



数据加载失败，请稍后重试！



数据加载失败，请稍后重试！

73.61083
163
3-2

电真空技术丛书

电子管热絲中的物理过程
热导、漏电、哼声

(内部資料 注意保存)

北京电子管厂技术情报組



数据加载失败，请稍后重试！

电子管热絲中的物理过程

热导、漏电、哼声

A. P. 舒里曼

1. 引言

电子管阴极內的热絲是一个比較简单的零件，它应能保証阴极加热到所需的温度。同时，应保証在电子管热絲电路及其它綫路間的电耦合最小。

热絲在其发展过程中逐渐形成目前的形式，就是以金属絲为芯，外复一层絕緣物。对絕緣物塗层的要求极严格：它应在高的热絲工作温度下具有良好的絕緣性能、高的击穿电压值及一系列电子管工作时所必需的給定的机械性能和热性能。目前所使用的塗层主要由氧化鋁組成。氧化鋁看来是一种能在最大程度上滿足上述要求的材料。

在热絲工作以及在制造热絲时，会产生許多物理过程，这些过程最后决定了热絲的质量。这些过程至今研究得还不够，因为目前对許多极重大的問題尚不能給以肯定的解答。在研究热絲中所发生的一些物理过程时經常要遇到一些实验上极其困难的問題，特别是在高温下氧化鋁的物理性质几乎沒有研究过。

阴极內的热絲工作于复杂的温度条件下：阴极軸向的温度降落及徑向的温度降落，可能有局部的过热，热傳导决定于热絲和阴极的結構，因而热絲各点的温度是不同的。热絲的电性质与其温度有很大的关系，因此在研究热絲时所得到的結果或者是平均值，或者是表示热絲温度最顯著最低部份的数值。此

外，热絲与阴极接触得极不好。在热絲工作时与阴极的接触情况也会改变。

所有这些情况都妨碍了对热絲内发生的过程的研究，为了对这些过程具有一定的概念，就必须先从研究单纯的现象开始，尽可能避免上述的复杂情况，而后再利用所得到的资料来解释热絲在真实情况下的工作。

本报告是几年来在作者指导下由列宁格勒加里宁工学院的同事和学生以及无线电工业部所属工厂特殊设计处同事们共同进行工作的综合报告的第一部分。

2. 热絲的热性质

在热絲工作时以及在研究其性能时下述参数具有重要的意义：1) 热絲单位长度的消耗功率；2) 热絲温度；3) 热絲塗层的热传导。

在这些参数中第一个参数在很大程度上决定于热絲的结构以及对阴极温度所提出的各种要求。测量它不是一件困难的事。

但是，测量第二个参数就复杂得多了。首先产生了这样一个问题：热絲温度这个概念代表什么？既然热絲表面各点的温度由于热传导条件的不同而有所不同，另外热絲塗层温度又有径向降落，那么热絲温度这个概念也就没有直接的物理意义，而仅是与热絲结构有关的某一平均值。

测定热絲芯金属及其表面的最高温度具有很大的意义，因为热絲的许多重要性能，特别是它的电参数都是由它们来决定的。但是，这些温度值与热絲的结构有关，在一般情况下不能确定。因此，我们的第一个任务就是决定塗复氧化铝套层的足够长的鎢絲芯金属及氧化铝表面的温度。

在这种情况下，芯金屬的温度利用测量其电阻的方法就可以很容易地确定。鎢絲的电阻温度系数与芯金屬表面情况、鎢絲表面有无氧化铝涂层无关，也就是說，鎢絲的电阻是唯一的在塗复氧化铝时不变的表徵其温度的量值。目前对純鎢的电阻温度系数知道得很清楚[文献 1—3]。如果用足够长的絲，其冷端效应是不重要的。在必須考虑到端点效应时，可以运用[文献 4—9]中的任一个半經驗公式，同时必須考虑到氧化铝涂层的影响。絲的軸向温度降的相对值同样可以用光学测温法观测其表面而决定。

