

聚酰亚胺电导率随温度和电场强度的变化规律

王松 武占成 唐小金 孙永卫 易忠

Study on temperature and electric field dependence of conductivity in polyimide

Wang Song Wu Zhan-Cheng Tang Xiao-Jin Sun Yong-Wei Yi Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 025201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.025201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.025201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光驱动准等熵压缩透明窗口 LiF 的透明性

Optical transparency of transparent window LiF in laser-driven quasi-isentropic compression experiment

物理学报.2015, 64(20): 205202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.205202>

不同温度下复杂介质结构内带电规律仿真分析

Computer simulation on temperature-dependent internal charging of complex dielectric structure

物理学报.2015, 64(12): 125201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.125201>

外加直流电场作用下高阶弱非线性复合介质的电势分布

Electrostatic potential distribution of high-order weakly nonlinear composites under external direct current electric field

物理学报.2013, 62(10): 107201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.107201>

双色场驱动下高次谐波的径向量子轨道干涉

Quantum path interferences of high-order harmonic generation in two-color Gaussian beams

物理学报.2013, 62(8): 087201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.087201>

外磁场与温度对低温超导光子晶体低频禁带特性的影响

Effects of external magnetic field and temperature on low frequency photonic band width in cryogenic superconducting photonic crystals

物理学报.2012, 61(7): 075203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.075203>

# 聚酰亚胺电导率随温度和电场强度的变化规律\*

王松<sup>1)2)†</sup> 武占成<sup>1)</sup> 唐小金<sup>2)</sup> 孙永卫<sup>1)</sup> 易忠<sup>2)</sup>

1) (军械工程学院静电与电磁防护研究所, 石家庄 050003)

2) (北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

(2015年8月8日收到; 2015年9月23日收到修改稿)

介质深层充电对航天器安全运行构成了重大威胁. 以聚酰亚胺为代表的此类聚合物绝缘介质的电导率受温度影响显著, 又因为充电过程中局部产生强电场 ( $10^7$  V/m 量级), 因此, 其电导率模型需要综合考虑温度和强电场的影响, 这对介质深层充电的仿真评估意义重大. 已有的两类模型, 不是低温区间不适用, 就是没有充分考虑强电场的影响. 基于跳跃电导理论, 本文分析对比了现有电导率模型, 提出了适用于较宽温度范围且合理考虑强电场增强效应的电导率新模型, 并采用某型聚酰亚胺电导率测试数据做出验证. 此外, 为了提高新模型在强电场下的低温适用范围, 尝试对强电场因子中的温度做变换, 取得了满意的效果. 参数敏感度分析表明新模型在电导率拟合与外推方面具有参数少、适用性强的优势.

**关键词:** 介质深层充电, 绝缘介质, 聚酰亚胺, 温度和强电场对电导率的作用

**PACS:** 52.25.Mq, 72.20.Ee, 72.20.Ht, 72.20.Jv

**DOI:** 10.7498/aps.65.025201

## 1 引言

高聚物绝缘介质材料在航天器的各级系统中广泛存在, 如聚酰亚胺和聚四氟乙烯, 它们具有良好的绝缘特性和优良的力学及抗老化物理特性. 在地面等常规环境中, 一般不考虑它们的电导率(绝缘体), 然而当其应用在航天设备时, 地球高轨道空间(如同步轨道)存在的高能带电粒子会射入并沉积在这类介质中, 因为介质电导率很低(室温下  $10^{-15}$  S/m 量级), 沉积电荷难以及时泄放, 从而出现介质深层充电(deep dielectric charging, DDC)现象<sup>[1]</sup>, 对航天器的可靠运行造成重大潜在威胁<sup>[2,3]</sup>. 温度是空间环境中的重要环境特征, 是制约电导率的敏感参数<sup>[4]</sup>. 环境温度变化, 以及考虑到高绝缘介质一般导热性差, 外露介质的光照与背光面将存在较大的温度梯度, 都会影响充电特征. 另外, 充电过程会出现局部强电场 ( $10^7$  V/m 量级), 它会显著增强介质电导率. 因此, 准确估计电导率随温度和电场强度的变化规律, 对合理评估

DDC 风险非常重要<sup>[5-7]</sup>.

通常采用跳跃电导理论来刻画该类介质的电导率. 已有的仿真软件<sup>[8-11]</sup>和多数研究结果<sup>[12-15]</sup>通常采用 Adamec 与 Calderwood 在 1956 年给出的计算模型, 该模型通过刻画强电场作用下载流子浓度和迁移率的增大效应, 强调了强电场对电导率的影响, 而温度因素是直接借鉴 Arrhenius 电导率-温度模型. 对比试验数据, 该模型在低温区间的表现难以令人满意. 此外, 也有相关研究<sup>[16]</sup>采用低密度聚乙烯材料对应的热助跳跃-变程跳跃电导率模型<sup>[5]</sup>, 该模型较好地处理了低温和高温(以 268 K 为分界)区间的电导率随温度变化趋势, 但其中电场强度作用因子表达式较复杂, 涉及的参数不容易确定, 而且缺乏一定的实验验证.

