

ICS 19.020
K 04

DB53

云南省地方标准

DB53/T 981—2020

复合绝缘子伞套硅橡胶陷阱电荷量和 陷阱能级的热刺激电流测试方法

2020 - 04 - 26 发布

2020 - 07 - 26 实施

云南省市场监督管理局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 热刺激电流测试装置	2
5 试样准备和测量步骤	3
6 热刺激电流设备校验	5
7 试验报告	6
附录 A（资料性附录） 测试参数选取建议	8
附录 B（资料性附录） 测量报告实例	12

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。
本标准由云南省电力装备标准化技术委员会（YNTC09）提出并归口。

本标准起草单位：云南电网有限责任公司电力科学研究院、华北电力大学、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、重庆普尔斯科技有限公司、上海交通大学、云南电网有限责任公司、云南电网有限责任公司大理供电局、云南电网有限责任公司德宏供电局、中国南方电网超高压输电公司昆明局、云南电网有限责任公司昭通供电局、云南电网有限责任公司楚雄供电局、云南电网有限责任公司文山供电局、上海鸿岩机械科技有限公司、云南电网有限责任公司昆明供电局、大唐云南发电有限公司、中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司、景森设计股份有限公司昆明分公司、昆明电器科学研究所、云南电力技术有限责任公司、云南电网有限责任公司红河供电局、广东电网有限责任公司电力科学研究院、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司曲靖局、云南电网有限责任公司临沧供电局、中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司。

本标准主要起草人：彭庆军、屠幼萍、王聰、周仿荣、马仪、钱国超、周兴梅、袁之康、姜雄伟、谭坚文、吴建东、沈志、黄修乾、李国彬、浦仕遵、刘劲松、杨和刚、高波、段军鹏、冯跃、冯锋锋、徐家勇、李晓婷、潘晓娟、洪志湖、杨阿娟、廖圣、青言、周原、聂建高、陆佳琪、敖翔。

复合绝缘子伞套硅橡胶陷阱电荷量和陷阱能级的热刺激电流测试方法

1 范围

本标准规定了电力工程中使用热刺激电流法测试高海拔地区复合绝缘子伞套硅橡胶材料陷阱电荷量和陷阱能级的术语和定义、热刺激电流测量装置、测试步骤、设备校验和试验报告等内容。

本标准适用于发电、输变电、配电等高海拔地区复合绝缘子伞套硅橡胶材料陷阱电荷量和陷阱能级的测量。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分:一般定义及试验要求

GB/T 19519 架空线路绝缘子标称电压高于1000V交流系统用悬垂和耐张复合绝缘子定义、试验方法及接收准则

GB/T 22079 标称电压高于1000V使用的户内和户外聚合物绝缘子一般定义、试验方法和接收准则

DL/T 626 劣化悬式绝缘子检测规程

DL/T 741 架空输电线路运行规程

DL/T 810 ±500kV及以上电压等级直流棒形悬式复合绝缘子技术条件

DL/T 1000.3 标称电压高于1000V交流架空线路用复合绝缘子使用导则 第3部分:交流系统用棒形悬式复合绝缘子

3 术语和定义

GB/T 16927.1、GB/T 19519、GB/T 22079、DL/T 626、DL/T 741、DL/T 810和DL/T 1000.3界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

