

低密度聚乙烯热压成型过程中的空间电荷^{*}

安振连[†] 杨 强 郑飞虎 张治文

(同济大学波耳固体物理研究所, 上海 200092)

(2007 年 1 月 16 日收到 2007 年 2 月 6 日收到修改稿)

借助开路热刺激放电(TSD)电流及原位实时电荷 TSD 和电荷等温衰减测量,研究了低密度聚乙烯(LDPE)在热压成型过程中所产生的空间电荷特性.结果表明具有良好室温稳定性的成型电荷被束缚在两类陷阱能级中:浅阱和深阱,其陷阱中心深度分别约为 0.92 eV 和 1.31 eV.初步的分析进一步表明了它们应该分别位于试样的表层和体内,为近表面陷阱和体陷阱.

关键词:低密度聚乙烯(LDPE),热压成型,空间电荷,热刺激放电(TSD)

PACC:7755, 7220J, 7360R, 7730

1. 引 言

聚乙烯(PE)以其优异的介电性能、良好的机械性能和加工特性以及低廉性而成为一种广泛应用的材料,如在电缆工业中得到大量的应用.但由于在强电场作用下从电极注入的空间电荷,以及由于聚合物分子不可避免的结构不规整性、聚合时使用的引发剂与引入的外来杂质、由颗粒状树脂成型时未排尽的残余气体等在强电场作用下产生的内部极性基团极化或杂质离子的分极和气孔相的击穿等,使电介质内场强分布的不均匀,并可能引发内部局部放电和电树枝的生成,从而降低了材料的使用寿命.由于聚合物中的电荷(电极注入电荷和内部偶极电荷及杂质离子电荷等)对其在强电场下的击穿起到极为重要的作用,因此早在上世纪 70 年代起人们就开始利用热刺激放电(thermal stimulated discharge, TSD)方法研究聚合物中的电荷行为^[1-3],并从 90 年代开始利用非破坏的电荷分布测量方法(如压力波法(PWP)和电声脉冲法(PEA)等)对聚合物中电荷的分布进行了较系统和直观地研究^[4-6].

尽管在上世纪五六十年代就已有报道关于聚合物在高温下经机械压缩成型冷却后(塑性变形期间)会出现电荷积累的行为^[7-10],然而在随后的近半个世纪尚为见到对这类电荷(简称成型电荷)的进一步

深入的研究.事实上如本文的研究结果所表明:低密度聚乙烯(LDPE)中的成型电荷比电晕充电(或强电场作用下的电极)外部注入空间电荷具有多得多的热稳定性、体内的成型电荷被束缚在更深的陷阱能级中.因此对它们的深入认识不仅对研究聚合物在强电场下的击穿特性具有重要的意义,也是区分外部注入的空间电荷和成型电荷、研究注入空间电荷行为的前提.事实上关于 PE、尤其是 LDPE 中空间电荷的俘获、脱阱及运输的早期热刺激放电研究中已发现结果的重复性和难以解释的问题^[11],Carmo Lanca 等也报道了要想获得关于空间电荷研究的可重复性结果、预清除试样中的原有电荷或残留电荷的必要性^[12].

2. 试样制备与实验方法

本文所用的试样厚度约为 1 mm 的 LDPE 薄片,并在其单面上热压有厚度约为 0.45 mm 的掺了碳黑的乙烯与乙酸乙烯共聚物(EVA)半导体电极(简称半导体电极).所用的 LDPE 原料为日本宇部兴产公司生产的 UBEC510 型 LDPE 颗粒树脂(密度 0.92 g/cm³).LDPE 薄片的制备过程是首先将原料颗粒放入 120—130℃ 的模板中预热 10—15 min,然后在温度下加压至 12—15 MPa,并持续 10—15 min,最后保持压力下冷却至室温.以类似过程制得的半

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号:50537040)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zan@mail.tongji.edu.cn

