

## 熔剂法热浸镀铝工艺研究现状及发展

王光文, 刘炳, 石传美

(新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

[摘要] 介绍了熔剂法热浸镀铝法的表面处理, 碳钢和铸铁助镀工艺的方法和区别, 助镀剂和覆盖剂的选择, 浸镀铝温度及浸镀时间的选择、浸铝后工件的热处理及热浸渗铝工件的性能和微观组织等方面; 阐述了当前国内外热浸渗铝工艺的新方法。

[关键词] 热浸镀; 熔剂法; 助镀剂; 耐蚀性; 镀铝

[中图分类号] TG174.443

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2008)05-0075-04

## Status and Advance of the Technology and Performance of Hot-dipped Aluminizing by Flux Method

WANG Guang-wen, LIU Bing, SHI Chuang-mei

(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Wulumuqi 830008, China)

[Abstract] The surface treatment, the technology and difference of auxiliary in iron and steel, the choice of auxiliary and slipcover, dipping aluminizing temperature and time, heat treatment, properties and microstructure in hot-dip-aluminized (HAD) steels were introduced. The new technology and method of hot-dip aluminizing in our country and overseas were clarified.

[Key words] Hot-dip aluminizing; Flux method; Auxiliary; Corrosion resistance; Al plating

### 0 引言

热浸镀铝是20世纪发展起来的1种表面处理工艺技术。钢镀铝后不仅把铝的耐蚀性和钢的强度结合起来,而且使钢材具有新的性能——耐热性,并对光、热有良好的反射性,镀件镀铝后经过扩散,表现出高耐蚀性、抗高温氧化、耐磨、硬度高等优点<sup>[1]</sup>。相比其粉末法、热喷涂法等,热浸镀铝是目前最经济的涂覆铝方法,约占生产的80%。因而热浸镀铝作为蓬勃发展的工艺,以其质优价廉的特点,目前正被广泛地研究并应用于石油、化工、电力、冶金、机械、能源和交通运输等领域,前景十分广阔。

### 1 热浸镀铝工艺

根据镀前预处理的方法不同,一般把热渗镀铝工艺分为:

1) 预镀金属法;2) 表面钝化法;3) 保护气法,主要包括森吉米尔法和改进森吉米尔法;4) 熔剂法。

预镀金属法是将脱脂、除锈后的工件涂覆金属底镀层(铜、锡、锌等),然后再浸入熔融的铝液中热浸铝,而作为底层的金属镀层会熔入铝液中不仅影响镀层性能,而且工艺复杂,不适用于工业化生产。随着工艺的发展,现在主要是保护气法热浸镀铝和熔剂法热浸铝。

[收稿日期] 2008-06-26

[基金项目] 新疆维吾尔自治区高校科研计划科学的研究重点项目(XJEDU2006I11)

[作者简介] 王光文(1984-),男,山东潍坊人,在读研究生,研究方向为金属材料表面技术的研究与应用。

保护气法是一种氧化还原表面处理技术,工件首先送入氧化气氛的氧化加热炉中,在高温下工件表面的油脂、污物被碳化处理掉,然后再将工件送入到还原加热炉中,在高温还原气氛下工件的表面氧化物被还原,露出纯的铁表面。最后放入镀液中进行浸镀。这种工艺的特点是自动化程度和生产效率高,产品处理稳定,但设备投资较大,工艺复杂。熔剂法是首先对工件进行除油、除锈处理,然后在净化的钢铁表面上浸助镀剂,形成1层完整的助镀剂薄膜,保护镀件表面不被氧化污染。当钢件浸入熔融铝液中时,钢表面的助镀剂膜自行熔化脱除,露出清洁的钢表面,并立刻被铝液所润湿,从而形成均匀连续的浸铝层。具有设备投资少,操作简单,生产灵活的特点,是一种简单、经济可行的方法<sup>[2-3]</sup>。

