

# 双辉光离子渗金属

——一种新颖的等离子体表面冶金技术\*

李家全 余萍 袁斌 耿漫 尚振魁 王经权

(核工业西南物理研究院,成都 610041)

徐重 王从曾 苏永安

(太原工业大学,太原 030024)

**摘要** 综述了双辉光离子渗金属这一新颖的等离子体表面冶金技术,介绍了双辉光交链增强型放电这一独特的放电现象,讨论了双辉光交链增强的条件和交链增强的机理以及它在双辉光离子渗金属技术中的作用,介绍了双辉光离子渗金属的实验研究结果及在国内工业化推广应用的情况,评述了它的应用前景及在推广应用中应注意的问题。

**关键词** 双辉光放电,离子渗金属,等离子体表面冶金

**Abstract** The diffusion of ions into a metal by double glow discharge—a new plasma surface alloying technique—is presented. An enhanced discharge caused by double glow cross-interaction is introduced as a special discharge. The conditions and physics of double glow cross-interaction are discussed. The effects of this cross-interaction on plasma surface alloying are also discussed. Experimental results and industrial applications as well as future industrialization and problems of application and promotion are mentioned.

**Key words** double glow discharge, ion diffusing into metal, plasma surface alloying

## 1 引言

双辉光离子渗金属技术是在离子氮化基础上发展起来的一种等离子体表面冶金技术,它主要应用双辉光等离子体交叉相互作用产生的增强型放电,并进一步利用这种交链增强型放电产生的溅射效应和温升效应,将 W, Mo, Ni, Cr, Ti, Al 等金属元素渗透进普通碳钢表层组织,以形成具有特殊物理化学性能的表面合金层,比如抗腐蚀不锈钢层、高硬度高速钢层、镍基合金层、低摩擦系数合金层等。合金层中被渗元素含量依赖于该元素在基体中的固溶度,可在百分之几到百分之九十以上的范围内变动,合金层厚度可达几百微米。该技术由中国太原工业大学徐重教授首创<sup>[1-4]</sup>。现已成功地在碳钢基底上进行了 W-Mo, Ni-Cr, Ni-Cr-Mo 等

多元共渗<sup>[5,6]</sup>。近年来该技术已被成功地用于手用钢锯条的中试生产,机用锯条、圆盘锯片及化工防腐蚀阀的小试开发<sup>[7,8]</sup>。试验结果表明:用这种技术生产出来的手用钢锯条,其切削能力、使用寿命等综合指标均超过目前国外广泛使用的最先进的双金属锯条,其使用寿命为国产高速钢锯条的 7 倍。一条年产 1000 万支的双辉光离子渗金属手用锯条生产线即将在广州建成。为了拓宽该技术的应用范围,加快工业化转化的速度,国家高技术委员会给予该项目强有力的支持,组织国内有关单位联合进行重点开拓,并将它纳入国家“九五”期间材料领域推广应用的重点项目。

该技术现已获美国、英国、加拿大等七国发

\* 国家“八六三”高技术资助项目。

1995 年 6 月 5 日收到初稿,1995 年 8 月 8 日收到修改稿。

明专利<sup>[9,10]</sup>.

## 2 双辉光离子渗金属的基本原理

双辉光离子渗金属技术的原理如图 1 所示. 当装置被抽至极限真空并充氩气至 50 Pa 左右时, 在源极和阳极之间外加 1000 V 的直流电压, 可在源极和阳极之间产生异常辉光放电, 这种放电一方面可使源极温升至 1200℃, 另一方面将以直流辉光溅射的方式将源极材料

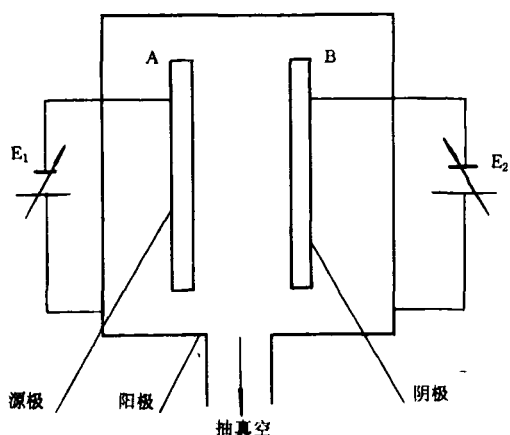


图 1 双辉光离子渗金属原理图

以原子或原子团的形式游离出来. 这些游离于真空中的原子或原子团将沉积在位于源极附近的阴极工件表面. 在阴极和阳极之间外加 600V 直流电压, 所产生的阴-阳网络异常辉光放电, 一方面使阴极工件温升至 1050℃, 在如此高的温度下, 沉积在阴极工件表面的源极材料成分可通过热扩散渗透进入阴极工件表层, 从而形成对阴极工件的表面冶金作用; 另一方面, 被阴极位降区加速后的氩离子在轰击阴极工件时将通过碰撞级联、反冲注入的方式加速源极材料成分对阴极工件的渗透.

为了实现工业化的、高效率的双辉光离子渗金属加工, 要求有以下条件: (1) 源极靶材有很高的溅射率; (2) 在阴极工件上有很高的沉积率; (3) 阴极工件有足够高的温度使沉积于阴极工件表面的源极材料成分能快速地通过热扩散渗透进入阴极工件表层; (4) 能有效地抑制住阴

极工件被溅射消蚀, 源极靶材被冶金这一逆向过程的发生; (5) 能有效地抑制住阴极工件、源极靶材被等地溅射、消蚀、冶金这一混冶现象.