导体电极薄片与 PE 薄片通过热压紧密贴合。

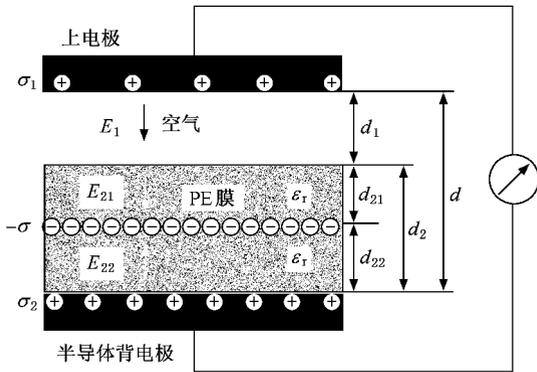


图1 电荷 TSD 和电荷等温衰减的原位实时测量原理

TSD 方法被用于研究带单面半导体电极的 LDPE 薄片中的成型电荷和电晕充电注入的空间电荷。所有试样为从成型后在室温下存放一周以上的热压大片上剪下的直径约为 40 mm 的圆片。为考察成型电荷与电晕充电电荷的陷阱能级的异同,部分试样在实施 TSD 研究前使用电晕充电装置(HNCs20000-1 ump, 德国 Heinzinger 公司)在大气中和室温(RT)下进行了栅控恒压电晕充电(针压为 ± 10 kV、栅压为 ± 1 kV、栅膜间距约为 8.5 mm、充电时间均为 5 min)或经历了 100°C 60 h 以上的成型电荷热清除后进行常压、RT、栅控恒压电晕充电。开路 TSD 电流谱的测量使用由升温速率约为 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的线性升温炉(T 5042 EK, 德国 Heraeus 公司)或另一升温速率可调的线性升温程控炉(L3/S17, 德国 Nabertherm 公司)美国 Keithley 公司生产的 6514 多功能表和计算机(数据处理)所组成的系统完成。开路 TSD 电流谱由计算机自动记录。电荷 TSD 和电荷等温衰减测量采用的是一种原位实时测量方法^[13], 其测量原理如图 1 所示。该电荷 TSD 和电荷等温衰减的原位实时测量方法克服了以往的测量中由于必须将试样从炉中频繁取出和放入、整个测量过程中试样实际经历了多次的高低温循环淬火过程、温控炉的频繁开闭使炉温的升温线性和稳定性受到极大的影响等缺点。另外,该方法的另一显著的优点是所测得的上电极感应电荷反映了试样中电荷的整体变化信息(试样中的全部电荷量和电荷重心),其测量精度可达 10^{-3} nC^[13]。上电极感应电荷如下式所示:

$$\sigma_1 = \frac{d_{22}}{\epsilon_r d_1 + d_2} \sigma, \quad (1)$$

σ_1 不仅与过程中试样的电荷 σ 和电荷重心相对背电极的位置 d_{22} 成正比,还与上电极和试样自由面间

的空气隙 d_1 、试样厚度 d_2 及试样的相对介电常数 ϵ_r 有关。在实际测量中由于采用合适的试样固定方法(中心固定),试样薄片由于温度升高产生的鼓起(从而引起 d_1 的变化)可以忽略。因此,上式中的分母在测量过程中可以看作不变,上电极感应电荷综合反映了试样的电荷量和电荷重心的位置。

3. 实验结果与讨论

3.1. 低密度聚乙烯中的热压成型电荷

TSD 方法是一种研究电介质材料中电荷的宏观和微观规律及其陷阱能级构造的快速有效方法。当试样处于某一温度下,与之相应深度陷阱中的俘获电荷将被激发脱阱,并在电荷自身电场的作用下向背电极运动(对开路、带单面电极试样),从而在外电路中形成 TSD 电流或引起上电极上感应电荷的变化。因此,TSD 电流谱直接反映了电介质中电荷陷阱的能级构造,同时也综合反映了陷阱的能级构造和不同能级的陷阱对电荷的俘获概率,而上电极上感应电荷的变化(电荷 TSD)综合反映了电介质中的残存电荷量及其重心的变化。