近年来,热浸镀铝新工艺主要是开发研究熔剂法,通过改变助镀工艺,来改善工件浸铝的表面质量,提高涂层与基体的结合力。

### 2 热浸渗铝方法

浸铝前的表面处理方法流程为:待镀件→除油→水洗→除锈→水洗→助镀→水洗→吹干及预热→热浸渗铝。

#### 2.1 表面清洗处理

工件表面通常有油污和氧化物的存在,妨碍了铝液在其上的铺展、润湿,从而影响铝和铁之间原子的相互接触扩散,影响渗铝层的完整均匀形成,故必须清除。

1) 除油 采用低温加热或碱液或有机溶剂清洗除油均可,通常采用化学方法除油,除油剂为20% NaOH+5% Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+10% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+水,加热煮沸20~30min。有机溶剂可采用丙酮。

如果钢件油污太多,可先用汽油粗除油处理。由于除油工件表面呈碱性,所以要用水冲洗干净。

2) 除锈 用10%~20%硫酸或盐酸水溶液均可,用硫酸液时加热到60~80℃,盐酸洗一般不用加热。如表面锈蚀严重,可适当延长酸洗时间。酸洗时间过短不能有效清除试样表面的氧化物,过长容易导致试样表面积碳,还会引起漏镀等缺陷。试样酸洗后再用清水冲洗,去除残留的酸液。对于铸铁工件喷丸清理,然后经有机溶剂清洗,其渗铝效果要比一般的方法碱洗除油,酸洗除锈要好,其原因是:喷丸处理能打掉表面部分石墨,可提高铝液对表面的润湿性;喷丸清理避免了碱、酸洗过程中酸、碱液沿疏松的石墨渗入,减小烘干过程中表面的重新氧化程度;喷丸使表面粗糙,增强了表面对铝液的毛细作用,促进了铝液在其上的铺展。

## 2.2 水溶液助镀

助镀主要起保护经除油除锈的工件表面。工件若不及时助镀,表面会很快被氧化形成疏松的氧化膜,该膜有阻止铝液与基体的润湿性接触的特点,易造成镀件出现漏镀、假镀现象。因此,助镀是镀铝前一道至关重要的工序。助镀方法有电解法、熔融盐法、水溶液法等,其中水溶液助镀法是一种最简便易行的方法,一般是碱金属盐及铝系盐组成的氯化物及氟化物复合盐溶于水进行助镀<sup>[4]</sup>。

从大量已经公开的水溶液助镀剂的配方可以看出,熔剂法热浸镀所采用的水溶液助镀剂应该有以下特点:1)能在工件表面形成连续完整而且无孔隙的保护膜;2)浸铝时,助镀剂产生的保护膜应立即从工件表面脱除,并且能显著改善铝与钢基体的润湿性;3)对浸铝工件与铝液接触面处可能出现的少量氧化物有吸附溶解作用;4)对铝液无污染。

有关水溶液助镀剂的专利报道很多,可分为氧化剂、氯化物溶剂和氟化物溶剂。通过试验测得氧化物溶剂有CrO<sub>3</sub>、KMnO<sub>4</sub>等。氟化物和氯化物组合使用效果更好。常用的氯化物溶剂有KCl、NaCl、ZnCl<sub>2</sub>、NH<sub>4</sub>Cl、LiCl、SnCl<sub>2</sub>等,常用的氟化物溶剂有NH<sub>4</sub>F、NaF、Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>、AlF<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>ZrF<sub>6</sub>等。通过试验测得性能较好的配方见表1。

表1 碳钢助镀剂配方

Table 1 Component of iron auxiliary

配方	质量分数 /%	时间 /min	温度 /℃	镀层
CrO <sub>3</sub>	3%~5%	5~10	80	完整,附着性好,表面不平整。
KMnO <sub>4</sub>	5%~10%	10	80	完整,附着性好,表面有凹凸。
ZnCl <sub>2</sub> +NH <sub>4</sub> Cl	20%	3~5	80	完整光亮,附带少量渣滓。
ZnCl <sub>2</sub> +NH <sub>4</sub> Cl+KF	20%	3~5	80	完整光亮,附着性好,表面平整。

