

测定材料逸出功的一种新方法

杨 德 清 陈 尔 纲

(云南大学物理系)

1988 年 3 月 28 日收到

本文报道了一种测定材料逸出功的新方法,二次电子发射-接触电位差法(简称 SEE-CPD 法)。用该法对 Ni, Al, Au 和 Mo 四种纯金属的逸出功进行了测量,并与 Fowler 等温法和 Kelvin 的接触电位差法比较,结果是一致的。表明 SEE-CPD 法在理论上是正确的,在实际应用中也是成功的。

一、引 言

材料逸出功是物质特性的主要参数之一,特别是对固体电子发射,更是一个非常重要的参量。因为它的大小直接表征着电子发射本领的高低,不仅如此,更深的研究表明它除了与电场和温度有关外,还与材料结构和表面状况都有密切关系。因此,精确测量和认真分析它,不论对揭示固体电子发射机制,或是对表面物理过程和表面现象的了解,都是极为重要的。长期以来一直受到人们的关注,成为重要的研究课题。

材料逸出功一般用 ϕ 表示,定义为真空能级 E_0 和 Fermi 能级 E_F 之差,即

$$\phi = E_0 - E_F. \quad (1)$$

一般用(1)式很难求出 ϕ 的准值。但它具有指导意义。

目前在确定 ϕ 的准确值时,尽管也有人用理论的方法进行计算^[1,2];但更多的仍然是实验测定。其中主要有 Richardson 直线法;量热法;Fowler 等温法^[3];Dubridge 等色法^[4];以及 Kelvin 接触电位差法^[5]等。对这些方法的比较已有很好评述^[6]。它们各有优缺点,使用范围、精度和局限性也不尽相同。我们在分析这些方法的基础上,利用二次电子发射特性和接触效应,提出了所谓二次电子发射-接触电位差法(SEE-CPD)。实验表明,用该法测定材料逸出功不仅使用方便,测量精度高,而且还有许多其它方法所没有的特点。

二、SEE-CPD 的工作原理

如前所述,我们提的 SEE-CPD 法是以精确测量材料的二次电子能量分布和接触电位差为基础。

众所周知,当两种不同逸出功的金属接触时,它们之间的外接触电位差 V_k ,等于它们逸出功之差:

$$V_k = \frac{1}{e} (\phi_2 - \phi_1). \quad (2)$$

这里 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为金属 1 和 2 的逸出功, e 为电子电荷. 另外, 如果物质表面受到具有一定能量的电子轰击, 就会产生电子发射. 这种现象称二次电子发射. 通常用次级电子发射系数 δ 来描述, 并表示为^[7]

$$\delta = \frac{I_s}{I_p} \quad (3)$$

式中 I_p 为轰击表面的一次电子流; I_s 为同一时刻从表面发射出来的二次电子流.

事实证明, 对一定材料若入射的一次电子流其强度、能量和入射角不变, 则 δ 值也不变. 于是由(3)式得的二次电子流就为常数, 可记为

$$I_{s0} = \delta_0 I_{p0}. \quad (4)$$

实验指出, 从物质表面发射出来的二次电子中, 其能量是各不相同的, 其典型分布如图 1 所示^[7]. 主要由弹性散射电子、背散射电子和真正二次电子三部分组成. 其中最重要也是我们最感兴趣的是真正二次电子. 这部分电子除了具有能量低, 所占比例大(一般占总数的 90% 以上), 分布形状和峰的位置不随一次电子能量和入射角而变化等特点外, 更重要的是曲线形状有如图 2^[8] 所示是满足 Maxwell 分布的. 一旦具有这种分布的真正

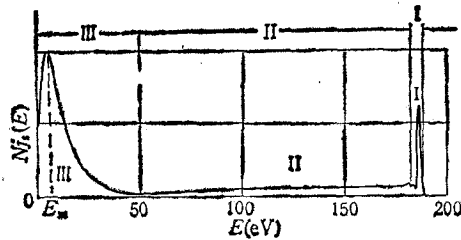


图 1 二次电子能量分布的一般形状

I 为弹性散射电子; II 为背散射电子;
III 为真正二次电子

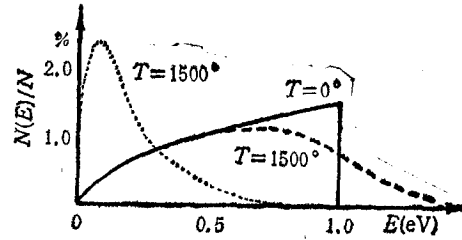


图 2 Fermi 和 Maxwell 能量分布

虚线为 Maxwell 分布;
实线和粗虚线为 Fermi 分布

二次电子处于拒斥场中, 所形成的电流毫无疑问是遵守拒斥场流通规律的. 这一点也可以用图 3 作进一步说明. 若令 T 为次级发射体, c 为收集极, V_c 为外加负电位. 当收集极的实际电位为负值时, 即