图 2(a)是通过热压成型制备的带单面半导体电极的 LDPE 试样(未热处理、未电晕充电的原始试样,简称原样)的开路 TSD 电流谱(以电流的峰值进行了归一化),TSD 实施过程中线性升温速率约为 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 。从图 2(a)可看到在 112°C 附近出现一个较尖锐的放电电流峰,而且在 123°C 后放电电流呈现再次上升的趋势预示着另一放电电流峰的出现,说明原样中除存在 112°C 峰所对应的陷阱俘获电荷外,还应存在处于更深陷阱中的电荷。因此,如原样的初始表面电位测量(初始表面电位值约为 -500V)所表明,开路 TSD 电流测量进一步地明确了在热压成型过程中试样中电荷的产生。应该指出开路 TSD 电流直接反映的是上电极感应电荷的时间变化率($I = d\sigma_1/dt$, 其中 σ_1 是上电极感应电荷)或间接反映试样中电荷的时间变化率($d\sigma/dt \propto I = d\sigma_1/dt$, 其中 σ 是试样中的电荷),仅从开路 TSD 电流谱不能考察 TSD 期间试样中的残存电荷量。如第 2 节的实验方法中所指出:上电极感应电荷综合反映了试样中的电荷量和电荷重心的位置,在 TSD 过程中电荷重心基本保持不变的情况下,可精确地反映试样中的电荷量。为进一步考察开路 TSD 电流谱

(图 2(a))所预示的深陷阱俘获电荷的存在,在较宽的温区内($RT-160^{\circ}\text{C}$)进行了原样在线性升温过程中上电极感应电荷的动态变化.图 2(b)是所测得的原样的以室温下的初始感应电荷值归一化的原位实时电荷 TSD 谱.由图 2(b)可见当从室温线性升温至 120°C 时,上电极感应电荷(原样中的电荷)仅衰减了 50%,直至 160°C 时才几乎衰减为零.图 2(c)为原样的原位实时电荷 TSD 谱(图 2(b))的微分曲线(以微分曲线的峰值进行了归一化),即为其相应的开路 TSD 电流谱.比较图 2(a)和图 2(c)可见实测开路 TSD 电流谱和微分开路 TSD 电流谱在相同温区内具有很好的一致性,特别值得注意的是微分开路 TSD 电流谱中除温位约为 112°C 的电流峰外,在高温区内出现了峰温约为 142°C 的电流峰,表明了这一被预示的深陷阱俘获电荷所对应的放电电流峰的峰温约为 142°C ,而图 2(a)和图 2(c)在相同温区内的微小差异起因于即使是从同一热压薄片剪下的原样间也不可避免地存在一定的不同.

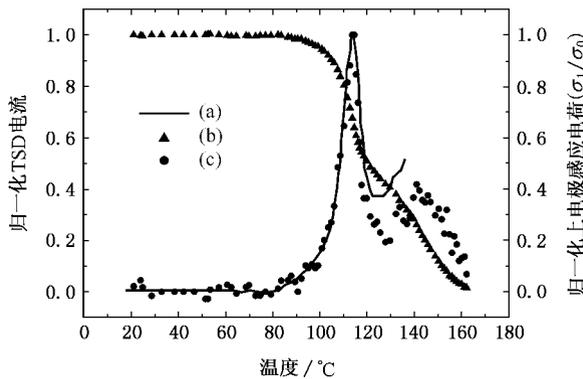


图 2 原样的开路 TSD 电流谱(a)、原位实时电荷 TSD 谱(b)及原位实时电荷 TSD 谱的微分曲线(c)它们分别被以其峰值或初始值归一化,线性升温速率约为 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$

另外,应该指出是 TSD 期间的升温速率会显著地改变 TSD 电流峰的温位和峰值,尤其对较厚的试样.这是因为升温速率较高、试样较厚时试样的实际温度会小于试样的表面温度(热电偶测得的温度)以及升温速率较高时电荷释放的作用时间较短.为比较升温速率对开路 TSD 电流峰的温位和峰值的影响,首先对原样中的成型电荷进行了 100°C 60 h 以上的热清洗(简称热清洗试样,此热清洗过程的充分性已在图 4(c)表明),然后对热清洗试样进行了负电晕充电.图 3(a)和(b)分别是负电晕充电的热清洗试样以升温速率为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 和 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时的开路 TSD 电流谱(TSD 在另一升温速率可调节的程控炉

内完成).比较图 3(a)和(b)可见,与升温速率为 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时电晕充电电荷的放电电流峰的温位(约 112°C)相比,升温速率为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时相应峰的温位发生明显的向低温方向的漂移,约为 94.5°C .这一结果与文献中所报道的电晕充电 LDPE 的 TSD 电流谱(具有相同的升温速率: $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$)的峰温(约 95°C)几乎完全相同^[1].由图 3 还可看到由于升温速率提高、电荷释放的作用时间变短,导致 TSD 电流峰明显增强、电流灵敏度提高.因此,当升温速率较高时 TSD 电流的峰温对表征陷阱能级的深度仅具有相对意义.

