

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.08.012

## 冷喷涂制备铝基涂层研究进展及应用现状分析

任子阳<sup>1</sup>, 汤嘉昊<sup>1</sup>, 殷世铜<sup>1</sup>, 李子轩<sup>1</sup>, 张留艳<sup>1,2\*</sup>, 谭桂斌<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 广东工业大学 广东省海洋能源装备先进制造技术重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:** 系统介绍了近年来冷喷涂制备铝基涂层的现状, 总结了Al-Ni、铝青铜、高铝青铜、Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al-Fe、铝基非晶涂层这几种铝基涂层体系在冷喷涂制备中所采用的工艺, 对涂层的微观结构、力学性能以及耐腐蚀、耐磨损性能等进行了阐述, 并对冷喷涂技术制备铝基涂层的研究发展和应用方向进行了展望。

**关键词:** 冷喷涂; 铝基涂层; 微观结构; 力学性能; 腐蚀性能; 磨损特性

**中图分类号:** TG174.4      **文献标识码:** A

## Research progress and application status analysis of aluminum-based coatings prepared by cold spraying

Ren Ziyang<sup>1</sup>, Tang Jiahao<sup>1</sup>, Yin Shitong<sup>1</sup>, Li Zixuan<sup>1</sup>, Zhang Liuyan<sup>1,2\*</sup>, Tan Guibin<sup>2</sup>

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Marine Energy Facilities, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The present situation of aluminum-based coatings prepared by cold spraying in recent years was systematically introduced, and the processes used in the preparation of aluminum-based coatings were summarized such as Al-Ni, aluminum bronze, high aluminum bronze, Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al-Fe and aluminum-based amorphous coatings. The microstructure, mechanical properties, corrosion resistance and wear resistance of the coatings were described, and the research development and application direction of the aluminum-based coatings prepared by cold spraying technology were prospected.

**Keywords:** cold spraying; aluminum-based coating; microstructure; mechanical properties; corrosion resistance; wear resistance

由于铝的密度较小、容易成型等优点, 其在航空航天、交通、运输、电子设备等领域都有良好的应用前景。但由于铝及其合金硬度低、耐腐蚀性差, 在服役过程中容易发生腐蚀而降低使用寿命。利用表面

改性技术提高铝的耐蚀性能是非常有必要的。现阶段常用的表面改性方法主要包括化学气相沉积法、激光熔覆技术、超音速火焰喷涂技术、等离子喷涂技术、阳极氧化等。但是这些方法基本都存在着工件

收稿日期: 2023-04-11

修回日期: 2023-05-30

作者简介: 任子阳(2002—), 男, 本科生, 研究方向: 表面工程, email: 2632753861@qq.com

\*通信作者: 张留艳(1983—), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 表面工程, email: zlyjust@gdut.edu.cn

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金《超大型海上风电装备的高性能长寿命唇封材料磨损与失效特性研究》(No. 2022A1515240004); 广州市科技计划项目《海洋盐雾条件下超高压往复密封系统腐蚀磨损交互作用及规律研究》(No. 2023A04J0270)

受热大并且稳定性不高、价格太昂贵等缺点。

铝和铝合金都适合作为金属基复合材料的基体,铝基复合材料是采用颗粒(直径在 $0.5\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间的等轴晶粒)或者纤维(包括短晶须等)作为增强体,并通过运用一些与传统工艺不同的方法制备出来的一种新型结构材料,具有抗腐蚀性能强、密度低以及硬度高等很多优势,成为飞行器制造、交通工具制造以及国防武器装备制造等领域中常用的一种材料<sup>[1]</sup>。目前,铝基复合材料常用的制备方法主要为粉末冶金法、固态热压法、热等静压法、搅拌铸造法、液态金属渗透法、热喷涂法和原位合成法等<sup>[2]</sup>。但上述这些制造方法或多或少都存在一些不足之处,例如:粉末冶金法所需成本较高、生产效率低,无法制造尺寸较大的零部件,并且易在零件内部产生气孔与偏析;热喷涂法能够应用的材料范围非常广泛,并且工作场地及工件尺寸均不受限制,但也存在热效率低、均匀性差、结合强度不够高、存在孔隙以及高温使工件变形等问题;原位合成法是新兴的制备复合材料的一种方法,这种方法能得到热力学性能稳定、结合强度很高的复合材料,同时成本也比较低,但也存在合成体系有限、反应速度难以控制等问题。