在决定氧化铝表面温度时，我們立刻会碰到許多困难。光学测温法在此时不能給出足够正确的結果，因为氧化铝的辐射性能尚未研究过。皮拉尼[文献 10 和 11]所給的表面光滑的压制的氧化铝粉在 $\lambda = 0.655$ 微米时的辐射系数 e_λ 在温度为 1100—1600°K 范围内等于 0.14。李卜曼[文献 12]指出，氧化铝的辐射能力随温度的升高而显著提高，并与顆粒度有关。因为辐射材料的表面情况在測定 e_λ 值时很重要，所以很难确定皮拉尼或李卜曼的数据与热絲上所使用的氧化铝相符的程度。其它一些测量方法（热电偶、电阻温度计及其它）均极为复杂，因此使用它們来进行試驗有很大的困难。

因此，我們决定根据較容易测量的芯金屬的温度值来决定表面温度。为此，必須知道在高温下氧化铝的热傳导系数。鉴于这一情况，創造了一种方法，即相对功率特性偏移法[文献 13]。同时又用另外一个方法作了监督性的测量：在氧化铝表面繞了一个电阻温度计网极。这二个方法給出的結果很接近。

在作第一步热处理燒去粘合剂时，涂层的热性质有急剧的变化，在涂层內存在有碳粒子。进一步作热处理时影响就相当小了。图 1 所示是燒結的氧化铝热傳导系数在涂层受到不同的

老炼时与温度的关系。由图可以看出，在作各种老炼时热傳導率的变化較小。

由測量結果得到了老炼完善的氧化鋁热傳導系数关系曲綫（见图 2）。数字資料列于表 1。

表 1 在不同溫度下老炼完善的氧化鋁的热傳導系数(平均值)

溫 度, ($^{\circ}\text{C}$)	$K, 10^3$ (瓦/厘米·度)	溫 度, ($^{\circ}\text{C}$)	$K, 10^3$ (瓦/厘米·度)
900	2.0	1500	3.4
1000	2.3	1600	3.7
1100	2.4	1700	4.0
1200	2.7	1800	4.3
1300	2.9	1900	4.6
1400	3.2		

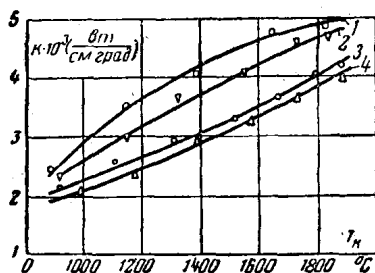


图 1 塗层作不同的老炼时氧化鋁的热傳導系数与芯金屬溫度的关系曲綫

曲綫 1—4 相当于四次依次进行的老炼： $d_K=100$ 微米； $d_n=370$ 微米； $l=13$ 厘米。

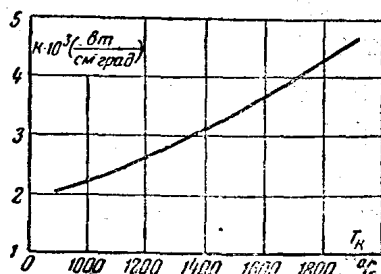


图 2 老炼完善的氧化鋁热傳導系数与芯金屬溫度的关系曲綫

把这些結果与現知的为数不多的資料比較 [文献 14—16] (图 3) 可以看出，我們样品的热傳導率比文献所載的資料低一个数量級，約在 [文献 17] 中列举的数据 ($K=0.0016-0.0084$

卡/厘米·秒·度) 之下限。产生这种情况的原因似乎应当从材料之不同上去找。在[文献 14]的工作中研究的是熔融的氧化铝(比重 3.67, 孔隙度 23%), 在[文献 15]中指出的是氧化铝, 在[文献 16]中指的是压制的氧化铝, 而我们的资料中所指的则是人造电钢玉在使用于热丝中所处的状态。很自然, 对氧化铝而言, 其热传导率应与结构及物态有很大的关系。应该指出, 如果文献中所载的资料可以指热丝涂层而言, 那么这就是说热丝涂层之温度降落极小(约为 $5-6^{\circ}$), 这个可能性是很小的。

已知氧化铝的热传导系数及芯金属的温度, 就可以按下式计算涂层内的温度降或其表面温度:

$$T_n = T_k - \frac{W}{2k} d_n l_n \frac{d_n}{d_k}, \quad (1)$$

式中 T_n —氧化铝表面的温度;

T_k —芯金属温度;