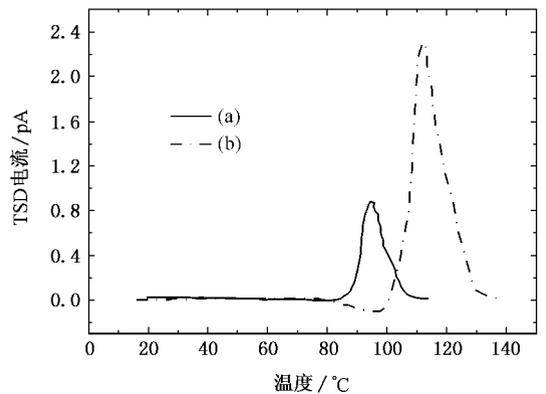


图 3 不同升温速率的负电晕充电热清洗试样的开路 TSD 电流谱 (a)线性升温速 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (b)线性升温速 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$

3.2. 热压成型电荷的陷阱能级

为考察原样中热压成型电荷的陷阱能级及其热稳定性,对原样分别在 60°C 、 80°C 和 100°C 下进行了原位实时电荷等温衰减研究.图 4(a)(b)和(c)分别是在这三个温度下的原位实时电荷等温衰减的测量结果,图中的纵轴为对数坐标,上电极感应电荷以

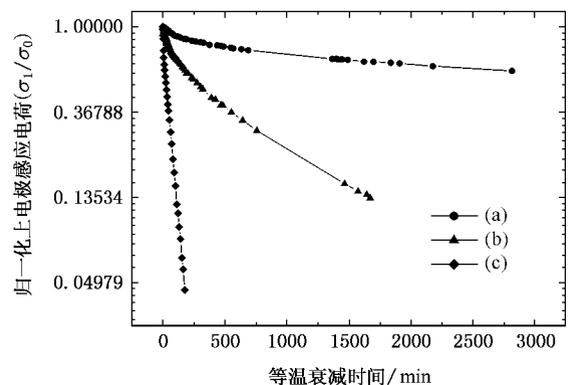


图 4 在不同温度下原样成型电荷的原位实时等温衰减(以上电极初始感应电荷进行了归一化) (a) 60°C (b) 80°C (c) 100°C

其初始值进行了归一化.比较图 4(a)(b)和(c)可见,随着等温衰减温度的升高、成型电荷的衰减速率急剧加快.需指出原样成型电荷的等温衰减规律应综合了反映其浅阱成型电荷和深阱成型电荷的衰减.对单一陷阱俘获电荷,其等温衰减规律遵循简单的指数关系^[14]:

$$\alpha(t, T) = \sigma_0(0, T) \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

式中 $\alpha(t, T)$ 为具有单一陷阱俘获的试样中的电荷, $\sigma_0(0, T)$ 为其初始值, t, T, τ 分别为衰减时间、温度和电荷衰减等效时间常数.因此,原样的热压成型电荷的等温衰减应由浅阱成型电荷的衰减和深阱成型电荷的衰减构成:

$$\alpha(t, T) = \sigma_{s0}(0, T) \exp(-t/\tau_s) + \sigma_{d0}(0, T) \exp(-t/\tau_d), \quad (3)$$

式中 $\sigma_{s0}(0, T)$ 和 $\sigma_{d0}(0, T)$ 分别为浅阱成型电荷和深阱成型电荷的初始值, τ_s 和 τ_d 分别为它们的衰减等效时间常数.