热刺激电流

以热能作为活化能,在不同温度下激发电介质中的空间电荷形成的微电流,称为热刺激电流。

3.2

热刺激电流法

测试并获得热刺激电流的方法。

3.3

空间电荷

材料中积聚的电荷。

3.4

陷阱

陷阱是能够对电荷产生束缚作用的定域态或局域态。

3.5

陷阱电荷量

被陷阱捕获的电荷总量。

3.6

陷阱能级

杂质或缺陷在聚合物的禁带中入陷所构成陷阱的能级。

4 热刺激电流测试装置

4.1 概述

热刺激电流测试系统应由直流加压系统、温控系统、监测和采集系统、测试腔体四部分组成。为避免加压时发生闪络，可加入真空系统。测试系统结构如图 1 所示。

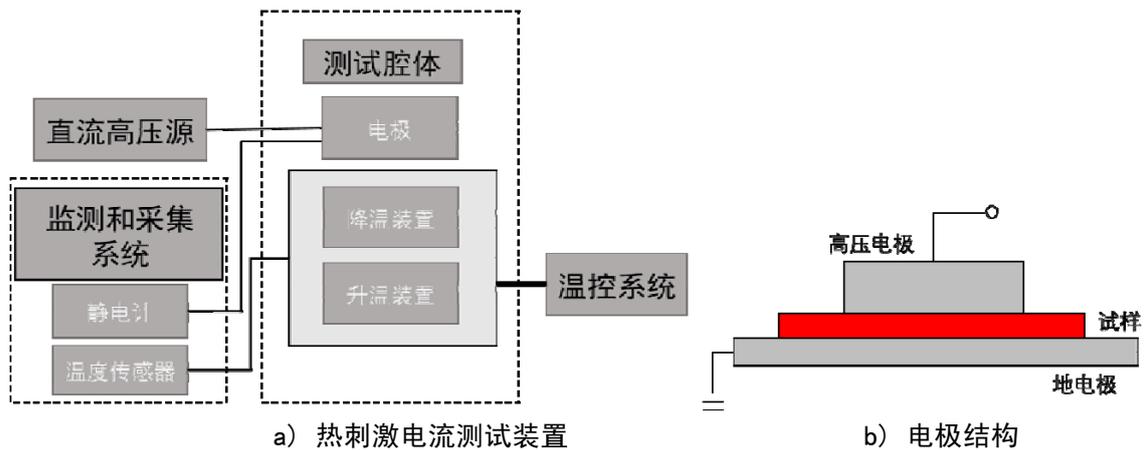


图1 热刺激电流测试装置示意图

4.2 直流加压系统

直流加压系统为样品提供直流电压，包含直流电源和电极，直流电压源提供的电压范围 0 kV ~ 20.0 kV，精度 0.1 kV。

4.3 温控系统

温控系统维持加压时样品的温度以及降温和升温过程中样品变温速率，温度范围 -150.0 °C ~ 200.0 °C，精度 0.1 K，降温速率可达到10.0 K/min，升温速率可控制在 0.1 K/min ~ 10.0 K/min 范围内。

4.4 监测和采集系统

监测和采集系统用于监测和采集测试过程中的温度和电流。温度传感器用于监测升温过程中实时温度。静电计用于采集升温过程中试样电流，精度应优于 1×10^{-14} A。

4.5 测试腔体

测试腔体为测试提供相对稳定的测试环境，可选择干燥或真空环境。

5 试样准备和测量步骤

5.1 试样准备

5.1.1 取样位置

考虑到高海拔地区的复合绝缘子受紫外辐射严重、电晕放电频繁，从复合绝缘子首端和末端第一片伞裙上各取 3 片或以上片数样品，且每组样品必须包含伞裙上下表面的部分。

5.1.2 试样尺寸

试样的面积应与测量设备的有效范围相匹配，厚度宜小于 2 mm，试样表面应平整、厚度均匀，应保证试样表面和电极的紧密接触。

5.2 试样表面处理

5.2.1 热刺激电流法对电极材料无特殊要求，宜在样品两面蒸镀铜、铝、银、金或者需要的电极材料。

5.2.2 蒸镀直径应大于热刺激电流测量装置上电极的直径，且应小于试样整体直径。蒸镀位置应在试样的中间位置。

5.3 测试环境的要求

直流电源，监测和采集系统应在 0 °C ~ 40 °C 之间的环境范围中进行使用和测试。

5.4 测量原理及步骤

5.4.1 测量原理

5.4.1.1 热刺激电流法利用热能作为活化能，在不同温度下激发电介质中的空间电荷形成微电流，由此获得被测电介质中陷阱捕获到的电荷量，并得到温度上分立的陷阱能级。通过介质中的电荷密度以及陷阱能级可以判断电介质材料性能的变化。

5.4.1.2 热刺激电流测试主要包括加压、降温以及升温三个过程。在某一温度（加压温度） T_0 下对试样施加作用电压 U_0 一段时间后，保持该电场，迅速将试样降温至温度 T_a ($T_a < T_0$)，撤去电场，使试样线性升温，测量外电路的短路电流，该电流与温度的曲线即为热刺激电流的特性曲线，温度和电压变化曲线如图 2 所示。

