

# 双层辉光离子渗金属技术的现状与发展

古风英 徐重 范本惠 潘俊德 郑维能 王从曾

(太原工业大学离子渗金属及热处理研究所)

双层辉光离子渗金属技术是目前世界上在表面合金化领域中的一项最新技术。该技术已获得美国、加拿大、英国、澳大利亚、法国、瑞士及比利时等国专利权。

本文主要介绍了双层辉光离子渗金属技术的现状与发展, 双层辉光离子渗金属技术在工业用钢铁材料和零件表面进行合金化的研究及其在工业上的应用。

## The Present Situation and Development of the Surface Alloying by Double-Glow Discharge Technique

Gu Fengying Xu Zhong Fan Benhui

Pan Junde Zheng Weineng Wang Congzeng

(Research Institute of Plasma Surface Metallurgy and Heat Treatment, Taiyuan University of Technology)

The surface alloying by double-glow discharge technique is an updated technology in the field of surface alloying. The United States of America, Canada, the United Kingdom, Australia, French, Swiss and Belgium have granted the patent rights for the surface alloying of double-glow discharge technique.

In this paper, the present situation and development of the surface alloying by double-glow discharge technique are introduced. The study and the application of double-glow discharge surface metallizing process have been applied on the surface alloying of commercial steels and their workpieces.

### 一、概 述

“双层辉光离子渗金属”(以下简称“双辉渗”)是在一密闭容器内(见图1)抽真空, 两端加一直流电压至一定值时, 阴阳极间稀薄气体就产生辉光放电现象; 若在阴阳极间加一中间极(见图2), 在阳极与中间极间加一直流电压达一定值时, 它们之间也产生放电辉光现象。这种阳-阴极间、阳-中间极间的辉光放电现象, 称为双层辉光放电。

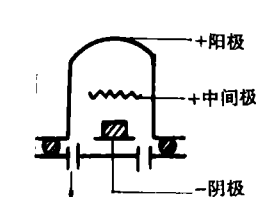
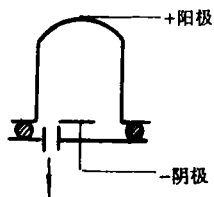


图1 辉光放电容器示意图 图2 双辉放电容器示意图  
双层辉光离子渗金属技术, 就是将上述的中间极换成

欲渗的金属(称为源极)。利用源极辉光溅射将其中原子或离子轰击出来, 使炉内充满活性金属原子或离子。同时利用阳-阴极(工件)间的辉光放电使工件加热, 吸收扩散活性金属原子(离子), 从而使工件被渗入金属。以上即为双层辉光离子渗金属的简单原理。

最初, 源极采用钨丝、钼丝。10 钢经  $1000^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$  的双辉渗钨, 其表面钨含量达 10%, 渗层厚度 0.08mm, 而钼含量 18.3%, 渗层厚度 0.049mm, 渗层为钨(钼)在  $\alpha$  相中固溶体。图 3 为  $1000^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$  渗钨的金相组织; 图 4 为渗层钨的分布曲线。

“双辉渗钨钼新工艺”于 1981 年 8 月通过省级鉴定, 首次向世界宣布双层辉光离子渗金属技术获得成功。1981~1983 年徐重教授去美国进修期间申请了专利, 于 1985 年 5 月获得美国专利权, 尔后又获得加拿大、英国、澳大利亚、瑞士、比利时、法国等专利权, 以及西德、日本、荷兰等三国专利优先权。同时该项技术被美国柏劳公司命名为“徐氏合金法”(Xuloy)。

双辉渗技术与固态、气态及激光等渗金属相比, 具有以下特点:

