

表面摩擦与润滑

## 高铝青铜磷光复合冷喷涂层的发光及摩擦磨损性能

杜连超, 李文生, 何玲, 杨效田, 吕叶, 王福全, 安国升, 冯力

(兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 目的 将耐磨材料、涂层制备技术以及磷光粒子的指示功能结合, 发展一种简便经济的涂层监测技术。方法 采用冷喷涂技术在 T3 紫铜基体上制备高铝青铜涂层及高铝青铜磷光复合涂层, 利用 SEM、EDS 及荧光分光光度计等观察冷喷涂层的形貌, 分析发光粒子的分布及涂层发光性能, 并在室温条件下采用 CSM 往复摩擦磨损试验机对干摩擦条件下涂层的摩擦磨损特性进行测试和分析。结果 磷光粒子均匀分布在复合涂层中。涂层有较好的发光性能, 经紫外线激发后发出肉眼可识别的黄绿光。磷光粒子的添加提高了高铝青铜磷光复合涂层的硬度, 涂层摩擦表面磨痕较浅, 呈轻微磨粒磨损特征, 而高铝青铜涂层摩擦表面发生严重塑性变形, 有剥落块及磨屑粘附在磨痕表面, 呈粘着、疲劳磨损特征。结论 磷光粒子的添加提高了复合涂层的抗磨性。磨损后的磷光复合涂层经紫外灯照射后, 无荧光现象发生, 能够实现检测涂层存在与否的功能。

**关键词:** 高铝青铜; 磷光粒子; 复合涂层; 发光性能; 摩擦磨损

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)08-0031-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.08.006

### Luminescence and Wear Properties of Cold Sprayed Cu-14Al-X/Phosphorescence Composite Coating

DU Lian-chao, LI Wen-sheng, HE Ling, YANG Xiao-tian,  
LYU Ye, WANG Fu-quan, AN Guo-sheng, FENG Li

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,  
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

收稿日期: 2015-04-09; 修订日期: 2015-05-26

Received: 2015-04-09; Revised: 2015-05-26

**基金项目:** 国家国际科技合作项目(2013DFR50790); 中国科学院西部之光计划(01-0526); 甘肃省杰出青年基金资助项目(1111RJDA013); 国家自然科学基金与英国皇家学会交流项目(51211130116)

**Fund:** Supported by Key Program for International S&T Cooperation Projects of China(2013DFR50790); West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences(01-0526); the Gansu Province Outstanding Youth Fund(1111RJDA013); The Project in Cooperation with the British Royal Institute of the National Natural Science Foundation of China(51211130116)

**作者简介:** 杜连超(1989—), 男, 山东人, 硕士研究生, 主要研究耐磨材料及表面工程技术。

**Biography:** DU Lian-chao (1989—), Male, from Shandong, Master graduate student, Research focus: wear resistant materials and surface engineering technology.

**通讯作者:** 李文生(1973—), 男, 甘肃人, 博士, 教授, 主要从事耐磨材料及表面工程技术的研究工作。

**Corresponding author:** LI Wen-sheng (1973—), Male, from Gansu, Ph. D., Professor, Research focus: wear resistant and corrosion resistant materials and surface engineering technology.

**ABSTRACT:** **Objective** To combine the wear-resistant materials, coating preparation technology and the indication function of phosphor particles, and develop a simple and economic coating monitoring technology. **Methods** A Cu-14Al-X coating and a composite coating of Cu-14Al-X and  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  phosphorescence particle were prepared on T3 copper substrate by cold gas dynamic spray. SEM, EDS and fluorescence spectrophotometer were employed to observe the morphology of coatings and analyze the distribution and luminescent intensity of the embedded particles. Reciprocating friction and wear tester was used to evaluate the friction properties of the coatings under dry sliding condition at room temperature. **Results** Phosphor particles distributed homogeneously in the cold sprayed Cu-14Al-X/phosphorescence composite coating. Under ultraviolet light, a strong luminescence was visible in yellow-green light. The micro-hardness increased with the increased dose of phosphorescence particles. A shallow track was observed on the worn Cu-14Al-X/phosphorescence composite coating, which indicated a slight abrasive wear occurred during the sliding process. For the Cu-14Al-X coating, intense plastic deformation, adhesion of small drop-cuts and abrasive dusts were observed on the worn surface, abrasive and fatigue wears dominated in the sliding process. **Conclusion** The addition of phosphor particles improved the wear-resistance performance of composite coating. Under ultraviolet light, no luminescence was visible on the worn Cu-14Al-X/phosphorescence composite coating, realizing the function of detecting the existence of coating.