本文在梳理 Adamec 与 Calderwood 模型和热助跳跃-变程跳跃电导率模型的基础上, 将前者电导率对电场强度的关系式与后者温度谱关系式进行结合, 提出了一种新的电导率模型. 选择某型聚酰亚胺介质为代表, 通过实验测试和数据拟合, 对提出的电导率模型做出了合理验证.

\* 国家自然科学基金(批准号: 51577190)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 735314535@qq.com

## 2 模型的建立

利用能带理论, 导体和半导体材料的导电机理已经得到很好的刻画. 然而对于绝缘材料, 尤其是无序大分子材料, 其禁带宽度远大于载流子可能具备的热能, 能带模型和载流子跃迁理论不能解释绝缘材料中存在的弱导电现象. 经过多年研究, 通常采用跳跃电导模型 (hopping conductivity model) 来近似刻画高聚物绝缘材料的电导特性. 所谓“近似”, 是因为此模型最初是针对无序半导体提出来的, 但对于高分子绝缘体, 并没有得到合理验证 [5]. 这种导电机理可以概括为: 绝缘材料的中性中心受热电离产生载流子, 然后载流子被材料的中性势阱 (neutral potential wells) 俘获, 并在受热激发作用下在各个平衡位置之间跳跃, 从而产生电导. 因为电子运动直接受到温度和电场强度影响, 从而电导率对应出现温度谱, 并表现出强电场增强效应.

### 2.1 电导率随温度变化模型

通常采用的 Arrhenius 温度谱模型如下 [17]:

$$\sigma_T = \frac{A}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta H}{kT}\right) \quad (1)$$

式中, 玻尔兹曼常量  $k$ , 电导激活能  $\Delta H$  (通过实验测得), 温度  $T$  以 K 为单位, 常数  $A$  由特定温度 (一般为室温) 下对应的电导率来确定.

在较低温度下 (如 100 K), 单纯热能提供的能量已经不足以使聚合物中载流子跨越势垒, 此时, 电导机理归结为载流子在两个相邻陷阱态势垒间的遂穿效应, 对此, Mott 和 Davis 提出了变程跳跃电导模型 [18,19]

$$\sigma_{\text{md}} = A_H \left(\frac{T_A}{T}\right)^n \exp\left[-\left(\frac{T_A}{T}\right)^n\right], \quad (2)$$

式中,  $A_H$  是待定常量,  $T_A$  由电导激活能确定, 即  $T_A = \Delta H/k$ ,  $n$  取值  $0.25 \leq n \leq 0.50$ , 该模型体现了在较低温度下电导率随温度降低而下降的趋势会变小, 这与实验结果是相符的.

### 2.2 进一步考虑强电场效应的电导率模型

为方便讨论, 温度  $T$  电场强度  $E$  下的电导率记为  $\sigma(T, E)$ , 强电场对电导率的增强系数为

$$\chi \triangleq \frac{\sigma(T, E)}{\sigma(T, 1)}, \quad (3)$$

式中, 分母表示  $E$  取值 1 V/m, 即不考虑强电场的作用. 目前, 热助跳跃 (thermally activated hopping, TAH) 电导, 变程跳跃 (variable range hopping, VRH) 电导和 Adamec 与 Calderwood 提出的强电场下的电导模型, 都考虑了强电场的作用. TAH 电导模型是人们在研究离子晶体中电荷输运过程中得到的 [17,20]. 该模型中电导率的温度依赖关系与 Arrhenius 模型 ((1) 式) 相同, 其完整表达式为

$$\sigma_{\text{TAH}} = \sigma_{\text{TAH0}} \left(\frac{T_A}{T}\right) F_A \exp\left(-\frac{T_A}{T}\right), \quad (4)$$

式中,  $\sigma_{\text{TAH0}}$  待定常数,  $F_A$  是关于  $E, T$  的关系式. 对于 VRH 电导, Apsley 与 Hughes 对其做出改进 [20-22], 考虑了电场强度的作用, 其表达式为

$$\sigma_{\text{VRH}} = \sigma_{\text{VRH0}} \left(\frac{T_V}{T}\right)^{1/4} F_2 \times \exp\left[-\left(\frac{T_V}{T}\right)^{1/4} F_1\right], \quad (5)$$

式中,  $\sigma_{\text{VRH0}}$  和  $T_V$  是待定常数,  $F_1$  和  $F_2$  都是关于  $E, T$  的复杂关系式, 详见文献 [5, 23].

