

直流电机换向论文集

滑动接触与火花形成

第一机械工业部大电机研究所编译



机械工业出版社

目 录

换向器滑动面的薄膜·····	1
关于电刷—换向器的接触特性·····	12
直流电机换向器伤损的研究——关于电刷 镀铜和换向器条纹·····	20
关于换向器伤损现象的试验研究·····	45
电刷的机械固有振动对换向和集流的影响·····	67
影响滑动接触的几个机械因素·····	76
换向器不平度对电刷接触的影响·····	93
换向时形成电弧的边界条件·····	99
直流电机环火时的现象·····	113

換向器滑动面的薄膜

国分欣治

王洁民 校

換向器薄膜的化学成分主要是氧化亚铜 (Cu_2O)，其它还有石墨、氧化钙 (CaO)、氧化硅 (SiO_2)、氧化铁 (Fe_2O_3)、氧化铝 (Al_2O_3) 等粉末状物质。薄膜厚度为 $200\sim 350\text{ \AA}$ ●。它所呈现的击穿● (Fritting) 现象已由 R. Holm [1] 研究过，其接触电阻为 $0.1\text{ 欧}\sim 100\text{ 千欧}$ 。

然而，迄今尚未明确在換向器上希望有什么样的薄膜。本文将对这一点给予一定的阐述，以薄膜击穿为中心，在确定薄膜电特性的同时，探讨与无火花区的关系。

薄膜电特性测定法

为测定薄膜电特性所使用的探极，是用 $\phi 0.14$ 的白金线制成 $\phi 1.3$ 的环，或者用 $\phi 0.5$ 白金线的前端做成 $R 0.25$ 的半球，将它们都安装在黄铜制的杠杆上。在此杠杆的一端附有能挂重量的螺旋弹簧。将此装置装在显微镜下，在必要时用显微镜检查被测定的部位。

经研究此弹簧的弹性常数选用 100 毫克/毫米 。在选择探极

● $1\text{ \AA} = 10^{-10}\text{ 米}$ 。——譯者

● Fritting 一詞含有燒結、熔結的意思，R. Holm 借用來說明換向器薄膜在一定条件下产生的一种現象（見本文后面的敘述），此处暫譯为击穿，但并不十分确切。——校者

载重的时候, 使用各样的薄膜, 探求探极接触载重和接触电阻之间的关系, 明确了 100 毫克以上时其测定值才能稳定。两者的关系大体上是指数函数关系, 然而在载重大的地方如不相当注意, 也会损伤薄膜。图 1 是用 XY 记录器求得的薄膜与探极间电压电流特性的一例; 它的电源从 6~12 伏蓄电池上用电位计法取得, 回路的稳定电阻为 50~100 欧姆。从各方面考虑, 选择测定载重不少于 100 毫克到 200 毫克。

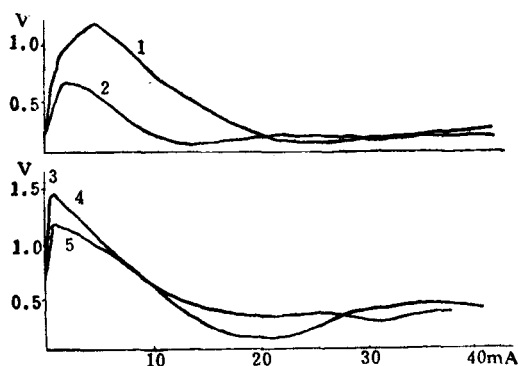


图 1 用白金探头测定的击穿电压与接触负载之间的关系:

- 1—载重 200 毫克; 2—载重 400 毫克; 3—微接触物质;
4—100 毫克物质; 5—200 毫克物质。

在环状与半球状测定探极中, 用直方图比较接触电阻时, 两者之间几乎没有差异。如计算薄膜的接触面积〔2〕, 环状的为椭圆, 其面积约为 6×18^{-8} 平方厘米, 半球状的约为 5×18^{-6} 平方厘米。