**KEY WORDS:** Cu-14Al-X; phosphorescence particle; composite coating; luminescence property; friction and wear

简单铝青铜材料因其硬度、屈强比、耐磨性能的不足,限制了其应用。本课题组开发了铝含量在14%左右的复杂高铝青铜<sup>[1]</sup>,具有强度高、耐磨性、耐热性及耐蚀性好的特点,在减摩、导热等方面性能优良,可作为涂层材料应用于模具表面<sup>[2]</sup>。

热喷涂技术是表面工程领域中十分重要的表面技术,具有操作简便、灵活高效、涂层材料种类多的特点。将热喷涂技术应用于模具表面处理,可提升模具表面的性能,节省材料,延长模具使用寿命<sup>[3]</sup>,而通过简单高效的涂层检测技术对涂层表面状态进行实时监测,及时发现缺陷从而进行修补更可以大大降低模具的维护成本。现有的监测技术如声发射<sup>[4]</sup>,超声无损检测<sup>[5]</sup>以及机器视觉<sup>[6]</sup>等在线监测技术大都需要先进设备支持,时间及经济成本较高。稀土激活的长余辉发光材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  是一种新型、绿色无污染的发光材料,具有发光强度高,余晖时间长,性能稳定,无放射毒害性等优点,它能够将吸收光-储存光-发光-再吸收光的过程无限循环进行下去<sup>[7]</sup>,且该材料已作为发光涂料、发光薄膜、发光油墨、发光陶瓷、发光塑料等被广泛应用<sup>[8]</sup>,而其不足是温度过高时发生猝灭,发光强度急剧下降<sup>[9]</sup>。

为避免或减少高温对磷光粒子发光性能的猝灭作用,利用冷喷涂技术具有喷涂温度较低(一般<600℃)、喷涂颗粒速度快(300~1200 m/s)、制备的涂层氧化程度低的特点<sup>[10-12]</sup>,将高铝青铜材料的耐磨性能与长余辉发光材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  的指示功能结合,制备高铝青铜 Cu-14Al-X,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  磷光复合冷喷涂层,并对涂层组织结构、发光性能及摩擦磨损性能进行了分析。旨在利用磷光粒子的指示

功能,通过手持紫外线设备观察功能层有无荧光现象发生,进而确定涂层是否发生磨损损失。

## 1 实验

### 1.1 材料

高铝青铜(Cu-14Al-X)合金粉末由兰州理工大学合金粉末责任有限责任公司采用气雾化法制备而成,选取粒径小于50 μm的粉末待用,粉末成分(质量分数)为:Cu 80.3%, Al 14.0%, Fe 3.5%, Mn 1.2%, 其他 1.0%。发光材料选用商用长余辉发光材料  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ , 选取粒径小于50 μm的粉末待用;将高铝青铜 Cu-14Al-X 粉末与  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  粉末以体积比7:3的比例混合,采用机械混合方式混合均匀。两种粉末 SEM 形貌如图1所示。

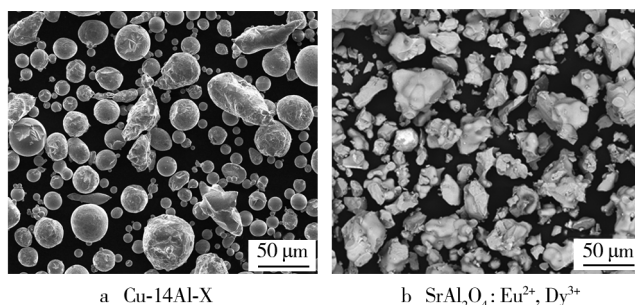


图1 试验用粉末 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphology of experimental particles

### 1.2 涂层制备

采用北京科技大学研制的 SL400CNC 型冷喷涂

设备制备高铝青铜涂层及高铝青铜磷光复合涂层,基体材料选用 T3 紫铜,喷涂前基材表面进行清洗、除油及粗化处理。主要工艺参数为:加速气体压力 2.15 MPa,送粉气体压力 2.54 MPa,喷涂温度 340 ℃,喷枪移动速度 400 mm/min,喷涂距离 20 mm,送粉速率 0.5 r/min。