铸铁在成分上不同于碳钢,含有较多的C、Si等,它们阻碍铝层的渗入,其助镀照搬碳钢时,镀层性能较差。通过试验测得助镀配方见表2。

## 2.3 铝液表面覆盖剂

铝液在高温下极易被空气中的O<sub>2</sub>氧化,造成镀液表面氧化严重,致使镀件表面成疙瘩不平。因此,在熔融的铝液表面需要覆盖1层表面熔剂来防止铝的氧化,表面熔剂浮在铝上应满足以下基本条件:1)熔点应低于铝液的熔体温度;2)密度要小,能

表2 铸铁助镀配方

Table 2 Component of steel auxiliary

配方	质量浓度 /(g·L <sup>-1</sup> )	时间 /min	温度 /℃	镀层
KCl+LiCl+AlF <sub>3</sub> +NaF	50	8~10	80	完整,附着性好。
ZnCl <sub>2</sub> +NH <sub>4</sub> Cl+KF	200	8~10	80	完整,附着性好,表面平整、光亮。

浮于铝液表面;3)具有溶解Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的能力;4)流动性要好;5)吸湿性要小,工作时不易挥发;6)不产生有害杂质及气体。

覆盖剂一般由碱金属及碱土金属的氯化物及氟化物组成,主要成分是NaCl、KCl、Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>等。氯盐对固态氧化铝夹杂物和氧化膜有很强的浸润能力,在熔体温度下密度远小于铝液,能很好地铺展在铝液表面,破碎和吸附熔体表面的氧化膜,并且氯化物的表面张力小,润湿性好。通常以50%NaCl和50%KCl组合最好,加入少量的Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>等氟盐,主要起精炼作用。

## 3 浸铝温度及时间与渗铝层质量的影响

### 3.1 浸铝温度和浸铝时间

浸铝温度和浸铝时间是影响镀铝工件质量的重要因素,温度低,铝液流动性差,表面积铝增厚,镀层中合金层薄;温度高,铝液对坩埚的侵蚀加剧,熔剂老化加快。通常情况下,浸铝温度控制在700~800℃之间。

表面热浸渗铝的过程可以分为2个阶段,第1阶段是铝液附着于工件表面的过程;第2阶段是工件表面的活性铝原子通过表面向内部扩散的过程,高的浸铝温度和长时间的浸铝,虽然有利于第2过程中铝的扩散而增加浸渗层的厚度,从而提高浸渗层的性能,但同时也会增加熔铁深度,污染铝液。针对于这一问题,国内外科研工作者做了大量的研究,试验结果表明:浸铝温度为(720±10)℃,同时浸铝时间控制在150s左右较为适宜<sup>[5]</sup>。当然对于不同复杂程度、不同服役条件和不同的基体材料的工件表面,浸铝温度和浸铝时间的适当调整将会更好地满足其性能要求。

### 3.2 渗层组织

整个过程包括熔融、吸收、扩散3个基本过程。当液态铝和固态铁接触时,发生铁原子溶解和铝原子的化学吸附,形成铝铁化合物以及铁、铝原子的扩散过程和合金层的生长。形成的镀铝层为2层:靠近基体的铁铝合金层及外部的纯铝层。当工件浸入铝液中,铝中铁浓度增大,形成金属间化合物FeAl<sub>3</sub>(θ相)。开始时θ相不向铝液内部生长,同时在工件表面产生铝的固态液体。2种金属原子相互扩散达到一定时产生Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>(η相),沿C轴快速生长形成柱状晶。同时Fe穿过FeAl<sub>3</sub>向铝中渗透。当Al进一步扩散时,Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>变成FeAl<sub>3</sub>。由于Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>的生长及铁向铝中的快速扩散,使铝在铁中固溶区消失,Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>成为扩散层主要成分<sup>[6]</sup>。渗铝后的室温组织由表及里为:Al→FeAl<sub>3</sub>(θ)→Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>(η)→FeAl<sub>2</sub>(ξ)→FeAl(β)→Fe<sub>3</sub>Al→含铝α-Fe过渡层→心部组织(F+少量P)。由此可见,热浸渗层的形成是铁与铝液相界面反应和反应扩散的结果<sup>[7]</sup>。