换向器薄膜的性质

1. 薄膜的击穿及其形状 将白金探极与薄膜接触而记

录其电特性的话, 当外加电压小的时候, 它好像绝缘材料一样几乎不流通电流, 当达到某电压值时, 电流急剧流通而电压下降。霍耳姆称此现象为击穿 (Fritting), 此时的电压为击穿电压 (以下用 V_F 表示)。进一步增大电流时, 电压降大致一定, 所得到的只有电流增加的形态。在产生击穿现象之前, 有时几乎不流通电流, 有时电流多少流通一些。如果前者称为 A 型, 后者称为 B 型, 那末图 1 的上图为 B 型, 下图为 A 型。测定的例子中以 A 型为多。

当击穿后, 不管电流如何增加, 由于导电面积扩大而使电压能保持恒定, 这就是霍耳姆所说的 β 型击穿。如按他的说法, V_F 在 0.2 以下的情况也称之为 β 型击穿。当薄膜非常薄时, 很容易产生这样的情况, 上述的 A、B 形便属于他所说的 α 型击穿。

2. 击穿与湿度 ● 换向器上的滑动现象会受湿度的影响。如果薄膜与湿度有关系, 那么击穿与湿度也同样是有关系的。在 $\phi 58$ 的模拟换向器上形成一定的薄膜, 然后放在干燥器中保持 48 小时, 取出后再经 1 小时和 2 小时, 用 XY 记录器测定其电特性的结果 (表 1)。

表 1 击穿与湿度的关系

处 理	击穿次数	测 定 值	低电阻频度	高电阻范围
刚取出之后	0	25	8%	500 Ω ~ 25 K Ω
1 小时后	1	25	36%	500 Ω ~ 1.8 K Ω
2 小时后	8	30	36%	675 Ω ~ 1.7 K Ω

刚取出后未发生击穿。随着放置时间的增加, 击穿的次数增加, 电阻范围也会缩小。因此可以断定, 存在湿度时容

● 原文为湿度, 有誤。——譯者

易产生击穿。如果把击穿认为是绝缘击穿，那末可用湿度减少耐电压强度的现象来理解击穿。

薄膜的极性 对滑动接触时电压降为一定的薄膜的测定如下所述：这一测定由于在滑动情况下进行，故使用银石墨探极。电压电流特性如图 2 所示，当电压上升和下降时呈滞后现象。从薄膜流向换向器的电流正方向和反方向的特性有着显著差别。根据测定电流的方向，其逆方向测定所以有大的电阻值，是由于薄膜上存在极性差。为探索此极性差，以电阻比的形式来研究（如图 3 所示）。图中用升压曲线和降压曲线来求两方向的电阻比。每一曲线都有极大值，极性比大约是 44 和 62。此值比换向器所使用的氧化亚铜的极性比小，这一点有必要加以注意。如从击穿测定面求极性差，则以 3 千瓦换向试验机在 1500 转/分、19 安下变化正负电刷回路、运转 24 小时后所得的薄膜作为试样，变化测定极性来测定

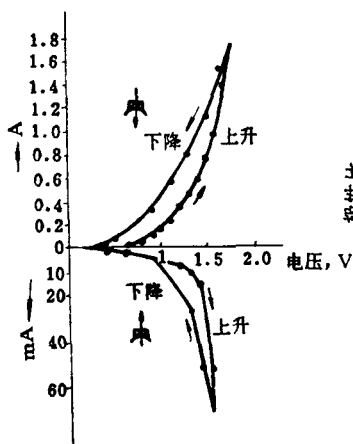


图 2 运行时薄膜的极性
与滞后现象。

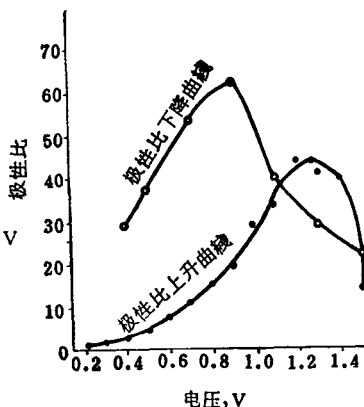


图 3 薄膜电阻的极性比。

其击穿。图4是将其结果绘成的直方图。图a、b为正电刷下的薄膜，正方向测定时的 V_F 分布比逆方向测定时的高。以正方向测定来比较正负电刷下的薄膜，从a、c图的比较中可以看出正电刷下有高的分布。

