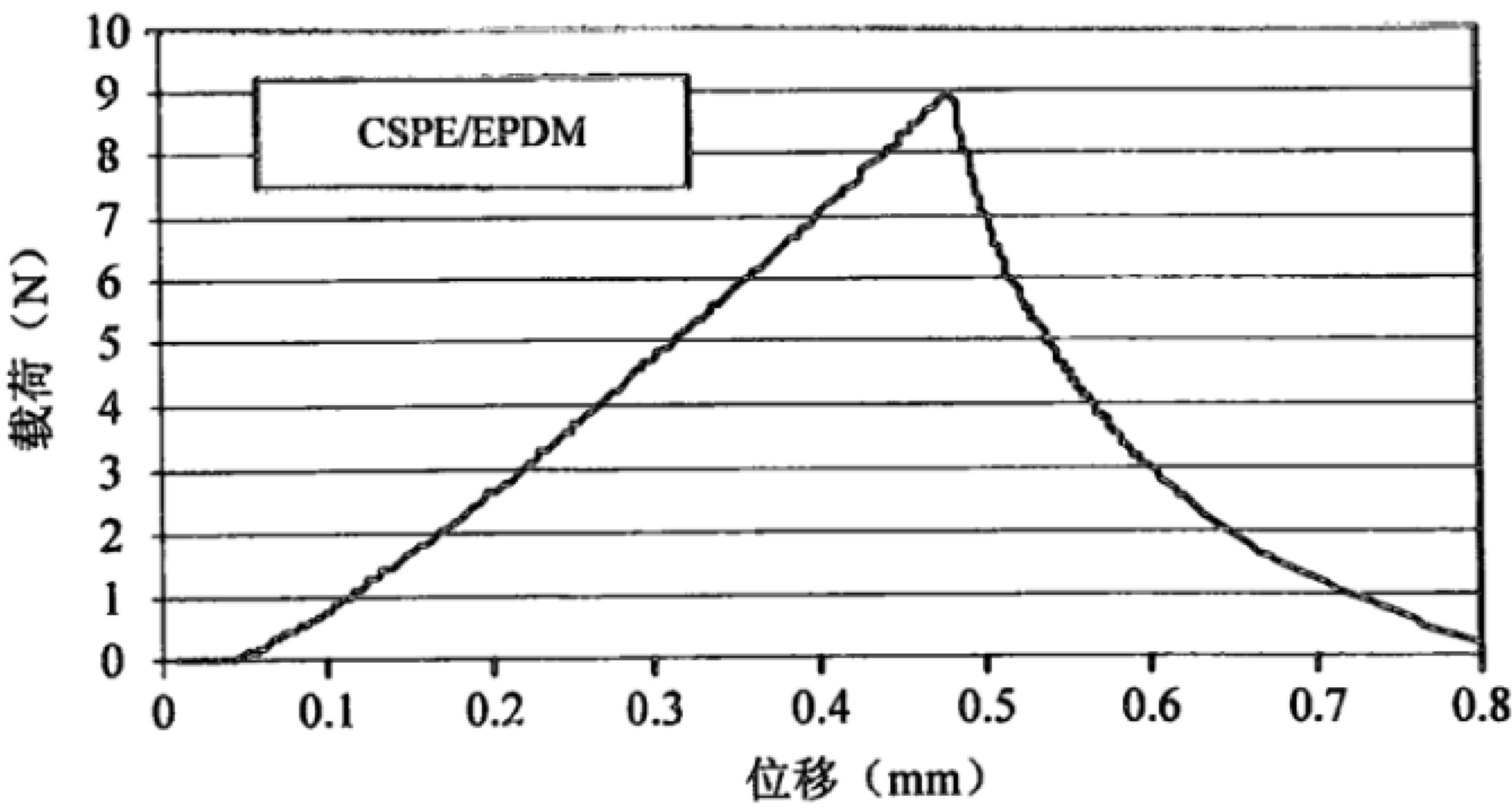
表B.1 压痕模量测量报告

设备号	274电缆 FSSR 7×1
材料	护套: CSPE(2mm)—蓝色。绝缘层和导体: 7芯EPDM绝缘绞合铜导体—灰色 (0.7mm)
历史	试验箱中模拟老化。方法: IEC 60068 Ba测试。老化条件: 120 °C下42 d
测量日期和地点	1998年2月2日韦斯特罗斯ABB原子实验室
测量条件	从试验箱中取出到压痕模量测量之间的时间: 大于30 d 测量时温度: 21.5 °C 测量时湿度: XXXX
仪器	OGDEN CI 96100007
校准	测量之前参考仪器生产厂家的说明书。应力使用砝码校准, 压针速度校准使用秒表。 见校准报告 (NO XXX)。
测量点	三个横截面沿护套圆周方向取三个点
压针前进速度	5.162 mm/min
最大力值	9 N
安装	仪器厂商提供保证电缆固定的最小力。使用大型夹具。
压痕模量	平均值23.39 N/mm; 标准差0.99 N/mm。 (删除最大值和最小值之后)

签字: XXX

日期: XXX

测量绝缘线芯 (单独老化) 上的8个点, 测量结果显示平均值为29.35 N/mm, 标准差为2.34 N/mm。



图B.1 力—位移的例子

参 考 文 献

- [1] IEC 60544-5 Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation Part 5: Procedures for assessment of ageing in service
- [2] IEC 60780 Nuclear power plants – Electrical equipment of the safety system – Qualification
- [3] IEC 62582-1 Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Electrical equipment condition monitoring methods – Part 1: General
- [4] IAEA-TECDOC-1188: 2000 Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment instrumentation and control cables, IAEA, Vienna
- [5] IEEE Std 323: IEEE Standard for qualifying Class 1E equipment for nuclear power generating stations
- [6] JNES-SS-0903-2009 The final report of the project “*Assessment of cable ageing for nuclear power plant*”
- [7] NUREG/CR-6704, Vol. 2 (BNL-NUREG-52610) Assessment of environmental qualification practices and condition monitoring techniques for Low-Voltage electric cables, condition monitoring test results

中 华 人 民 共 和 国
能 源 行 业 标 准
核电厂安全重要电缆状态监测方法
第 2 部分：压痕模量
NB/T 20421.2—2017

*

核工业标准化研究所出版发行
北京海淀区骚子营 1 号院
邮政编码：100091
电 话：010-62863505
原子能出版社印刷
版权专有 不得翻印

*

2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷
印数 1—50 定价 32.00 元