近年来,冷喷涂技术因其优异的性能和广阔的应用前景引起了国内外学者的广泛关注。冷喷涂技术是一种新的涂层制备方法,其基本原理是将高纯度粉末与惰性气体混合形成不稳定的混合气体,并在常温下高速运动,由高速气流带动,使粉末颗粒迅速加热、熔化和蒸发,在基体表面形成由固态到液态的过渡层。喷涂粉末和基体之间通过高速的气流充分碰撞进行热交换,在极短的时间内形成完全冶金结合的涂层。冷喷涂预处理阶段是指将基材加热到高于其熔点的温度;喷涂阶段是指将喷涂材料喷到基材表面,并通过高速旋转的喷枪将其与基材充分混合;后处理阶段是指利用喷枪将喷涂材料喷到基材表面,并通过后处理将其与基体分离。冷喷涂技术的应用特点是对基材的预处理要求较低且能够在较高的温度下快速进行,可以克服传统热喷涂对基材的预处理要求,从而满足生产实际需要。这种特殊的喷涂技术大大提高了喷涂效率和涂层质量,有

效避免了传统热丝喷涂中因涂层厚度较薄而易造成裂纹和气孔缺陷的缺点,同时具有喷涂效率高、对基材热影响小、涂层外形与基材表面形貌一致、氧化物含量低、致密度高等优点。本文对国内外相关研究资料进行了总结与分析,结合前人研究结果对冷喷涂制备铝基复合涂层的制备工艺及特点进行分析与研究,并对铝基复合材料的未来发展趋势进行了展望。

## 1 Al-Ni涂层

镍铝青铜合金因具有很高的耐腐蚀性能和良好的机械性能,通常被用来制造船体制动的螺旋桨、海洋泵体的零件以及一些水下作业使用的零件<sup>[3]</sup>。陈晓峰等<sup>[4]</sup>通过使用Kentiks-4000型冷喷涂设备,将工业氮气作为冷喷涂通入的气体,其压力、温度分别为 $3.0\ \text{MPa}$ 、 $650\ ^\circ\text{C}$ ,喷涂距离选择了 $35\ \text{mm}$ ,送粉率为 $40\ \text{g/min}$ ,在镍铝青铜合金表面冷喷涂制备Al-Ni涂层。通过使用扫描电镜、X射线衍射仪观察并测试了镍铝青铜合金与涂层的微观组织形貌,通过使用X射线光电子能谱(XPS)和电化学工作站测试了合金与冷喷涂制备涂层的电化学行为,再通过使用磨蚀试验机测量了它们的磨蚀性能。结果表明:冷喷涂制备的涂层经过电化学腐蚀后,晶间腐蚀和选相腐蚀会在基体上发生,同时相对较小的微孔和裂纹也会在涂层被腐蚀后产生;相对于静态环境,在磨蚀的过程中,由于摩擦和钝化的共同效果以及阳极在摩擦的促进下溶解等因素,使得冷喷涂制备的涂层和基体检测出来的自腐蚀电位相比出现明显的下降,因此自腐蚀电流会增大,涂层与基体的耐腐蚀性能也随之下降;如果在干摩擦过程中,磨蚀也会使得涂层和基体的摩擦系数显著增大,导致减磨性能变差。Podrabinnik P等<sup>[5]</sup>采用激光辅助冷喷涂的方法制备出Al-Ni复合涂层, $\text{Al}_3\text{Ni}_5$ 金属间化合物是通过辅助激光的原位退火工艺生成的。Lee H Y等<sup>[6]</sup>通过使用冷喷涂的技术制备出Al-Ni复合涂层,后续采用 $450\ ^\circ\text{C}$ 以上退火热处理方法,形成了含有 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 和 $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ 两种金属间化合物的复合涂层。Spencer K等<sup>[7]</sup>通过使用冷喷涂技术,在镁合金基体上制备出Al-Ni复合涂层,在 $420\ ^\circ\text{C}$ 下退火处理 $2\ \text{h}$ ,得到了