薄膜的厚度及击穿电压就氧化亚铜薄膜而言，其厚度与 V_F 之间的关系引用霍耳姆著作中的表[4]示于图5。由于测定者的不同，点呈稀疏状，但是霍耳姆以金探针测对氧化亚铜(Cu_2O)薄膜所求得电位梯度 0.6×10^6 伏/厘米，是图中a线的电位梯度。可见，此电位梯度稍低于对其他氧化物薄膜所测得的值(10^6 伏/厘米)。如果薄膜的厚度不同，其颜色也就不同。一般倾向是：颜色愈深， V_F 愈高，膜愈厚。

击穿后的薄膜电阻 如前所述，因电压恒定击穿后的薄

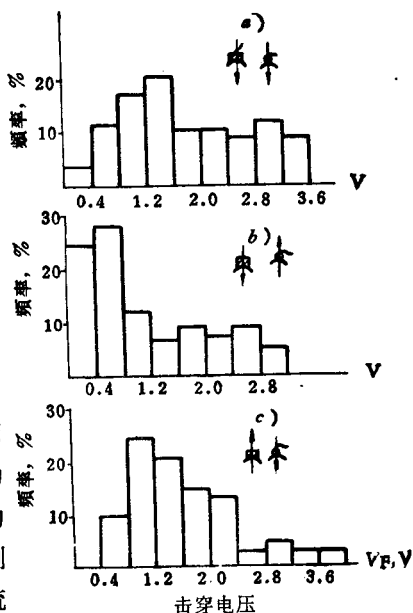


图4 击穿电压的直方图。

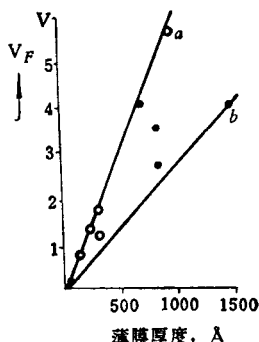


图5 Cu_2O 的薄膜厚度与击穿电压的关系。

膜电阻一般是会减少的。

因此, 为方便起见, 将图 4 的试样计算 0.1 安时的薄膜电阻并绘成直方图, 则如图 6 所示。在这种情况下, 其分布的高低与 V_F 的情况一样, 按着 $a > c > b$ 的顺序。因此 V_F 与薄膜电阻之间, 大体上成比例关系。然而, 当薄膜的种类不同时, 此种关系就不一定成立。在 B 型薄膜和 A 型薄膜混合时, 问题变得更为复杂。

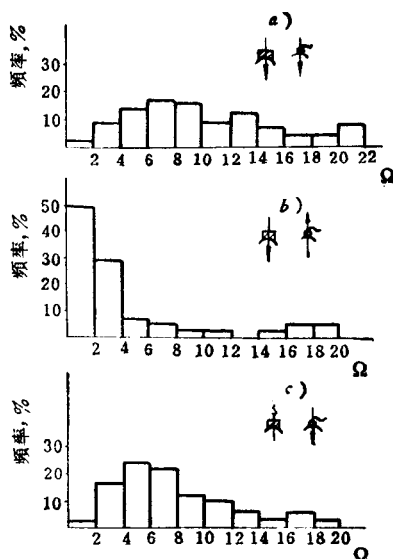


图 6 100 毫安时击穿后薄膜电阻的直方图。

无火花区与击穿

薄膜的电特性显然以 V_F 分布和薄膜电阻来表示。因此, 为确定它们与无火花区究竟有何关系, 进行了如下实验。

实验方法 以 3 千瓦换向试验电机在 4~26 安/3.2 厘米²、电刷压力为 500 克/3.2 厘米²、1500 转/分和 B 种电刷的条件下运转 24 小时 (1 日 7 小时), 然后测定其无火花区。若测定一定的点, 则以薄膜产生的电流运转 15 分钟以后进行下一测定。薄膜的 V_F 及电阻的测定, 须使换向器的温度恢复到常温后进行, 然而运转时正负电刷的通路要变换。

实验结果 所求无火花区的结果如图 7 所示。上图表示薄膜生成电流 4 安及 9 安时的无火花区; 下图表示 15 安、19 安及 26 安时的无火花区。无火花区的宽度随薄膜生成电流