以上两类模型, TAH 电导 (4) 和 VRH 电导模型 (5), 在电导率的温度因素方面取得了较好效果, 二者结合起来可以综合考虑低温和高温下的电导率, 然而关于电场强度的影响因素并没有得到很好的实验验证. 在这方面, Adamec 与 Calderwood 通过考虑外加电场对载流子浓度和迁移率的影响, 理论推导得到了强电场下电导率表达式 [24]

$$\begin{aligned} \sigma(T, E) &= \sigma_T C_{\text{con}} C_{\text{mob}}, \\ C_{\text{con}} &= \frac{2 + \cosh(\beta_F E^{1/2}/2kT)}{3}, \\ C_{\text{mob}} &= \frac{2kT}{eE\delta} \sinh\left(\frac{eE\delta}{2kT}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $C_{\text{con}}$  和  $C_{\text{mob}}$  分别代表载流子浓度和迁移率在电场强度  $E$  作用下的增大系数. 参数  $\beta_F = (e^3/\pi\epsilon)^{1/2}$  由材料介电常数  $\epsilon$  决定,  $\delta$  代表载流子跳跃距离, 取值为 1 nm. 通过广泛实验验证, 该式适用于多种聚合物绝缘材料 [24], 如聚酰亚胺和多种乙烯聚合物. 该式在航天器介质充电领域得到了广泛应用 [12,25], 包括欧空局的在线计算软件 DICTAT.

### 2.3 提出新模型

注意到, 热助跳跃电导中电场强度关系式 [5]

$$F_A = \frac{kT}{eE\delta} \sinh\left(\frac{eE\delta}{kT}\right), \quad (7)$$

与  $C_{\text{mob}}$  是同形式的. 考虑到对于  $E \leq 10^8$  V/m 的情况,  $C_{\text{mob}}$  与  $C_{\text{con}}$  相比是可以忽略不计的(见文献[24]的图1), 因此, TAH 电导没有充分考虑强电场的影响. 按照文献提供的参数, 比较 TAH, VRH 电导中电场强度的增强系数  $\chi$ , 如图1所示, 场强小于 1 MV/m 时, 四种参数均约等于 1. 即使场强达到 100 MV/m, TAH 和 VRH 电导对应的  $\chi$  仍然不超过 10,  $C_{\text{mob}}$  更小, 因此在场强范围  $10^8$  V/m 以内,  $C_{\text{con}}$  的作用(强电场对载流子浓度的增加作用)是最显著的. 该场强范围也是绝缘介质材料充放电研究的典型区间, 一般认为超过  $10^8$  V/m 就会发生击穿放电. 对于其他温度, 不难验证该结论依然成立, 这里不再赘述.

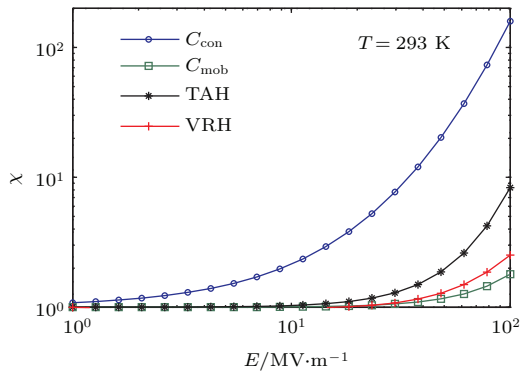


图1 电场强度对电导率的增强系数对比

Fig. 1. Comparison of the electric field enhanced coefficients from different conductivity model.

从以上分析得出, 热助跳跃电导和变程跳跃电导没有充分考虑强电场对电导率的增强作用, 而且(4)和(5)式中的强电场因子难以控制. 因此, 本文用  $C_{\text{con}}$  和  $C_{\text{mob}}$  来考虑强电场影响, 得到了一类新的电导率模型

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_A + \sigma_V, \\ \sigma_A &= \sigma_{A0} \frac{T_A}{T} \exp\left(-\frac{T_A}{T}\right) C_{\text{con}} C_{\text{mob}}, \\ \sigma_V &= \sigma_{V0} \left(\frac{T_V}{T}\right)^{1/4} \exp\left[-\left(\frac{T_V}{T}\right)^{1/4}\right] \\ &\quad \times C_{\text{con}} C_{\text{mob}}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $T_A$  由材料的电导激活能决定,  $T_V$  通常取值在  $10^7$ — $10^8$  K 之间. 实际应用中, 若电场强度不超过  $10^8$  V/m, 可以忽略  $C_{\text{mob}}$ . 在电导率随温度从低到高的变化过程中, 高温段以热助跳跃电导为主, 低温段以变程跳跃电导为主, 于是存在温度  $T_{\text{trans}}$  使得二者相等(对于低密度聚乙烯[5],  $T_{\text{trans}} \approx 268$  K). 因此, 在已知  $T_A, T_V, T_{\text{trans}}$