$\text{Ni}_2\text{Al}_3$ 和 $\text{NiAl}_3$ 两种金属间化合物,这使得涂层的显微硬度明显得到了提高。

采用冷喷涂技术制备的Al-Ni复合涂层的后续热处理加工过程对涂层的金属间黏结层结合能力强弱有很重要的影响,同时热处理加工过程中以及冷喷涂过程中不免伴随着一些残余应力的产生,应力也是一个很重要的因素。Xie F等<sup>[8]</sup>通过采用实验建模的方法,探究了残余应力对Al-Ni复合涂层金属间黏结层结合能力的影响,发现如果Al、Ni粉末进行机械碾磨前处理,即消除之前过程中产生的残余应力,将会大幅度缩短Al-Ni复合涂层合金化的时间。

## 2 Al-Cu 涂层

冷喷涂制备的Al-Cu涂层通常称之为铝青铜涂层(铝元素含量不超过11.5%)和高铝青铜(铝元素含量为11.5%~16.0%)。如果想要提升某种特定的性能,还会增加其他元素。铝青铜作为舰船螺旋桨的材料,能起到很好的抗腐蚀及抗空蚀作用,但整个制造成本过高;而在船舵表面涂覆铜-铝青铜材料,使其具有与铝青铜质结构件相似的性能,可达到提高船舵使用寿命的效果。通过冷喷涂工艺可得到致密涂层,且与铜-铝青铜材料有相同或类似的性能,冷喷涂工艺避免了副反应物的产生(如热喷涂工艺中易生成的氧化物),使该工艺得到的涂层拥有更好的力学性能<sup>[9]</sup>。高铝青铜则因为其铝含量的提高,形成了强度、耐腐蚀能力和耐磨能力较高的优势,在航空航天、海洋工程等领域得到了广泛应用。另外,由于该材料还有着良好的导热性能和刚度稳定等性能,还被用作一些材料的模具。但是由于其呈现液态时流动性差,容易产生气孔等缺陷,导致裂纹甚至断裂的发生,所以通常将其做成粉末态,再通过喷涂等方式添加到其他基体表面,以获得良好性能的高铝青铜。

Kerbs S等<sup>[10]</sup>使用CGT-Kinetiks 8000高压冷喷涂装置(气体预热温度最高为1000℃),在钢的基体表面制备了 $\text{CuAl}_{10}\text{Fe}_3\text{Ni}_5$ 涂层,并通过采用X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、显微硬度测试等深入研究其微观结构以及性能。结果表明:涂