### 1.3 分析测试

用附带 EDS 能谱仪的 JSM-6700F 型扫描电子显微镜观察涂层表面形貌、显微组织及微区成分;利用 HVS-1000 型数显显微硬度计测定硬度,载荷为 0.245 N,保持时间为 10 s。

用 F97 荧光分光光度计测定磷光复合涂层发射光谱;样品在 254 nm 紫外光下激发 30 s,撤去光源,在暗室中用佳能 600D 拍摄涂层宏观光学照片;用 CFC-900E 型荧光显微镜观察涂层荧光显微组织。

采用 CSM TRB 型摩擦磨损试验机在干摩擦条件下进行涂层摩擦磨损实验,将试样加工成 10 mm×10 mm×6 mm 大小,对磨件采用硬度 287HV 的 304 钢球,尺寸为  $\phi 6$  mm。试验在室温、大气条件下进行,法向载荷为 5 N,摆幅为 5 mm,线性频率为 5 Hz,实验时间为 10 min,摩擦因数可由摩擦仪配备的软件实时获得并记录。采用 KLA-Tencor D100 型表面轮廓仪观察磨痕表面磨损轮廓,测定磨损体积来表征磨损量。

## 2 结果

### 2.1 涂层组织及形貌

图 2 为高铝青铜磷光复合涂层及高铝青铜涂层表面扫描电镜形貌。从图 2 中可以看出,高铝青铜磷光复合涂层表面由均匀分布于涂层表面的深灰色相(图中 A)及灰色相(图中 B)组成,而高铝青铜涂层仅

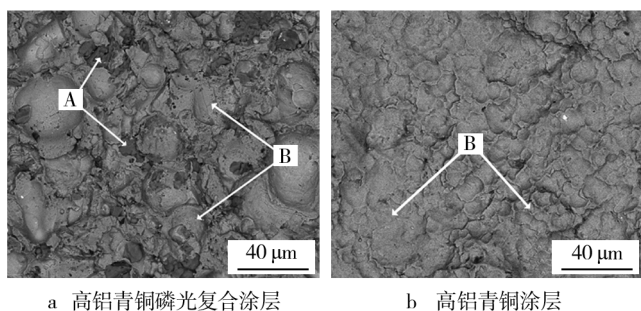


图 2 涂层表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of cold sprayed coatings

有单一灰色相。结合 EDS 能谱点分析可知,复合涂层中深灰色相为磷光粒子  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ , 灰色相为高铝青铜。磷光复合涂层中磷光粒子均匀分布于涂层表面,但与原始粒子尺寸相比尺寸较小,直径大多小于 20  $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 涂层发光性能

图 3 为用数码相机在普通光照条件下及暗室中经紫外灯激发后拍摄的高铝青铜磷光复合涂层宏观照片。由图 3 可以发现,暗室条件下经激发后涂层发光性能良好,涂层表面密集分布着肉眼可识别的黄绿色光点,涂层发光亮度满足指示喷涂涂层存在的要求,如图 3b 所示。

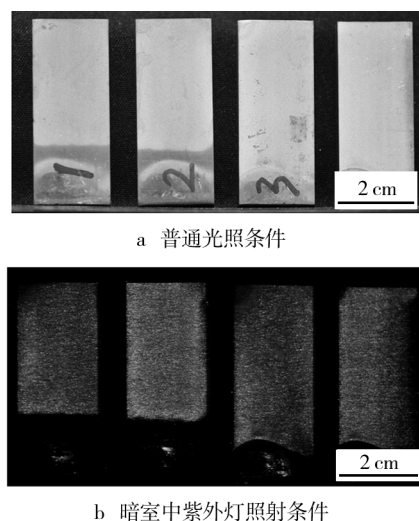


图 3 高铝青铜磷光复合涂层宏观照片

Fig. 3 Macro-photos of Cu-14Al-X/phosphorescence composite coating

图 4 为纯铝酸锶粉体及冷喷涂磷光复合涂层的发射光谱。由图 4 可以观察到,两者发射光谱形状基本相同,都出现了带宽在 400 ~ 650 nm 的发射峰,纯铝酸锶粉发射曲线在波长为 510 nm 处达到了最大峰值,此发射带来源于  $\text{Eu}^{2+}$  的  $4f^65d \rightarrow 4f^7$  跃迁发射,而磷光复合涂层发射曲线在波长 516 nm 处达到最大峰值,较纯铝酸锶最大峰值处波长有一定偏移,且峰值强度远低于纯铝酸锶粉发射曲线的峰值强度。

