

荧光粉表面包覆膜制备方法及其功能的研究进展

郭萍, 朱宪忠, 张彦娜, 曾明敏

(南京信息职业技术学院, 南京 210023)

[摘要] 归纳了荧光粉表面典型无机膜层的功能,介绍了荧光粉表面膜层的包覆技术,重点介绍了溶胶-凝胶法、化学沉淀法、非均匀成核法、乳胶法、均相沉积法等湿法包覆技术的工艺流程及当前的研究现状,并提出了制膜过程中的注意事项,最后指出了荧光粉表面包覆技术的发展方向。

[关键词] 荧光粉; 膜层功能; 包覆方法

[中图分类号] TB44

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)04-0100-04

Progress of Fabrication and Function of Surface Coating of Fluorescent Powders

GUO Ping, ZHU Xian-zhong, ZHANG Yan-na, ZENG Ming-min

(Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China)

[Abstract] The function of inorganic surface coating of fluorescent powders was classified. The fabrication technologies of surface coating of fluorescent powders were introduced including technical processes of sol-gel process, chemical deposition, nonuniform nucleation, emulsion method, homogeneous deposition and so on and research present. The notice points during their fabrications were listed. Finally, the blueprint of the surface coating of fluorescent powders in future was pointed out.

[Key words] phosphor; surface coating function; coating technology

荧光粉也称为夜光粉,因具有发光效率较高、能承受紫外辐射及猝灭温度较高等优点,在许多领域^[1]得到广泛应用,如:荧光灯(FL),场发射显示器(FED)及各类显示、显像、光源、X射线增感屏,核物理和辐射场的探测、记录及医学放射学图像的各种摄影技术等。

荧光粉根据不同分类方法,可以分成多个类别。如按照发光原理,分为光致储能夜光粉和带有放射性的荧光粉两类;按是否含有硫,分为非硫基和硫基荧光粉两类;按激活元素,分为铋、镉激活和稀土激活荧光粉两大类;按组成基质,分为硅酸盐、铝酸盐、氮化物荧光粉等等^[2-21]。这些不同种类的荧光粉根据其各自的性能,应用在不同的产品中,给发光器件带来了革命性的更新,但是荧光粉在使用中存在的共性缺陷也是不可忽视的,如点亮一段时间后会存在光衰现象,色纯度差,发光亮度低,发光效率不够理想,使用寿命低及耐水性差,导电性亟需提高等^[1-21]。目前,人们努力找寻各种方法来改善荧光粉的性能,如掺杂、进行化学组分调整等,但解决这类问题的最好方法还是在荧光粉材料表面包覆一层膜层^[1-2]。为在荧光粉表面形成良好的包覆膜层,需考虑几个问题:在什么材料上包

膜、包什么成分的膜以及采用何种包覆方法。对于科研工作而言,通常被包膜的荧光粉基质材料是选定,需要重点考虑的是包覆什么样的膜层及采用何种包覆方法,文中就从这两个方面进行概述。

1 荧光粉包覆膜层的功能

荧光粉表面包覆的膜层种类比较多,根据膜层物质成分可分为无机膜层和有机膜层。无机物膜层有 SiO_2 ^[3-10], Al_2O_3 ^[11-15], MgO ^[2,16], MgF_2 ^[17-23], TiO_2 ^[24-25], In_2O_3 ^[26-27], $\text{ZnO}:\text{Al}$ ^[28], $\text{Y}(\text{OH})_3$ ^[29-30], $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ ^[31], B_2O_3 ^[32]等;有机物膜层有硬脂酸(SA)、聚苯乙烯(PS)^[33]等。有机物膜层可明显改善荧光粉的耐候性能,无机物膜层可提升发光强度、热稳定性等,荧光粉的包覆膜层中以无机物居多,下文就无机物膜层进行归纳。

一般来说,包覆什么膜层,要根据所需的膜层功能而定。目前各类膜层功能的报道多见于单类包覆膜层形成后的检测数据,针对膜层功能的综述性报道尚未查阅到,笔者根据文献所述,将目前主要的无机膜层所

[收稿日期] 2013-03-05; **[修回日期]** 2013-04-10

[基金项目] 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012869);南京信息职业技术学院基金课题(YKJ12-019)