的增加而变宽, 在 19 安时为最宽, 以后就变窄, 当 26 安时则有显著变形。

测定无火花区后, 用探极 (取正方向) 测定正负电刷下每个薄膜的 V_F 分布。就其结果的一部分来看, 9 安时如图8所示; 26 安时如图9所示; 19 安时如图4所示。正电刷下的电流增加是有规则的; 最频繁

的 V_F 值由 $1.8 \rightarrow 1.4 \rightarrow 1.2$ 伏逐步减少。一方面表示接近金属面

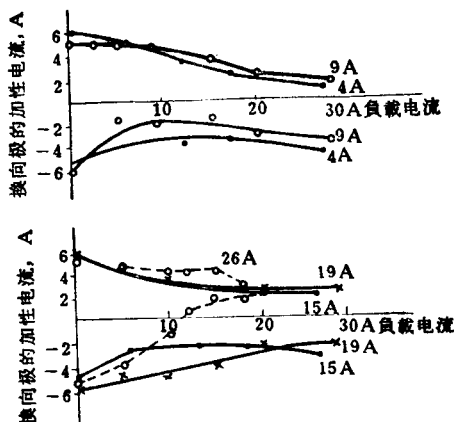


图7 3千瓦试验换向器的无火花区。

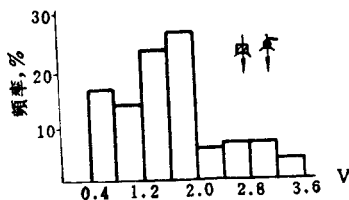


图8 击穿电压的直方图(9安/3.2厘米², 1500转/分)。

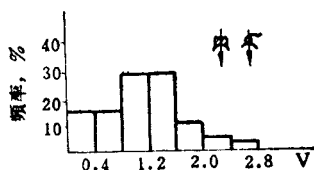
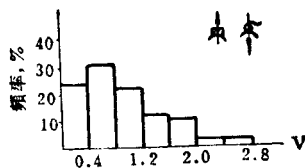
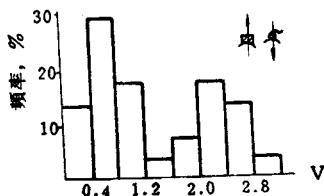


图9 击穿电压的直方图(26安/3.2厘米², 1500转/分)。



状态的0.4伏以下的频率由0→3%→15%增加。这一事实是由于薄膜趋于单薄所致。另一方面,在负电刷下2峰分布向1峰分布转化,随着电流的增加,最频繁的 V_F 值变化为0.6→1.0→0.6伏,19安时为最大。接近金属面的0.4伏以下频率则为13→0→23%,19安时为最小。因此,负电刷下薄膜的变化与19安时为最大的无火花区宽极相适应。由此,负电刷下的薄膜以正极性来测定是较好的方法。从上述事实可知,无火花区的良好薄膜在正负电刷之下是不一样的,可以说最频繁的 V_F 值高,0.4伏以下的频率低者较好。在这个实验例子中, V_F 为1~1.4伏,0.4伏以下的频率为0~3%。如以分布形状而言,呈高原形的分布应该说是好的。从图5膜厚与 V_F 的关系中推导最频繁的 V_F 值的膜厚为200~270 Å,几乎不包含80 Å以下的薄膜,才能说是好的薄膜。由于 V_F 的最大值为8.3伏,故约为650 Å。