$$V'_c = V_c + V_k < 0. \quad (5)$$

T, c 间便处于拒斥场. 这时, 从 T 表面发射出来的真正二次电子, 是不可能都到达收集极的, 只有动能足够大且满足以下条件者, 才可能克服拒斥场的阻碍作用而到达收集极. 该条件为

$$E_s \geq e|V'_c| = e|(V_c + V_k)|. \quad (6)$$

这里 E_s 为二次电子动能, e 为电子电荷.

于是, 根据 Maxwell 分布律, 在 T, c 拒斥场中的电流 I_s 和电压 V'_c 间有如下关系:

$$I_s = I_{s0} \exp \left[-\frac{e}{2E_m} |(V_c + V_k)| \right]. \quad (7)$$

式中 E_m 为真正二次电子能量分布的最可几能量。

对(7)式两边取对数得

$$\ln(I_s/I_{s0}) = -\frac{e}{2E_m} |(V_c + V_k)|. \quad (8)$$

由此可见, $\ln(I_s/I_{s0})$ 与 V_c 间的关系为一一直线,其斜率为 $e/2E_m$ 。

因此,若用实验的方法一经找到 $\ln(I_s/I_{s0}) = 0$ 的条件,便立即可确定出 V_k 的数值,记为

$$V_k = -V_{c0}. \quad (9)$$

这样,只要事先能知道 T, c 电极中任一电极材料的逸出功,就可以既确定两电极材料逸出功之差的相对值,又可以通过(2)式确定另一种材料逸出功的绝对值。

三、SEE-CPD 法的验证和讨论

对(7)式的正确性,虽已进行了严格论证,但它是否符合实际,仍须用实验证明。为此,我们用图3所示的球形电容器拒斥场测试电路^[9],对 Ni, Al, Au 和 Mo 四种纯金属进行了测量。结果得到的减速曲线如图4(a)和(b)所示;它们之间和它们相对于收集极的接触电位差如图5所示。

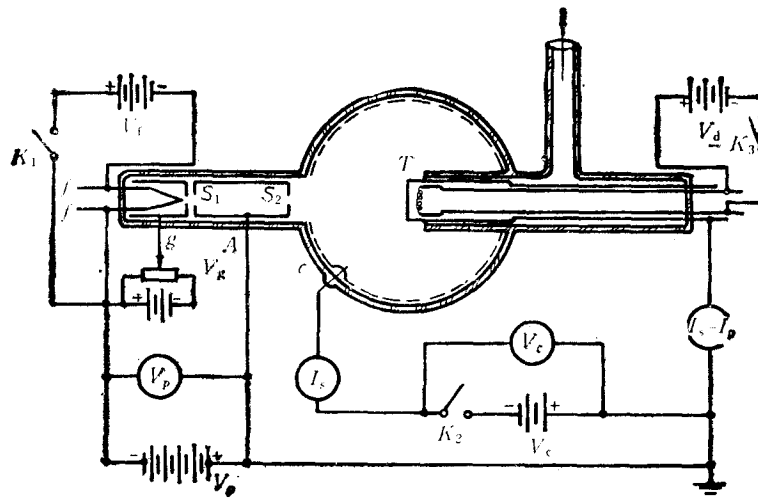
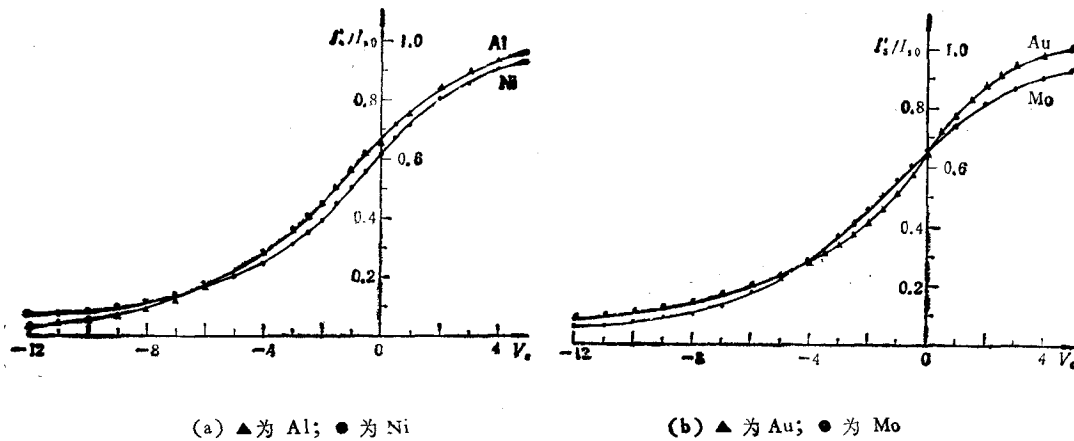