源极 -1000V 的偏置电位低于阴极 -600V 的偏置电位, 这种电位配置一方面将使源极网络的放电较阴极网络的放电猛烈, 因而使源极温升高于阴极温升, 源极溅射率大于阴极溅射率, 另一方面源极相对于阴极的负电位配置还有可能通过第三辉光网络放电, 有效地将逆向冶金和混冶现象抑制住.

为了在阴极工件表面有尽可能高的沉积率, 要求从源极溅射出来的源极材料成分绝大部分都能沉积在阴极工件上, 故要求阴极工件能良好地空间屏蔽住源极靶材, 因此阴极与源极间距不能太大. 由于当阴极与源极间距太小时, 将因放电通道受阻而产生不了双辉光放电, 因此在双辉光离子渗金属炉中阴极与源极间距一般为 2-3cm, 阴、源电极为平行板结构, 单层电极表面积可达 1 m<sup>2</sup>.

由于阴、源电极均为平板结构, 电极表面积很大, 极间距又很小, 又均工作在异常辉光放电状态. 在这种特定情况下进行双辉光离子渗金属研究时, 就发现了一种特殊的放电现象——双辉光交链增强型放电.

## 3 双辉光交链增强型放电现象<sup>[11,12]</sup>

设将源极电压升至  $V_a$  时, 源极回路发生强烈的异常辉光放电, 包绕源极 A 的辉光亮度及其空间分布如图 2 中曲线 1 所示, 然后逐步增加阴极电压  $V_c$ , 并使阴极网络产生放电. 当阴极放电还不太强时, 阴极辉光滞留在阴极附近, 如图 2 中曲线 2 所示. 随着阴极放电电压  $V_c$  的逐步提高, 阴极辉光逐渐向源极方向扩展, 辉光亮度也逐渐增加, 如图 2 中曲线 3 所示, 此时阴极放电电流  $I_c$  随  $V_c$  的变化如图 3 中交链前的  $I_c$  曲线所示,  $I_a$  不受  $V_c$  影响. 此时双辉光互不相交, 界限分明, 放电电流也互不影响, 属于双辉光独立放电模式. 随着  $V_c$  的进一步增加,

物理

当阴极负辉区进一步往源极扩展至与源极负辉区相交并重叠到某程度后,阴极负辉区突然与源极负辉区浑为一体,充满了两个平行板电极之间的所有空间,辉光亮度也明显增强,如图2曲线4所示.此时源极电流  $I_a$ , 阴极电流  $I_b$  都有一阶跃上升(图3交链线).在双辉光交链

后,随着  $V_b$  的进一步增加,不但  $I_b$  以更大的幅度上升,而且  $I_a$  也以很大的幅度上升(图3交链后的  $I_a, I_b$  曲线).这种双辉光交链时  $I_a, I_b$  阶跃增加,交链后  $I_a, I_b$  均随  $V_b$  的增加而大幅度增加的现象叫做双辉光交链增强型放电现象.

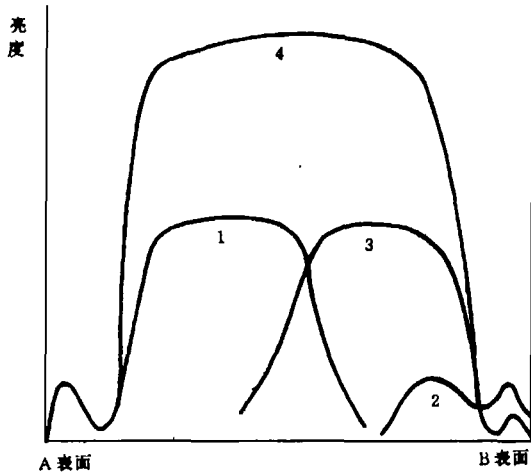


图2 辉光亮度及其空间分布<sup>[11]</sup>

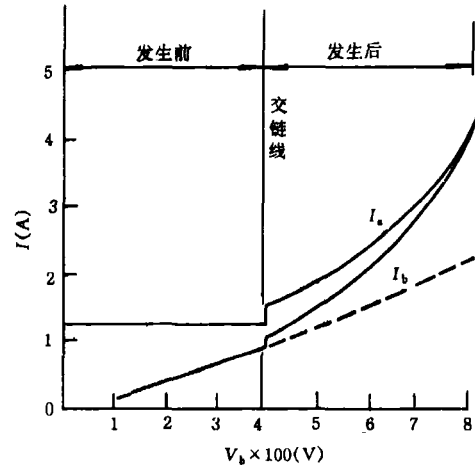


图3 双辉光交链前后两极电流随阴极电压的变化<sup>[11]</sup>  
 $V_a = 800 \text{ V}, d = 30 \text{ mm}, P = 120 \text{ Pa}$

在发生双辉光交链增强型放电时,不但阴极电压  $V_b$  强烈影响着  $I_a, I_b$  的变化,由于阴极与源极之间的互换性,源极电压  $V_a$  也将对  $I_a,$

$I_b$  产生重要的影响.图4、图5中分别给出了实验观察的  $I_a, I_b$  随着  $V_a, V_b$  的变化规律.