仔细观察图 4(a)(b)和(c),可将整个等温衰减过程曲线分为三段,即初期和末期的直线段及中期的曲线段.初期和末期的直线段应分别主要反映浅阱电荷和深阱电荷的衰减,而中期的曲线段应反映浅阱电荷和深阱电荷衰减的共同贡献.这是因为考虑到升温速率对 TSD 电流峰温位的影响,浅阱成型电荷和深阱成型电荷的实际脱阱温度应分别约为 94.5℃ 和 124.5℃,这两种陷阱所对应的放电电流峰的温差(约 30℃)较大,所以等温衰减过程中浅阱电荷的衰减要比深阱电荷的衰减快得多,等温衰减的初期主要表现为浅阱电荷的衰减、等温衰减的后期浅阱电荷实际已衰减殆尽而主要表现为深阱电荷的衰减,而在中期浅阱电荷的衰减速率较初期已显著减慢、反映出浅阱电荷和深阱电荷的综合衰减规律.因此,由图 4(a)(b)和(c)可分别求得它们的初期和末期的等温衰减斜率,即 $(-1/\tau_s)$ 和 $(-1/\tau_d)$,并由此可得在这三种等温衰减温度下原样中的浅阱成型电荷和深阱成型电荷的衰减等效时间常数(如表 1).

表 1 60℃, 80℃ 和 100℃ 时原样中成型电荷的衰减等效时间常数 τ

温度 T/K	333	353	373
浅阱电荷 τ_s/min	847	213	23.2
深阱电荷 τ_d/min	1.02×10^4	1.14×10^3	62.9

对单一陷阱俘获电荷,其衰减的时间常数与温度呈现 Arrhenius 关系,即

$$\tau(T) = \tau_0 \exp(E/kT), \quad (4)$$

式中 E 和 k 分别为活化能(陷阱深度)和波尔兹曼常数.对上式取对数可得

$$\ln \tau(T) = \ln \tau_0 + (E/k) \cdot (1/T), \quad (5)$$

可见 $\ln \tau(T)$ 与 $(1/T)$ 成线性关系,其斜率为 E/k .因此,由表 1 可得浅阱成型电荷和深阱成型电荷的 $\ln \tau(T)$ 与 $(1/T)$ 的关系图,并由它们的斜率可得到浅阱中心和深阱中心的深度分别为 0.92 eV 和 1.31 eV.

比较两个具有相同升温速率(3℃/min)的开路 TSD 电流谱图 3(a)和图 3(b)可看到它们具有完全相同的电流峰温位(112℃),表明成型电荷的浅阱中心与电晕充电电荷的陷阱中心具有相同的深度. Toomer 等曾利用自建模型极好地拟合了具有不同正、负初始表面电位(410—2600 V)的电晕充电 LDPE 膜在三种室温范围的温度下表面电位的初期等温衰减过程,并得出了相应几种情况下的 LDPE 膜的电晕充电电荷活化能(电荷陷阱深度)的拟合值为 0.9 至 1.0 eV^[15].因此,本文得到的 LDPE 成型电荷的浅阱中心或电晕充电电荷的陷阱中心的结果与上述结果基本一致.

3.3. 热压成型电荷的陷阱能级特征

众所周知常温电晕充电的电荷位于试样的表层(表面或近表面).为考察热压成型电荷的陷阱能级的体分布特征,进一步进行了常温电晕充电的原样和热清洗试样的 TSD 研究.图 5(a)(b)和(c)分别是负电晕充电的热清洗试样、负和正电晕充电的原样的开路 TSD 电流谱.为了便于比较,未充电原样的开路 TSD 电流谱(电流值放大 3 倍后)也显示在图中(图 5(d)).与图 5 相同电晕充电条件的相同试样的宽温区归一化原位实时电荷 TSD 测量结果分别被显示在图 6(a)(b)和(c)中,同样为了便于比较,未充电原样的原位实时电荷 TSD 谱(图 2(b))在图 6 中被记为(d).如同图 3(b),图 5(a)再次显示了负电晕充电的热清洗试样的开路 TSD 电流的单峰(温位约 112℃)谱,图 6(a)的相应的宽温区原位实时电荷 TSD 谱进一步明确地表明了升温至 120℃ 后负电晕充电的热清洗试样中的电荷几乎衰减为零.以相同的充电针压、栅压和充电时间的正充电热清洗试样结果(在图 5 和图 6 中未显示)与负充电的结果除电流和电荷的方向与极性相反外几乎完全相同.原样的开路 TSD 电流谱(图 5(d))中低温峰的峰