W —热丝功率;

d_n —试样直径;

d_k —芯金属直径。

根据所作的实验证明, 氧化铝层内的径向温度差约为 0.5—0.6 度/微米。

在某些情况下可以认为, 对于涂层氧化铝层的热丝, 氧化铝表面的温度约等于测得的芯金属温度, 无需对热丝的冷端及径向温度差进行修正, 后二者之效应相反, 约可互相抵消。实验证明, 对于涂层厚度约为 30—40 微米的氧化铝来说, 这个假定实际上在一定的温度范围内不会给出大的误差。但是, 当氧化铝层较厚时用这种方法来决定表面的温度会引起极大的误差。图 4 示出了氧化铝涂层厚的热丝的数据。比较两修正值可以看出, 它们并不能相互抵消。

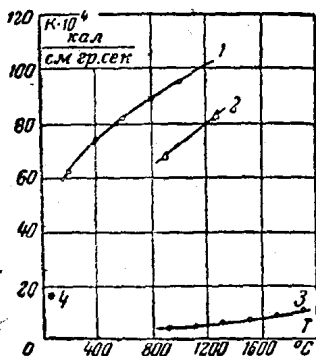


图3 氧化铝热传导系数与温度的关系曲线

曲线根据不同的数据画成:

1—[文献 14]; 2—[文献 15]; 3—我们的数据; 30—[文献 17]。

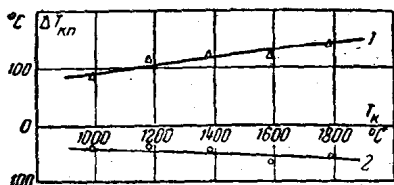


图4 氧化铝层中温度降 ΔT_{kn} (曲线 1) 及芯金属冷端的修正值 ΔT_k (曲线 2) 与芯金属温度的关系:

$d_k = 140$ 微米; $d_n = 520$ 微米;
 $l = 13$ 厘米。

上述的测量数据使我们可以判断热丝的热状态。但如果将它们直接引用于实际热丝的复什情况下就不太慎重了。还需要进行大量的工作去阐明和确定热丝的热状态。

3. 热丝芯金属-阴极电路内的漏电电流

大家都知道, 如在热丝芯金属与阴极间加上电位差 U_{nk} , 则在此电路中产生电流 I_{nk} 。由于在芯金属的某些部份和阴极间存在电位差 (例如, 当热丝中点接地, 或者当阳极与芯金属的正引出线接通时), 即使 $U_{nk} = 0$, 通常仍有电流 I_{nk} 。

当电流流过热丝时, 应将下述情况分开;

- 1) U_{nk} 为直流, 其值不很大;
- 2) U_{nk} 为交流, 其值不很大;
- 3) U_{nk} 以脉冲形式通入电路中;
- 4) U_{nk} 为交流及直流 (预击穿电压和击穿电压)。

首先必須对芯金属—阴极电路有电流通过时所发生的各种过程有一清楚的概念。但这一工作直到现在尚未完全解决。本文将针对上述几种情况加以讨论。

4. 通过热丝的直流电的伏安特性曲线

对不同型号的电子管及样管进行了大量测量，得到了如下的结果： I_{nk} 的绝对值彼此相差极大。例如，在 $U_{nk}=100$ 伏及工作灯丝电压下，电流 I_{nk} 的变化范围由几分之一到几百微安，也就是说，可能相差四个数量级。大多数电子管热丝的伏安特性曲线与图 5 和图 6 中所示的相似。这些特性曲线的特点是

电流极不对称。在这些图上和以后的图上正的 U_{nk} 值相当于正的阴极电位。利用这种表示方法伏安特性曲线要看得清楚一些。

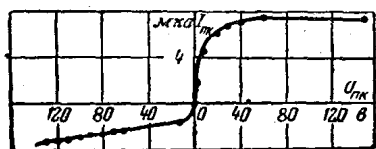


图 5 在正常加热情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

与此同时也可以看到一些其它形状的伏安特性曲线。一

般电子管中也有少量的热丝，其伏安特性曲线不对称，但在负半部电流很大(图 7、8、9)。有时还会碰到伏安特性曲线对称的热丝(图 10)。除了在图中画出的典型例子以外，还可能有些中间的形状。伏安特性曲线的形状与电流的绝对值无关。这点可用图 11 和 12 来说明，在此两个图上电流值相差 30 倍左右。