### 3.3 浸铝后的扩散热处理

工件热浸后都应进行扩散处理,以增加Al-Fe合金层的厚

度,可以明显地提高工件表面抗氧化性、耐蚀性及耐磨性。热浸渗铝的过程持续时间比较短,不利于活性铝原子的扩散,所以在浸铝后必须进行适当的热扩散处理。由于铝原子在奥氏体中的扩散系数远大于铁素体,所以扩散温度必须加热到碳钢的  $A_{C_3}$  点以上,并在  $950 \sim 1050^{\circ}\text{C}$  时保温  $4 \sim 6\text{h}$ ,炉冷或空冷均可。

但普通碳钢的扩散温度超过  $1000^{\circ}\text{C}$ ,不锈钢(18-8型)扩散温度超过  $1300^{\circ}\text{C}$  时,合金层有时会出现疏松或崩裂现象,会降低渗铝钢的耐热抗蚀能力。在扩散温度一定时,随着扩散时间的延长,厚度在增加,当扩散时间超过  $4\text{h}$  后,厚度增加不明显<sup>[8]</sup>。

### 3.4 抛光处理

工件从铝液中提取出来时,覆盖在铝液表面的熔剂和污物会粘附于工件表面,而影响其外观质量。粘附于工件表面的残盐对镀铝层有较强的腐蚀作用。因此,对耐候和耐蚀工作,需作除盐的抛光处理。目前抛光处理大多数采用化学溶剂法,即用化学剂(主要是酸)配制成水溶液,使镀件表面盐溶解,获得光亮的表面。使用的化学剂有硝酸、磷酸、盐酸、硫酸等。

## 4 渗铝后工件的性能

### 4.1 抗氧化性能

抗氧化性取决于渗铝层厚度及表面含铝量的高低。一般渗铝钢比不渗铝钢使用温度提高  $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\#}$  钢只能在  $500^{\circ}\text{C}$  以下使用,渗铝后可在  $800^{\circ}\text{C}$  下长期使用,在  $1000^{\circ}\text{C}$  短时使用<sup>[9]</sup>。耐热钢渗铝后,可显著提高其抗高温氧化性,其原因在于耐热钢渗铝后,其表面铝、铬含量较高,从而形成致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜,有很好的保护作用。而随着使用时间的延长,合金层中铝原子不断向内层扩散,浓度不断降低,表面形成的  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜亦很致密,具有良好的保护作用<sup>[10]</sup>。未渗铝的 HH309 钢在高于  $1000^{\circ}\text{C}$  时,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的稳定性降低,将对表面失去保护作用,而热浸渗铝后,其表面由表层的铁铝合金和内层分散的  $\text{NiAl}$  和  $\text{Ni}_3\text{Al}$  构成,在  $700^{\circ}\text{C}$  和  $1100^{\circ}\text{C}$  的氧化性试验中,其高温抗氧化性能明显提高<sup>[11]</sup>。

铸造渗铝后,其耐高温氧化性增强,但与渗铝钢相比,在相同的工艺条件下,钢的渗铝层比铸造的深;渗层越深,铁原子向表面扩散的距离越长,越不易扩散到基体表面被氧化。铸造中石墨在渗铝过程中部分残留在渗层表面和铝铁化合物层中,成为氧原子进入材料内部的通道,使氧化加快。在铝液中加入适量的合金元素,来提高渗层质量和改善工件的抗高温氧化性能。