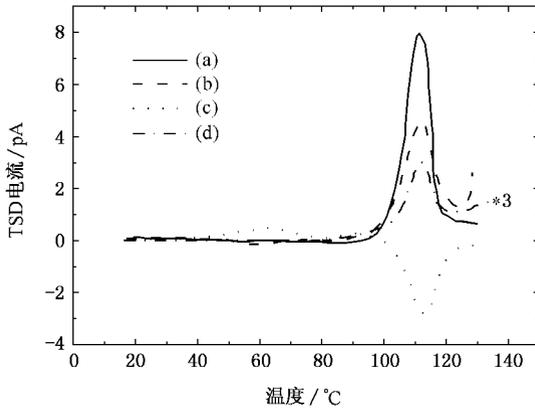


图 5 开路 TSD 电流谱 (a) 负电晕充电的热清洗试样 (b) 负电晕充电的原样 (c) 正电晕充电的原样 (d) 原样. 线性升温速率约为 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$

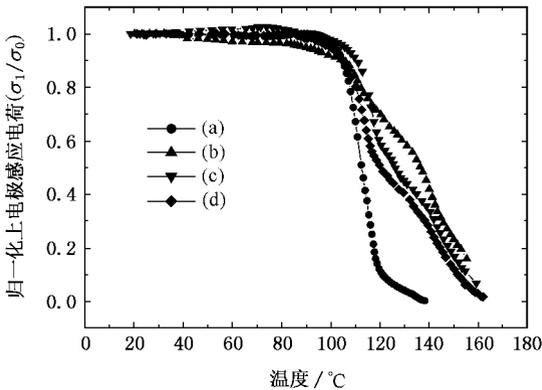


图 6 归一化原位实时电荷 TSD 谱 (a) 负电晕充电的热清洗试样 (b) 负电晕充电的原样 (c) 正电晕充电的原样 (d) 原样(图 2(a)). 线性升温速率约为 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$

温 (112°C) 和形状与电晕充电热清洗试样的 TSD 电流峰的极好的一致, 表明原样成型电荷的低温放电峰是由表层的成型电荷脱阱引起, 即原样成型电荷的浅陷阱应分布于原样的表层, 是近表面陷阱. 图 5 (b) 和 (c) 进一步地表明了表层负、正电晕充电电荷和表层成型电荷的能级的一致性. 而图 5 (b) 和 (c) 在约 124°C 后放电电流的再次上升趋势及如图 6 (b) 和 (c) 所示的负、正电晕充电的原样的宽温区原位实时电荷衰减规律表明原样中的深阱成型电荷在电晕充电期间(电晕电场中)的稳定性. 显然原样的深阱成型电荷不可能仅位于原样的表层, 否则原样的深阱成型电荷会因与正充电电晕电荷的复合而不可能

看到图 5 (c) 中的电流再次上升趋势及图 6 (c) 中升温后期的仍有大量电荷的存在和与原样(图 6 (d)) 相似的电荷衰减情形. 因此, 原样成型电荷的深陷阱应分布于原样的体内、为体陷阱.

另外, 可以看到图 5 (b) 和 (c) 中的放电电流再次上升的起始点存在差异. 图 6 (b) 和 (c) 的宽温区原位实时电荷 TSD 谱进一步表明了负、正电晕充电的原样的电荷呈现不同的衰减规律. 这应归因于它们的电晕充电极性与原样成型电荷极性的异同. 对负电晕充电(图 5 (b) 和图 6 (b)), 电晕电荷与原样中成型电荷具有相同的极性(同为负), 而正电晕充电(图 5 (c) 和图 6 (c)) 时, 电晕电荷与原样中成型电荷的极性相反, 从而导致这两种情况下试样内电场的分布不同. 后者的表面(正)电荷层与体内(负)成型电荷层间的内电场比前者强得多. 因此, 后者首先脱阱的正电晕电荷在较强内电场的作用下向体内以较快的速率迁移、从而引起上电极感应电荷在相应温区内的快速下降(比较图 6 (c) 和 (b)). 另外, 正电晕充电试样在整个原位实时电荷 TSD 过程中始终未观察到上电极感应电荷的极性变化(如图 6 (c)), 表明表层正电晕电荷在脱阱、向体内输运的途中不断地与负成型电荷复合并填充其陷阱, 呈现快再俘获效应. 在图 6 (c) 中的后期(约 140°C 后) 由于实际上是深成型陷阱中的正填充电荷的衰减, 因此与图 6 (b) 和 (d) 呈现几乎完全相同的衰减规律.