层的气孔率小于2%,显微硬度达到368  $\text{HV}_{30}$ ,沉积效率可达70%。冷喷涂颗粒撞击后形貌有3种:留下孔洞反弹、在基体表面铺展开以及嵌入基体中。后面2种方式对冷喷涂制备涂层有促进作用。孙晓峰等<sup>[4, 11]</sup>使用CGT-Kinetiks 4000高压冷喷涂设备(气体预热温度最高为800℃),在镍铝青铜9442合金表面进行了镍铝青铜涂层制备,同时探究了在不同pH中涂层的电化学腐蚀以及腐蚀磨损性能。结果表明:冷喷涂的铝镍青铜涂层内部致密且颗粒发生了明显变形,但涂层表面缺乏后续的一些处理,导致表面颗粒容易脱落,会产生孔隙和裂纹。涂层电化学腐蚀测试结果发现,不管是在碱性环境下还是在酸性环境下,有涂层部位的耐腐蚀能力都比没有涂层的地方要强,而在酸碱度适中的环境中,有涂层部位的耐腐蚀能力却相对较弱。在pH=3或者pH=11的环境中,基层表面以及涂层表面都会受到摩擦因素的影响,会出现表面疲劳磨损以及选相腐蚀等问题,在这种环境下,有涂层的地方会表现出比较强的抗腐蚀能力,而当环境中的pH为7左右时,防腐涂层会出现磨粒磨损,涂层中的Cu会出现溶解问题,而随着Cu的不断溶解,涂层的耐腐蚀能力也会随之下降。Miguel J M等<sup>[12]</sup>分别采用冷喷涂技术与APS(大气等离子喷涂)技术将铝青铜粉末与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末按照不同比例混合制备涂层,并对冷喷涂制备的涂层进行了硬度以及耐磨性能的检测。结果表明:冷喷涂制备的涂层致密度更高,同时没有氧化物的夹杂,冷喷涂制备的涂层硬度高于同等条件下APS制备的涂层,且随着 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末含量的增加,涂层硬度逐渐上升。涂层结合强度也随着 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末含量的增加而增加,但是APS制备的涂层结合强度更高。在涂层中添加 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒,使得冷喷涂制备的涂层磨损性能得到了提高,不过由于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒本身塑性比较差,因此其耐浸蚀的能力比较弱,导致复合涂层的含量越低,其抗浸蚀能力越强。

与铝青铜相比,铝元素含量的提高可以使其具有更高的硬度、粉末流动性及耐磨擦性等,其在表面工程领域的前景广阔<sup>[13]</sup>。制备高铝青铜涂层,之前往往采用雾化方法制备粉末,但是其成本较高,在工业中难以广泛应用。冯力等<sup>[14]</sup>提出了一种冷喷涂



辅助原位合成高铝青铜合金涂层的方法,通过使用GDU-3-15设备,在45钢基体(C 0.42 %~0.50 %, Si 0.17 %~0.37 %, Mn 0.50 %~0.80 %, Cr≤0.25 %, 喷涂前对基体喷砂粗化处理)上制备了高铝青铜涂层,并采用了场发射扫描电子显微镜和能量色散X射线光谱仪(EDS)分析了涂层摩擦试验前后的表面形貌和成分;通过采用X射线衍射仪对冷喷涂涂层的表面进行物相分析,同时采用显微硬度计测量了涂层和粉末的显微硬度。结果表明:冷喷涂辅助原位合成高铝青铜合金涂层的组织是以 $\beta$ 相、 $\alpha$ 相、 $\gamma_2$ 相和 $k$ 相为主的典型高铝青铜合金组织。通过原位合成法制备出的高铝青铜,其冷喷涂合金涂层微观结构致密、孔隙率比较低,具有良好的耐磨和耐腐蚀性能,这些性能都非常接近于高铝青铜合金。涂层的硬度为3570 MPa,与氧化铝的干摩擦系数为0.320。在3.5 wt.%NaCl与5.0 wt.%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>腐蚀介质里面的稳定电位分别为-366 mV和-387 mV(vs.SCE)。使用该方法制备出的高铝青铜涂层具有更高的耐腐蚀能力,可以对基层进行有效的防护,避免基层出现腐蚀问题。

### 3 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层

目前,热喷涂、化学气相沉积(CVD)和冷喷涂这几种方法是制备高性能Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层的常用方法。与热喷涂相比,工艺简单、成本低、涂层质量好是冷喷涂技术的优势。通过冷喷涂技术制备的Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层具有较高的致密性、硬度和结合强度,抗磨损能力也得到了大幅度的提升。

不同的载气温度会影响冷喷涂得到的Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合涂层的表面质量。杨理京等<sup>[15]</sup>研究了不同载气温度对复合涂层沉积特性的影响规律,利用扫描电子显微镜和三维轮廓仪测量并观察了复合涂层的厚度、涂层的表面形状和微观组织。在一定温度范围内,复合涂层的厚度随载气温度升高而增加,涂层粗糙度 $R_a$ 和与表面最大高度差 $H_{\max}$ 也会随着温度的不断提升而增加。在进行涂层制备时,要将载气温度控制在400℃,该温度下制备出的涂层质量较好。涂层表面的平整度和致密性可以通过在涂层中添加Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的方法来提高。李林波等<sup>[16]</sup>通过改变氧化铝