### 4.2 耐蚀性

碳钢渗铝后,表面形成 1 层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜,其致密连续,无孔隙,可阻止腐蚀介质侵入。在高温下,  $\text{H}_2\text{S}$  与铁发生反应:  $\text{H}_2\text{S} + \text{Fe} = \text{FeS} + \text{H}_2$ , 反应在室温进行,在高温下反应速度更快。表面生成的 FeS 是 1 种疏松多孔的物质,不能阻止  $\text{H}_2\text{S}$  对材料内部的侵蚀,渗铝后表面生成致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜,可以阻碍  $\text{H}_2\text{S}$  气体与基体铁原子接触,从而保护了基体金属,使渗铝件具有很好的耐  $\text{H}_2\text{S}$  气体腐蚀性能。

铸造经高温扩散渗铝后,其表层的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和次表层的铝铁化合物  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  和  $\text{FeAl}_3$  相致密连续、无空隙可防止腐蚀介质侵

入<sup>[12]</sup>。渗层对酸、碱、盐如海水等都有很好的防腐性能<sup>[13]</sup>。

### 4.3 耐磨性

渗铝钢表面有很高的硬度,由表及里随着铝含量的降低,其硬度不断下降,所以表面有较优良的耐磨性。以渗铝  $20^{\#}$  钢为例,进行磨损对比试验,其结果为:渗铝  $20^{\#}$  钢的耐磨性指数为 2.18,未渗铝  $20^{\#}$  钢为 1.0,未渗铝  $\text{Cr}_8\text{CuMo}$  钢为 1.60。可见  $20^{\#}$  钢的耐磨性在渗铝后大大高于其它钢种<sup>[14]</sup>。

此外,渗铝后工件具有优良的导电和导热性能。渗铝后铸铁的导热性能比渗铝前高  $15\% \sim 20\%$ 。与其他渗铝法比较,有美观的外表,可作装饰材料。

## 5 渗铝技术的发展

### 5.1 无覆盖熔剂的热浸镀渗技术

在热浸镀铝工艺中,为了防止表层铝液被氧化,加入覆盖剂。但由于覆盖剂大都由氟盐和氯盐组成,其蒸汽腐蚀设备,对操作人员的毒害较大。对于以上问题,李苏琴<sup>[15]</sup>探讨了在铝液中加入微量合金元素的无覆盖熔剂的热浸镀铝新工艺,主要是在铝液中加入微量合金元素(如 Ga、In、Re、Si),使其对铝液面有较好的抗氧化作用。因此,在钢材的热浸镀渗铝时,完全可以采用铝液中添加微量合金元素的方法替换传统的覆盖熔剂法,从而大大缩短工艺流程,降低成本,提高产品的质量,镀件表面白亮无杂质,平整无挂皮和漏镀现象,并长时间保持光泽而不发灰<sup>[16]</sup>。

### 5.2 超声波热浸镀渗铝技术

目前的渗铝技术主要用于高温、高腐蚀工作条件下的管件和一些结构简单工件。复杂材料仍以合金材料为主,因为存在铝液流动性差、渗入能力不够等问题,使工件的各个部分的孔洞、缝隙、内壁得不到充分处理。超声波热浸镀渗铝研究的出现,加大了外场作用力下热浸镀渗技术的应用。不仅缩短了热浸镀时间,而且由于铝液中无所不在的超声波强烈火空化效果,使得复杂工件和各个部分均可以得到充分处理,可极大地提高热浸镀渗层表面质量及结合力。这种超声镀铝方式更是迎合了我国能源发展和环境保护等方面的需求。近 10 年来,超声空化已成为多种学科的基础研究热点<sup>[17]</sup>。