图 5 是在荧光显微镜下观察到的高铝青铜磷光复合涂层荧光显微组织以及利用显微镜自带的 JX-2000 金相分析软件得到的复合涂层表面磷光粒子分布图。可观察到黄绿色发光粒子在涂层表面分布均匀,磷光粒子占表面涂层体积的 3.7%,远小于原混合粉末中 30% 的体积百分比。



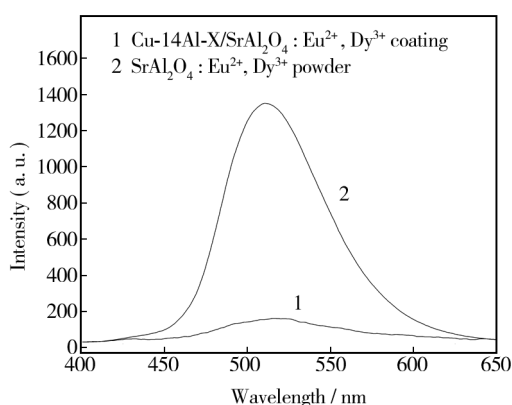
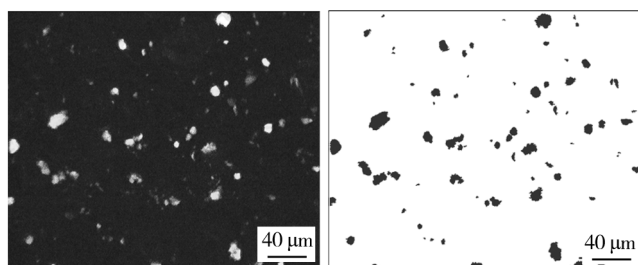


图4 发射曲线

Fig. 4 Emission spectra



a 荧光显微照片

b 磷光粒子分布图

图5 高铝青铜磷光复合涂层荧光显微照片及磷光粒子分布

Fig. 5 Fluorescence photomicrograph of Cu-14Al-X/phosphorescence composite coating and distribution of phosphor particles

## 2.3 涂层硬度

表1所列分别为高铝青铜涂层、高铝青铜磷光复合涂层及高铝青铜、铝酸铈磷光粒子的硬度。由表1可知,铝酸铈颗粒硬度最高,且显著高于高铝青铜颗粒硬度,高铝青铜硬度高于高铝青铜颗粒,磷光复合涂层硬度仅稍高于高铝青铜涂层。在涂层上测量25个点,算得平均值作为涂层硬度;对喷涂颗粒截面测量5个点,算得平均值作为颗粒硬度。

表1 显微硬度测试结果(平均值)

Tab. 1 Results of microhardness test (average)

Materials	Microhardness (HV)
Cu-14Al-X 涂层	281.0
Cu-14Al-X /SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> :Eu <sup>2+</sup> , Dy <sup>3+</sup> 复合涂层	309.6
Cu-14Al-X 颗粒	235.8
SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> :Eu <sup>2+</sup> , Dy <sup>3+</sup> 颗粒	465.0 ~ 570.0

## 2.4 涂层摩擦行为及磨损形貌

图6为高铝青铜磷光复合涂层及高铝青铜涂层的摩擦系数随时间变化的曲线图。由图6观察到两种涂层摩擦系数曲线不尽相同,在初始跑合阶段,高铝青铜涂层摩擦系数随时间增加而迅速上升,而后摩擦系数逐渐增大,至50 s左右后,摩擦系数由小幅波动逐渐转为平缓直至摩擦试验结束,稳定后平均摩擦系数约为0.60;高铝青铜磷光复合涂层的摩擦系数在初始跑合阶段随时间增长迅速增加,至100 s左右后摩擦系数增速逐渐变缓,摩擦系数曲线逐渐平稳,稳定后摩擦系数约为0.73。