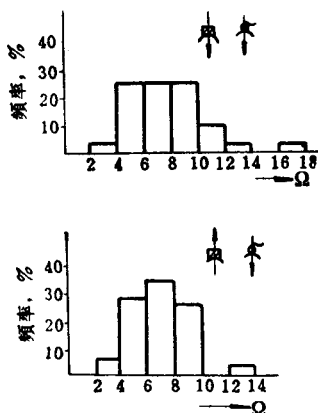


图10 在100毫安时击穿后薄膜电阻的直方图(9安/3.2厘米², 1500转/分)。

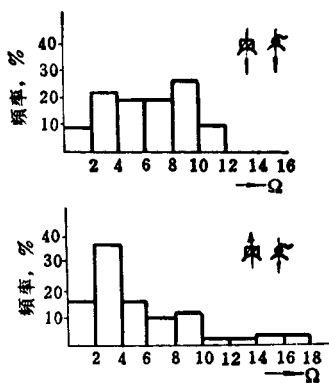


图11 100毫安时击穿后薄膜电阻的直方图(26安/3.2厘米², 1500转/分)。

在 0.1 安时击穿后电压恒定处的薄膜电阻分布呈图 10、图 11 及图 6 的形状。测定极性是探极正方向,与测量 V_F 时相同。其分布也与 V_F 分布相同,即正电刷下的薄膜比负电刷侧分布的高。在正电刷下的薄膜电阻,随电流增加其频繁的值有 $7 \rightarrow 7 \rightarrow 9$ 欧姆增加的倾向。同时,2 欧姆以下的低电值部分也增加为 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 8\%$ 。负电刷侧最频繁的值虽减少到 $1 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ 欧姆,然而 2 欧姆以下的电阻部分却是 $0 \rightarrow 2 \rightarrow 16\%$ 地增加。正负电刷下薄膜的共同现象是低电阻部分随电流的增加而增加。电流所给予的影响是薄膜的破坏,这对负电刷侧的影响较大。

和无火花区联系起来考虑电阻分布的话,由于和 V_F 一样并不很大,故得不到明确的表现,然以高原形分布,低电阻部分的频率极小者应该说是好的。根据以上的结果使二者统一地表现时,良好的薄膜是有高原形的分布和低电阻部分的频率小者为佳。 V_F 分布比电阻分布能更好地表示与无火花区的关系。

分 析 研 究

本文中叙述了使用白金探极测定薄膜的电压电流特性,从而研究了 V_F 和定电压部分的薄膜电阻。如图 1 所示的 V_F 是探极接触力的函数。所以,假如把绝对值视为定量的问题,那是危险的,予以定性比较那才比较方便。

V_F 虽有各种不同的值,然而同一种类的薄膜,其电位梯度却都相等。关于薄膜厚度与 V_F 之间的关系,本文中引用了霍耳姆的值,即图 5 中 α 线的电位梯度为 0.6×10^6 伏/厘米。此值约为一般氧化物所得值的一半,原因是在薄膜中混入了导电性物质。所以如取电位梯度为 10^6 伏/厘米,则必须改

变本文中求得的膜厚。然而换向器薄膜B型击穿的存在，从薄膜含有导电性物质这一推断出发，认为A形薄膜完全没有那种倾向也不一定正确，所以在该实验中给予40%的补偿不是没有必要的。接近于氧化物薄膜的换向器薄膜的电位梯度将在 10^6 伏/厘米以下。

B型击穿与A型击穿的区别在于击穿之前多少有电流流通或者不流通。电流流通的原因是因为导电性物质混入的缘故，这个物质很容易被人认为是起滑动作用的石墨。石墨究竟以什么样的形式构成薄膜的一部分，这可从Davies等的层状结构论中求得解答。该文献中说的薄膜结构为最外层由石墨形成，而 Cu_2O 又在处处露头的特殊薄膜结构。如果一面把换向器面的结晶方位认为是不同铜粒子的氧化机构，一面来考虑在B型中极多的击穿复原的机构，那末认为在 Cu_2O 层中也混入石墨的论点是比较恰当的。

击穿复原是由击穿薄膜再返回到击穿以前状态的现象。其原因为外部振动和电子应变，以及生成的金属晶格非常细，与体积内的金属线不同而强度较弱，因而还存在由于随冷却而收缩的张力引起的切断。

有时可用示波器观察除去外部振动使电流返还到零的大击穿复原。这种观察需要研究金属键是否破断。如果认为很小的击穿复原是由两根以上的金属键形成，那么由于其中一根破断所产生的现象也是可能的。击穿后的恒定电压部分的薄膜电阻，如果薄膜是由单纯的氧化物所构成的，则为A型时也有0.5伏左右的恒定电压。可是实验结果很明显地表明也有1伏以上的。另一方面，B型时1伏附近的很多，其原因可能是由于石墨的缘故，也可能还含有 Cu_2O 以外的物质。