的加入量,研究了其对复合涂层形貌和显微结构的影响,发现涂层的物相不受Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加量的影响,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒的加入促进了Al粒子的变形,降低了表面的粗糙度。由于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒具有夯实作用和产生物理效应,降低了涂层的孔隙率。Zhang Z等<sup>[17]</sup>研究也发现了冷喷涂制备复合涂层的孔隙率是改变涂层抗腐蚀性能的因素,随着复合涂层孔隙率的降低,涂层的自腐蚀电流密度也会降低,抗腐蚀能力则会变高。陈金雄等<sup>[18]</sup>研究发现相对于镁合金的自腐蚀电流密度( $2.56 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>),冷喷涂制备的Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合涂层自腐蚀电流密度下降了3个数量级,显著增强了镁合金基体的抗腐蚀性能。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的添加使得复合涂层的硬度也有明显的提高。Wang Q等<sup>[19]</sup>发现在冷喷涂过程中,高速冲击导致涂层表面的Al颗粒产生不均匀的塑性变形,在颗粒边界发生晶粒细化,这就是涂层硬度提高的根本原因。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒的添加使得复合涂层具有更高的纳米硬度和弹性模量,也表现出了更好的耐磨性。

### 4 Al-Fe涂层

Al-Fe涂层因其优异的高温强度、耐腐蚀性、耐磨性和耐水蒸气性等性能,是服役于极端环境中的可选择材料之一。可用于冷喷涂Al-Fe涂层的喷涂材料主要包括铁基合金、不锈钢和铝基合金。相比于其他金属,铁基合金具有较好的热稳定性、高温抗氧化性和优异的机械性能,因此得到了广泛关注。目前,Al-Fe涂层已被研究用于航空航天部件的表面保护、作为聚变反应堆中的氦渗透屏障等<sup>[20]</sup>。Al-Fe涂层可以通过喷涂、热浸和电子束等不同的技术进行制造,其中热喷涂是一种效率高且经济的方法。然而,热喷涂过程中的高工作温度可能会引起杂质(氧化物和未知的铁铝化物)产生、高孔隙率、热残余应力甚至微裂纹等问题,在高温环境下也容易形成脆性铁铝化物。这些不同的缺陷会使热喷涂制备的涂层各方面性能显著下降。为了解决热喷涂过程中高温引起的问题,近年来形成了固态沉积技术,即冷喷涂技术,冷喷涂技术可以在远低于材料熔点的温度下运行<sup>[21]</sup>。

Wang Y等<sup>[22]</sup>将不同质量比例的Fe和Al(Fe质

量分数:25 %、50 %、75 %)组成的 Al-Fe 复合涂层分别通过冷喷涂沉积在纯 Al 和 P91 钢板上,再通过 SEM 和 EDS 对所制备涂层横截面的微观结构进行了表征,并分析了涂层和基材之间的黏合强度,探究了 Fe/Al 比和基体硬度对沉积行为的影响。结果表明:具有 3 种不同 Fe/Al 比率的样品均表现出 Al 元素碎裂区的特殊形态,破碎带由大的集成 Al 颗粒和小的断裂 Al 颗粒组成,Fe/Al 比对冷喷涂涂层的沉积行为有显著影响。不同 Fe/Al 配比的 Al-Fe 涂层可以通过冷喷涂成功沉积到 Al 基材上,Fe/Al 比为 50 %/50 % 的涂层表现出相对较高的黏结强度。对于 P91 基体,只有 Fe/Al 比为 75 %/25 % 的涂层才能成功沉积。基体的硬度对沉积行为和结合强度均有明显影响。