情况下, 待定常量  $\sigma_{A0}$  和  $\sigma_{V0}$  可以如下取值. 假设  $\sigma(T_{\text{trans}}, 1) = \sigma_{\text{trans}}$ , 那么

$$\begin{aligned} \sigma_{A0} &= \frac{\sigma_{\text{trans}}}{2} \left(\frac{T_A}{T_{\text{trans}}}\right)^{-1} \exp\left(\frac{T_A}{T_{\text{trans}}}\right), \\ \sigma_{V0} &= \frac{\sigma_{\text{trans}}}{2} \left(\frac{T_V}{T_{\text{trans}}}\right)^{-1/4} \\ &\quad \times \exp\left[\left(\frac{T_V}{T_{\text{trans}}}\right)^{1/4}\right]. \end{aligned} \quad (9)$$

### 3 实验验证与讨论分析

在真空变温环境下, 采用电压-电流法测量了一类改性聚酰亚胺介质电导率. 温度范围是 233—353 K, 以 5 K 为步进, 电场强度  $2.5 \times 10^6$ — $2 \times 10^7$  V/m. 实验中电流测量采用 Keithley 6517B 静电计, 其量程为 20 pA 时分辨率能达到  $10^{-18}$  A, 测量过程考虑了介质极化电流的影响, 即持续加电较长时间(约 1000 s), 取最后 100 s 的电流均值来计算电导率. 另外, 通过宽带介电谱仪(concept80)测量得到该介质的相对介电常数为  $\epsilon_r = 4.8$ . 前期研究[12], 采用 Arrhenius 电导率-温度模型对测试结果进行拟合, 得出该介质的电导激活能为  $\Delta H = 0.40$  eV. 本文采用新模型对测试结果进行拟合, 进一步拓宽了温度范围, 并验证了新模型的合理性.

#### 3.1 三类模型的对比分析

对比 Adamec 模型((6)式), TAH 和 VRH 电导模型((4), (5)式)和新提出模型((8)式)的拟合结果, 如图2所示. 其中, Arrhenius 模型拟合参数与文献一致[13], 即  $\sigma(293 \text{ K}, 8.1 \text{ MV/m}) = 6.2 \times 10^{-15}$  S/m; 后两种模型中的  $T_{\text{trans}} = 268$  K, 由该温度下的实测值, 根据(9)式对  $\sigma_{A0}$  和  $\sigma_{V0}$  取值,  $T_A = 0.4 \text{ eV}/k = 4.64 \times 10^3$  K,  $T_V = 5 \times 10^7$  K, 另外函数  $F_A, F_1, F_2$  中参量取值为与文献[5]一致. 其中  $T_A$  由电导激活能确定,  $T_V$  在  $10^7$  K— $10^8$  K 取值对结果影响不大.

该图表明, Adamec 电导率温度谱只能在较高温度部分实现对测试结果的满意拟合, 而不能兼顾低温部分, 从(6)式可知该温度谱是基于 Arrhenius 模型的; TAH 和 VRH 电导模型随温度的变化趋势与新模型接近, 因为其电场强度作用系数较小, 故拟合值偏小, 通过调整  $T_{\text{trans}}$  可以改善这一问题. 总之, 新模型不仅涉及的待定参数较 TAH 和 VRH 电导模型少, 而且得到了最好的拟合效果.



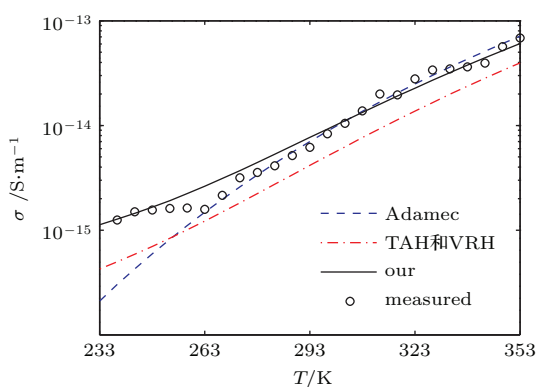


图2 三类模型拟合与试验结果对比

Fig. 2. Comparison of the results from three models and measurement.

### 3.2 实验验证与分析

考虑到测试中电压限制(防止介质击穿放电),实际电场强度不超过  $2 \times 10^7$  V/m, 于是选择两组电场强度对应的温度谱进行绘图. 考虑电场强度分别为 5 MV/m 和 20 MV/m, 取  $T_{trans} = 273$  K,  $T_A, T_V$  保持不变, 得到的拟合效果见图 3.