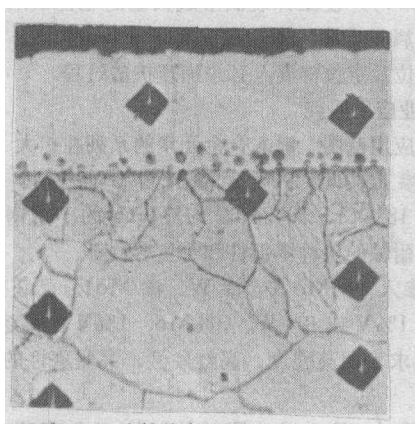


图3 1000°C × 5h 渗钨的金相组织 × 250

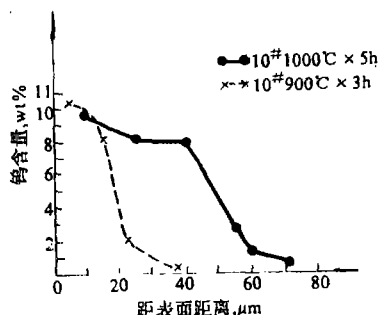


图4 渗层钨的分布曲线

- (1) 低压低真空：工作电压在几十伏至 1000 伏；真空度为 1 至  $10^{-2}$  托；
- (2) 成分基本可控；
- (3) 不需外热源，靠辉光加热；
- (4) 用材广泛，适用面宽：被渗材料可为普通钢、铸铁、有色金属等导体材料，适用于大面积、大工件；
- (5) 节约贵重金属，省能源；
- (6) 无公害，有利于文明操作。

## 二、基础研究和应用研究进展

### 1. 双辉渗基础研究

我们已进行下列工作，并获得成功：

- (1) 渗入的合金元素：1) 单元渗：W、Mo、Cr、Ti、V、Zr、Ta、Ni、Al、Pt、B 等；2) 二元或多元渗：Cr-Ni、W-Mo、Cr-Ni-W、Cr-Ni-Mo、Cr-Ni-W-Ti。

在普通碳钢表面渗入合金元素，其表面形成合金固溶体（如图 5），或纯金属沉积层（如图 6），或沉积层+固溶层（如图 7）；有时表面层还析出各种金属间化合物或碳化物，这取决于渗入元素的性质、基材的成分及不同的工艺参数。渗层表面合金元素含量可由百分之几至 90% 以上，渗层厚度为几  $\mu\text{m}$  至 1000  $\mu\text{m}$ 。实际上类似在普通钢铁表面进行“冶炼”特殊钢，所以此项技术又称“等离子表面冶金”。

(2) 金属源极形式有：丝状、板状、块状或粉末冶金制样，还可仿形，还根据需要设计形状。

(3) 被渗的基材有：普通碳钢、低合金钢、铸铁、有色金属等具有导电性的材料。

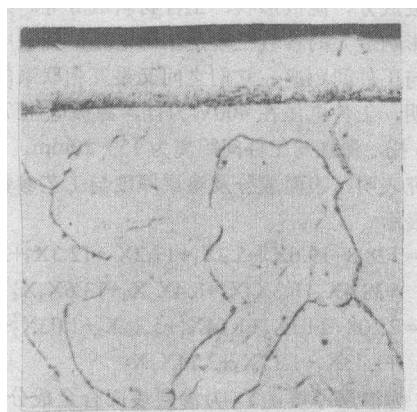


图5 A<sub>3</sub> 钢 1000°C × 3h 渗 Ti 金相组织 × 200

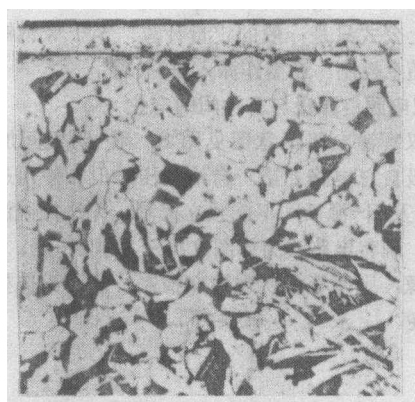


图6 45 钢 950°C × 1h 渗 Ti 金相组织 × 200

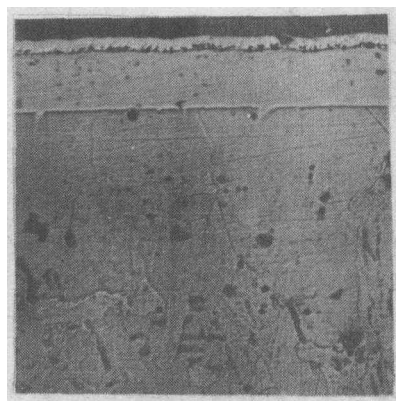


图7 20 钢 950°C × 3h 渗 Ti 金相组织 × 100

### 2. 复合渗及复合热处理

复合渗，是渗金属后再进行氮化、渗碳或碳氮共渗处理。普通碳钢渗金属后表面的物理化学性能改变，但表面强度和硬度低，经渗碳、渗氮或碳氮共渗可提高表面硬度和耐磨性等。实施此工艺比较容易，只要在通氩气的管路中接一三通，即可依需要通入碳、氮等气体。