王洪涛等<sup>[23]</sup>为了研究 Al-Fe 复合粉末在冷喷涂沉积过程中粒子相互碰撞的变形行为、二者之间的结合机理以及冷喷涂涂层的组织结构微观特征,通过使用球磨机把 Fe、Al 粉末机械混合作为冷喷涂的原料( $w(\text{Al}):w(\text{Fe})=85:15$ ),使用 CS-2000 冷喷涂系统沉积 Al-Fe 金属复合涂层。喷涂时采用  $\text{N}_2$  使气体加速并传送混合粉末,具体实验条件为:气体压力 22.4 MPa、喷涂温为 200 °C、喷涂距离 20 mm、喷枪移动速度 40 mm/s。铝板作为基体材料,在喷涂之前需要采用棕玉砂( $\sim 700\text{ }\mu\text{m}$ )进行喷砂处理。用扫描电镜观察粉末和涂层的表面以及它们的断面形貌,通过 X 射线衍射仪分析粉末涂层的相结构,采用显微硬度仪测定冷喷涂层和粉末的显微硬度。结果表明:通过采用冷喷涂技术,可以得到没有发生氧化的 Al-Fe 复合涂层,涂层结构致密,孔隙率大约为 1.2 %。冷喷涂制备的 Al-Fe 复合涂层微观相结构中,Fe 粒子在 Al 基体中呈弥散分布,两种微粒机械结合,在碰撞的接触区域,晶粒显著被拉长,Al 晶粒呈现扁平状,并且扁平率接近 50 %,但是同时被拉长的 Fe 粒子,在碰撞后的扁平化程度却是有限的。另外,在冷喷涂过程中,Fe、Al 两种粒子相互碰撞,产生了强烈的塑形变形,这也造成了涂层的 XRD 图上衍射峰的半高宽显著增加,同时显微硬度也显著提高。

## 5 Al-石墨烯涂层

Al 基复合材料具有诸多优异的性能,如较低密度、高耐腐蚀型、耐磨等,而且在导电导热等性能上,也远远高于纯金属材料。其在电子元件、医疗器械、汽车制造及航空航天等领域都有十分广泛的应用,并且经过石墨烯改性后的 Al 基复合材料可以更进一步提高原材料上述性能。

梁建权等<sup>[24]</sup>使用球磨混粉法和半固态电磁搅拌法制备了石墨烯纳米片改性 Al 基复合材料。通过扫描电镜观察表明,复合材料中石墨烯纳米片分布均匀,随着石墨烯纳米片含量的增加,复合材料的晶粒尺寸逐渐细小。但是当石墨烯纳米片的含量达到 0.9 % 时,晶粒尺寸又将会略微变大,复合材料的拉伸强度、伸长率和硬度等力学性能随着石墨烯纳米片含量的增加而增加。当石墨烯纳米片的含量为 0.6 % 时,复合材料具有最佳的性能。王秀金等<sup>[25]</sup>采用原位还原法制备了石墨烯铝合金复合粉末,并利用低压冷喷涂技术在 AZ318B 镁合金粉末表面喷涂形成了 Al-石墨烯涂层。与纯铝涂层相比,Al-石墨烯涂层中铝粉末颗粒的变形程度较高,涂层较致密,孔隙度大幅下降,硬度也有明显提高;在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的浸泡时间相比原来几乎增加了 3 倍,而涂层的耐腐蚀性则通过改善其结构密度而得到提高。此外,研究了室温下的复合涂层的摩擦磨损性能,结果表明,含有 0.2 wt.% 石墨烯的复合材料涂层,摩擦系数在不同载荷下均比纯 Al 的摩擦系数低,表现出不同的磨损机制。在试验过程中,纯 Al 涂层产生了大量的碎屑,摩擦痕迹的宽度较大,出现了极为明显的磨损现象,但是含有 0.2 wt.% 石墨烯的涂层表面光滑,没有明显的碎屑产生,擦痕宽度较小,其结果表明石墨烯的自润滑性能可以提高涂层的耐磨性。

