

专题——热喷涂技术研究及应用

# 冷喷涂技术制备 Al 基复合材料涂层研究进展

付树仁<sup>1,2</sup>, 杨理京<sup>2</sup>, 李争显<sup>1,2</sup>, 王少鹏<sup>2</sup>

(1.东北大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110819; 2.西北有色金属研究院, 西安 710016)

**摘 要:** 首先对冷喷涂铝基复合材料涂层的装备开发现状进行了总结, 通过对比低压、中高压、真空、激光辅助、原位喷丸辅助冷喷涂技术的优缺点, 指出现有冷喷涂装备对制备铝基复合材料的适用性。其次, 通过总结冷喷涂技术在制备铝基金属间化合物、铝基陶瓷、铝基石墨烯等复合材料涂层方面的研究现状, 证明冷喷涂技术在各类型铝基复合材料制备方面的优势和可行性。最后, 对热处理、搅拌摩擦、热等静压和激光重熔等冷喷涂制备涂层的常用后处理方法进行了分析, 阐述合理的后处理策略对提升冷喷涂铝基复合材料性能方面的重要意义。总之, 专用冷喷涂装备开发、复合材料结构设计和后处理策略的体系化研究, 是推动冷喷涂技术应用于金属基复合材料开发的关键。

**关键词:** 冷喷涂; 铝基复合材料; 涂层; 陶瓷颗粒; 热处理

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0075-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.009

## Research Progress of Al-matrix Composite Coatings Prepared by Cold Spraying Technique

FU Shu-ren<sup>1,2</sup>, YANG Li-jing<sup>2</sup>, LI Zheng-xian<sup>1,2</sup>, WANG Shao-peng<sup>2</sup>

(1.School of Material Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2.Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**ABSTRACT:** The development status of equipment for cold spraying of Al-matrix composite coatings was summarized and the advantages and disadvantages of all those cold spraying systems including low-pressure, medium-pressure, high-pressure, vacuum, laser-assisted and in-situ shot-assisted cold spraying systems were compared to point out the applicability of the existing cold spraying equipment for the preparation of Al-matrix composites. Then, the related studies of cold spraying in the preparation of composite coatings of Al-matrix intermetallic compounds, Al-matrix ceramics, Al-matrix graphene were concluded, showing the advantages and feasibility of cold spraying technology in the preparation of various types of Al-matrix composites. At last, the common post-treatment methods of composite coatings prepared by cold spraying such as heat treatment, friction stir, hot isostatic pressing (HIP) and laser remelting technology were analyzed, indicating the important

收稿日期: 2020-05-09; 修订日期: 2020-08-20

Received: 2020-05-09; Revised: 2020-08-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51701165); 陕西省博士后科学基金 (2018BSHQYXMZZ36); 陕西省重点科技创新团队 (2017KCT-06)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51701165); Shaanxi Postdoctoral Science Foundation (2018BSHQYXMZZ36); Shaanxi Science and Technology Innovation Team Project (2017KCT-06)

作者简介: 付树仁 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为冷喷涂稀有金属的研究与应用。

Biography: FU Shu-ren (1995—), Male, Master, Research focus: research and application of cold spraying rare metals.

通讯作者: 杨理京 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为稀有金属激光及冷喷涂增材制造。邮箱: yanglijing84@126.com

Corresponding author: YANG Li-jing (1984—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: laser and cold spray additive manufacturing of non-ferrous metal. E-mail: yanglijing84@126.com

引文格式: 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, 2020, 49(11): 75-84.

FU Shu-ren, YANG Li-jing, LI Zheng-xian, et al. Research progress of Al-matrix composite coatings prepared by cold spraying technique[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 75-84.

significance of those post-treatment methods to improve the properties of the composite coatings. In a word, the systematic study of cold spraying equipment development, composite structure design and post-treatment strategy is the key to promote the application of cold spraying in preparing metal matrix composites.