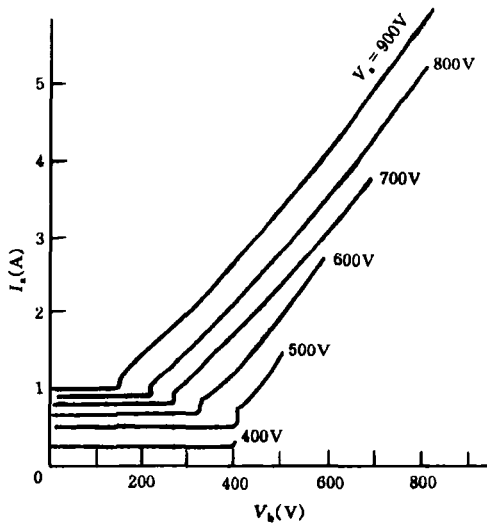


图4  $I_a$  与  $V_a, V_b$  的关系<sup>[11]</sup>  
 $d = 20 \text{ mm}, P = 120 \text{ Pa}$

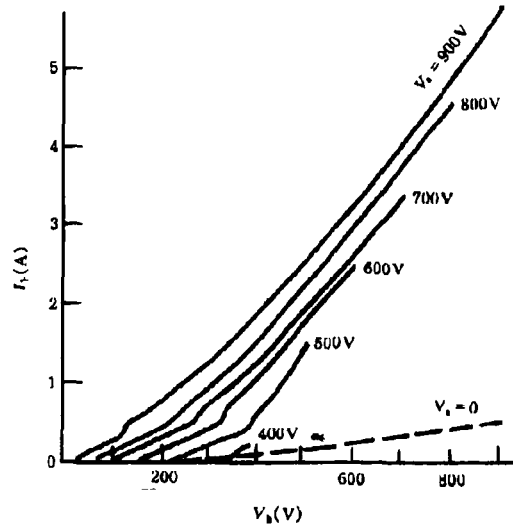


图5  $I_b$  与  $V_a, V_b$  的关系<sup>[11]</sup>  
 $d = 20 \text{ mm}, P = 120 \text{ Pa}$

#### 4 双辉光交链增强型放电产生的条件

双辉光交链增强型放电作为一种特殊的放电现象,只能在特定环境下才能产生.首先,两个辉光网络均要产生异常辉光放电,这就要求  $V_a, V_b$  均要远大于在装置实验条件下的真空击穿电压  $V_0$ . 第二,基于双辉光交链的表观现象是负辉区的叠加,而负辉区的宽度与阴极位降区的宽度之和  $d$  比例于外加电压  $V$  的二分之一次方,即  $d_a = kV_a^{1/2}, d_b = kV_b^{1/2}$ , 从双辉光交链的表观条件,  $d_a + d_b \geq d_0, d_0$  为阴极与源极间的距离,则可得

$$kV_a^{1/2} + kV_b^{1/2} = k(V_a^{1/2} + V_b^{1/2}) \geq d_0 \Rightarrow V_a^{1/2} + V_b^{1/2} > \frac{d}{k} = V_{ab}^{1/2},$$

即双辉光发生交链增强的电压条件是分别加在两个网络上的有效电压的二分之一次方之和大于一个临界电压  $V_{ab}$  的二分之一次方. 在表 1 中给出了由图 4 得到的在不同的  $V_a$  条件下临界交链点的  $V_{ab}^{1/2} = V_a^{1/2} + V_b^{1/2}$ , 由表 1 可见,只要  $V_a, V_b$  大于异常辉光发生电压,则  $V_{ab}$  为常数. 进一步的研究表明,  $V_{ab}$  只与阴源极间距  $d_0$  和双辉光离子渗金属工作真空压力  $P$  有关. 第三,阴源极间距  $d_0$  越小,实现双辉光交链的  $V_{ab}$  就越低,但是当  $d_0$  小到某一临界  $d_{0min}$  后,不但使辉光放电的等离子正柱区消失,而且使负辉区和位降区都得不到保证时,则将因放电通道受阻,产生不了辉光放电. 当  $d_0$  太大时,双辉光之间的耦合变弱,要产生图 2 所示特征的辉光叠加所需的  $V_{ab}$  太大,当  $d_0$  大到某一  $d_{0max}$  时,则由于弧光放电的制约,将使双辉光放电被破坏. 实验中观察到当  $d_0 = 100 \text{ mm}$  时,  $P$  降到  $10 \text{ Pa}$ ,  $(V_a + V_b)$  高达  $1700 \text{ V}$  时才观察到微弱的双辉光交链增强现象<sup>[11]</sup>. 第四,随着真空气压的增加,粒子间的平均自由程变短,阴极负辉区和位降区变薄,即  $d_a, d_b$  均变小,因此要满足  $d_a + d_b \geq d_0$  这一交链条件所需,  $V_{ab}$  将增加. 随着  $P$  的下降,平均自由程变长,粒子间的碰撞频率降低,  $d_a, d_b$  增加,双辉光易于交链. 但是当  $P$

降至某一  $P_{min}$  后,由于阴极鞘层可能变为无碰撞鞘层,从而使  $d_a, d_b$  与  $P$  无关. 另外还有可能因碰撞频率降低,碰撞电离率下降而使双辉光交链增强型放电受阻. 实验中观察到的发生交链增强的真空气压条件为  $10 \text{ Pa} \leq P \leq 150 \text{ Pa}$ <sup>[11]</sup>.

表 1 在不同  $V_a$  时交链点的电压条件

$V_a(\text{V})$	900	800	700	600	500
$V_b(\text{V})$	150	200	260	320	400
$V_a^{1/2}$	30.0	28.2	26.4	24.4	22.4
$V_b^{1/2}$	12.3	14.1	16.1	17.9	20.0
$V_a^{1/2} + V_b^{1/2}$	42.3	42.3	42.5	42.3	42.4

#### 5 双辉光交链增强型放电的交链增强机理

由于双辉光交链增强型放电是在一种比较特殊的条件下出现的放电现象,对其知道的人还不多,交链增强的机理研究也很少,下面介绍两种不太成熟的物理模型.