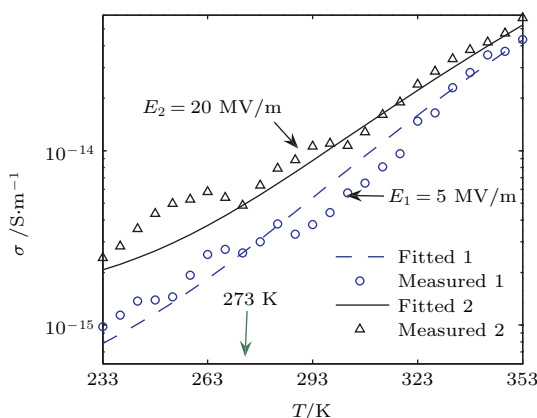


图3 新模型对电导率的拟合结果 (1),  $E = 5$  MV/m; 2),  $E = 20$  MV/m

Fig. 3. Data fitting performance by the newly proposed model: two groups of data with 1)  $E = 5$  MV/m and 2)  $E = 20$  MV/m.

可以看到, 测试数据存在一定波动, 但是从电导率关于温度的整体变化趋势来看, 新模型实现了较好拟合. 电导率随电场强度增大而升高, 其升高幅度  $\sigma(T, E_2)/\sigma(T, E_1)$  随着温度降低而增大, 这是因为低温区间对应的电导率倾向于由载流子隧穿效应主导的变程跳跃电导, 而强电场可以显著提高载流子隧穿成功的概率. 该作用机理体现在 (8) 式中的  $\cosh(\beta_F E^{1/2}/2kT)$ , 对比文献 [23] 中的图 3 和图 4, 可以发现其作用规律与 TAH 和 VRH 电导模

型是一致的. 与后文提到的低温下强场电导依然很低的现象不同, 这里所述为相对变化过程, 即同一温度下, 不同的场强大小对电导率的影响. 在拟合过程中, 相关参数只是参照其中一组数据进行设置的, 这体现了新模型对强场电导率的外推能力. 其参数取值较 TAH 和 VRH 电导模型容易, 只需要合理把握  $T_{trans}$  的取值即可, 其余参数根据电导激活能和一般取值范围便可得到. 结合图 2 分析, 该介质对应的在  $T_{trans}$  在 268 K—273 K 范围之间, 与低密度聚乙烯的情况是类似的.

### 3.3 新模型的适用范围和参数敏感度分析

根据材料参数(电导激活能和室温下电导率), 所提出模型可用于材料电导率的拟合与外推. 我们首先考虑它的适用范围, 然后分析参数敏感度. 这些参数为  $T_{trans}, T_A, T_V, \epsilon$  和  $\delta$ . 其中出现在场强作用系数中的有  $\epsilon$  和  $\delta$ ,  $\epsilon$  是材料的基本属性, 其取值出现偏差的可能性不大, 且  $\delta$  只影响  $C_{mob}$ , 如前所述, 在所讨论场强范围内 ( $< 100$  MV/m),  $C_{mob}$  对电导率的作用是可以忽略不计的. 因此, 需要重点考察的参数为  $T_{trans}, T_A$  和  $T_V$ .

以图 3 中第二组拟合数据为参照, 已知材料电导激活能为 0.4 eV, 对应的  $T_A = 4.64 \times 10^3$  K, 其室温下不考虑强电场作用的电导率  $\sigma|_{293\text{ K}} = 2.06 \times 10^{-15}$  S/m. 首先由 (1) 式得到  $\sigma|_{T_{trans}}$ , 然后代入模型计算, 得到结果如图 4 所示. 在低场强情况下 (1 MV/m), 得到的电导率温度谱曲线是合理的, 其变化趋势以  $T_{trans}$  为转折点, 低于该温度后, 电导率随温度变化趋于缓慢. 随着电场强度升高, 在低温区间出现了问题, 也就是电导率反常增大的现象, 我们认为这是不合理的. 分析其原因, 模型中的  $\chi = C_{con}C_{mob}$  随温度降低而增大, 而且当电场强度达到 10 MV/m 量级时, 该增大效应在总电导率中起到主导作用. 因此, (8) 式的有效温度区间随着电场强度增大而收窄, 如图中标记, 当电场强度为  $3 \times 10^7$  V/m 时, 温度下限收窄到 230 K; 当  $E = 10^8$  V/m 时, 达到 300 K. 从公式  $C_{mob}$  和  $C_{con}$  原始出处 [24] 可以看到, 相关实验验证所考虑的都是  $T > 293$  K 的情况, 而且从数值分析角度来看, 出现  $C_{mob}|_{T=50\text{ K}, E=2 \times 10^7\text{ V/m}} = 10^7$  是不合理. 针对低温区间受限问题, 我们给出如下解决方案. 鉴于文献 [24] 给出的实验验证温度均在 293 K 以上, 于是利用如下公式将  $C_{mob}$  和  $C_{con}$  中的  $T$  取值  $[T_{min}, T_{max}]$  变换到 293 K 以上, 其中