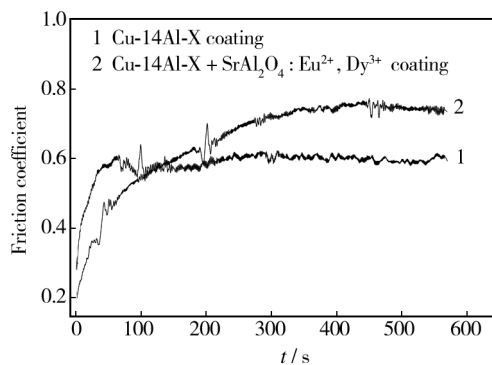
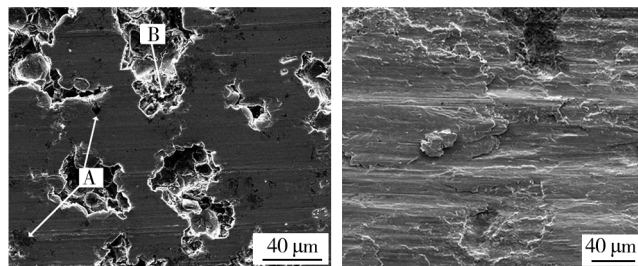


图6 摩擦系数曲线

Fig. 6 Friction coefficient curves

图7为高铝青铜磷光复合涂层及高铝青铜涂层的摩擦磨损形貌图,图中A为磷光粒子,B为喷涂表面未磨掉的凹坑。由图7可知,高铝青铜磷光复合涂层摩擦表面较光滑,磨痕较浅,表现为轻度磨粒磨损;高铝青铜涂层摩擦表面发生严重塑性变形,大块的剥落块以及磨屑被反复碾压后呈层片状粘附在磨痕表面,呈现粘着、疲劳磨损特征。



a 高铝青铜磷光复合涂层

b 高铝青铜涂层

图7 涂层摩擦磨损形貌

Fig. 7 Friction and wear morphologies of coatings

图8为表面轮廓仪测得的高铝青铜磷光复合涂层及高铝青铜涂层磨痕剖面轮廓曲线拟合图。可以

看出,磷光复合涂层磨痕窄而浅,磨痕表面较平整,而高铝青铜涂层磨痕宽而深,磨痕表面有较多犁沟,表面不平整。明显观察到磷光复合涂层磨痕的宽度与深度乘积(面积)远小于高铝青铜涂层,磨痕长度相同,即磷光复合涂层的磨损体积较小。

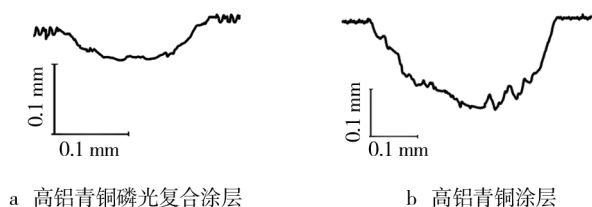


图8 涂层磨损表面轮廓曲线拟合图

Fig. 8 Surface profile fitting curves of worn coatings

### 3 分析与讨论

#### 3.1 冷喷涂涂层组织结构及发光性能

由图2中给出的高铝青铜磷光复合涂层以及高铝青铜涂层表面形貌可知,高铝青铜涂层呈现良好的堆叠形貌,为合金粒子在基体表面堆积形成涂层而成;而从高铝青铜磷光复合涂层表面观察到磷光粒子直径大多小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ ,尺寸远小于原始粉末(如图1b所示),且局部可见球形凹坑。这是由于在喷涂过程中,磷光粒子与基体发生高速撞击,形状不规则的磷光粒子发生破碎,散落形成了较多尺寸较小的颗粒。其中少部分破碎颗粒凭借碰撞瞬间较高的速度嵌入基体或涂层表面,大部分破碎的颗粒则发生溅射,因而磷光粒子的沉积率大大降低,涂层中磷光粒子占涂层的百分比大大降低,与图5中给出的磷光粒子占表面涂层体积 $3.7\%$ ,远小于原混合粉末中 $30\%$ 的体积比的结果相一致。