图3 测量电路

T 为次级发射体, c 为收集极; V_f 为灯丝电源; V_p 为加速电源; V_d 为加热电源; V_e 为拒斥电源; V_g 为调制极电源

在讨论之前,必须先指出:

(1) 用球形电容器拒斥场法测量二次电子流时,因电流中不仅有真正二次电子,实际上还有弹性散射和背散射电子。这两部分电子虽然所占比例不大,但能量高且不满足 Maxwell 分布,故应将它们去掉。为此,我们引入 η 量,定义为弹性散射和背散射电子与总收集电流之比(该量可通过对减速曲线微分,作出二次电子能量分布来确定),于是对

图 4 $V_p = 200\text{V}$

(7)式应修正为

$$(I'_c - \eta I'_{c0}) = I'_{c0}(1 - \eta) \exp \left[-\frac{e}{2E_m} |(V_c + V_k)| \right]. \quad (10)$$

这里 I'_c 和 I'_{c0} 为收集极实测电流值。

(2) 在对四种纯金属测试时,是在室温,相同真空度 ($1 \times 10^{-7}\text{Torr}$),用同一个实验管和其它实验条件完全相同下进行的。

(3) 因实验管的收集极为胶体石墨,其逸出功尚无可靠数据。为便于比较和提高测量精度,我们以公认 Au 的逸出功 $4.92\text{eV}^{[10,11]}$ 为参考基准。由于

$$V_{k_1} = \frac{1}{e} [\phi_c - \phi_{Au}],$$

$$V_{k_2} = \frac{1}{e} [\phi_c - \phi_i].$$

故 $\phi_i = \phi_{Au} - e(V_{k_2} - V_{k_1})$ 。这里 ϕ_c 为收集极材料的逸出功, ϕ_i 为待测材料的逸出功。

从实验测得的图 5 中可以看到

(1) 四种纯金属在拒斥场中的 $\ln[(I'_c - \eta I'_{c0})/I'_{c0}(1 - \eta)]$ 与 V_c 关系确为一直线;其斜率如表 1 所示,这与图 6^[12]所示 $e/2E_m \approx 0.26$ 相比,结果是一致的。表明二次电子速度分布确实满足 Maxwell 分布律,同时也证明(7)式是正确的。

(2) Al 和 Mo 的逸出功小于 Au 的逸出功,它们与 Au 的接触电位差分别为 0.8eV 和 0.7eV ;而 Ni 的逸出功则大于 Au,其接触电位差为 0.15eV 。

(3) 与光电发射的 Fowler 等温法和 Kelvin 接触电位差 (CPD) 法相比,其结果如表 1 所示。

从上述实验和比较中可见,用 SEE-CPD 法所得的结果与其它方法是一致的。这表明 SEE-CPD 法在理论上是正确的,在实际应用中也是成功的。

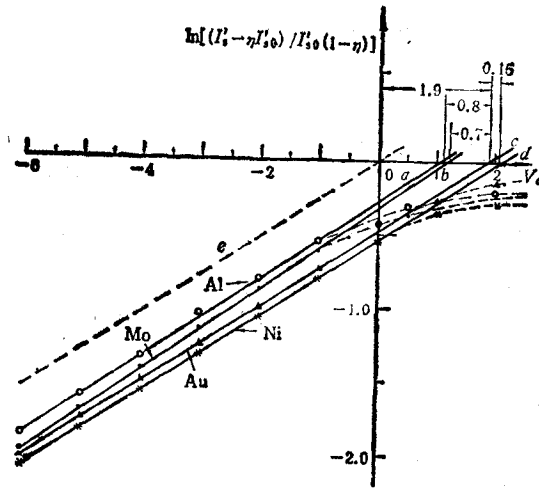


图5 在拒斥场中用 SEE-CPD 法测得的 Ni, Au, Mo 和 Al 对收集极间的 CPD 值, 以及 Ni, Mo 和 Al 相对于 Au 的 CPD 值