**KEY WORDS:** cold spraying; Al-matrix composites; coating; ceramic particle; heat treatment

金属材料、无机非金属材料和高分子材料等单一材料已经难以满足航空、航天结构件的性能需求,这也促进了复合材料的研究发展。例如碳/碳复合材料保留了碳纤维优异的力学性能,兼具碳素材料低密度、低热膨胀系数、高导热等优点,已经成为航空航天等领域理想的结构材料<sup>[1]</sup>。金属基复合材料通过添加增强体,赋予金属材料更高的强度、韧性和抗疲劳等优异的力学性能,同时还能赋予金属材料高导电、高导热、抗氧化、耐磨等功能性优点<sup>[2-3]</sup>。通常铝基复合材料通过添加纤维、陶瓷颗粒、晶须等增强相突破铝合金材料低强度、低硬度、低熔点等性能的局限<sup>[4]</sup>。因此,铝基复合材料的结构设计、增强体与金属基体界面控制、复合材料制造装备、复合材料后处理技术是铝基复合材料研究的热点。

目前,铝基复合材料的常用制备方法主要有液态渗透、压力铸造、粉末冶金、箔/纤维/箔法、丝材/纤维/丝材法、热轧法等<sup>[5-7]</sup>。其中箔/纤维/箔法是制备纤维增强金属基复合材料最原始的方法,该方法难点在于基体合金箔的制造;粉末冶金方法设备成本高,工艺复杂,制备周期长,零件结构和形状尺寸受一定限制;液态渗透法是先把纤维增强相预制成形,使金属液渗透到纤维间隙而达到强化的目的,易造成纤维的热损伤;压力铸造法需对固液混合体施加高压,导致纤维预制体变形。

冷喷涂技术是一种以固态沉积为特点的新型增材制造技术,它以压缩气体(氮气、氦气、空气或混合气体)作为加速介质,带动固态金属颗粒以极高的速度碰撞基板,使颗粒发生强烈塑性变形而沉积的一种新型喷涂技术<sup>[8]</sup>。冷喷涂技术制备复合材料的优势在于低温沉积和固态沉积,喷涂金属颗粒是通过绝热剪切失稳发生塑性流变沉积在基体上,特别适合沉积

塑性较高的金属颗粒(如 Al、Cu、Ni 等)。此外,冷喷涂技术制备铝基复合材料涂层可以有效避免材料的氧化、分解、相变及晶粒长大等问题,有望为铝基复合材料的制备研究提供新的途径。

## 1 冷喷涂技术分类

### 1.1 低压冷喷涂

根据喷涂压力的不同,冷喷涂技术可以分为低压喷涂和中高压喷涂系统。低压冷喷涂(Low Pressure Cold Spray, LPCS)是一种便捷式冷喷涂系统,工作原理如图 1 所示。其特点是输入电源为  $220\text{ V}\pm 10\%$ ,采用频率为  $50\text{ Hz}$  的民用电源设计,即插即用,所需喷涂气体工作压力在  $0.8\text{ MPa}$  左右,可直接通过空气压缩机供气,工作温度范围为  $0\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,喷涂系统小巧,可手持喷涂。LPCS 由于受到喷涂压力和气体工作温度的限制,适用于喷涂铝、铜、锡、镍等软质纯金属及其合金。如 Mohammad 等人<sup>[9]</sup>在 AZ31B 镁合金上冷喷涂纯铝涂层,提高基体的耐腐蚀性能。国外低压冷喷涂设备制造商主要有:俄罗斯的奥布宁斯克粉末喷涂中心(OCPS),市场占有率较低;美国 Inovati 公司,其 KM 系列低压冷喷涂设备的特点是通过 Inovati 的专利摩擦补偿型喷嘴设计,使冷喷涂设备操作压力比传统冷喷设备低很多(其压力在  $0.35\sim 0.9\text{ MPa}$ );加拿大 CenterLine 公司,其 SST-P 型低压冷喷涂设备商业化较成熟,气体压强范围在  $0.7\sim 1.72\text{ MPa}$ ,气体温度可达  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。国内成熟的商业化低压冷喷涂设备主要是北京天诚宇新材料技术有限公司生产的 LP-TCY-III 型低压冷喷涂系统,压缩空气工作压力在  $0.5\sim 0.8\text{ MPa}$ ,气体工作温度为  $200\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