复合热处理，即渗金属后再进行其他热处理，如淬火、调质等。由于渗金属温度高，工件组织被破坏，为使

表面或整体获得所需性能。可进行各种热处理。

### 3. 工艺参数最佳值及表面成分可控研究

双辉渗金属影响质量的因素很多,如源极电压、工件电压、气压、工件温度、保温时间、工件与源极间距离、金属源极成分、源极形状、工件材料成分等。经长期实验结果,影响最大的参数主要是工件电压、源极电压、气压及源极与工件间距离,它们之间又是互相联系的。后来的研究表明,工件电压在 400V 为佳,源极电压 700V 以上,气压 0.3 托,源极与工件间距离为 15~20mm。

研究表明,表面成分及渗层厚度与工艺参数间关系可用下式表示:

$$Y_1 = 128.8 - 19.6X_1^2 - 5.2X_1 + 17.2X_2 + 12.3X_3^2 + 32.3X_3 + 38.4X_4 + 6.3X_2X_3 + 8.4X_2X_4 + 13.6X_3X_4$$

$$Y_2 = 25.08 - 2.01X_1 + 1.14X_1^2 + 5.28X_2 + 1.03X_2^2 + 2.94X_3 + 1.43X_3^2 + 1.12X_4 + 2.14X_2X_3$$

式中  $Y_1$  为渗层厚度,  $Y_2$  为渗层表面合金成分;  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  分别为与气压、源极电压、温度、时间有关的参数。

以上公式只是一般的定量计算,至于像钢铁冶金或渗碳那样随意控制,还需作深入研究。

### 4. 双电源、源极与工件间的电位

原双辉渗电路示意图见图 8,阳-阴极间加一直流电压,源极自总电路上接一自给偏压,但在在使用过程中,阳-阴极间及阳-源极间不能独立控制,无法控制源极和工件的电流。现将电路改为如图 9 所示,即阳-阴、阳-源极间分立电源,则两者可实现独立控制,从而为选择正确工艺提供方便。

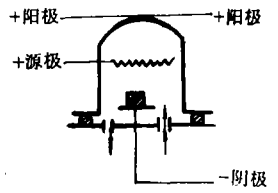
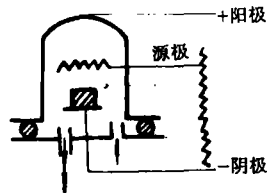


图 8 原双辉渗电路示意图

图 9 改进后双辉渗电路示意图

源极与工件间的电位,开始试验时源极总是高于工件,希望金属正离子易向工件飞奔。但是现在两者之间,既可源极电位高于工件,也可等于或低于工件。实验得知,自金属源极喷射的粒子,多数为活性中性原子所致。

### 5. 空心阴极放电效应的应用

当源极与工件之间产生辉光放电时,两者间小至一定距离,则产生强烈的辉光放电现象,电流密度迅速增加,温度急剧增高,此现象称为空心阴极放电效应。利用此效应,可提高源极喷射率及金属的离化率,并能较快地提高工件温度,这对提高表面渗金属浓度、增加渗层厚度有利。但同时也存在加热不均、工件形状受限制等问题,有待解决。

### 6. 关于扩散机理

利用双辉放电使固态金属喷射出来,在  $1000^\circ\text{C} \times 3\text{h}$  的离子渗钨时,能使 10 钢表面获 10%W,渗层厚度达

0.08mm,渗速也快。经分析与计算认为,由于辉光放电过程中离子(或原子)对工件表面轰击(每一离子具有平均能量为 50eV),使工件表面形成大量的空位缺陷及空位梯度层。金属元素渗入钢铁表面属于置换型扩散,而表面存在大量空位及空位梯度,必定加速扩散过程。

### 7. 工业应用研究

(1) 应用范围 渗入合金元素的系列在扩大

1) 渗入 Cr-Ni (含渗 Cr): 已获得 20%Cr、80%Ni、18%Cr、10%Ni、 $>13\%$ Cr 的不锈钢渗层,适用于要求耐蚀的各种零部件和管道容器等。