結 論

測定換向器滑动面薄膜的电特性和无火花区得到了如下结论:

1. 击穿有 A、B 及 β 型三种, 随薄膜结构及膜厚而不同。
2. 良好薄膜的 V_F 分布是高原形, 其膜厚出现最频繁的值约为 $250 \text{ \AA}$; 然而 $80 \text{ \AA}$ 以下的膜几乎是沒有的。
3. 击穿后的薄膜电阻是恒定电位形的, 在高原形分布的基础上, 其低电阻部分少的薄膜较好。
4. 薄膜有极性差, 探极正方向的 V_F 比逆方向的 V_F 为高。滑动中的接触电阻极性比约为 60。
5. 击穿电压在湿度降低时升高。

参 考 文 献

- [1] R. Holm, Elect Contact Hand Book, 1958.
- [2] Raymond J. Roark, Formulas for Stress and Strain., p. 289, Mc. Graw, Hill Book Co, Inc 1954.
- [3] R. Holm, Elect Contact Hand Book, 1958, R141.
- [4] R. Holm, Elect, Contact Hand Book, 1958, p. 135.

譯自 炭素, 1962, №33, 2~8 頁。

关于电刷—换向器的接触特性●

大久保胜弘 編譯

張海学 节譯 王洁民 校

电刷—换向器間的接触特性

对小型直流并励发电机（6 伏，160 瓦）的电刷—换向器接触特性（电弧发生条件）采用电子管计测装置进行了研究。

测定方法 图 1 是对任意两个换向片进行测定的图示。电刷和换向片之间的电压 U_{LB} 通过电刷和滑环向外导出。为测定升高片电流 i_L ，如图 1b 所示，通过滑环向外导出与 i_L 成比例的电压 U_{i_0} 。

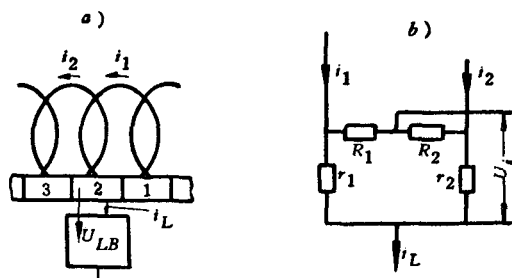


图 1 换向电流示意图:

a—换向片接触图; b—等效电路图。

根据图 1b 求 U_i :

$$U_i = a_1 i_1 + a_2 i_2$$

式中 a_1 和 a_2 为常数。

在计算 a_1 , a_2 时, 取 $R_2:R_1=r_2:r_1$ ($R_1 \cdot R_2 \gg r_1 \cdot r_2$), 则 $a_1=a_2$, 从而

$$U_i = a(i_1 + i_2) = a i_L$$

成为与升高片电流成比例的电压。

图 2a 所示为 i_1 , i_2 和 i_L 一个周期的经过情况。升高片电流 i_L 在电刷和换向器不接触时为零。放大时间由图 2b 得到。

为便于了解接触特性, 图 3 示出电流电压的关系曲线。

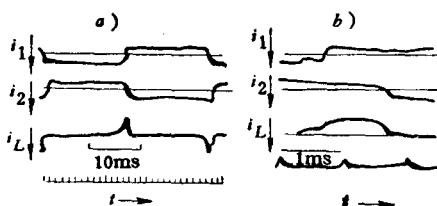


图 2 线圈电流 i_1 , i_2 和升高片电流 i_L 的示波图:

a—普通摄影; b—高速摄影。

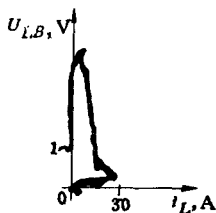


图 3 升高片电流 i_L 和换向片电刷间的电压 U_{LB} 的关系。

低负荷低转速时的接触特性 初期的换向理论假定, 如果电刷是在中性线上, 则换向在一定的换向器电刷间的电压下进行。这种特性如图 4 所示。其物理根据是击穿[●]理论。接触点的数目不变时, 接触电阻是一定的, 此特性表现为通过零点的直线(图 5), 假如接触点数量增加, 特性移到下一条通过零点的直线上, 还暂时地保持不变。假如接触点数目