[作者简介] 郭萍(1978—),女,安徽人,硕士,副教授,主要研究方向为表面处理技术。

具有的功能进行了归纳,见表 1。

表 1 荧光粉表面典型无机膜层的功能
Tab. 1 Typical inorganic surface coating function of phosphor powder

包覆膜层物质	膜层功能
SiO ₂	可改善荧光粉的耐水性 ^[3,5,7-8] ,解决 LED 荧光粉在使用过程中突出的热劣化问题 ^[4,10] ,提高荧光粉的热稳定性,降低亮度衰减比例 ^[6] ,延长荧光粉的光衰时间和提高荧光粉的量子效率 ^[9] ,提升荧光粉的发光强度 ^[10] 等。
Al ₂ O ₃	可改善荧光粉的耐水性 ^[11] ,保护粉体,提高热稳定性,降低光衰 ^[12-14] ,减少粉体表面汞的吸附沉积,减少某些组分的有害影响,减轻灯管黑化现象,减轻荧光粉劣化程度 ^[13,15] 等。
MgO	可减轻由于电性和表面化学活性造成的荧光粉性能下降,提高发光性能 ^[2] ,提高荧光发射性能 ^[16] ,明显提高荧光粉的热稳定性。
MgF ₂	可改善荧光粉亮度衰减情况 ^[17-18] ,有效稳定荧光粉的发光性能 ^[19] ,提高荧光粉的抗热劣化性能 ^[20-21] ,提高荧光粉的发光强度 ^[22] ,减少荧光粉表面对真空紫外光的反射 ^[23] 等。
TiO ₂	薄膜分布均匀且整体连续性较好,不影响荧光粉的晶型及结晶度,对荧光粉吸光度略有屏蔽且可使其发光强度降低 ^[24] ,可有效降低表面的衰减,提高荧光粉的稳定性及使用寿命 ^[25] 。
In ₂ O ₃	可提高荧光粉的导电性 ^[26] 和抗劣化性能 ^[27] 。
ZnO : Al	可在保持良好光致发光性质的同时,明显降低荧光粉的电阻率 ^[28] 。
Y(OH) ₃	对荧光粉晶格结构、发光性能没有影响,且不会发生色坐标偏移现象,能较大幅度提高荧光粉的亮度 ^[29] ,改善荧光粉的亮度热衰减程度 ^[30] 。
SnO ₂ : Sb	可增加荧光粉表面的导电性 ^[31] 。
B ₂ O ₃	可提高荧光粉的亮度 ^[32] 。

2 荧光粉表面包覆方法

2.1 研究现状

未经处理的荧光粉在使用过程中往往会存在寿命短,发生粉末团聚,表面电性能和化学性能不稳定等问题,表面包覆膜层可以有效地改善以上问题。从上文可知,膜层分为无机物和有机物两类,目前研究较多的主要是无机物膜层。

包覆技术按介质环境分为干法包覆和湿法包覆两类。干法包覆,如高温固相烧结法,其介质环境无水,工艺相对简单,产生的废液少,甚至不产生废液,但它对设备的要求较高,使用时要精确控制温度。湿法包覆,如溶胶-凝胶法、化学沉淀法等,则是在水介质中进

行,水的消耗量比较多,因此废液处理量也比较大,但因为对设备和温度控制要求不高,且生产流程容易控制,所以也是当前膜层包覆技术的主流^[34]。下面概述了几种主要的湿法包覆技术。

2.2 湿法包覆技术

2.2.1 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法发明于 1967 年,最初用于制备一些粒径较小的无机材料,后用于制粉及包膜^[35]。溶胶-凝胶包覆工艺流程如下:1) 预处理被包覆颗粒;2) 根据需求选择液体溶剂(水或有机溶剂),将改性剂溶于溶剂中,混匀,经水解或醇解制得溶胶;3) 将溶胶与预处理后的被包覆颗粒均匀混合,经蒸干处理,溶胶转变为凝胶;4) 经一定温度焙烧,得到表面包覆的荧光粉。