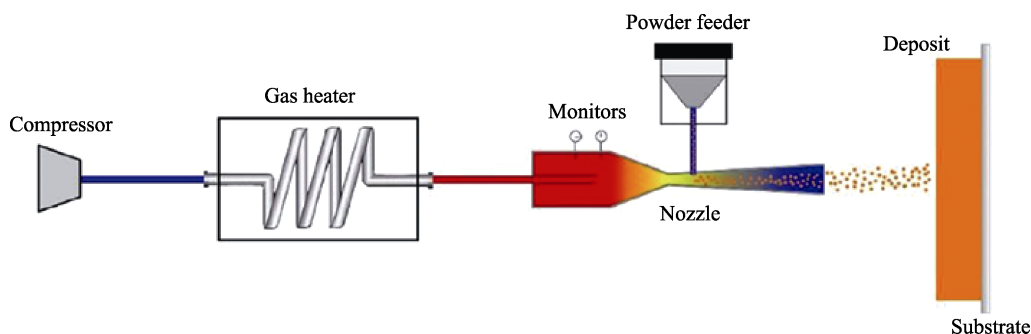


图 1 低压冷喷涂系统原理示意图<sup>[8]</sup>  
Fig.1 Sketch of LPCS<sup>[8]</sup>

## 1.2 中高压冷喷涂

中高压冷喷涂系统通常指喷涂压力在 2~5 MPa 范围的冷喷涂设备, 气体的工作温度较低压冷喷涂系统提高到 1000 °C。相比 LPCS 系统, 为了提高工作气体的温度和压力, 避免软连接管路材料对温度和压力的限制, 气体加热装置集成在冷喷涂枪中, 气流加热后直接进入喷嘴 (如图 2 所示), 导致冷喷涂枪体积庞大, 喷涂便携性大大降低。中高压冷喷涂设备可喷涂硬度较高的钛合金、WC-Co、CrC-NiCr 等材料涂层, 进一步拓展了冷喷涂技术喷涂材料的适用范围。如 Da Silva 等人<sup>[10]</sup>采用高压冷喷涂设备在 AA7075-T6Al 合金基体表面分别制备了 WC-12Co 和 WC-25Co 涂

层。中高压冷喷涂系统喷涂实验需要多组气瓶组进行气体供应, 如进行喷涂生产, 则需建设氮气气站。日本 Plasma Giken 公司生产的 PCS-1000 冷喷涂设备是国外较成熟的中高压冷喷涂系统, 最高气体工作压力可达 5 MPa, 气体工作温度可达 1000 °C, 喷涂材料种类多 (如 Ni、MCrAlY、TC4 合金、不锈钢、Inconel 合金、WC-Co 等)。德国 Impact Innovations GmbH 公司生产的高压冷喷涂设备气体工作压力可达 5 MPa, 工作温度在 800 ~ 1000 °C。国内的商业化中高压设备主要是陕西德维自动化有限公司生产的 DWCS-2000、北京联合涂层技术有限公司生产的 UCS-1000, 他们生产的冷喷涂系统气体工作压力最高为 4 MPa。

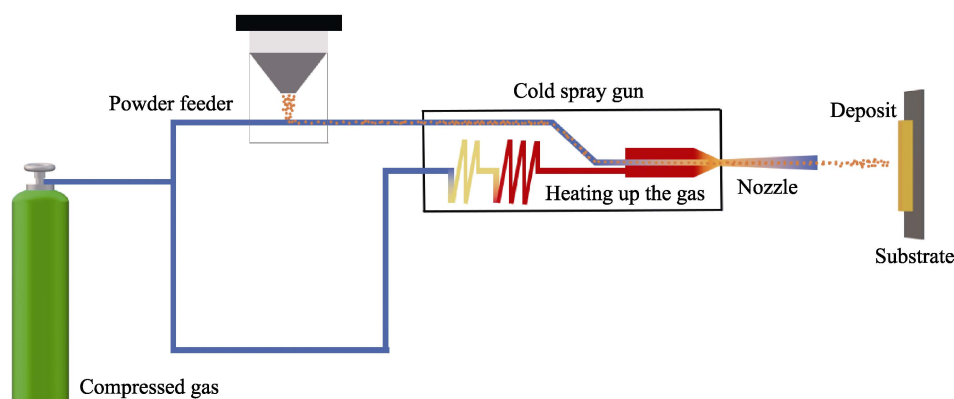


图 2 中高压冷喷涂系统原理

Fig.2 Principle of medium/high pressure cold spraying system

## 1.3 真空冷喷涂

真空冷喷涂系统已成为一种先进的陶瓷涂层制造方法, 相比于传统冷喷涂系统, 主要增加了真空泵对密闭喷涂室抽真空。陕西德维自动化有限公司推出的 DWZKLP 型真空冷喷涂系统的极限真空度为 2 Pa, 工作真空度为 50 ~ 1000 Pa, 恢复真空时间为 20 min。西安交通大学李长久等人自主研发的真空冷喷涂系统如图 3 所示, 其优点在于喷涂颗粒在喷涂过