##### 5.1 第三放电网络模型

由于在双辉光离子渗金属技术的具体实施中,源极网络电压总是大于阴极网络电压,即在源极和阴极之间存在着几百伏的电压差,当这个压差大于工作条件下的真空击穿电压时,将有可能产生源阴极之间的第三辉光网络放电. 当这个压差小于真空击穿电压时,由于存在着源阳网络和阴阳网络背景等离子体,则阴源电位差也将趋使带电粒子定向运动形成由双极扩散为特征的第三网络放电. 由于这种第三放电网络与两个基础辉光放电网络的叠加,导致了双辉光交链增强型放电.

第三放电网络模型认为:在双辉光交链之前,两个基础网络互相独立,互不相干,他们的等效电路如图 6(a) 所示. 当双辉光交链后之在源极 A 和阴极 B 之间产生放电,其等效电路如图 6(b) 所示,其中  $R_{AC}, R_{BC}, R_{AB}$  分别代表源阳、阴阳、源阴极之间放电的等效电阻.

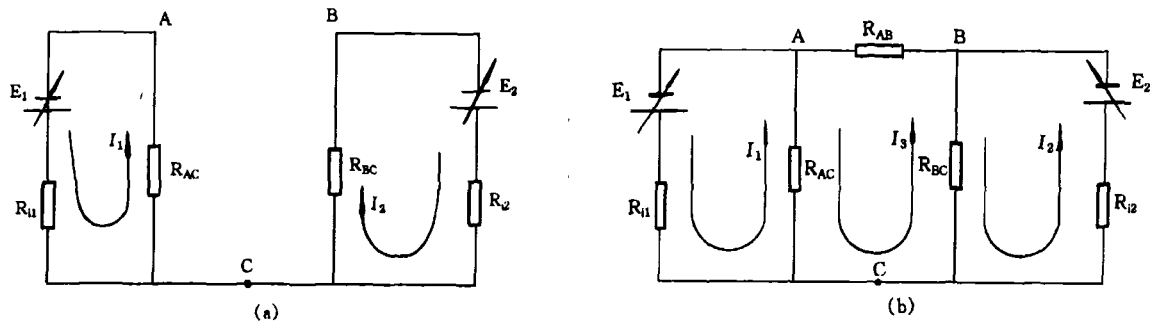


图6 双辉光放电等效电路  
(a)交链前;(b)交链后

对图6(a)用欧姆定律:

$$\begin{cases} E_1 = I_1(R_{i1} + R_{AC}), \\ E_2 = I_2(R_{i2} + R_{BC}), \end{cases}$$

得

$$\begin{cases} R_{AC} = \frac{E_1}{I_1} - R_{i1}, \\ R_{BC} = \frac{E_2}{I_2} - R_{i2}. \end{cases}$$

对6(b)用基尔霍夫定律:

$$\begin{cases} I_1 R_{i1} + I_1 R_{AC} - I_3 R_{AC} = -E_1, \\ I_3 R_{AC} + I_3 R_{BC} + I_3 R_{AB} - I_1 R_{AC} - I_2 R_{BC} = 0, \\ I_2 R_{BC} + I_2 R_{i2} - I_3 R_{BC} = -E_2, \end{cases}$$

可对  $R_{AC}, R_{BC}, R_{AB}$  求解, 上式中  $R_{i1}, R_{i2}$  分别代表电源  $E_1$  和  $E_2$  的内阻.

按第三放电网络模型, 双辉光交链的条件是第三网络放电的产生, 此时电离率的提高导致了等离子体密度的急增, 引起了  $I_s, I_b$  的跃变. 同时第三网络放电的产生将使两个基础网络之间耦合增强, 因此  $V_b$  的变化不单使  $I_b$ , 而且也会使  $I_s$  急剧地变化. 由于第三网络放电流为直流电流, 源极接收的是第三网络电流的离子, 阴极接受的电子, 因此阴极位降区的扩张和源极的离子轰击能有效地抑制逆向冶金和混冶现象.

第三网络模型虽能定性解释双辉光交链

增强型放电现象, 但进一步分析就发现它存在下述缺陷: (1) 第三网络放电的基点是在阴极与源极之间存在着能产生定向电流的电位差, 可实验发现当该电位差为零时也会产生双辉光交链增强型放电; (2) 根据第三网络放电模型, 阴源极间电位差越大, 第三网络放电就越强, 辉光交链增强就应越厉害, 由图3可见, 当  $V_a > V_b$  时, 双辉光交链后, 随着  $V_b$  的增加,  $(V_a - V_b)$  减小, 辉光交链增强越厉害. 模型预示的结果正好与实验结果相反; (3) 按第三网络放电模型, 当  $V_b$  较小时, 只要  $V_b > V_0$ , 均将因  $(V_a - V_b)$  较大, 第三网络放电流较强, 双辉光会强烈交链. 可图3的实验曲线表明, 此时  $I_s$  却与  $V_b$  无关; (4) 第三网络放电模型只要求在阴极与源极之间有定向电流存在, 考虑到德拜屏蔽作用, 这种电流应只依赖于背景等离子体的密度和温度, 同时也依赖于阴源极间的电位差. 它并不要求双辉光叠加, 因而与阴源极间距  $d_0$  关系不大. 这又与实验结果不符; (5) 第三网络放电所要求的真空压力可低到 1 Pa, 可实验观察到当真空压力降至 10 Pa 时, 双辉光交链增强放电现象就很难发生了.

尽管第三放电网络模型不能很好地解释双辉光交链增强型放电现象, 但它很可能是双辉光放电现象中的客观存在, 至于它在其中到底起了什么作用? 起了多大作用? 都还有待于进一步研究.