如图4所示,磷光复合涂层发光强度远低于原始粉末,说明磷光粒子的发光性能在喷涂过程中发生猝灭。冷喷涂过程中喷涂温度为 $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ (见表2),而铝酸锆的耐热温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[13]</sup>,所以喷涂温度不足以对磷光粒子的发光性能造成影响;而铝酸锆颗粒经喷枪加速后动能较高,与基板碰撞时产生较大撞击力,机械外力作用使得铝酸锆的晶体结构遭到破坏,晶格畸变严重<sup>[13]</sup>,大大降低了磷光粒子的发光强度,同时高速撞击造成了颗粒尺寸变小(见图2a)及涂层中磷光粒子百分比的减小(见图5)是磷光粒子发光强度猝灭和磷光复合涂层的发光强度降低的主要原因<sup>[15-16]</sup>;同时,涂层中合金粉末中铁、钴、镍作为稀土

长余辉发光粉的猝灭剂对 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ 的发光性能也产生一定猝灭作用<sup>[17]</sup>,综合作用导致磷光复合涂层的发光强度远低于原始磷光粉末的发光强度。由图3b可知,虽然猝灭作用使得磷光复合涂层发光强度远低于原始粉末,但磷光复合涂层仍表现出良好发光性能,已满足指示涂层存在的要求。

#### 3.2 冷喷涂涂层摩擦磨损性能及指示效应

如图6所示,摩擦系数摩擦初期高铝青铜磷光复合涂层摩擦系数较小,稳定后摩擦系数比高铝青铜涂层高,这是由于摩擦初期,对摩件首先与高铝青铜磷光复合涂层表面硬质磷光粒子接触,较小的接触面积使得载荷作用对摩擦表面的剪切应力相对较小,因而摩擦系数较小,随着摩擦进行,对摩件与涂层表面实际接触面积逐渐增大,相应的表面剪切应力逐渐提高,使得磷光复合涂层的摩擦系数逐渐增加,铝酸锆颗粒作为硬质相提高了涂层的硬度,增加了摩擦表面的变形抗力,因而稳定后的摩擦系数较高。而高铝青铜涂层在摩擦过程中,摩擦表面被不断地碾压并产生变形,致使该区域产生加工硬化现象<sup>[18]</sup>,最后在涂层表面形成了相对光滑的支撑面,使摩擦系数保持较低值并最终趋于稳定。

图8给出两种涂层磨损表面轮廓拟合曲线,由图可知,高铝青铜磷光复合涂层磨损量较小,高铝青铜涂层磨损量较大。这是由于较硬的磷光粒子添加到较软的高铝青铜涂层后,构成了“软基体+硬质点”的耐磨组织,摩擦过程中,铝酸锆颗粒起支撑骨架的作用,承担着大部分的载荷,使相对较软的高铝青铜受到较小的剪切应力,而高铝青铜起到支撑硬质磷光粒子的作用,两种作用结合提高了涂层的耐磨性能,同时均匀分布的铝酸锆颗粒在涂层中起到弥散强化作用,提高了涂层抵抗切削的能力及疲劳强度<sup>[19-21]</sup>,因而涂层磨损量较低;而高铝青铜涂层摩擦磨损过程中,对摩件与涂层表面发生咬合,涂层表面产生严重塑性变形及划伤现象,在交变应力作用下,材料表层较薄弱的地方以层片状被剥离表面(如图7b所示),被剥离的部分作为磨粒存在于摩擦表面,对涂层材料产生划擦,大大增加了涂层的磨损量。在此综合作用下,高铝青铜涂层表面变得粗糙,划痕明显,摩擦表面呈现粘着、疲劳磨损特性;而磷光复合涂层在反复的摩擦过程中,只有少量硬质颗粒部分被剥落并存在于对摩件与涂层表面之间,使磨损表面呈现轻微磨粒磨损机理。

图9为高铝青铜磷光复合涂层经过充分磨损、局部涂层消失后的发光照片。由图9看出,磨损后的区域有明显的黑色条状划痕,荧光现象消失。由此可知,可在涂层中添加磷光粒子,通过定期利用紫外灯对涂层表面进行监测,若发现荧光现象消失,则表明该部位涂层已被磨损,可及时采取修补措施,实现磷光粒子在涂层中的指示功效。

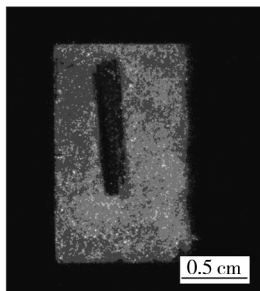


图9 高铝青铜磷光复合涂层摩擦后的发光照片

Fig. 9 Fluorescence photograph of Cu-14Al-X/phosphorescence composite coating after friction and wear