2) 渗入 W-Mo (含渗 W、渗 Mo): 已获得 6%W、5%Mo、1%V 或 9%W、3%Mo、1%V 的高速钢渗层,适用于要求表面高硬度、高红硬性、高耐磨性的工模具及零部件。

3) 渗入 Cr-Al、Cr-Ni-Mo: 已获得 13%Cr、5%Al、5~6%Mo 的高温合金钢渗层,适用于要求耐高温氧化、防  $\text{Cl}^-$  的零部件。

4) 渗入 Ti、Ta 等: 已获得纯 Ti、Ta 的沉积层和扩散层,适用于抗海水腐蚀及化工方面材料。

(2) 应用成果

1) 双辉渗钨钼用手锯条,已于 1987 年通过省级鉴定,认为是“国内首创,技术水平居国际领先地位”。

用手锯条国内采用碳素工具钢制造,国外刃部采用高速钢,背部采用弹簧钢。后者性能好,但工艺复杂,设备昂贵。我们采用 20Cr 钢为基材,沿齿廓渗入近似高速钢成分的渗层,再经渗碳、淬火、回火。经切削试验,其性能达到英国国家 BS1919-1983 年关于电子束焊接高速钢双金属用手锯条规定的锯切标准,并具有工艺简化、减少高速钢消耗、降低成本的优点。

2) 大型钢板,如  $1000\text{mm} \times 500\text{mm} \times 4\text{mm}$  A<sub>3</sub> 钢板经  $1000^\circ\text{C} \times 3\text{h}$  双辉 Ni-Cr 共渗,表面获得  $>40\%$  Ni、 $>10\%$  Cr 的合金层,层厚达 25~30 $\mu\text{m}$ ,经德国克虏伯公司检验,渗层与基体结合良好。致密性高。

3) 其他如 4Cr9Si2 钢制排气阀,经双辉渗钨钼后台架试验结果,其寿命提高二倍,与 21-4N 钢制排气阀相当。南方钢窗拉手,采用低碳钢双辉渗铬镍,效果良好,可防止生锈。某化工厂泵零件采用 45 钢渗铬镍后,已运行一年多。

为了使双辉渗技术工业化,于 1986 年聘长春光华热处理研究所杜树芸高工设计、委托航天部首都机械厂制造了一台 100kW 大型双层辉光离子渗金属工业用炉,1987 年通过省级鉴定,被认为“具有世界先进水平”。

国内外行家认为,双辉渗金属技术为渗金属化学热处理开拓了一条新的途径,是金属表面合金化的一种有力手段,具有很强的生命力和广阔的发展前景,有着很高的技术价值和经济效益。美国威斯康星大学发明服务中心在评价国际上自 1980 年以来的发明水平时,共评价 1600 项,其中不到 2% 的发明获 50 分以上,而“双辉技术”获得 52 分。1985 年 9 月美国《金属进展》发表文章把双辉渗技术誉为“1985 的 6 月西柏林召开的第四届国际材料热处理大会文章的精萃”。

(下转第 35 页)

# 9Cr18 钢的二次硬化效应

一六六厂 郑茂全

我厂生产的油剂计量泵的泵体由前板、后板、中板和齿轮板组成,使用材料均为 9Cr18 钢。尤其齿轮板,它的厚度为 1~2mm,形位公差平面度、平行度均为 0.002~0.003mm。热处理后硬度分别在 HRC54~60 之间,热处理制度采用淬火+冷处理+低温回火(200℃左右)。零件完工检验入库,在总装时发现零件产生变形,进行排油量试验时,由于渗漏达不到技术要求,或由于零件变形造成装配时尺寸干涉。

通过分析认为,零件完工后,在存放中继续产生变形,主要是因淬火内应力没有基本消除的缘故,机加工产生的应力,经热处理已得到消除。因为零件淬火冷却时造成的宏观区域性的内应力(亦称为第一类内应力)是造成零件变形的主要原因,须经高于 500℃回火,第一类内应力才可基本消除。

有关介绍 9Cr18 钢热处理制度的资料很少,我们在可查到的资料中,都是采用淬火+低温回火,有的资料中介绍了用 1000~1050℃油淬、经不同温度回火后的硬度变化的曲线,这条曲线表达了随着回火温度的提高,硬度不断下降的趋势。