李峰等^[19]采用该法在用于 PDP 的 BAM 荧光粉表面成功包覆了 MgF₂ 膜,研究了其发光与热衰减特性:经 300 °C 焙烧处理,在 254 nm 激发下,发光强度比未包覆样品约高 12%;在 147 nm 激发下,发光强度比未包覆样品约高 15%。这表明表面包覆的 MgF₂ 膜有效地提高了 BAM 荧光粉的发光稳定性和抗热衰减能力。

陈平清等^[24]采用该法在 ZnS 荧光粉表面成功包覆了 TiO₂ 膜,经 60 °C 烘箱干燥处理后,研究了其结构和光学性能,结果表明:ZnS 荧光粉表面的 TiO₂ 薄膜厚约 5 nm,整体连续性较好,分布较为均匀,且包覆对荧光粉的晶型及结晶度无影响,但吸光度略有屏蔽,发光强度有所降低。

Young-Rag Do 等^[36-38]采用该法在用于 PDP 的 BAM 荧光粉表面包覆了一层 SiO₂ 与 Al₂O₃,经 600 °C 高温处理,膜的厚度控制在 10 nm 以下,其发光强度比未包覆的 BAM 高 25%,但膜层过薄,易造成离子轰击破坏,且不耐机械加工。

2.2.2 化学沉淀法

化学沉淀法也称为包覆沉淀法、化学液相沉淀法、表面沉淀法等,其工艺过程如下^[39-40]:1) 将载体粉体配制成浆料或悬浮液;2) 选择含有被包覆膜层的物质做包覆剂,将步骤 1 经处理好的载体放置于包覆剂中,调节到一定 pH 值下进行包覆反应,超声振荡 30 min 以保证其分散效果;3) 反应完成后进行保温沉化 120 min,以保证其沉化完全;4) 洗涤,过滤,并在 105 °C 烘干。

孙秀果等^[39]采用该法成功地在纳米二氧化钛表面包覆了致密的二氧化硅膜,并通过 XRD,TEM 等进行了表征,同时测定了比表面积和光催化活性。XRD 证实,氧化硅的添加提高了二氧化钛纳米颗粒的热稳定性能,有效地抑制了纳米二氧化钛的晶型转化。TEM 照片显示,包覆后的 TiO₂ 粒径减小,粒度分布均

匀,表面光滑。比表面积测定和光降解实验结果显示,改性后的 TiO_2 具有大的比表面积,而且随 SiO_2 含量的增大而减小,其光催化活性比未改性纳米 TiO_2 高,且在煅烧温度为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时最好。

2.2.3 非均匀成核法

非均匀成核法^[41-45]同样是将基体放在包膜物质前驱体溶液中沉积反应,其工艺过程如下:1)称取少量粉体放入一定浓度的酸或碱溶液中,浸泡 24 h 以上进行粉体预处理;2)用蒸馏水洗至粉体溶液为中性;3)配制一定 pH 值的缓冲液,将处理后的粉体与缓冲液混合,配成 0.2% (体积分数)的悬浮液;4)超声分散的条件下加入 0.5% 的聚乙二醇,以确保荧光粉颗粒的分散状态;5)将包覆物质配制成一定浓度的稀溶液,将该稀溶液缓慢加入剧烈搅拌的步骤 4 的溶液中;6)陈化 2 h 后,先水洗,再过滤、脱水,最后在高温 ($300\text{ }^\circ\text{C}$) 灼烧 1 h。

Liang Chao 等^[41]采用该法在自制粉体表面包覆了一层二氧化硅薄膜,经 TEM, XRD 等检测证实,该薄膜具有高度的紧密性和均匀性,可作为阻止外部溶液中某些离子入侵氧原子的屏障,因此能够有效缓解 Eu^{2+} 的氧化程度。此外,粉体的抗热劣化性能明显得到改善,在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 灼烧 1 h 后的亮度最高达 89%,高出包覆前粉体亮度 20%。

2.2.4 乳胶法

乳胶法^[22,46-47]也称乳液法,其包膜过程中需先形成乳液,因此得名。工艺过程如下:1)将一定浓度的氟化铵与粉体充分混合,加入适量的聚乙二醇;2)在搅拌的条件下,将包覆物滴入上述体系中;3)在溶液蒸发过程中,包覆物均匀地包覆在粉体表面,形成包覆膜;4)离心分离,洗涤,烘干,并在 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 焙烧 1 h。