还需指出的是, 在第三放电网络模型中所

引入的几个等效电阻  $R_{AC}, R_{BC}, R_{AB}$  在放电过程中均非常数. 根据辉光放电的伏安曲线, 在双辉交链前虽然双网络均工作于异常辉光区, 但由于工作点不一样, 其等效电阻也大不一样, 随着放电电压连续地提高, 异常辉光放电增强, 等效电阻将连续下降, 此时  $R_{AB} \rightarrow \infty$ . 在交链的一瞬间, 源极、阴极电压不变,  $I_a, I_b$  跃增, 故等效电阻  $R_{AC}, R_{BC}$  跃降. 在交链时, 第三辉光网络放电突然产生, 故  $R_{AB}$  也将跃降至一有限值. 在交链后, 由于随  $V_b$  的增加,  $I_a, I_b$  均大幅度增加, 故  $R_{AC}, R_{BC}$  在跃降后均将进一步地连续下降. 几个等效电阻的这种高度可变性将给第三放电网络模型电路方程的求解带来很大的困难.

## 5.2 不等电位空心阴极放电模型<sup>[1,11]</sup>

这种模型来自空心阴极放电理论, 根据这种理论, 当两个网络都运行在异常辉光放电模式时, 由于网络电压较高, 从 A (或 B) 电极上打出来的二次电子经位降区加速后有足够高的能量进入另一电极的位降区, 这些二次电子经另一电极的位降区减速, 反向加速后被反弹回原电极附近. 由于二次电子在 A, B 电极空间的来回反弹增加了碰撞电离本底气体的机会, 提高了电离率, 从而增加了双辉光放电网络的放电电流, 并产生了双辉光交链增强型放电.

当 A, B 电位相同时, 从它们表面打出来的二次电子对增强型致电有相同的贡献, 当 A, B 电位不同时, 则电位越负从其表面打出的二次电子对增强型放电贡献越大.

根据辉光放电理论, 从源极或阴极打出来的二次电子在离开负辉区进入等离子体正柱区时, 已基本丧失碰撞电离的本能并无规化了, 这些二次电子即使因碰撞或扩散进入另一电极的位降区, 也不会象前面所描述那样来回反弹, 因此在双辉光交链前观察不到增强放电现象. 在双辉光交链后, 源极的负辉区与阴极的位降区、阴极的负辉区与源极的位降区部分重合, 因此, 使从某一电极打出来的二次电子在具有相当的定向能量和碰撞电离本领时就进入了另一电极的位降区, 因而能有效地实现二次电子反弹, 也能使以二次电子反弹为基础的空心阴极理论在

增强型放电中发挥作用.

由于双辉光交链这一表观现象反映在物理上是负辉区与另一电极的位降区的叠加, 而某一电极负辉区与位降区宽度之和比例于施加在该电极上的外加电压  $V$  的二分之一次方. 因此当源极电位不变时,  $d_a$  是一个常数, 当  $V_b$  较小时,  $d_b$  较小,  $d_a + d_b < d_0$ , 实现不了辉光交链, 产生不了二次电子反弹效应. 随着  $V_b$  的增加,  $d_b$  增加, 当  $d_a + d_b > d_0$  时, 双辉光交链. 在交链那一瞬间, 由于突然产生的二次电子反弹增加了碰撞电离率, 因而使  $I_a, I_b$  均有一跃变. 交链后随着  $V_b$  的进一步增高, 因两个电极的负辉区与位降区进一步重叠, 由于在负辉区与另一个电极的位降区的交界面二次电子的能量随着重叠程度的增加而大幅度增加, 因而将通过碰撞电离率的大幅度增加而使  $I_a, I_b$  大幅度增加.

根据以二次电子反弹为基础的空心阴极理论, 源极与阴极间的距离  $d_0$  越小, 只要不使双辉光放电受阻, 则使一个电极的负辉区与另一个电极的位降区叠加所要求的  $V_b$  就越低. 当  $d_0$  较大时, 由于位降区与负辉区的厚度之和比例于  $V^{1/2}$ , 因此要保证双辉光交链所要求的  $V$  就越大. 基于  $V$  受打弧的制约, 因此  $d_0$  增加到一定程度后双辉光就很难交链了.

空心阴极理论虽能成功地解释双辉光交链增强型放电的大部分现象, 但由于下述局限它还不很完善. 首先, 空心阴极理论适用的真空压力范围是  $10 \text{ Pa} < P < 10^{-1} \text{ Pa}$ , 此时粒子的平均自由程  $\lambda$  为  $1 \text{ mm} < \lambda < 10 \text{ cm}$ , 在这个真空区间, 一方面辉光放电得以保证, 另一方面二次电子在两次碰撞之间有较长的飞行距离, 能比较容易地从源极飞向阴极并被阴极位降区反弹. 比如当  $\lambda = 1 \text{ cm}$ ,  $V_a = 900 \text{ V}$ ,  $d = 2 \text{ cm}$  时, 从源极打出来的二次电子有能力在源极与阴极之间反弹近百次. 而双辉光交链增强型放电的真空压力条件为  $150 \text{ Pa} > P > 10 \text{ Pa}$ , 刚好与二次电子反弹的真空压力条件不一样, 此时粒子的平均自由程为  $3 \times 10^{-2} \text{ mm} < \lambda < 1 \text{ mm}$ , 如取  $\lambda = 0.1 \text{ mm}$ ,  $d = 2 \text{ cm}$ ,  $V_a = 900 \text{ V}$ , 源极二次电子在飞抵阴极时将碰撞 200 次. 由于二次电

物理

子碰撞频率很高,将很快地被无规化而具备平行电极方向的速度分量,因而不能像我们想象那样直线式地横越源极和阴极空间.其次,二次电子被无规后在速度空间遵从麦克斯韦分布,二次电子的能谱是一个连续函数,当  $V_0$  不变、 $V_b$  增加时,阴极位降区将按  $V_b^{1/2}$  规律连续地向源极扩张,麦克斯韦分布的高能二次电子尾巴将首先进入阴极位降区而被反弹,随着  $V_b$  的增加,能进入阴极位降区而被反弹的二次电子数只能连续地增加.由于这种变化的连续性,不太可能产生双辉光交链时的电流跃变.第三,在双辉光交链的实验观察中发现,在交链前一瞬间,双辉光还各自独立,一旦稍增加  $V_b$  使其交链,则观察到阴极负辉区与源极负辉区都急剧扩展,并很快溶为一体并充满了两个电极间的所有空间.这种负辉区急剧扩展并混溶的现象为二次电子反弹理论解释不了.