程中, 不会因为腔内气氛的阻力作用使颗粒的动能降低。真空冷喷涂适用于喷涂纳米陶瓷颗粒涂层以及陶瓷薄膜。如 Wang 等人<sup>[11]</sup>研究了真空冷喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒过程中, 颗粒的结构及基体的硬度对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷涂层性能的影响。另外, 为了解决因基板前弓形激波的影响造成在传统冷喷涂环境下纳米颗粒难以实现有效沉积的技术难题, 有学者在真空冷喷涂的基础上结合静电辅助冷喷涂开发出静电辅助真空冷喷涂系统。Takana 等人<sup>[12]</sup>采用数值模拟了这一喷涂过程, 为今后静电辅助冷喷涂技术的进一步发展及应用提供了理论依据。

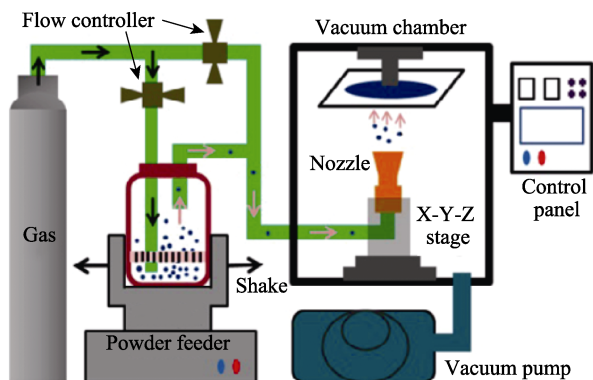


图 3 真空冷喷涂系统原理<sup>[11]</sup>

Fig.3 Principle of vacuum cold spraying system<sup>[11]</sup>

## 1.4 喷丸辅助冷喷涂

冷喷涂硬度较高的金属材料 (如 TC4 合金、Inconel718 合金、316L 合金等), 很难通过单纯冷喷涂技术获得致密性高的沉积层。为此, 崔晓涛等<sup>[13]</sup>提出原位微锻 (in-situ micro-forging) 辅助冷喷涂理论, 在较低喷涂压力的条件下, 通过原位喷丸辅助实现高致密冷喷涂沉积层的制备, 喷丸辅助冷喷涂技术原理如图 4 所示。喷丸粒子通常使用不锈钢球或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷颗粒, 尺寸通常为 50~150  $\mu\text{m}$ 。在冷喷涂过程中, 大尺度喷丸颗粒由于质量大、速度低, 碰撞



到已沉积层时,产生回弹,对已喷涂涂层起到锤击夯实的作用,而又不会沉积在涂层表面,降低沉积层中的孔隙,并使涂层整体呈现压应力的状态,提高了涂层致密度。WEI 等人<sup>[14]</sup>采用喷丸辅助冷喷涂系统增材制造出高致密度的 AA6061 铝合金,抗拉强度可达  $(277.6 \pm 7.1)$  MPa,弹性模量达  $(64.3 \pm 1.3)$  GPa。

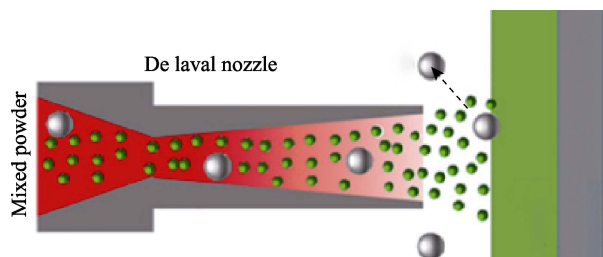


图4 喷丸辅助冷喷涂技术原理<sup>[14]</sup>

Fig.4 Principle of in-situ micro-forging assisted cold spraying technology<sup>[14]</sup>