陈哲等^[22]以廉价的 MgCl_2 和 NH_4F 为原料,采用乳胶法在纳米 BAM 蓝色荧光粉颗粒表面成功地包覆了一层均匀、致密的 MgF_2 包覆层。测试分析表明,包覆效果好,包覆后的纳米 BAM 荧光粉颗粒由两部分组成:内核为纳米 BAM 颗粒,粒径约为 25 nm;外层为 MgF_2 包覆层,厚约 3~4 nm。经过包覆处理后, BAM 蓝粉的发光强度不仅没有下降,反而有所提高,膜层对粉体表面有很好的修复作用。

2.2.5 均相沉积法

均相沉积法可制得粒度均匀、纯度高的纳米颗粒,其工艺过程如下:1)配制一定浓度的粉体溶液和沉淀剂溶液;2)将沉淀剂溶液缓慢加入粉体溶液中,使沉淀剂浓度缓慢地增加,严格控制沉淀剂的浓度,使之在适当范围内;3)通过化学反应的沉淀平衡使沉淀能在整个溶液中均匀地出现,慢慢生成;4)恒温陈化一定时

间;5)洗涤,过滤,干燥。

Hongyang Zhu 等^[48]采用该法在粉体表面包覆了一层 MgO 膜层,经过热处理后,发现包覆的 MgO 薄膜有效减缓了荧光粉的表面氧化,使荧光粉的热稳定性得到了明显提高。Young Kyu 等^[49]采用该法在粉体表面包覆了一层 SiO_2 ,通过检测发现,因为 SiO_2 薄膜层可阻滞氧原子的扩散,所以包覆后的荧光粉的发光强度和抗热劣化性能都有所提高。

2.3 注意事项

不管用什么材料,用什么包覆技术,形成什么物质的膜层,都需注意以下几点:1)包覆材料本身的稳定性,如在紫外线辐射、高温环境或离子轰击等条件下;2)包覆材料与被包覆材料能够形成牢固的结合,以防在使用过程中发生膜层脱落;3)包覆材料与被包覆材料之间的反应性,以防发生化学反应,从而造成荧光粉在使用过程中的发光性能下降;4)包覆材料本身对光的透射率,特别是可见光和紫外激发光;5)原料成本要低,且工艺相对简单,能够实现产业化。

3 荧光粉表面包覆技术的发展趋势

1)目前的荧光粉表面包覆技术主要满足对粉体的保护功能,随着人们对材料使用性能的要求越来越高,要求表面包覆技术向功能性方向发展。

2)不局限于已有的包覆技术,而能根据需要,针对粉体进行包覆材料和包覆方法的设计。

3)通过计算机模拟能够实现材料设计虚拟实验,提高工作效率。

4)注重能够规模化生产。

5)对现有包覆工艺及包覆方法进行改进,以期能获得更均匀、稳定性更高的包覆膜层。

[参 考 文 献]

- [1] 谢晔,王海波,张瑞西,等. $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 荧光粉表面包覆研究及展望[J]. 化工新型材料, 2011, 39(1): 21—24.
- [2] 王贵超,李志光,何纯莲,等. $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 蓝色荧光粉表面包覆技术研究进展[J]. 广州化工, 2010, 38(11): 36—38.
- [3] 周文华,刘又年,吕兴栋,等. 铝酸锶荧光粉的表面包覆[J]. 广州化学, 2005, 30(2): 11—14.
- [4] 杨茜,邱克辉,赵昆,等. LED 用 YAG: Ce^{3+} 荧光粉覆盖 SiO_2 膜的研究[J]. 化工新型材料, 2011, 39(3): 100—102.
- [5] 张希艳,卢利平,米晓云,等. 硫化物基荧光粉的表面包覆