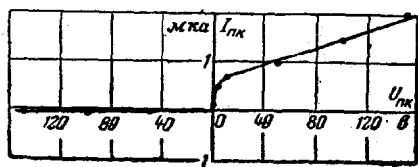


图 6 在正常加热情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

大多数的热丝在加上电压 U_{nk} 时经过最初的电流跃增后

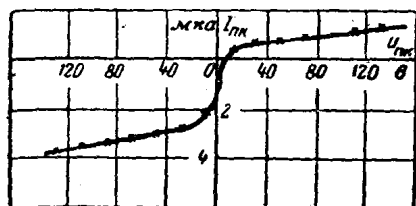


图 7 在正常加热情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

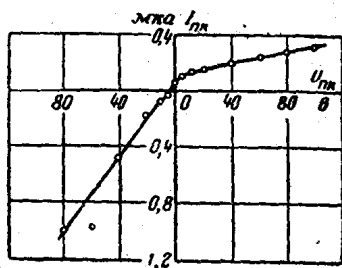


图 8 在正常加热情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

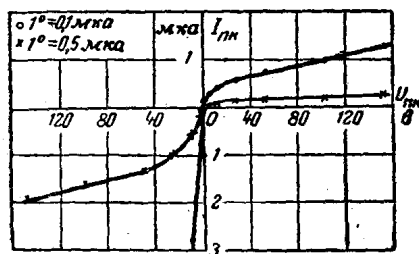


图 9 在正常加热情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

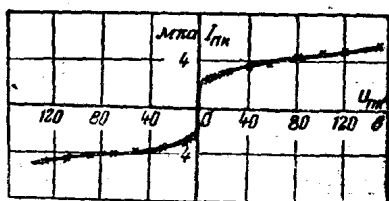


图 10 在正常加热情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

电流应当下降，下降速度开始时快，而后逐渐变慢。重复测量时电流值即比第一次测量时小。静置片刻后电子管的漏电流值变得又和最初的值接近（有时稍小些，有时稍大些）。但有时也会遇到这样的电子管，它们的电流变化过程正好相反——在测量过程中，电流慢慢上升。由图 13 可以看出，同一支热丝在同样条件下画出的伏安特性曲线会有很大的区别。依次测绘特性曲线时伏安特性曲线的变化见图 14。仅在第六次测量以后，特性曲线才开始稳定。 I_{nk} 的时间关系的特点是电流的变化过程在长时间内（约数小时）一直继续进行，其速度与温度有关，变化过程的行程与所加电压的极性及热丝以前的历史有关。