## 1.5 激光辅助冷喷涂

激光辅助冷喷涂技术又叫超音速激光沉积技术 (SLD),是由英国剑桥大学的 O'Neill 教授首先提出的<sup>[15-16]</sup>。其原理是在冷喷涂技术中同步耦合激光,利用激光辐照的加热作用来辅助沉积喷涂涂层,如图5所示。激光辅助冷喷涂技术通过调控激光束对基体和粉末颗粒进行加热,保证基体和颗粒处于合适的温度,既保持了冷喷涂技术的固态沉积、无稀释、低热输入、低氧化、低变形量、高沉积速度,保证了喷涂颗粒的原始成分与相结构,又解决了冷喷涂难以沉积高硬度或脆性颗粒的这一难题。目前国内主要有浙江工业大学姚建华教授团队开展这方面的研究工作,该团队采用激光辅助冷喷涂技术在中碳钢基体上沉积制备镍基金刚石复合涂层、钴基 WC 复合涂层、高硬度司太立合金 (Stellite6) 和镍基合金 (Ni60)<sup>[17]</sup>。

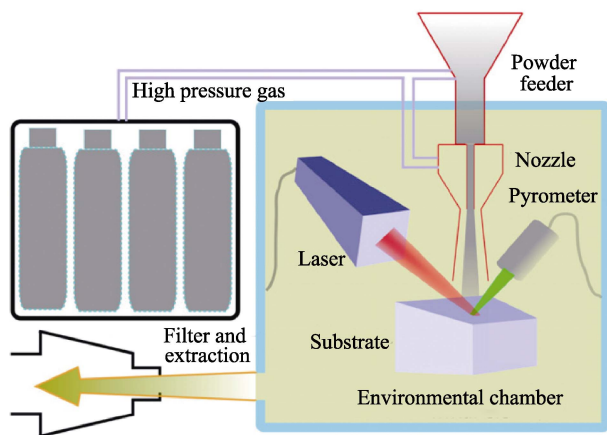


图5 激光辅助冷喷涂系统原理<sup>[16]</sup>

Fig.5 Principle of laser-assisted cold spraying system<sup>[16]</sup>

## 2 冷喷涂铝基复合材料涂层

### 2.1 铝基金属间化合物

铝基金属间化合物复合涂层通常采用热喷涂方法 (如等离子喷涂、高速氧燃料热喷涂 (VHOF)、电弧喷涂、火焰喷涂等) 制备,由于喷涂过程中的焰流温度较高,很容易对颗粒及涂层产生氧化、相变、热裂等热损伤<sup>[18]</sup>。而冷喷涂技术的低温固态沉积特性可以有效避免热损问题,但含铝金属间化合物在低温下脆性大,很难利用冷喷涂技术直接沉积。为了克服这一问题,众多学者提出用冷喷涂制备铝和其他金属的复合材料涂层,经过后续的热处理诱导复合材料形成夹杂金属间化合物的复合材料涂层。Wang 等人<sup>[19]</sup>采用冷喷涂沉积铁铝混合粉末,并在  $500 \sim 900$  °C 进行退火,生成 FeAl 金属间化合物,形成过程为:  $\text{Fe/Al} \rightarrow \text{Fe}_2\text{Al}_5 \rightarrow \text{FeAl}$ 。Lee 等人<sup>[20]</sup>在 Al 基体上冷喷涂沉积 Al/Ti 复合涂层,利用热处理使涂层中形成  $\text{Al}_3\text{Ti}$  金属间化合物。Novoselova 等人<sup>[21]</sup>也采用这种方法成功制得  $\text{Al}_3\text{Ti}$  金属间化合物,并揭示了  $\text{Al}_3\text{Ti}$  的形成过程。Podrabinnik 等人<sup>[22]</sup>采用激光辅助冷喷涂的方法制备出 Al/Ni 复合涂层,在辅助激光的原位退火作用下,生成  $\text{Al}_x\text{Ni}_y$  金属间化合物。Lee 等人<sup>[23]</sup>采用冷喷涂的方法制备出 Al/Ni 复合涂层,在  $450$  °C 以上退火时,形成夹杂  $\text{Al}_3\text{Ni}$  和  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$  金属间化合物的 Al 涂层。Spencer 等人<sup>[24]</sup>采用冷喷涂的方法在 ZA91 合金基体上制备 Al/Ni 复合涂层,并进行热处理,在  $420$  °C 下退火处理 2 h,原位生成的  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  和  $\text{NiAl}_3$  金属间化合物能显著提高复合涂层的显微硬度 (从 106HV 到 144HV)。