- 及性能研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2007, 30(4): 1—3.
- [6] 王娟娟, 袁曦明, 李予晋, 等. PDP 用 BAM 蓝色荧光粉的制备及表面包覆[J]. 液晶与显示, 2010, 25(2): 181—185.
- [7] 侯志青, 刘东州, 王云明. 用液相沉积法在铝酸锶荧光粉表面包覆 SiO₂ 和 Al₂O₃ 复合膜[J]. 材料保护, 2010, 43(10): 55, 57.
- [8] DO Young-rag, PARK Do-hyung, KIM Yong-seon. Phosphor for a Plasma Display Device Coated with a Continuous Thin Protective Layer and Method of Manufacture: U S, 20020039665[P]. 2002-04-04.
- [9] SOHN S H, LEE J H, Lee S M. Effects of the Surface Coating of BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ Phosphor with SiO₂ Nano-particles [J]. Journal of Luminescence, 2009, 129(5): 478—481.
- [10] CHEN Z, YAN Y W, LIU ETAL J M. Microstructure and Luminescence of Surface Coated Nano-BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ Bluephosphor[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 478(1/2): 679—683.
- [11] 黄永平. 氧化铝包覆荧光粉[J]. 广东化工, 2005(4): 24—25.
- [12] 马林, 胡建国, 王惠琴, 等. BAM 荧光粉表面包膜处理及其发光性能[J]. 发光学报, 2003, 24(5): 523—525.
- [13] 马林, 胡建国, 王惠琴, 等. 溶胶法荧光粉包膜及灯管涂膜的研究[J]. 光源与照明, 2003(3): 16—19.
- [14] 李永绣, 闵宇霖, 周雪珍, 等. 有机-无机杂化凝胶法合成 YAG: Ce³⁺ 荧光粉的包膜及其稳定性[J]. 无机化学学报, 2003, 19(11): 1169—1173.
- [15] 马林, 胡建国, 王惠琴, 等. BaMgAl₁₀O₁₇: Eu 荧光粉表面包膜的研究[J]. 复旦学报(自然科学版), 2002, 41(4): 449—452.
- [16] HELMUT Bechtel, WOLFRAM Czarnojan, THOMAS Justel. Aluminatephosphor with a Polyphosphate Coating: US5998047 A [P]. 1999-12-07.
- [17] 王晓君, 段桂花, 赵晓霞, 等. BaAl₁₂O₁₉: Mn²⁺ 荧光粉的表面包覆与发光性能[J]. 发光学报, 2005, 26(1): 56—59.
- [18] 沈静飞, 王海波, 黄如喜, 等. BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ 蓝色荧光粉表面包覆 MgF₂ 的性能[J]. 化工进展, 2007, 26(12): 1771—1775.
- [19] 李峰, 王育华. 溶胶-凝胶法制备 MgF₂ 包覆 BaMgAl₁₀O₁₇: Eu 荧光粉及其发光特性[J]. 发光学报, 2004, 25(6): 667—672.
- [20] 曹同, 吴直森, 梁超, 等. PDP 用 BaAl₁₂O₁₉: Mn²⁺ 荧光粉表面包覆 MgF₂ 研究[J]. 电子器件, 2008, 31(1): 229—232.
- [21] 王林生, 周健, 文小强, 等. PDP 用 BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ 蓝色荧光粉的研究进展[J]. 江西有色金属, 2007, 21(2): 29—32.
- [22] 陈哲, 严有为. 纳米 BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ 蓝色荧光粉的表面包覆研究[J]. 功能材料, 2007, 38(增刊): 101—104.
- [23] 梁超, 何锦华, 董岩, 等. 非均相成核法制备包覆型 BaAl₁₂O₁₉: Mn²⁺ 荧光粉[J]. 中国粉体技术, 2007, 13(5): 1—4.
- [24] 陈平清, 李大光, 赵丰华, 等. TiO₂ 包覆 ZnS 荧光粉的制备及表征[J]. 化工新型材料, 2010, 38(5): 88—90.
- [25] 杨苗苗. 荧光粉表面包覆二氧化钛纳米薄膜的绿色过程研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
- [26] 胡晓珊, 秦毅红, 黄小卫, 等. Y₂O₃: Eu 荧光粉表面包覆 In₂O₃ 的研究[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(3): 284—288.
- [27] 梁超, 董岩, 张超, 等. BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ 荧光粉包膜研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005(5): 733—737.
- [28] 赵婧, 李怀祥, 王安河, 等. CaSiO₃: Pb, Mn 荧光粉的 ZnO: Al 包覆研究[J]. 物理化学学报, 2006, 22(3): 286—290.
- [29] 谢晔, 王涛, 王海波. Y(PV)O₄: Eu³⁺ 荧光粉表面包覆 Y(OH)₃ 的性能[J]. 发光学报, 2010, 31(6): 821—825.
- [30] 沈静飞, 赵浙明, 袁莉. 表面包覆 Y(OH)₃ 对 BAM 蓝色荧光粉性能的影响[J]. 嘉兴学院学报, 2011, 23(6): 92—95.
- [31] 李怀祥, 左相青, 王安河, 等. 降低 ZnS: Mn 荧光粉电阻率的 SnO₂b 薄膜包覆研究[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2006, 21(3): 67—69.
- [32] FAN C W, BENJAM in D E, KUMMER F, et al. Boronoxide Coated Phosphor and Method of Making Same: US, 5985175 [P]. 1999-11-16.
- [33] 夏志科, 廉世勋, 尹笃林, 等. 硬脂酸对超微 CaS: Eu 荧光粉的表面包覆改性[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2007, 31(1): 64—67.
- [34] 杨庆华, 李李泉, 王海波, 等. 近紫外发光荧光粉的表面包覆[J]. 化工进展, 2006, 25(4): 406—410.
- [35] 李岚. 溶胶-凝胶法合成掺铈硼酸钡钙荧光粉及其表征[J]. 广东化工, 2011, 38(5): 56—59.
- [36] SHEN J F, WANG H B, HUANG R X, et al. Surface Coating of BAM Phosphors with MgF₂ [J]. Chin J Lumin, 2008, 29(2): 264—268.
- [37] ZHU P F, ZHU Q R, ZHU H Y, et al. Effect of SiO₂ Coating on Photoluminescence and Thermal Stability of BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ under VUV and UV Excitation[J]. OptMater, 2008, 30(6): 930—934.
- [38] SOHN S H, LEE J H, LEE S M. Effects of the Surface Coating of BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ Phosphor with SiO₂ Nano-particles [J]. Chin J Lumin, 2009, 129(5): 478—481.
- [39] 孙秀果, 张建民, 彭政. 包覆沉淀法制备氧化硅改性的纳米二氧化钛及其性质[J]. 功能材料, 2007(11): 1898—1900.
- [40] 邹建, 高家诚, 王勇, 等. 纳米 TiO₂ 的氧化铝表面改性及表征[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(3): 46—49.
- [41] LIANG Chao, ZHANG Chao, DONG Yan, et al. Improving Thermal Stability of BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ Phosphor[J]. Journal of Rare Earths, 2006, 24: 153—156.
- [42] HELMUT Bechtel. Aluminate Phosphor with a Polyphosphate Coating: US, 5998047 [P]. 1999-12-07.