$\Delta T = 200$  K. 该变换

$$f(T) = (T_{\max} - 293) \left( 1 - \exp \left( - \frac{T - T_{\min}}{\Delta T} \right) \right) + 293. \quad (10)$$

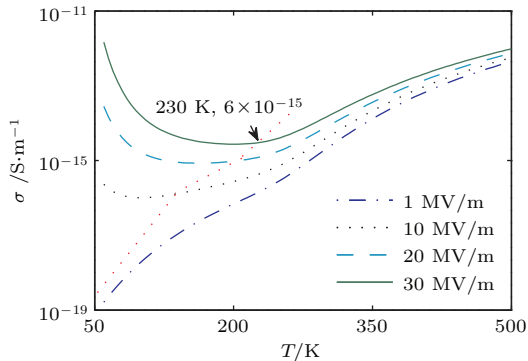


图4 新模型电导率随温度和电场强度变化关系

Fig. 4. Temperature and electric field dependence of conductivity by the proposed model.

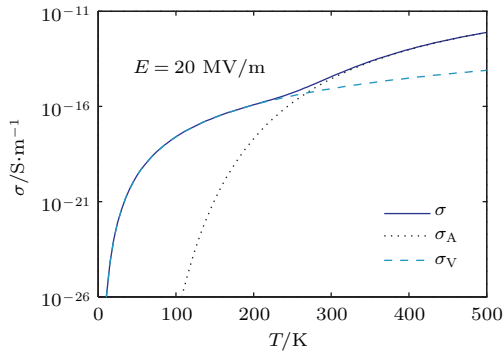


图5 温度变换后的电导率组成部分比较

Fig. 5. Comparison between the two parts of conductivity after temperature transformation.

从图5和图6可以看出,适当的温度变换有效拓宽了电导率温度谱的温度区间.从电导率的组成部分来看,当 $T > T_{\text{trans}}$ 时, $\sigma_A > \sigma_V$ ,热助跳跃电导率占优,反之,则 $\sigma_V$ 占优.随着温度降低, $\sigma_A$ 的衰减速度大于 $\sigma_V$ ,零下100 °C时,已经可以忽略 $\sigma_A$ 影响.当温度低至一定程度后,电场强度增大对进一步提高电导率的影响甚弱,这是因为极低温度下载流子的浓度几乎为零,电场强度的作用随之降低.变程跳跃电导不考虑强电场作用时(即1 MV/m对应的曲线),室温300 K和低温75 K对应的电导率分别为 $3.92 \times 10^{-15}$  S/m和 $3.48 \times 10^{-19}$  S/m,参照文献给出的实验数据可知,这种衰减幅度是合理的.通过对比图6和图4得知,所提出的温度变换在低场强情况下对电导率影响甚微,在高场强下可以有效拓宽模型的低温适用范围,因此,其物理意义可以理解为:虽然新模型中沿用了原来的载流子浓度系数 $C_{\text{con}}$ 和迁移率系

数 $C_{\text{con}}$ ,但在强电场作用下,需要对系数中的温度效应做出适当限制,以求得到合理的电导率变化规律,因为低温下载流子浓度降低,强场对电导率的增大效应不可能被放大,具体的微观机理有待进一步实验研究.

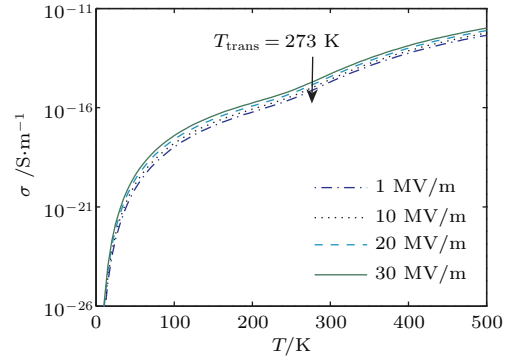


图6 温度变换后不同电场强度下的电导率温度谱

Fig. 6. Temperature and electric field dependence of conductivity by the proposed model with temperature transform.