## 4 结论

1) 冷喷涂制备的高铝青铜磷光复合涂层在紫外线持续照射下发出肉眼可识别的黄绿色可见光,涂层磨损后发光现象消失,从而可用于监测涂层存在与否。

2) 冷喷涂过程中磷光粒子所受机械压力、粒子的破碎以及涂层合金粉末中铁、钴、镍的存在造成了磷光复合涂层中磷光粒子发光强度的猝灭,涂层中磷光粒子百分比的降低使得磷光复合涂层发光强度远低于原始粉末。

3) 涂层中磷光粒子的添加提高了涂层的硬度,增强了摩擦过程中涂层表面的变形抗力,提高了涂层干摩擦条件下的耐磨性能。高铝青铜磷光复合涂层呈轻微磨粒磨损特性,高铝青铜涂层呈粘着、疲劳磨损特性。

## 参考文献

- [1] LI W S, WANG Z P, LU Y, et al. Mechanical and Tribological Properties of a Novel Aluminum Bronze Material for Drawing Dies[J]. Wear, 2006(261):155—163.
- [2] 李文生,王爽,何玲,等. 高铝青铜磷光复合烧结涂层组织及发光性能[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(6):130—135.
- [3] 郭小燕,张津,张叶成,等. 表面技术在模具修复中的应用进展[J]. 表面技术, 2007, 36(6):70—76.  
GUO Xiao-yan, ZHANG Jin, ZHANG Ye-cheng, et al. Surface Technology Application and Development in Mould and Die Repairing[J]. Surface Technology, 2007, 36(6):70—76.
- [4] YU J, ZIEHL P, ZARATE B, et al. Prediction of Fatigue Crack Growth in Steel Bridge Components using Acoustic Emission[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67:1254—1260.
- [5] 卢晓亮,李国禄,王海斗,等. 再制造零件涂层服役过程的在线监测现状[J]. 无损检测, 2013, 35(2):18—22.  
LU Xiao-liang, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Research Status of On-line Monitoring of Remanufacturing Parts Coatings in Service Process[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(2):18—22.
- [6] FADARE A D, ONI A O. Development and Application of Machine Vision System for Measurement of Tool Wear[J]. RPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2009, 4(1):42—49.
- [7] 刘艳辉,赵映. 铝酸盐长余辉材料研究进展[J]. 广东化工, 2009, 36(5):54—56.  
LIU Yan-hui, ZHAO Ying. Development of Long-lasting Phosphorescent Materials of Aluminates Hosts[J]. Guangdong Chemical Industry, 2009, 36(5):54—56.
- [8] 姜岭,常程康,毛大立. 长余辉发光材料的研究进展[J]. 无机材料学报, 2004, 19(2):268—274.  
JIANG Ling, CHANG Cheng-kang, MAO Da-li. Progress in the Research of Long Lasting Phosphorescent Materials[J]. Journal of Inorganic Materials, 2004, 19(2):268—274.
- [9] 阳区,刘应亮,余彩霞,等.  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  长余辉材料发光性能与温度依赖研究[J]. 无机化学学报, 2011, 27(9):1715—1720.  
YANG Qu, LIU Ying-liang, YU Cai-xia, et al. Temperature Dependence of Luminescence Property of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  Phosphors[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2011, 27(9):1715—1720.
- [10] 朱胜,周超极,王晓明,等. 铜合金表面超音速微粒沉积镍基涂层的耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(3):138—142.  
ZHU Sheng, ZHOU Chao-ji, WANG Xiao-ming, et al. Study on Anti-corrosion Property of Nickel-based Alloy Coatings on Copper Surface Formed by Supersonic Particle Deposition[J]. Surface Technology, 2015, 44(3):138—142.