- Mg Alloy with Cathodic Electrophoretic Coating Pretreated by Silane[J]. Prog Org Coat, 2009, 66(4): 387—392.
- [8] ACAMOVIC N M, DRAZIC D M, MISKOVIC-STANKOVIC V B. Influence of Substrate on the Formation and Growth Kinetics of Cathodic Electrocoat Paint [J]. Prog Org Coat, 1995, 25(3): 293—307.
- [9] SONG G L. "Electroless" E-Coating: An Innovative Surface Treatment for Magnesium Alloys[J]. Electrochem Solid-state Lett, 2009, 12(10): 77—79.
- [10] SONG G L. "Electroless" Deposition of a Pre-film of Electrophoresis Coating and Its Corrosion Resistance on a Mg Alloy [J]. Electrochim Acta, 2010, 55(7): 2258—2268.
- [11] MISKOVIC S V B, DRAZIC D M, TEODOROVIC M J. Electrolyte Penetration Through Epoxy Coatings Electrodeposited on Steel[J]. Corros Sci, 1995, 37(2): 241—252.
- [12] CIOU S J, FUNG K Z, CHIANG K W. The Mathematical Expression for Kinetics of Electrophoretic Deposition and the Effects of Applied Voltage [J]. J Power Sources, 2007, 172: 358—362.
- [13] PIERCE P E. The Physical Chemistry of the Cathodic Electrodeposition Process [J]. J Coat Technol, 1981, 53(672): 52—67.
- [14] FURUNO N, KAWAI H, OYABU Y. Mechanism of Film Formation by the Electrodeposition Coating [J]. J Col Interf Sci, 1976, 55(2): 297—304.
- [15] ONO S. Surface Phenomena and Protective Film Growth on Magnesium and Magnesium Alloys [J]. Metallurgical Science and Technology, 1998, 16: 91—104.