综上所述,第三网络放电模型和以二次电子反弹为基础的空心阴极理论均不能完全地解释双辉光交链增强型放电现象.即使将本文所描述的现象视为不等电位空心阴极效应,那也是二次电子反弹理论不能完全解释得了的,因此很可能还有其他尚没被认识的机制在发挥作用,故还有进一步深入研究的必要.

## 6 双辉光交链增强型放电在双辉光离子渗金属技术中的作用

要工业化地实施双辉光离子渗金属技术,首先要求源极有一个较高的溅射率以向阴极源源不断地提供源极材料成分,源极溅射率比例于溅射系数和轰击源极的离子流密度.而溅射系数又直接和源极材料以及源极温度有关.温度越高,源极表层原子脱离源极晶格而游离出来所需的能耗就越小,故溅射率就越高.由于在结构一定时,源极温度比例于放电功率,考虑到源极电压受弧光放电的制约,因此要提高源极的温度,提高轰击源极离子流密度的关键是要有一个足够大的源极放电电流.从图 3 可见,由于双辉光的交链,只需改变  $V_b$  就可使  $I_a$  从交链

前的 1.2 A 跃升到交链时的 1.5 A,然后随着  $V_b$  的增加,近似指数的增加到 4.3 A.源极电压不变,源极电流就提高了 2.5 倍,这既避免了源极回路打弧,又提高了源极的输入功率.可以说正是因为双辉光交链增强型放电才确保了源极温升 1200℃,才确保了将源极材料成分源源不断地送给阴极,以满足阴极表面冶金的需求.

要在阴极表面产生离子渗金属过程,要求阴极温度高达 1050℃,这要求有一个比较高的阴极放电电流.从图 3 可见,倘若没有双辉光交链,阴极电流随  $V_b$  的变化如虚线所示,当  $V_b$  达到 800 V 时,最多只能达到 2.2 A,由于增强型放电的出现,  $I_a$  实际升到 4.2 A,提高了近一倍.因此双辉光交链增强放电还保证了阴极工件表面渗金属的温度需要.

一个工业化的离子渗金属炉总是希望将源极的溅射和阴极工件表面渗金属过程动态地结合在一起.由于对源极、阴极的要求不一样,工作点互不相同,因此只有采用不等电位双辉光放电才能满足这种要求.

为了进一步提高阴极工件表面的离子渗金属速率,需要利用并强化高能离子轰击阴极时产生的碰撞级联反冲注入作用,这要求有尽可能高的阴极放电电流密度.为了抑制逆向冶金和混冶金现象,就需第三网络放电,这一切都只有在双辉光交链增强型放电模式下才能实现.

由此可见,双辉光交链增强型放电不单是双辉光离子渗金属过程中出现的一种典型放电现象,而且也是这种技术能工业化实施的物理基础.

## 7 双辉光离子渗金属的实验研究结果<sup>[1,8]</sup>

原则上凡导电材料都可用作阴极或源极,并通过双辉光离子渗金属处理在阴极工件表面产生和基体熔为一体的成分、性能各不相同的表面合金层,下列各表中列出了双辉光离子渗金属研究的部分实验结果<sup>[1,8]</sup>,其中表 2 为三

种含碳量不同的碳钢经离子渗铬处理后表面合金层中含铬量随深度变化的数据,表 3 是工业纯铁经采用镍 80-铬 20 合金丝作为源极进行镍铬共渗处理后的实验结果.表 4 为工业纯铁经镍、铬、钼三元共渗,表 5 为 20 钢经镍、铬、铜、钨四元共渗处理后合金层中合金元素随深度变化的重量百分数.

表 2 离子渗铬,1000°C×2h

基材材料					
20 钢		45 钢		T8 钢	
D(μm)	Cr(%)	D(μm)	Cr(%)	D(μm)	Cr(%)
2.0	40.0	1.0	26.0	1.0	89
10.0	27	5	24	3	84
20	18	10	22	7	73
30	13	20	18	9	57
32	2	30	15	12	29
45	0.6	32	12	14	13
		34	5	15	4
		36	1.0	18	1.5

表 3 镍、铬共渗,1000°C×3 h

工业纯铁		
D(μm)	Ni(%)	Cr(%)
1.0	79.62	16.33
10	78.25	16.26
20	74.87	16.38
30	69.64	17.47
40	56.70	13.53
50	40.80	10.78
60	12.51	3.69
70	0.84	0.49

表 4 镍、铬、钼共渗,1000°C×3 h<sup>[1]</sup>

工业纯铁			
D(μm)	Ni(%)	Cr(%)	Mo(%)
1.0	25	9.4	16.6
20	32.5	32.5	15.2
40	18.9	18.9	11.3
56	7.5	1.5	8.5
60	5.7	5.7	6.5
76	0	1.1	2.5

表 5 铬、钛、钨、钼四元共渗,1000°C×3 h

20 钢				
D(μm)	Cr(%)	Ti(%)	W5	Mo(%)
1.0	49.3	21.5	13.5	7.5
10	48.5	23	15	8
20	35.5	22.2	14.2	7.4
30	29.3	21.5	10.5	5
35	24.5	14.5	6.5	2.5
40	13.6	6	3	0.8
45	3.5	0	0	0

从上述各表可见,双辉光离子渗金属技术不仅可在钢铁表面形成合金钢,而且还可形成合金元素总量高达 90% 以上的特殊合金层.由于合金层中合金元素的含量随深度的变化是一渐变过程,因而和基体有着良好的结合.