### 5.3 机械能助渗铝<sup>[18-19]</sup>

机械能助渗铝是利用运动中的粒子的机械能冲击工件表面进行助渗,能使渗铝温度由常规下的  $800 \sim 900^{\circ}\text{C}$  降低到  $460 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 。渗层相结构仍然是  $\text{Fe}_2\text{Al}_5(\eta)$ ,经  $800^{\circ}\text{C}$  扩散退火后,渗层组织为  $\text{FeAl}$  相。 $20^{\#}$  钢机械能助渗铝层在  $700^{\circ}\text{C}$ 、 $800^{\circ}\text{C}$  加热  $120\text{h}$ ,氧化轻微,抗氧化性优于  $\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$  不锈钢。与常规渗铝和热镀铝一样,能在  $780^{\circ}\text{C}$  以下长期使用。

## [参考文献]

- [1] 姚寿山,李戈扬,胡文彬. 表面科学与技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2005. 137-180
- [2] 郭旭侠, 资文华, 丑修建, 等. 热浸镀铝工艺及镀层分析[J]. 昆明理工大学学报, 2004, 29(2): 19-22

- [3] 孙克宁,孙雪. 热浸镀铝工艺及水溶液助镀剂的研究[J]. 电镀与环保,2001,21(3):29-32
- [4] 刘秀玉,柴本银. 助镀剂在热浸镀工艺中的应用[J]. 山东化工,2004,(33):21-23
- [5] 陈思佳,张世明. 钢铁热浸铝温度的研究[J]. 有色设备,1998,(5):14-15
- [6] Gul Hameed Awan,Faizul Hasan. The morphology of coating/substrate interface in hot-dip-aluminized steels[J]. Materials Science and Engineering,2008, A 472:157-165
- [7] 赵文轩. 材料表面工程导论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998.87-140
- [8] 郝建堂,张翠兰,陈冬. 我国熔剂法热浸渗铝工艺发展概况[J]. 金属热处理,1995,(1):3-5
- [9] 丁庆如. 碳钢热浸渗铝工艺及应用[J]. 热加工工艺,1994,(3):30-32
- [10] 郝建堂,卢杰. 耐热钢的热浸渗铝及其性能试验[J]. 钢铁,1996,(12):45-48
- [11] Sharafi S, Farhang M R. Effect of aluminizing on surface microstructure of an HH309 stainless steel[J]. Surface & Coatings Technology,2006,200:5048-5051
- [12] 曹学增,陈爱英. 热浸渗铝组织及其腐蚀性能的研究[J]. 理化检验——物理分册,2002,(6):241
- [13] 郝建堂. 钢材热浸渗铝及在工业加热设备上的应用[J]. 工业加热,1994,119(3):48-50
- [14] 丁庆如. 碳钢热浸渗铝工艺及应用[J]. 化工施工技术,1996,(3):32-33
- [15] 李苏琴. 钢材热浸镀铝新工艺[J]. 热处理,2001,16(4):20-22
- [16] 吴元康. 钢铁件浸铝工艺的改进及发展[J]. 材料保护,1984,27(1):7-10
- [17] 夏原,彭丹阳. 超声波热镀铝技术评述[J]. 材料热处理学报,2001,22(4):25-30
- [18] 孙希泰,付建设,徐英,等. 机械能助渗铝的研究[J]. 金属热处理,2000,25(7):21-23
- [19] 孙希泰,徐英,孙毅,等. 21世纪化学热处理将由其它能助扩渗代替纯热扩渗[J]. 金属热处理,2003,28(1):27-29

(上接第 18 页)

构并未发生变化,并成功地在其表面包覆上 1 层完整均匀的非晶态 Ni-Co-P 合金镀层。

表面金属化改性的聚苯胺粉体作为 1 种新型的电磁波吸收剂在民用和军用方面都具有广阔的前景,通过具体的沉积工艺控制镀层的厚度,镀层的成分,实现表面颗粒纳米量级包覆及控制改性粉体的电磁参数等具有重要的意义,是下一步研究的重点。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Zhan Haijun, Yao Xi, Zhang Liangying. The preparation and microwave properties of  $\text{Ba}_3\text{Zn}_z\text{Co}_{2-z}\text{Fe}_{24041}$  ferrite by citrate sol-gel process [J].