--- 为 $V_k = 0$; * 为 Ni; ▲ 为 Au; ● 为 Mo; ○ 为 Al

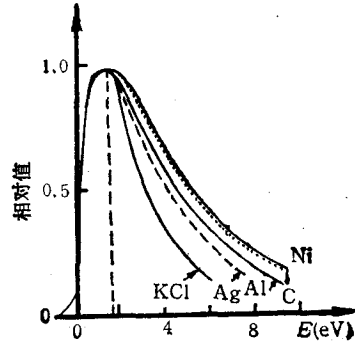


图6 几种金属和 KCl 的二次电子能量分布

表1 SEE-CPD 法与 Fowler 和 Kelvin 法比较

材料	比较	SEE-CPD 法			Fowler 等温法	Kelvin CPD 法
		$\frac{e}{2E_m}$	$V_k(eV)$	$\phi(eV)$		
Au		0.256	0	4.92	4.92 ^[10]	5.22 ^[13]
Ni		0.256	+0.15	5.07	5.05 ^[14]	4.96 ^[15]
Al		0.255	-0.8	4.12	4.20 ^[16]	4.19 ^[17]
Mo		0.264	-0.7	4.22	4.12 ^[18]	4.20 ^[17]

四、结 束 语

事实说明,我们提出的 SEE-CPD 法既不同于 Richardson 直线法,也不同于 Kelvin 的接触电位差法,但兼有两者的优点。特别是它还有以下特点:

(1) 因轰击待测体的一次电子能量较高(一般为几百电子伏特),可使其充分除气表面清洁,有利提高测量精度和可靠性。

(2) 用该法既可测定金属的逸出功,又可测定合金、半导体以致绝缘体材料的逸出功。特别是可方便地研究物质结构对非晶和准晶材料逸出功的影响。

(3) 此外,还可以用该法研究和分析材料逸出功随温度变化的关系等。

由此可见,SEE-CPD 法在材料分析和电子发射特性的研究等方面,都具有广泛的实用意义。

- [1] N. D. Lang and W. Kohn, *Phys. Rev.*, **B3**(1971), 1215.
- [2] G. Paasch, H. Eschrig and W. John, *Phys. Status Solidi (b)*, **51**(1972), 283.
- [3] R. H. Fowler, *Phys. Rev.*, **38**(1931), 45.
- [4] L. A. Dubridge, *Phys. Rev.*, **39**(1932), 108.
- [5] W. A. Zisman, *Rev. Sci. Instr.*, **3**(1932), 367.
- [6] J. C. Riviere, in *solid state surface science*, ed. M. Green M. Dekker; New York, (1969).
- [7] O. Hachenberg and W. Brauer, *Advances in electronics and electron physics*, Vol. **XI**(1959), 417.
- [8] G. Herrmann and S. Wagener, *The Oxide-coated Cathode*, Vol. II (1951), 12.
- [9] O. Hachenberg and W. Brauer, *Advances in electronics and electron physics*, Vol. **XI**(1959), 432.
- [10] 刘学恣, 阴极电子学, 科学出版社, 北京, (1980), 242页.
- [11] 《真空设计手册》编写组编, 真空设计手册(上册), 国防工业出版社, (1979), 522页.
- [12] G. Mollenstedt and F. Lenz, *Advances in electronics and electron physics*, Vol. **XVIII** (1963), 284.
- [13] E. E. Huber, *Appl. Phys. Letters*, **8**(1966), 169.
- [14] A. B. Cardwell, *Phys. Rev.*, **76**(1949), 125.
- [15] R. C. L. Bosworth, *Trans. Faraday Soc.*, **35**(1939), 397.
- [16] R. Suhrmann and J. Pietrzik, *Z. Physik*, **122**(1944), 600.
- [17] B. J. Hopkins and J. C. Riviere, *Brit. J. Appl. Phys.*, **15**(1964), 941.
- [18] R. J. Cashman and W. S. Huxford, *Phys. Rev.*, **48**(1935), 734.

A NEW METHOD OF MEASURING THE WORK FUNCTION OF MATERIALS

YANG DE-QING CHEN ER-GANG

(Department of Physics, Yunnan University, Kunming)

ABSTRACT

This paper reports a new method of measuring the work function of materials. The method is based on accurate measuring of energy distribution of secondary electrons and contact potential difference of materials. We call it the method of secondary electron emission-contact potential difference (SEE-CPD method). The work function of pure metals of Ni, Al, Au and Mo were measured by this method. The results are well consistent with that obtained by using photo-electron and Kelvin's method. The fundamentals and applications of the SEE-CPD method are proved to be correct and reliable.