● 見“换向器滑动面的薄膜”一文中的 Fritting 注 (第 1 頁)。

减少, 则与上面相反, 成为逐渐通过零点的陡度大的直线。在实际使用的发电机上, 如果不考虑不规则性, 则上述特性有以下三个条件:

- (1) 电刷的负荷电流最高为 10~15 安;
- (2) 转速在极限值 (2000 轉/分) 以下;
- (3) 电刷在希望的负荷下平均运行一天。

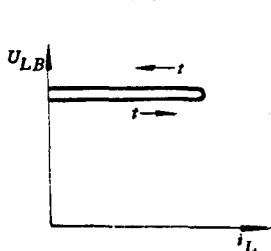


图 4 在一定电压下的
换向 $U_{LB} = f(i_L)$ 。

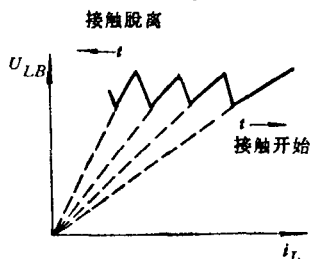


图 5 在特性曲线 $U_{LB}(i_L)$
上的击穿。

安排了上述条件, 在最初的 10 分钟内得出如图 6 的特性。AM 对应于接触点增加, ME 对应于减少。根据图 6 弄明白 26 个接触点中每个点平均电阻为 3.6 欧, 切向长度为 15 微米。这个长度约为 Cu_2O 厚度 21 毫微米 [4] 的 1000 倍。假如接触点是圆形的, $2a = 15$ 微米, $\rho = 3000$ 微欧厘米时, 接触点的集中电阻 $R = \rho/4a$, 大约等于 1 欧姆。因此击穿的接

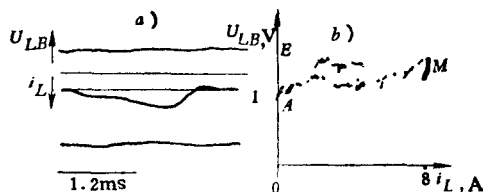


图 6 1700 轉/分, 8 安时的特性曲线 $U_{LB}(i_L)$ 上的击穿。

触点不是圆形的而是椭圆形的。

氧化膜的破坏和恢复 在高的转速和高负荷的情况下 (例如 6000 转/分, 40 安是额定的 1.5 倍), 接触特性变成图 7 的样子。图的区间 1 是接触形成区间。由于形成时的电压为正值、零或负值, 结果呈图 8 所示的种种状态。区间 2 的接触特性即电压与电流成比例。区间 3 是在接触断开前受电源感抗的影响而电压上升。

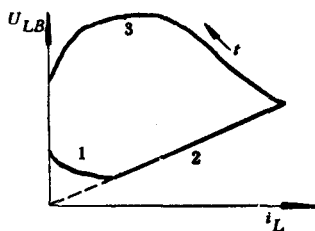


图 7 滑动接触的特性曲线。

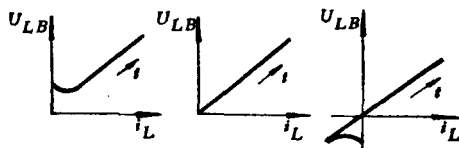


图 8 接触形成的各种条件。

氧化层的破坏是由线圈电感的作用而引起的。假如接触断开的話，电感使电流保持原样，在换向片后端击穿处变换负荷而温度升高。全氧化层在较广的范围内遭到破坏的话，电气上已经不能完成分配的任何任务。这种破坏情况可以在示波器上清晰地看到。

图 9 表示驱动开始约 3 分钟后的接触特性。电压在起始电流流过前为正值，从这里开始

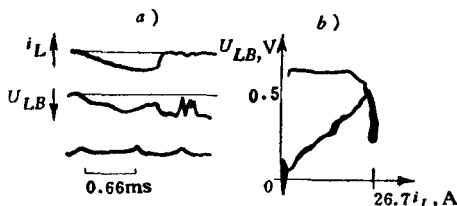


图 9 负荷 3 分钟后换向器薄膜破坏开始的波形 (26.7 安, 300 转/分)。