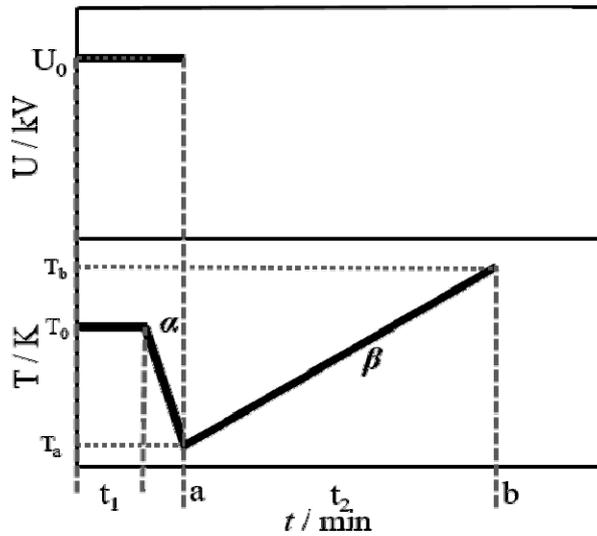


图2 热刺激电流测试过程电压和电流变化曲线

(1) 陷阱电荷密度计算

基于热刺激电流曲线，按式 (1) 计算得到试样在时间 $[t_a, t_b]$ 区间的陷阱参数陷阱电荷密度

$Q_{TSC} (\mu C/cm^2)$:

$$Q_{TSC} = \frac{\int_{t_a}^{t_b} I(t) dt}{\pi r^2} = \frac{60}{\beta} \frac{\int_{T_a}^{T_b} I(T) dT}{\pi r^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

t_a —起始升温时刻，单位为秒(s)；

t_b —终止升温时刻，单位为秒(s)；

β —升温速率，单位为开尔文/分钟(K/min)；

T_a —起始升温温度，单位为开尔文(K)；

T_b —终止升温温度，单位为开尔文(K)；

r —镀金层半径，单位为厘米(cm)。

(2) 陷阱能级计算

按式 (2) 计算陷阱能级 (eV) :

$$E_{TSC} = \frac{2.47T_m^2 k}{\Delta T} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

k —波尔兹曼常数；

T_m —峰值电流对应的温度，单位为开尔文(K)；

ΔT —半峰值电流对应的温度差，单位为开尔文(K)。

5.4.2 测试步骤

5.4.2.1 加压

加压过程是为了向试样内注入电荷。通过控温系统使试样加热至加压温度 T_0 后，在试样两端施加作用电压 U_0 ，并保持一定的加压时间 t_1 。加压温度 T_0 的选取可参考附录 A.1，作用电压 U_0 的选取可参考附录 A.2，加压时间 t_1 的选取可参考附录 A.3，测量实例参见附录 B，报告编制参见附录 C。加压过程完成后应迅速降温至采集微电流的起始温度 T_a （平均降温速率 α 宜在 20~30K/min 范围内）。在降温过程结束后，撤去电压，对试样两端进行接地短路，以减少电极极化对测试结果的影响。

5.4.2.2 升温

以升温速率 β 对试样进行升温，同时监测并记录试样的实时温度 T 和热刺激电流 $I(T)$ ，升温到达升温终止温度 T_b 后，实验结束。

6 热刺激电流设备校验

6.1 匀速升温校验

由热刺激电流法（TSC）的数据分析原理可得，若要通过热刺激电流曲线表征陷阱能级和陷阱电荷参数，必须维持去压、加压过程中温度上升的线性度。因此使用热刺激电流设备测试陷阱电荷和陷阱能级参数前，须进行允许升温校验，以保证升温过程线性度。校验结果如图 3 所示。

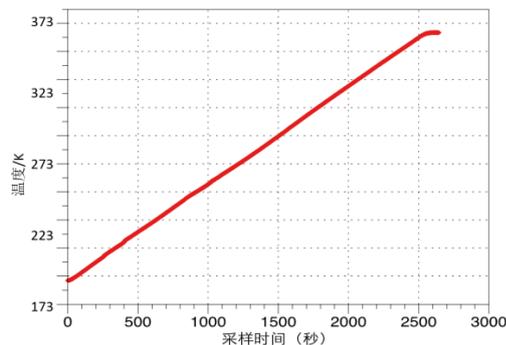


图3 匀速升温校验结果

6.2 有效性校验

为了检验热刺激电流测量装置的有效性，需要进行有效性校验。分别对硅橡胶试样进行两次热刺激电流测试，第一次除了不对试样施加高电压外，其它都参照第 5 节中规定的热刺激电流测试步骤进行，得到热刺激电流曲线。第二次均按照第 5 节中规定的热刺激电流测试步骤进行，得到热刺激电流曲线。测试结果如图 4 所示。