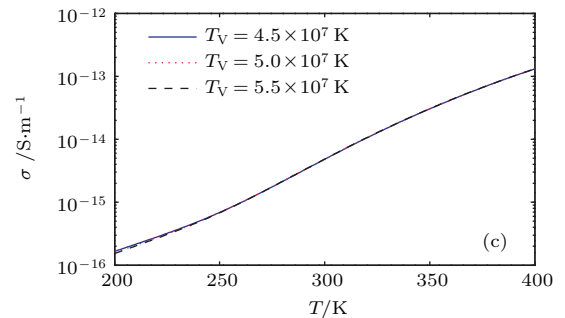
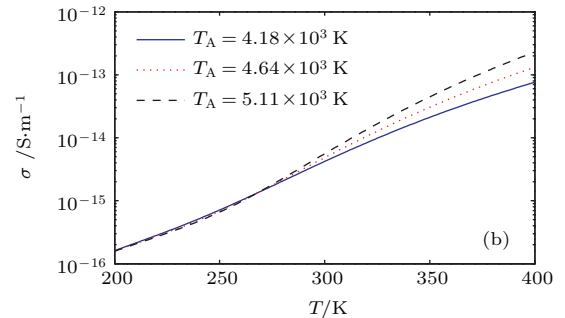
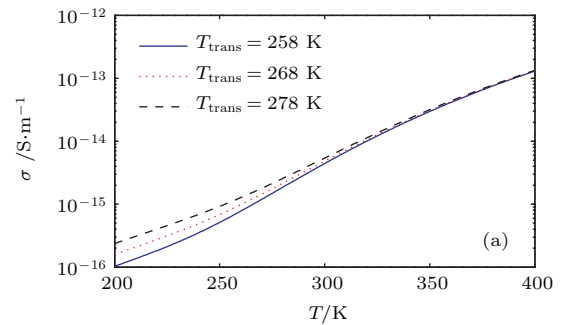


图7 拟合结果关于(a)  $T_{\text{trans}}$ , (b)  $T_A$  和 (c)  $T_V$  的灵敏度  
Fig. 7. Fitting results versus factors (a)  $T_{\text{trans}}$ , (b)  $T_A$  and (c)  $T_V$ .

从以上分析可知,采用新模型进行电导率拟合估计,主要受到三个参量的影响,即 $T_{\text{trans}}$ , $T_A$ , $T_V$ .分别调整三个参数上下浮动,得到对应的结果见图7.计算过程中,以图3第2组数据为对象,分别选择三组 $T_{\text{trans}}$ 及其对应的电导率进行计算;其余两图取 $T_{\text{trans}} = 268$  K,分别调整参数 $T_A$ , $T_V$ 上下浮动10%.可以看出, $T_V$ 在 $10^7$  K量级取值即可,拟合结果对 $T_{\text{trans}}$ 和 $T_A$ 比较敏感.因为可以参照电导激活能确定 $T_A$ ,因此在数据拟合中,主要是找到合适的 $T_{\text{trans}}$ .以上分析表明采用新模型进行数据拟合与外推的可行性.

## 4 结 论

以航天器介质深层充电为背景,针对目前聚合物绝缘介质电导率模型存在的不足,提出了电导率关于温度和电场强度的新模型.该模型结合了已有模型的优势,即不仅充分考虑了强电场对电导率的增强作用,而且具有较宽的温度适用范围.利用聚酰亚胺的电导率测试数据,得到了令人满意的数据拟合结果,初步验证了所提出模型的正确性.

新模型的温度谱借鉴了热助跳跃电导和变程跳跃电导模型,电导率由低温和高温两部分组成,其应用不局限于聚酰亚胺.根据材料的电导激活能进行数据拟合或外推时,需要确定低温段与高温段的过渡温度及其对应的电导率,继而确定待定参数,得到拟合结果.电导率关于模型中主要参数的敏感度分析表明:只要电导激活能和过渡温度可以准确确定下来,就能得到合理的结果.在电导率拟合方面,新模型体现了参数较少、适用性强的优势.此外,尝试对强电场作用因子中的温度进行合理变换,可以进一步提高模型的温度适用下限,这还需要后续研究和实验验证.

## 参考文献

- [1] Li G C, Min D M, Li S T, Zheng X Q, Ru J S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 209401 (in Chinese) [李国倡, 闵道敏, 李盛涛, 郑晓泉, 茹佳胜 2014 物理学报 **63** 209401]
- [2] Wrenn G L 1995 *Journal of Spacecraft and Rockets* **32** 514
- [3] Han J W, Huang J G, Liu Z, Wang S 2005 *Journal of Spacecraft and Rockets* **42** 1061