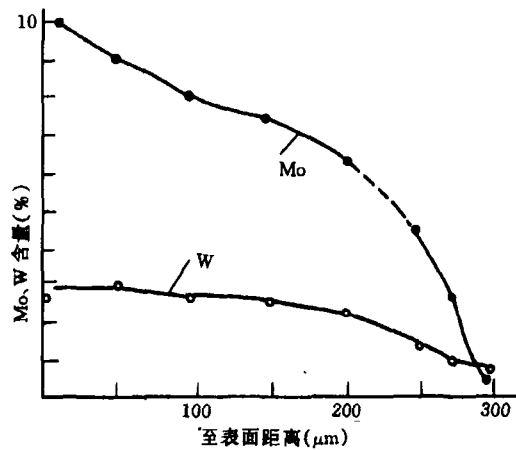


图 7 渗层 W,Mo 含量分布<sup>[8]</sup>

图 7 给出了经离子钨钼共渗处理后的手用锯条坯子中 W,Mo 含量在表层的深度分布规律<sup>[8]</sup>.手用锯条坯子是用低碳钢冷轧带经下料、冲孔、刨齿、分齿等机械加工而成.渗层沿锯齿连续分布.经电子探针分析表明:齿尖部渗层较厚,齿根部渗层较薄,表层合金元素浓度较高,其组织为 W,Mo 的 α 固溶体及在该基体上密集分布的棒条状及粒状析出物,这些析出物可能是 Fe, W, Mo 的金属间化合物 Fe<sub>3</sub>(W,Mo)<sub>6</sub>,在距表面 150 μm 处 Mo 的含量物理



降为 10—8%，钨为 3—2.6%。渗层厚度可达 300  $\mu\text{m}$ 。

## 8 双辉光离子渗金属技术的工业应用

双辉光离子渗金属技术在国内目前主要用在手用锯条的生产上，国产手用锯条以前都用高速钢带经机械加工和热处理后制得，锯条整体硬而脆，使用中常崩齿、断条，寿命很低。英国在 1965 年发明了一种双金属锯条，它的锯齿和锯身分别由高速钢及低合金钢制成，用真空电子束焊接技术把它们拼焊在一起，然后按高速钢规范热处理。这种锯条既具有高速钢的锯割性能，又具低合金钢的韧性，不易断条。然而制造设备昂贵，在热处理时常出现焊缝开裂，而且没有解决崩齿的问题。双辉光离子渗金属技术制得的手用锯条是以低碳钢带作为原料，由于钨、钼等元素主要渗透进锯齿部分，齿尖渗层厚、齿根渗层薄，而且合金元素含量沿深度连续下降，因此齿尖将因钨、钼合金含量高而特别锋利，齿根因渗层薄、钨钼合金含量少而具有良好的韧性，故不易崩齿。低碳钢的锯身在渗碳后虽为高碳钢结构，但由于热处理是按高速钢规范进行，锯身被退火，故锯身韧性特好，不易断条。正因为如此，双辉离子渗金属锯条的综合性能优于美国发明的世界上广泛使用的双金属锯条。经国家检测中心检测表明：其锯割性能已超过英国有关双金属锯条的标准，其使用寿命为国内高速钢锯条的 7 倍。目前一条年产 1000 万支离子渗金属锯条的生产线已在我国广州建成，其设备投资仅 300 万元，每支锯条生产成本 0.5 元，市售价 1 元。我国每年手用锯条市场为 10 亿支，西欧、北美约 3 亿支。因此双辉离子渗金属手用锯条的开拓具有相当大的市场前景和社会经济效益。

与手用锯条工业化推广的同时，机用锯条、圆盘锯片的小试研究已经完成。

以镍、铬为主要元素的多元共渗在防腐蚀领域应用广泛，工业炉上对  $1000 \times 500 \text{ mm}^2$  大型钢板经镍、铬共渗后获得 30  $\mu\text{m}$  的镍铬合金

层。对化学工业的防腐蚀不锈钢球阀，采用碳钢制成镍铬共渗后其抗腐蚀性能达到不锈钢标准。柴油机喷气阀经双辉光离子钼、铝共渗及氮化处理，使用寿命提高 2 倍。在管子内表面形成镍基合金层及钛合金层并在陶瓷表面形成高耐腐蚀合金层，可以满足能源工业、化学工业的抗腐蚀性要求。

双辉离子渗金属作为一种新技术在推广应用中也有一定的局限性，这是因为：(1)它要求源极和阴极之间耦合很紧，极间距很小，因此对一些尺寸加工件就很难设置源极。比如防腐蚀球阀的球体，若要对其进行镍、铬共渗，则要求将源极作成同心球面，考虑到真空通道，绝缘支撑，要工业化实施是很困难的；(2)要在阴极工件上均匀地实现离子渗金属，要求从源极溅射出来的源极成分能均匀地沉积在阴极工件表层，要求阴极电流密度沿阴极均匀分布，对形状复杂的工件很难满足上述要求；(3)当工件上或源极靶材上具有孔、洞或曲率半径较小的凹面时，有可能产生等电位的辉光交链增强型放电而形成一些不必要的损伤；(4)为了避免一些附加的辉光交链，对引线、绝热支撑、紧固夹具的设置要求很严；(5)工件温升高、热变形大，不适于精密加工。因此在开拓双辉光离子渗金属的各项新的应用领域时都需进行精心的结构设计，有时还需开展系列先行试验。