- [11] WU Xiang-kun, ZHANG Ji-shan, ZHOU Xiang-lin, et al. Advanced Cold Spray Technology: Deposition Characteristics and Potential Applications [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(2): 357—368.
- [12] 李文亚, 余敏. 冷喷涂技术的最新研究现状 [J]. 表面技术, 2010, 39(5): 95—99.  
LI Wen-ya, YU Min. The Latest Development State of the Cold Spraying Technique [J]. Surface Technology, 2010, 39(5): 95—99.
- [13] 黄世炎, 张环华, 黄慧民. 铝酸锶长余辉发光材料包覆无机膜的研究 [J]. 稀土, 2008, 29(2): 39—44.  
HUANG Shi-yan, ZHANG Huan-hua, HUANG Hui-min. Inorganic Encapsulation of Strontium Aluminate Phosphors [J]. Chinese Rare Earths, 2008, 29(2): 39—44.
- [14] 王仁清, 吕兴栋, 何玉明.  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}, \text{Dy}$  发光粉的机械余辉与机械劣化研究 [J]. 中国稀土学报, 2008, 26(6): 689—693.  
WANG Ren-qing, LYU Xing-dong, HE Yu-ming. Mechanical Afterglow and Deteriorating for  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}, \text{Dy}$  Phosphors [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2008, 26(6): 689—693.
- [15] 马伟, 万发荣, 龙毅, 等.  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}, \text{Dy}$  的粉末粒度与发光性能的关系 [J]. 发光学报, 2003, 24(1): 95—99.  
MA Wei, WAN Fa-rong, LONG Yi, et al. Relation between Luminescence and Granularity of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}, \text{Dy}$  [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2003, 24(1): 95—99.
- [16] 张咪娜. 真空热压烧结耐磨自敏涂层组织及其性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.  
ZHANG Mi-na. Vacuum Hot Pressing Preparation of Phosphoresce Luminescent Wear-resistant Coating and Its Properties [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [17] 杨雪峰. 铝酸盐基质发光材料的制备新工艺及特杂质猝灭研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
YANG Xue-feng. New Process Preparation and Iron Quenching of Aluminate-based Luminescent Materials [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [18] 李文生. 高铝青铜的研制及腐蚀磨损机理研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2006.  
LI Wen-sheng. Preparation and Corrosive Wear Properties of a High Aluminum Bronze [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2006.
- [19] 上官宝, 陈跃, 铁喜顺, 等. WC 等离子喷涂涂层摩擦磨损特性研究 [J]. 表面技术, 2004, 33(1): 21—22.  
SHANG-GUAN Bao, CHEN Yue, TIE Xi-shun, et al. Friction and Wear Characteristics of Plasma-Sprayed WC Coatings [J]. Surface Technology, 2004, 33(1): 21—22.
- [20] 董衍林, 张磊, 董建东. 等离子喷涂  $\text{Cr}_2\text{C}_3/\text{MoS}_2$  复合自润滑涂层的摩擦学性能 [J]. 润滑与密封, 2011, 36(5): 15—19.  
DONG Yan-lin, ZHANG Lei, DONG Jian-dong. Investigation of Tribological Properties of Plasma Sprayed  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{MoS}_2$  Self-lubricating Coating [J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(5): 15—19.
- [21] GUO Xue-ping, ZHANG Ga, LI Wen-ya, et al. Microstructure, Microhardness and Dry Friction Behavior of Cold-sprayed Tin Bronze Coatings [J]. Applied Surface Science, 2007, 254: 1482—1488.

(上接第 19 页)

- [12] CAMPS I, MUHL S, CAMPS E, et al. Tribological Properties of TiSiN Thin Films Deposited by Laser Ablation [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 255: 74—78.
- [13] CHANG C L, LIN C T, TSAI P C, et al. Influence of Bias Voltages on the Structure and Wear Properties of TiSiN Coating Synthesized by Cathodic Arc Plasma Evaporation [J]. Thin Solid Films, 2008, 516: 5324—5329.
- [14] GUO C T, LEE D, CHEN P C. Deposition of TiSiN Coatings by Arc Ion Plating Process [J]. Applied Surface Science, 2008, 254: 3130—3136.
- [15] ZHANG P, CAI Z H, XIONG W Q. Influence of Si Content and Growth Condition on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti-Si-N Nanocomposite Films [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201: 6819—6823.
- [16] 石玉龙, 彭红瑞, 李世直. Si 对 TiSiN 膜组成结构的影响 [J]. 功能材料, 1999, 30(1): 66—67.  
SHI Yu-long, PENG Hong-rui, LI Shi-zhi. The Influence of Si on the Composition and Structure of the TiSiN Coatings [J]. Functional Materials, 1999, 30(1): 66—67.