## 6 铝基非晶涂层

非晶合金的内部原子排列是长程无序状态,非晶合金具有更优的耐腐蚀、耐磨损性能及在玻璃态转变温度附近有更好的加工性能等特点。

贾利等<sup>[26-27]</sup>通过采用冷喷涂技术(所用设备为

德国CGT冷喷涂设备,工作气体为 $N_2$ ,喷涂压力为3.5 MPa、喷涂温度为300 °C、喷涂距离为30 mm)在AZ91D镁合金和AZ31镁合金表面制备铝基非晶涂层,并对其耐磨性以及耐蚀性进行了研究。冷喷涂铝基非晶粉末的化学成分:83.81 %Al、7.35 %Ni、8.36 %Y、0.48 %其他,粉末形态均匀规则,大多数为球体或椭球体。研究表明,通过谢乐公式计算出的非晶含量为48 %,铝基非晶涂层的表面SEM形貌显示喷涂之后的颗粒为扁平状态,颗粒与颗粒之间存在着一些细小的孔洞,喷涂过程中粉末颗粒未出现熔融现象,涂层孔隙率为0.59 %,涂层厚度为450  $\mu\text{m}$ ,涂层硬度为300  $\text{HV}_{0.1}$ 。对镁合金材质的基体以及涂有铝基非晶涂层后的基体进行电化学实验,然后将实验结果和传统的铝涂层比对,实验结果表明,铝基非晶涂层的抗腐蚀能力明显高于传统的铝涂层,能够对镁合金材质的基体起到非常好的防腐保护效果。镁合金基体具有磨粒磨损的特征,在摩擦过程中,因为摩擦表面温度比较高,涂层上的Al会发生氧化反应,会在涂层表面形成一个强度更高的硬化层,使涂层的耐磨性得到了改善,即铝基非晶涂层在干摩擦条件下具有较强的抗磨损能力。

## 7 结语

铝及铝合金因为其具有密度较小、价格低、比强度高、耐腐蚀性能好且优良的导电性等特点,应用前景广阔。冷喷涂技术作为一种近年发展起来的低温表面工程技术,可以有效克服铝基复合涂层沉积过程中的许多问题。二者的结合,可以给铝及铝合金的应用带来更大的提升。但冷喷涂技术在铝基涂层中的应用还面临着较多问题,如不同参数下涂层性能对比试验、单一因素对涂层性能的影响以及涂层之间性能关系等。在今后进行涂层制备时,可以通过对不同参数组合下涂层组织、显微硬度和结合强度等进行对比试验,建立相应的关系模型,进而获得最优的冷喷涂工艺参数,以解决现阶段涂层制备工艺参数单一的问题。含铝材料在低温的环境下有较大的脆性,如果只利用冷喷涂技术,在基体上较难沉积,但如果是利用铝和其他金属的混合粉末(类似前文中列举出来的许多冷喷涂铝基复合涂层的制备)

进行沉积,通过热处理形成Al-Ni、Al-Cu、Al-Fe等金属间化合物,进而再去制备涂层,将为制备金属间化合物复合材料提供一种新思路。同时Al与其他非金属材料、陶瓷材料的沉积涂层也是有很大的探索空间。冷喷涂技术专用设备、复合材料的结构设计以及涂层后处理等一系列问题如果加以完善,也可将冷喷涂技术体系化,将进一步推动其在材料制备领域的发展。