(上接第 78 页)

[参 考 文 献]

- [1] 龙伟民. 焊接速查手册[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 2012:248—250.
- [2] SUI Fang-fei, LONG Wei-min, LIU Sheng-xin, et al. Effect of Calcium on the Microstructure and Mechanical Properties of Brazed Joint Using Ag-Cu-Zn Brazing Filler Metal [J]. Materials and Design, 2013, 46: 605—608.
- [3] 王星星, 龙伟民, 马佳, 等. 几种新技术在钎焊连接中的应用 [J]. 焊接, 2013(1): 28—31.
- [4] 王星星, 龙伟民, 裴夤峯, 等. 异种材料超声波钎焊连接的研究现状 [J]. 焊接技术, 2013, 42(6): 1—6.
- [5] CHEN Hong-sheng, FENG Ke-qin, WEI Shi-feng, et al. Microstructure and Properties of WC-Co/3Cr13 Joints Brazed Using Ni Electroplated Interlayer [J]. Int Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 33: 70—74.
- [6] ALHAZAA A N, KHAN T I. Diffusion Bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V Using Cu Coatings and Sn-3.6Ag-1Cu Interlayers [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 494: 351—358.
- [7] 张永清, 任家烈, 赵彭生. 陶瓷表面复合电镀 Ni-Ti 改性及其钎焊性 [J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(3): 291—293.
- [8] 王星星, 龙伟民, 裴夤峯, 等. BA_g45CuZn 钎料表面化学镀锡的研究 [J]. 表面技术, 2013, 42(3): 56—58.
- [9] 张三元, 张磊. 电镀层均匀性和镀液稳定性——问题与对策 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 45—48, 151—158.
- [10] 刘伟, 常立民, 段小月. 超声波对电沉积 Ni-Al₂O₃ 复合镀层耐磨性的影响 [J]. 表面技术, 2009, 38(5): 29—31.
- [11] 张著, 郭忠诚, 龙晋明, 等. 电流密度对甲基磺酸盐电沉积亚光锡的影响 [J]. 材料工程, 2012(4): 76—81.

(上接第 103 页)

- [43] CAO T, WU Z S, LIANG C. Research of Coating BaAl₁₂O₁₉: Mn²⁺ Phosphors with MgF₂ [J]. Chin J Electron Device, 2008, 31(1): 229—232.
- [44] 董岩, 蒋建清, 梁超, 等. 氧化铝包膜荧光粉及其膜包覆方法: 中国, CN1667081A [P]. 2005-09-14.
- [45] 梁超, 蒋建清, 董岩, 等. 氧化镁包膜荧光粉及其包膜方法: 中国, CN1664051A [P]. 2005-09-07.
- [46] YANG H, WANG X J, DUAN G H, et al. Luminescent Properties of BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ Phosphors Modified with MgF₂ [J]. Mater Lett, 2004, 58: 2374.
- [47] CHEN Z, YAN Y W, LIU J M, et al. Microstructure and Luminescence of Surface-coated Nano BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ Blue Phosphor [J]. J Alloys Compd, 2009, 478(1/2): 679—683.
- [48] ZHU Hong-yang, YANG Hai-bin, FU Wu-you, et al. The Improvement of Thermal Stability of BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ Coated with MgO [J]. Materials Letters, 2008, 62(4/5): 784—786.
- [49] JEONG Young Kyu, KIM Hyug-jong, KIM Hee Gyu, et al. Luminescent Properties of BaMgAl₁₀O₁₇: Eu²⁺ Blue Phosphor Grown with SiO₂ Using Atomic Layer Deposition [J]. Current Applied Physics, 2009, 9(3): 249—251.