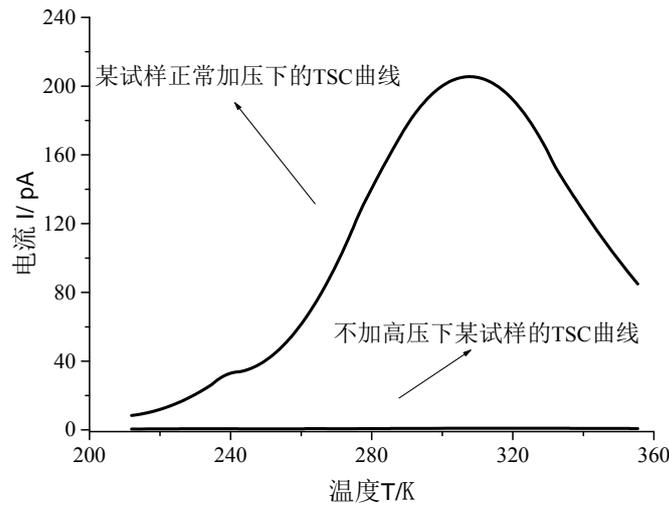


图4 硅橡胶热刺激电流测试的系统误差和外界干扰的校验

6.3 累积效应校验

为了考察硅橡胶热刺激电流试验的重复稳定性,需要对同一片试样进行多次热刺激电流试验,故对热刺激电流试验中的电荷累积效应进行了如下对比试验。按照第 5 节的热刺激电流试验步骤,对试样进行第一次试验,得到第一条热刺激电流曲线。之后,立刻对该试样进行第二次试验,此外,除了不对试样施加高电压外,其它均按照第 5 节的热刺激电流试验步骤进行,得到第二条热刺激曲线。测试结果如图 5 所示。

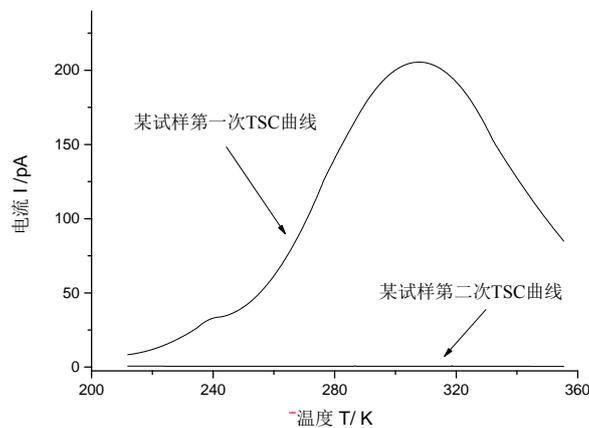


图5 硅橡胶热刺激电流试验的累积效应

7 试验报告

试验报告应包括下列内容:

- a) 被测试样的基本信息(运行环境、取样部位等);
- b) 试样信息说明: 尺寸、试样处理厚度等;
- c) 测试参数: 所加电压、加压温度、加压时间、降温温度、升温速率以及升温时间等;
- d) 实验测试结果(陷阱电荷量、陷阱能级等)。

附录 A
(资料性附录)
测试参数选取建议

A.1 概述

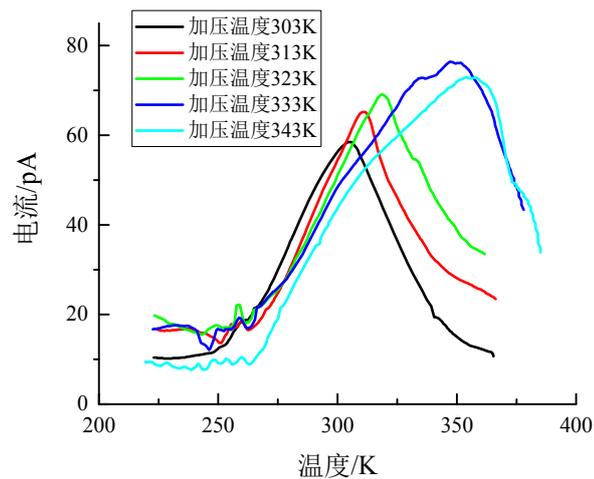
主要测试参数选取包括加压温度、所加电压（场强）和加压时间的选取。

A.2 加压温度的选取

不同温度下的加压过程会影响材料对空间电荷的捕获情况。按照表 A.1 的测试参数进行热刺激电流测试，测试结果如图 A.1 所示，空间电荷特性分析结果如表 A.2 所示。