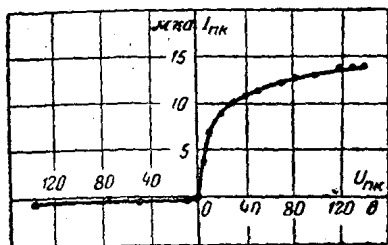


图 11 在正常的加热情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

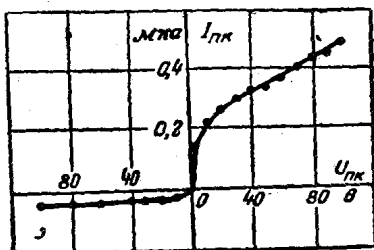


图 12 在正常的情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

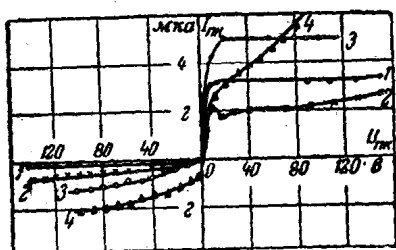


图 13 在正常加热的情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

1—第一次测量；2—第一次测量之后立刻进行的第二次量；3—第一次测量后经过 2 小时进行的第三次测量；4—第三次测量后立刻进行的第四次测量。

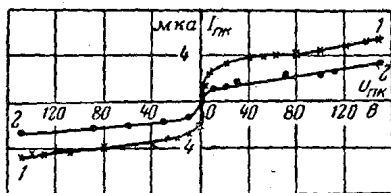


图 14 在正常加热情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线

1—第一次测量；2—第二次测量。

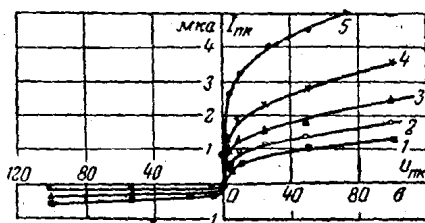


图 15 在正常加热情况下电流 I_{nk} 的伏安特性曲线
1—5.7 伏；2—6.1 伏；3—6.3 伏；4—6.5 伏；5—6.7 伏。

I_{nk} 之值与热絲的温度有关。图 15 所示为一支热絲在不同灯絲电压时的伏安特性曲綫族。

因此，主要的試驗事实可归結如下：(1)在絕大多数情况下有整流現象；(2) U_{nk} 值不大时电流急剧上升，而后电流即达飽和，或电流按直綫关系或近似直綫关系上升；(3)不同的电子管 I_{nk} 的絕對值也不同；(4)电流随時間改变，在測量过程中也发生改变；(5) I_{nk} 值与温度有关。

一般的意見是（例如文献18和19所述），芯金屬—阴极电路中的电流是热絲絕緣层的傳导电流。为了解釋与图 5 所示曲綫类似的伏安特性曲綫形状，克辽姆別列[文献18]作了如下的假定：在金屬与半导体的界面上有接触現象存在，因此电流飽和。为証实这点，克辽姆別列指出，如果热絲与阴极接触得相当牢靠，則伏安特性曲綫呈欧姆性直綫。格拉富杰尔[文献19]将伏安特性曲綫的形状归因于极化現象。

有一系列的論証說明，要想解釋伏安特性曲綫的形状单靠氧化鋁的傳导性或者与接触現象有关的过程或者极化現象是不够的。从半导体和介电质电傳导的最一般性的观点来看，在电流傳送过程中除电导率以外，尚有其它的使伏安特性曲綫变形的某些过程。此外，如果仅靠氧化鋁的电导傳送通过热絲的电流，則 I_{nk} 值很小，因为热絲与阴极之接触很不完善。

从伏安特性曲綫的外形看来可以很自然地假定，在自热絲向阴极傳送电流的过程中热电子放射很重要，这点在[文献20]中已經談到，并被我們用实验証明[文献21]。

为了判断热絲的伏安特性曲綫及其性质的其它特点，应当仔細地研究較簡單的现象——氧化鋁的电傳导及热电子放射，这些将在以下諸节中加以討論。

5. 氧化铝的电导率

我們早在 1939 年就开始研究氧化铝的电导率[文献21], 后来从1949年又繼續进行研究。我們用自己提出的气体放电法作为高温下定量研究电导率的主要方法[文献 22 和 23]。为了檢查这个方法所取得的結果是否正确, 也曾用其它方法专门測量了氧化铝的电导率。在已复氧化铝的鎢絲上又繞了几圈細鎢絲(直徑 12 微米)作为第二电极(試探极)。为了避免有放射电流, 試探极的引出綫上也应塗复氧化铝。比較用两种方法測得的資料, 得到了极良好的結果。也曾在試探极与芯金屬間加交流电压时用試探极进行了測量。伏安特性曲綫在示波器螢光屏上呈現出来。我們用以研究的样品的外形見图 16。

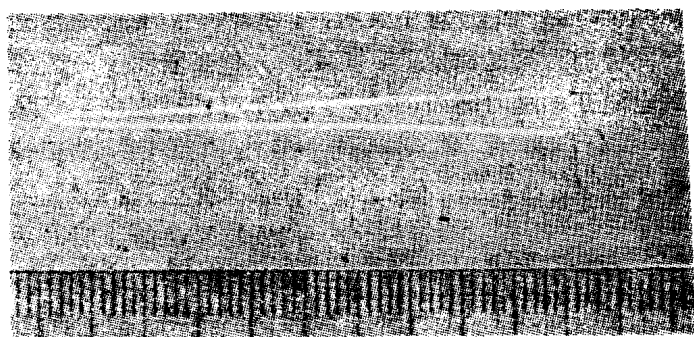


图 16 用以研究的样品的外形

測量的結果可归結如下: 氧化铝电导率的电流伏安特性曲綫为一直綫(图 17、18)。把这些特性曲綫与电子管内通过热絲的伏安特性曲綫相比較, 可以作出极重要的結論: 不能仅用氧化铝的电导率来解釋电流由芯金屬向阴极的載流过程。各种伏安特性曲綫外形的区别表明, 在实际的热絲中还发生其它一些过程。