- [4] Guo X, Guo C W, Chen Y, Su Z P 2014 *Chin. Phys. B* **23** 076403
- [5] Dennison J R, Brunson J 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2246
- [6] Frederickson A R, Dennison J R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 2284
- [7] Frederickson A R, Benson C E, Bockman J F 2003 *Nuclear Instruments and Methods Physics Research B* **208** 454
- [8] Rodgers D J, Ryden K A, Latham P M 1998 *Engineering Tools for Internal Charging: Final Report*, ESA contract 12115/96/NL/JG(SC), 1998
- [9] Rodgers D J, Ryden K A, Wrenn G L 2003 *Materials in a Space Environment* **540** 609
- [10] Sorensen J, Rodgers D J 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 491
- [11] Jun I, Garrett H B, Kim W 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2467
- [12] Yi Z, Wang S, Tang X J, Wu Z C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 125201 (in Chinese) [易忠, 王松, 唐小金, 武占成 2015 物理学报 **64** 125201]
- [13] Wang S, Yi Z, Tang X J, Wu Z C 2015 *High Voltage Engineering* **41** 687 (in Chinese) [王松, 易忠, 唐小金, 武占成 2015 高电压技术 **41** 687]
- [14] Tang X J, Yi Z, Meng L F, Liu Y N, Zhang C, Huang J G, Wang Z H 2013 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41** 3448
- [15] Yi Z, Meng L F, Tang X J, Yuan X X 2007 *10th Spacecraft Charging Technology Conference*
- [16] Li S T, Li G C, Min D M, Zhao N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 059401 (in Chinese) [李盛涛, 李国倡, 闵道敏, 赵妮 2013 物理学报 **62** 059401]
- [17] Wintle H J 1983 *Conduction Processes in Polymers, "Engineering Dielectrics Volume IIA Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Molecular Structure and Behaviour"* pp239-354, Bartnikas R, Eichorn R M (eds). ASTM Special Technical Publication 783, ASTM, 1983
- [18] Mott N F, Davis E A 1979 *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials* (2nd Ed.) (Oxford U.K: Oxford Univ. Press)
- [19] Mott N F 1969 *Phil. Mag.* **19** 835
- [20] Amos A T, Crispin R J 1975 *J. Chem. Phys.* **63** 1890
- [21] Apsley N, Hughes P H 1975 *Philos. Mag.* **31** 1327
- [22] Apsley N, Hughes P H 1974 *Philos. Mag.* **30** 963
- [23] Dennison J R, Sim A, Brunson J, Gillespie J, Hart S, Dekany J, Sim C, Arnfield D 2009 *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, AIAA 2009-562, Orlando, Florida,
- [24] Adamec V, Calderwood J H 1975 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **8** 551
- [25] Minow J I 2007 *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* Reno, Nevada.

# Study on temperature and electric field dependence of conductivity in polyimide\*

Wang Song<sup>1)2)†</sup> Wu Zhan-Cheng<sup>1)</sup> Tang Xiao-Jin<sup>2)</sup> Sun Yong-Wei<sup>1)</sup> Yi Zhong<sup>2)</sup>

1) (*Research Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China*)

2) (*Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China*)

( Received 8 August 2015; revised manuscript received 23 September 2015 )

## Abstract

The deep dielectric charging (DDC) imposes a potential threat on spacecrafts. On the one hand, this kind of polymer insulator dielectric, represented by polyimide, is significantly dependent on temperature; on the other hand, during the charging process the high electric field (at the level of  $10^7$  V/m) will enhance the conductivity of the dielectric. Therefore, in order to make a precise assessment of DDC by computer simulation, the conductivity model should take into account the temperature and electric field dependences. In this field, two conductivity models are usually adopted for DDC simulation. One of them is proposed by Adamec. It puts emphasis on the enhanced conductivity due to high electric field, while its temperature dependence is based on the famous Arrhenius formula. Adamec model can make good performance versus electric field, but it is inappropriate in low temperatures. Another model combines the thermally assistant hopping conductivity and the variable-range hopping conductivity together, so it shows advantage in the temperature dependence, which is named as TAH & VRH model. Although this model also can include the influence from electric fields, the effectiveness is not so good as that of Adamec model. In order to combine the advantages of these two models, i.e. the Adamec model and TAH & VRH model, a new conductivity model is proposed with fewer parameters than those in TAH & VRH. It is derived by replacing the Arrhenius formula in Adamec model with a simplified temperature model referred to as TAH & VRH model. This formulation enables the new model to deal with a wider temperature range and keep the good performance versus high electric fields. The proposed model is verified partly by the measured data of a kind of polyimide. Satisfactory agreement is obtained in data fitting by using the new model, where the temperature dependence is better than that of Adamec model. In addition, to overcome the unreasonable increase in conductivity in low temperature and high electric field, a useful technique is proposed. By temperature mapping in the electric field correlated factors namely the carrier concentration and mobility enhancement factor, this technique can extend the feasible temperature range to a lower limit. This is done according to the assumption that the carrier concentration is small at low temperatures, and consequently the electric field influence should not be large. At high temperatures or in low electric fields, the temperature mapping is of little effect. Finally, analysis of the model's sensitivity versus several parameters is provided, demonstrating the advantage of applicability of the new model with fewer parameters.

**Keywords:** deep dielectric charging, insulator dielectric, polyimide (Kapton), temperature and high electric dependence of conductivity

**PACS:** 52.25.Mq, 72.20.Ee, 72.20.Ht, 72.20.Jv

**DOI:** 10.7498/aps.65.025201

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51577190).

† Corresponding author. E-mail: [735314535@qq.com](mailto:735314535@qq.com)