表A.1 不同加压温度的测试参数

试样编号	加压温度 K	场强 kV/mm	加压时间 min	升温速率 °C/min
1	303.0	8.0	20	3.0
2	313.0	8.0	20	3.0
3	323.0	8.0	20	3.0
4	333.0	8.0	20	3.0
5	343.0	8.0	20	3.0



图A.1 不同加压温度下的测量结果

表A.2 不同加压温度的测试结果

试样编号	峰值电流 pA	峰值电流温度 K	陷阱电荷量 nC	陷阱能级 eV
	58.50	304.3	87.05	0.345
2	65.20	310.6	102.91	0.355
3	69.10	318.6	115.77	0.294
4	76.40	347.2	144.50	0.295
5	72.90	353.7	129.84	0.297

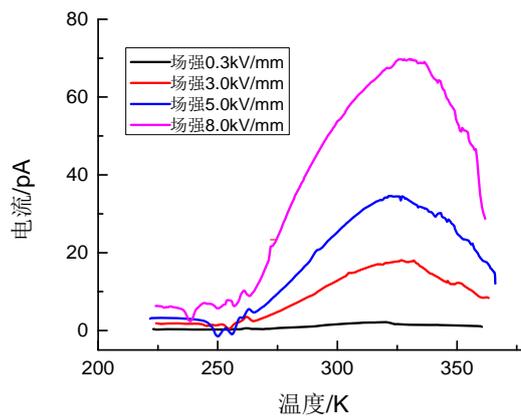
由图 A.1 可以发现，采用较低的加压温度，深陷阱对空间电荷的捕获并不充分，难以充分反映材料空间电荷特性；采用较高的加压温度，浅陷阱捕获的空间电荷较容易被激发，影响测量准确性。所以建议选择 323.0 ~ 333.0 K 之间的加压温度进行加压。

A.3 加压场强的选择

材料中空间电荷的积聚情况直接受到所处场强形式以及其幅值的影响。选取表 A.3 所示的测试参数进行测试，得到的电流—温度图和空间电荷特性分析结果分别如图 A.2 和表 A.4 所示。

表A.3 不同加压场强的测试参数

试样编号	场强 kV/mm	加压时间 min	加压温度 K	升温速率 K/min
1	0.3	20	323.0	3.0
2	3.0	20	323.0	3.0
3	5.0	20	323.0	3.0
4	8.0	20	323.0	3.0



图A.2 不同加压场强下的测试结果

表A.4 不同加压场强的测试结果

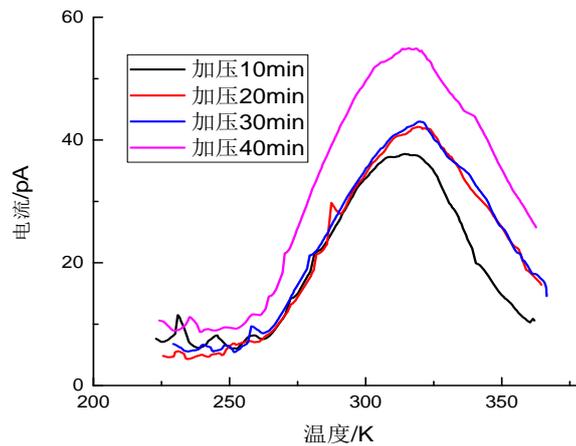
试样编号	峰值电流 pA	峰值电流温度 K	陷阱电荷量 nC	陷阱能级 eV
1	2.17	319.5	3.11	0.311
2	18.10	326.7	26.39	0.329
3	34.60	321.5	52.08	0.293
4	69.80	330.3	108.02	0.300

可见，在较高场强下，材料中的陷阱捕获到更多的空间电荷，表现为更高的电流峰值。综合考虑，为了得到材料更全面的空间电荷特性，并能更明显地反映出不同材料间的差异，应采用较高的场强进行加压。

A.4 加压时间的选择

表A.5 不同加压时间的测试参数

试样编号	加压时间 min	场强 kV/mm	加压温度 K	升温速率 K/min
1	10	8.0	323.0	3.0
2	20	8.0	323.0	3.0
3	30	8.0	323.0	3.0
4	40	8.0	323.0	3.0