(上接第 67 页)

4) 润湿剂的质量浓度控制在 0.10~0.15g/L 为好。  
5) 要充分使用阴极移动、滚动、翻动、循环拉动的方式,以使  $\text{H}_2$  能够迅速离开工件表面和溶液。盲孔、通孔和异形状工件的放置位置应有利于  $\text{H}_2$  溢出而尽可能无阻挡。

6) 酸洗后且超声波清洗后的工件表面,在流转过程中,应尽可能避免被酸碱盐等物质污染。其中,要控制末级漂洗后的纯水的电导率  $< 5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。这里采取自动控制水的流量为好。用 1%  $\text{AgNO}_3$  或用 5%  $\text{BaCl}_2$  溶液对末级漂洗后的纯水中是否含有氯离子或硫酸根离子进行定性分析<sup>[4]</sup>。若有白色沉淀或  $\text{pH} < 5$ ,说明工件表面未洗干净或被二次污染了。应重新酸洗和超声波清洗。

7) 氢粉化有别于氢脆,但同样是致命的。根据对磁体氢化的过程、机理和析氢的过程、机理的分析,对所采取的避氢措施

- [12] 曹学增,陈爱英. 热浸渗铝组织及其腐蚀性能的研究[J]. 理化检验——物理分册,2002,(6):241
- [13] 郝建堂. 钢材热浸渗铝及在工业加热设备上的应用[J]. 工业加热,1994,119(3):48-50
- [14] 丁庆如. 碳钢热浸渗铝工艺及应用[J]. 化工施工技术,1996,(3):32-33
- [15] 李苏琴. 钢材热浸镀铝新工艺[J]. 热处理,2001,16(4):20-22
- [16] 吴元康. 钢铁件浸铝工艺的改进及发展[J]. 材料保护,1984,27(1):7-10
- [17] 夏原,彭丹阳. 超声波热镀铝技术评述[J]. 材料热处理学报,2001,22(4):25-30
- [18] 孙希泰,付建设,徐英,等. 机械能助渗铝的研究[J]. 金属热处理,2000,25(7):21-23
- [19] 孙希泰,徐英,孙毅,等. 21 世纪化学热处理将由其它能助扩渗代替纯热扩渗[J]. 金属热处理,2003,28(1):27-29

Mater Sci and Engineering,2001,B84 (3):252-257

- [2] Kojima Akinori, Makino Akijiro, Inoue Akijisa. Rapid annealing effect on the microstructure and magnetic properties of the Fe-rich nanocomposite magnets [J]. J Appl Phys, 2000,87(9):6 576-6 578
- [3] 孟建华,杨桂琴,严乐美,等. 吸波材料研究进展[J]. 磁性材料及器件,2004,35(4):11-14
- [4] 张振华,孟锦宏,曹晓辉. 空心玻璃微珠表面金属化及电磁性能[J]. 表面技术,2006,35(5):10-13
- [5] 康兴宾,沈春英,丘泰,等. 聚苯胺吸波材料的研究进展[J]. 材料导报,2007,21(2):51-53
- [6] 邢丽英. 隐身材料[M]. 北京:化学工业出版社,2004.97-102

进行了多年的应用验证,效果明显而且可靠。镀层结合强度从约  $12\text{N/mm}^2$  提高到了  $40\text{N/mm}^2$  以上,切割法镀层脱落率从 98%/10 次降到了 5%/10 次,  $B_g$  无损失。本文认为措施是有效的。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 周寿增,董清飞. 超强永磁体-稀土铁系永磁材料[M]. 2. 北京:冶金工业出版社,2004.333-336
- [2] 王瑞祥,王蓓蕾. 镍铁硼基体上的电镀[J]. 电镀与涂饰,2000,19(5):19-21
- [3] 北京师范大学无机化学教研室. 无机化学 下[M]. 2. 北京:高等教育出版社,1986.508-509
- [4] 林树昌,郭金雪,耿秀. 定性分析化学[M]. 1. 北京:北京师范大学出版社,1984.173-180