4. 结 论

通过对热压成型的 LDPE 原样及(正、负)电晕充电的原样和热清洗试样的开路 TSD 电流、原位实时电荷 TSD 和电荷等温衰减的测量, 本文研究了 LDPE 在热压成型过程中所产生的电荷的特性. 结果表明原样中具有良好室温稳定性的负成型电荷被束缚在两类陷阱能级中. 浅阱和深阱, 它们应分别位于试样的表层和体内、属于近表面陷阱和体陷阱, 其陷阱中心深度分别约为 0.92 eV 和 1.31 eV . 考虑到 TSD 过程的升温速率对放电电流峰的温位的影响, 浅阱和深阱所对应的开路 TSD 电流峰的实际温位应分别约为 94.5°C 和 124.5°C .

- [1] Kao K J ,Banji S S ,Perlman M M 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 8181
- [2] Mizutani T ,Suzuoki Y ,Hanai M ,Ieda M 1982 *Jpn. J. Appl. Phys.* **21** 1639
- [3] Lei Q Q ,Fan Y ,Wang X ,Lin J Q ,Xiong Y L 1997 *J. Mater. Sci. Technol.* **13** 223
- [4] Zheng F H ,Zhang Y W ,Wu C S ,Li J X ,Xia Z F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1137 (in Chinese) [郑飞虎、张治文、吴长顺、李吉晓、夏钟福 2003 物理学报 **52** 1137]
- [5] Mizutani T 1994 *IEEE Trans. on DEI* **1** 923
- [6] Chen G ,Fu M ,Liu X Z ,Zhong L S 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 083713
- [7] Bazan C 1959 *Acta Phys. Polon.* **18** 87
- [8] Miller M L 1966 *J. Polym. Sci. A* **2** 685
- [9] Miller M L ,Murray J M 1966 *J. Polym. Sci. A* **2** 697
- [10] Novikov Y N ,Polovikov F I 1964 *FTT* **8** 1565
- [11] Wintle H J 1983 *Engineering Dielectrics* (Philadelphia : ASTM Special Technical Pub.) p783
- [12] Carmo Lanca M ,Neagu E R ,Neagu R M ,Dias C J ,Marat-Mendes J N ,Das-Gupta D K 2004 *IEEE Trans. on DEI* **11** 25
- [13] An Z L ,Tang M M ,Xia Z F ,Sheng X C ,Zhang X Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 803 (in Chinese) [安振连、汤敏敏、夏钟福、盛晓晨、张晓青 2006 物理学报 **55** 803]
- [14] Gross B 1975 *J. Phys. D* **8** L127
- [15] Toomer R ,Lewis T J 1980 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **13** 1343

Space charges formed in the hot compression molding process of low density polyethylene^{*}

An Zhen-Lian[†] Yang Qiang Zheng Fei-Hu Zhang Ye-Wen
 (Pohl Institute of Solid State Physics ,Tongji University ,Shanghai 200092 ,China)
 (Received 16 January 2007 ; revised manuscript received 6 February 2007)

Abstract

The properties of space charges formed in the hot compression molding process of low density polyethylene (LDPE) have been studied by measuring the open-circuit thermally stimulated discharge (TSD) current , in situ TSD charge and the isothermal charge decay . The results showed that the space charges with high stability at room temperature (RT) are trapped in two kinds of traps : shallow traps and deep traps with central depths of about 0.92 eV and 1.31 eV , respectively . Preliminary analysis indicates that the shallow traps and deep traps should be located in the surface layer and in the bulk of the sample , forming surface traps and bulk traps , respectively .

Keywords : low density polyethylene (LDPE) , hot compression molding , space charge , thermally stimulated discharge (TSD)

PACC : 7755 , 7220J , 7360R , 7730

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50537040) .

[†] Corresponding author. E-mail : zan@mail.tongji.edu.cn