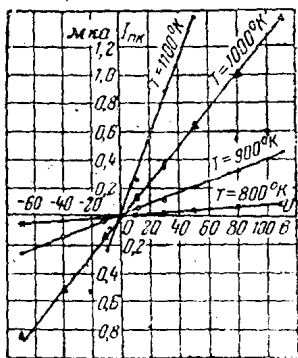


图 17 在不同温度下氧化铝传导电流的伏安特性曲线
(气体放电法)

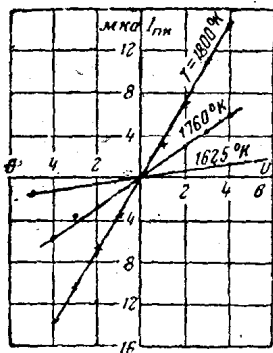


图 18 在不同温度下氧化铝传导电流的伏安特性曲线
(第二电极为钨丝)

在测量电导率的过程中发现，如果从室温开始进行测量，则起初测得的数据是稳定的可再现的。但随着温度的升高，所测得的电流开始随时间而下降，以致不可能确定电导率之值。

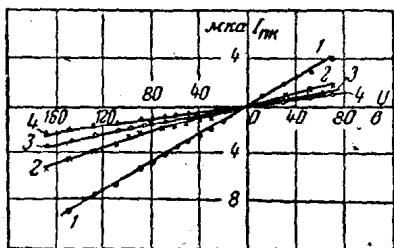


图 19 在热丝工作温度下氧化铝传导电流的伏安特性曲线。数字表示曲线的测绘顺序。

图 19 和 20 所示是某一个试样依次快速进行测量所得的伏安特性曲线。所得结果看来与在电子管内测绘得的热丝电流伏安特性曲线相似。但在测量电导率时，电流永远随时间而下降，而在实际电子管的热丝中有时会看到电流上升。

为了得到再现的数据，必须对热丝或试样进行某种热处理。在以后若无电场存在，则把这个过程称为热丝的焙烧；若 $U_{nk} \neq 0$ ，则称为老炼。

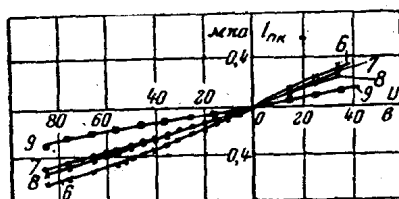


图 20 在热丝工作温度下氧化铝传导电流的伏安特性曲线
数字表示曲线的测绘顺序(续图 19)

经过焙烧和老炼后,在给定温度下试样的电导率测定值极为稳定。继续老炼不能改变电导率之值。测量氧化铝电导率的温度变程证明,表示 $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ 的关系曲线约在 1250—1400°K 范围内,即靠近热丝的工作温度处有一弯折。氧化铝电导率的温度变程见图 21。我们所采用的测量小电流的方法也能测量低温下氧化铝的电导率(图 22)。

曲线的两部份各有其特性。对于用不同品种的氧化铝作的

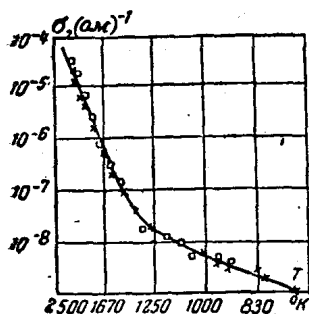


图 21 试样电导率与温度的关系曲线

□—老炼后之测量结果;
×—试样在 2100°K, $U_{AK} = +60$ 伏下再次老炼 30 分钟后的测量结果。

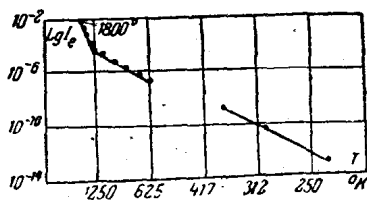


图 22 已老炼氧化铝电导率的对数值与温度之关系