图A.3 不同加压时间下的测试结果

表A.6 不同加压时间对测试结果的影响

试样编号	峰值电流 pA	峰值电流温度 K	陷阱电荷量 nC	陷阱能级 eV
1	37.80	314.5	90.20	0.330
2	42.20	319.1	98.71	0.291
3	43.00	319.3	106.49	0.286
4	55.00	316.0	143.51	0.254

通过表 A.5 和 A.6 可以发现，加压时间对测得热刺激电流峰值对应温度的影响很小如图 A.3 所示，而随着加压时间增加，峰值电流逐渐增加，陷阱电荷量也随之增长，说明加压时间越长，空间电荷注入越充分。加压 20~30 分钟左右后测得的陷阱电荷量及能级变化较小，所以建议选择加压 20 分钟，保证试验的准确性以及可重复性。

然而，上述测试案例以及对测试参数选择方法的分析仅适用于复合绝缘子硅橡胶材料，如果测量其它电介质材料还需要选择更合适的测试参数。

A.5 测试结果分级及评价建议

表A.7 测试结果的分级及评价建议

分级	陷阱电荷量 nC	特性描述	评价建议
1	$0 < Q \leq 97.78$	运行良好及新试样	正常
2	$97.78 < Q \leq 217.37$	憎水性轻微丧失	关注
3	$217.37 < Q \leq 283.98$	轻微粉化，憎水性丧失程度较重	重点关注
4	$Q > 283.98$	伞裙脱落及伞裙严重粉化	退出运行

运行良好及新试样的陷阱电荷量范围在 $0 \sim 97.78$ nC。当测得伞套硅橡胶材料 $97.78 \text{ nC} < Q \leq 217.37 \text{ nC}$ 时，伞套表现为憎水性轻微丧失，其运行状态需引起运行部门的关注，建议巡检周期为 6 月/次。当测得伞套硅橡胶材料 $217.37 \text{ nC} < Q \leq 283.98 \text{ nC}$ 时，伞套表现为轻微粉化，憎水性丧失程度较重，其运行状态需引起运行部门的重点关注，建议巡检周期为 3 月/次。当测得伞套硅橡胶材料 $Q > 283.98 \text{ nC}$ 时，伞套表现为脱落及严重粉化，建议绝缘子退出运行。

附 录 B
(资料性附录)
测量报告实例

B.1 概述

本标准中以复合绝缘子伞裙硅橡胶材料为例，提供一个测量实例，测量报告如下所示。

B.2 试样信息

试样名称：高温硫化硅橡胶；

试样结构：片状结构；

厚度：0.7 mm；

处理方式：用无水乙醇擦拭，并用离子溅射仪对硅橡胶材料两面镀金，见图 B.1。



图B.1 试验试样

B.3 测量参数

测量原理：热刺激电流法；

作用场强：直流，8.0 kV/mm；

加压时间：20 min；

加压温度：323.0 K；

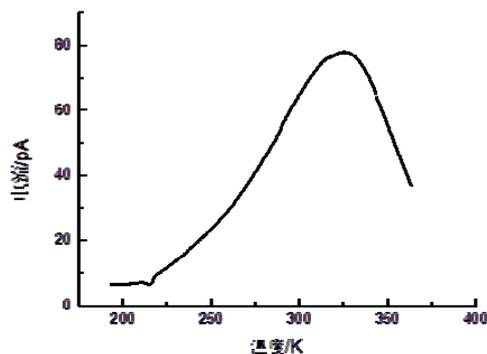
起始温度：183.0 K；

升温速率：3.0 K/min；

升温时间：60 min。

B.4 测量数据

通过电流温度采集系统，得到试样的热刺激电流曲线，如图 B.2 所示。



图B.2 硅橡胶试样热刺激电流曲线

根据公式 (B.1) 和 (B.2) 计算得到陷阱电荷量和陷阱能级。

$$Q_{TSC} = \frac{\int_{T_a}^{T_b} I(T) dT}{\pi r^2} = \frac{\frac{60}{\beta} \int_{T_a}^{T_b} I(T) dT}{\pi r^2} = \frac{20 \int_{T_b}^{T_2} I(T) dT}{3.14 \times 0.85^2} = \frac{139.76}{2.27} = 61.57 \text{ (nC/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{(B.1)}$$

$$E_{TSC} = \frac{2.47 T_m^2 k}{\Delta T} = \frac{2.47 \times 324.8^2 \times 1.38 \times 10^{-23}}{(360 - 272.4) \times 1.67 \times 10^{-19}} = 0.243 \text{ (eV)} \dots\dots\dots \text{(B.2)}$$