要达到基本消除淬火冷却时造成的内应力,零件的回火温度必须提高到 500℃以上,参考了 Cr12、Cr12MoV 钢的高温回火时的二次硬化效应和有关资料的介绍,合金钢中能形成二次硬化效应的碳化物形成元素的含量,对二次硬化效应有很大影响。如在铬钢中,只有含铬量足够大(>12%)时,才能显示出明显的二次硬化效应。当然它也应该含有形成碳化物的足够量的碳。为此,对 9Cr18 钢的二次硬化效应进行了如下探索性的试验。

1. 不同温度淬火后的硬度变化,采用试样尺寸约为 2mm×15mm×40mm;淬火加热温度分别为 900℃、1000℃、1050℃、1100℃和 1140℃;保温时间为 12 分钟;淬火冷却介质为 20<sup>#</sup>机械油,温度为 20~60℃。不同温度淬火后的硬度变化(未经冷处理)如图 1 所示。

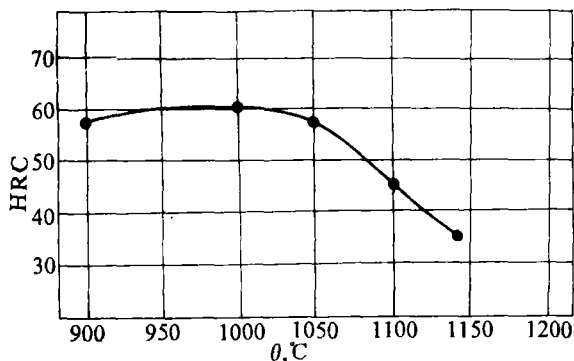


图 1 9Cr18 钢不同温度淬火后的硬度变化  
(9Cr18 钢化学成分: C-0.99%, Cr-18.1%)

从图 1 的曲线可以这样认为,淬火温度愈高,则晶粒度愈大,而淬火后组织中的未溶碳化物愈少,马氏体转变温度也愈低,淬火组织的残余奥氏体愈多,所以测得的硬度也愈低。

2. 不同温度回火后的硬度变化,根据有关资料介绍,高铬合金钢的二次硬化效应在 500℃左右。经上述不同温度淬火后(未经冷处理)试样在 440~560℃之间回火,温度间隔为 20℃,保温时间为 1 小时,回火空冷。不同温度回火后的硬度变化示于图 2。

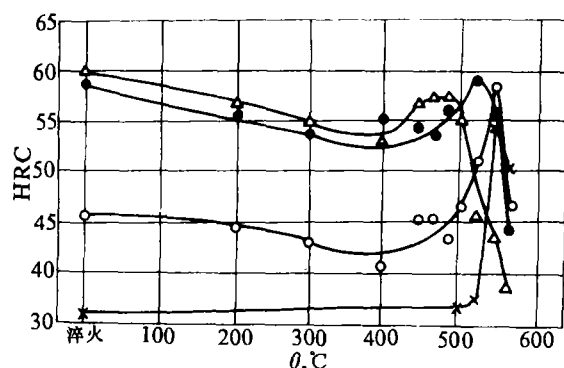


图 2 9Cr18 钢淬火后不同温度回火的硬度变化  
× 为 1140℃ 淬火; ○ 为 1100℃ 淬火;  
● 为 1050℃ 淬火; △ 为 1000℃ 淬火

由图 2 可以看出,9Cr18 钢在 500℃左右回火后硬度明显上升,显然是由于共析析出的合金碳化物的弥散强化(二次硬化)和高铬合金钢在淬火后存在有较多的残余奥氏体,在回火冷却中转化为马氏体(二次淬火)的结果。所以应采用 2~3 次回火较为合适。

## 结 论

1. 9Cr18 钢在 1000~1140℃温度范围内淬火后,都存在有明显的二次硬化效应。随着淬火温度的提高,对应于硬度最大值的回火温度也相应提高。

2. 为达到消除淬火冷却时造成的内应力,硬度 HRC 保持在 54~60 之间,应选择淬火温度 1050℃+500℃以上回火比较合适。

\* \* \* \* \*

(上接第 34 页)

## 三、结 语

“双辉渗技术”具有巨大潜在应用前景,应大力推广应用;但同时,也还存在如高温变形、渗速不够快、合金源活化率低等问题,需进一步深入研究,使之更趋完善。

参考资料(略)