## 9 结语

(1)双辉离子渗金属技术利用不等电位双辉光交链增强型放电能有效地将源极靶材成分溅射沉积在阴极工件表面，并利用高温扩散和离子轰击碰撞级联反冲注入的方式实现阴极工件表面渗金属过程，开辟了等离子体表面冶金的新领域。

(2)不等电位双辉光交链增强型放电作为双辉光离子渗金属技术的物理基础还应进行系统研究，特别是对其交链增强的机理解释还不太成熟，相关的研究成果有可能拓宽等离子体应用领域。

(3)双辉离子渗金属技术在手用锯条,机用锯条、圆盘锯片,管内壁防腐等方面的应用实施以及大型工业用渗金属炉的研制成功,标志着该项技术已进入转化为生产力的阶段。

**致谢** 本项工作得到了国家高技术委员会强有力的支持,得到了王焱、杨国明等同志的大力相助,李成明、冯铁民、高原、贺志勇等同志均做了不少工作,谨借此表示感谢。

#### 参 考 文 献

[1] 徐重,太原工业大学学报,24-3(1993),30.  
[2] 徐重、古风英,金属热处理学报,3-1(1982),71.  
[3] Xu Zhong, Gu F. Y. et al., Proc. of 4th International

Congress on Heat Treatment of Material, West Berlin, June, (1985), 785.  
[4] Xu Zhong, Gu F. Y. et al., Proc of 5th International Congress on Heat Treatment of Material, Budapest, Hungary, October 1986, 1301.  
[5] 范本惠、徐重,金属热处理, No. 9(1988), 37.  
[6] 贺志勇、高原、赵晋香等,热加工工艺, No. 1(1994), 29.  
[7] 范本惠、潘俊德,太原工业大学学报, 19-3(1988), 10.  
[8] 徐重、王从曾,金属热处理学报, 9-3(1988), 13.  
[9] U. S. Patent, # 4. 520. 268, May 28, 1985.  
U. S. Patent, # 4. 731. 539, March 15, 1988.  
Canadian Patent, # 1. 212. 486, October 7, 1981.  
U. S. Patent, # 2. 150. 602, May 28, 1987.  
[10] 中国专利, 871043580, 1987. 7.  
[11] 王从曾、徐重、苏永安等,太原工业大学学报, 21-4 (1990), 82.  
[12] 徐重、范本惠,太原工业学院学报, 12-1(1981), 76.

## 全国材料科学和化学化工纺织中的电子显微学学术会议简介

第六届全国材料科学中的电子显微学会议和第八届全国化学化工纺织中的电子显微学会议于1995年9月7日至11日在广西省南宁市召开,出席会议的代表共76人。会前选出了49篇论文,出版了论文集,学术交流采取全体大会和分组会相结合的方式。在全体代表大会上共宣读了论文15篇,其中有代表性的报告有:“固体中电子散射的分形现象”(中国科学技术大学吴自勤);“低能扫描电子显微术的进展”(冶金工业部钢铁研究总院廖乾初);“动态过程的扫描电镜观察”(中国科学院北京科学仪器研制中心章一鸣);“C<sub>60</sub>-十二烷胺加合物LB膜的微观结构的电子显微镜研究”(中国科学院化学研究所龙程奋);“弛豫铁电陶瓷中的反相畴界”(清华大学蔡丽英);“聚丙烯低温拉伸断口形态”(清华大学张桂甲)和“聚丙烯/尼龙-6共混物的力学性能与相结构研究”(北京燕山石化公司研究院邹本三)等。

在上述大会报告中,“低能扫描电子显微术的进展”和“动态过程的扫描电镜观察”是属于综合评述报告。据了解,随着商品扫描电镜普遍采用场致发射电子枪,使得在很低的工作电压(例如1kV)条件下仍能保证有足够大的电子束流和图像的衬度分辨率,从而为低能扫描电子显微术的发展扫清了道路,并开拓了新的应用领域,如多相陶瓷显微组织的相鉴定,半导体和超导体缺

氧程度的测定,金属和合金的氧化动力学,以及随温度和浓度变化所伴随发生的相变等。由此可见,低能扫描电子显微术是当今FE-SEM仪器及其应用技术的发展方向之一。近年来我国学者在这方面也做了一些有益的基础工作,例如这次会上吴自勤教授报告了低能电子(1-10keV)在固体中散射的分形现象,得出了二次电子分布的多重分形谱,为开拓低能电子显微术新应用的物理基础提供了有价值的资料。

这次会议的论文所涉及的材料领域集中在高分子、陶瓷、碳素和表面合金等方面,基本上反映了近年来我国材料科学的研究动态。其次,有关分析技术和仪器的论文约占全部论文的1/4左右,表明近年我国在分析测试技术方面取得一定的进展。

会议期间还召开了有关科研经费和人才问题的专门讨论会。

通过这次会议,代表们取得了如下共识:因为企业是技术开发的主体,在面临社会主义市场经济和科研体制改革的今天,电镜工作一定要继续面向企业科研生产,根据企业生产要求,配合工艺开发,积极参与工艺开发全过程,为生产建设作出贡献。电镜工作是大有可为的。

(冶金工业部钢铁研究总院 廖乾初)