## 参考文献

- [1] 曹子林,张林慧,仲斌年,等. 铝基复合材料的制备和研究现状[J]. 金属功能材料, 2023, 30(2): 29-39.
- [2] 付树仁,杨理京,李争显,等. 冷喷涂技术制备Al基复合材料涂层研究进展[J]. 表面技术, 2022, 49(11): 75-84.
- [3] 吕玉廷,王立强,毛建伟,等. 镍铝青铜合金(NAB)的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(3): 815-820.
- [4] 孙晓峰,陈正涵,李占明,等. 镍铝青铜合金及其冷喷涂涂层磨蚀行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(11): 3493-3498.
- [5] Podrabinnik P, Grigoriev S, Shishukovskiy L. Laser post annealing of cold-sprayed Al/alumina-Ni composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 271: 265-268.
- [6] Lee H Y, Jung S H, Lee S Y, et al. Alloying of cold-sprayed Al-Ni composite coatings by post-annealing[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(7): 3496-3502.
- [7] Spencer K, Zhang M X. The use of kinetic metallization to form intermetallic reinforced composite coatings by post-spray heat treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(20-21): 3019-3025.
- [8] Xie F, Zhang W X, Li H M, et al. Modelling of alloying process of cold sprayed Ni/Al coating[J]. Mechanics of Materials, 2019, 135: 129-143.
- [9] Krebs S, Gaertner F, Klassen T, et al. 冷喷涂铝青铜在海洋环境下抗空蚀方面的研究[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(1): 68-74, 55.
- [10] Krebs S, Gaertner F, Klassen T. Cold spraying of Cu-Al-bronze for cavitation protection in marine environments [J]. Journal of Materials Science & Engineering Technology, 2015, 24: 126-135.
- [11] 孙晓峰,陈正涵,李占明,等. 不同pH值环境中镍铝青



- 铜冷喷涂涂层腐蚀磨损性能[J]. 工程科学学报, 2017, 39(7): 1055-1061.
- [12] Miguel J M, Guilemany J M, Dosta S. Effect of the spraying process on the microstructure and tribological properties of bronze-alumina composite coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(7): 2184-2190.
- [13] 孙澄川, 卢静, 解路, 等. 冷喷涂制备铜基合金涂层研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(7): 165-176.
- [14] 冯力, 王贵平, 李洞亭, 等. 冷喷涂辅助原位合成高铝青铜涂层的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(5): 1720-1726.
- [15] 杨理京, 付树仁, 王少鹏, 等. 不同载气温度条件下低压冷喷涂 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的沉积特性[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 71-77, 127.
- [16] 李林波, 罗洪杰, 杜昊, 等. 氧化铝含量对冷喷涂 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层表面形貌和显微结构的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 303-310.
- [17] Zhang Z, Liu F C, Han E H, et al. Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the microstructures and corrosion behavior of low-pressure cold gas sprayed Al 2024-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings on AA 2024-T3 substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 370: 53-68.
- [18] 陈金雄, 王群, 罗丝丝, 等. AZ31 镁合金冷喷涂 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层组织及性能[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1720-1729.
- [19] Wang Q, Birbilis N, Huang H, et al. Microstructure characterization and nanomechanics of cold-sprayed pure Al and Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 232: 216-223.
- [20] Hu L, Zhang G, Wang H, et al. Optimum preparation of Fe-Al/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on 21-6-9 austenitic stainless steel[J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 148: 111280.
- [21] Arabgol Z, Villa Vidaller M, Assadi H, et al. Influence of thermal properties and temperature of substrate on the quality of cold-sprayed deposits[J]. Acta Materialia, 2017, 127: 287-301.
- [22] Wang Y, Deng N, Tong Z, et al. The effect of Fe/Al ratio and substrate hardness on microstructure and deposition behavior of cold-sprayed Fe/Al coatings[J]. Materials, 2023, 16(2): 878.
- [23] 王洪涛, 陈泉, 白小波, 等. Al/Fe 金属复合涂层冷喷沉积行为及结构特征[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(4): 1-4.
- [24] 梁建权, 赵宇宏, 陈利文, 等. 石墨烯纳米片增强铝基复合材料的制备及研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(6): 652-656.
- [25] 王秀金. 镁合金表面冷喷涂石墨烯/铝复合涂层的制备及其性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [26] 贾利, 陈杰, 崔焱, 等. 非晶铝基粉末冷喷涂涂层及其耐磨性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(5): 250-252.
- [27] 贾利, 陈杰, 刘光, 等. 镁合金表面冷喷涂铝基非晶涂层组织和性能的研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(22): 98-100, 115.