采用冷喷涂技术制备的 AlNi 金属粘结层 (热障涂层的重要部分) 组织致密,并且避免了过多氧化,受到了广大学者的关注。冷喷涂沉积 Al/Ni 复合涂层的热处理合金化对 NiAl 粘结层的好坏有着重要的影响。Yang、Suo 等人<sup>[25-26]</sup>已经证实,应力是影响合金化过程的一个重要因素。XIE 等人<sup>[27]</sup>通过实验建模研究了冷喷涂残余应力对 Al/Ni 复合涂层合金化过程的影响,发现 Al、Ni 粉末的机械碾磨处理大幅度减少了 Al/Ni 复合涂层的合金化时间。为了提高  $\gamma\text{-TiAl}$   $700 \sim 800$  °C 的抗高温氧化性能, Cizek 等人<sup>[28]</sup>在  $\gamma\text{-TiAl}$  基体上采用低压冷喷涂的方法制备出 Al/Ti 复合涂层 (其中 Ti 的质量分数分别为 0%、5%、15%、30%),并在  $950$  °C 氧气气氛中测量其抗氧化性能,发现基体中 Al 原子的过渡扩散形成  $\text{Al}_3\text{Ti}$  相,抑制了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  钝化层的形成,提高了  $\gamma\text{-TiAl}$  基体的高温抗氧化性能。基于以上学者的研究,本文将上述采用冷喷涂技术制备的铝与其他金属复合材料涂层的种类、粉末配比、基体材料、冷喷涂方法及原位生成的新相列于表 1 之中,以供参考。

表 1 冷喷涂 Al/金属间化合物复合涂层  
Tab.1 Al/intermetallic compound composite coating by cold spraying

Author	Type	Powder ratio	Substrate	Method	New phase
WANG <sup>[19]</sup>	Al/Fe	50 : 50(vol.%)		Medium/high pressure CS	FeAl
CIZEK <sup>[28]</sup>	Al/Ti	70 : 30(wt.%)	Ti-46Al-7Nb	Medium/high pressure CS	Al <sub>3</sub> Ti
LIANG <sup>[29]</sup>	Al/Zn	22 : 78(wt.%)	Ti-Nb IF steel	Medium/high pressure CS	
PODRABINNIK <sup>[22]</sup>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Ni	75 : 12.5 : 12.5(wt.%)	Aluminum alloy	Laser-assisted CS	Al <sub>x</sub> Ni <sub>y</sub>
LEE <sup>[23]</sup>	Al/Ni	90 : 10(wt.%)		Low pressure CS	Al <sub>3</sub> Ni, Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>
NOVOSELOVA <sup>[21]</sup>	Al/Ti			Medium/high pressure CS	Ti <sub>3</sub> Al, TiAl
LEE <sup>[20]</sup>	Al/Ti	75 : 25(wt.%)		Low pressure CS	Al <sub>x</sub> Ti <sub>y</sub> , Al <sub>x</sub> Ni <sub>y</sub>
	Al/Ni	75 : 25(wt.%)			
SPENCER <sup>[24]</sup>	Al/Ni	As-mixed 30 : 70(at.%) As-sprayed 50 : 50(at.%)	AZ91	Low pressure CS	NiAl <sub>3</sub> , Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>

2.2 铝基陶瓷复合材料

2.2.1 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料涂层

在冷喷涂涂层中添加硬质陶瓷颗粒，不仅能提升涂层的硬度及耐磨性，还能起到夯实的作用，增加涂层的致密性。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒具有良好的耐蚀性及化学稳定性，且成本低。Tao 等人<sup>[30]</sup>采用冷喷涂技术在镁合金 (AZ91D) 基体上制备出 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合涂层，由于 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒的夯实作用，复合涂层的抗拉强度 (98 MPa) 远远高于纯铝涂层 (61MPa)。Tao、Spencer、Irissou 等人<sup>[30-32]</sup>证实了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的添加可以提高复合涂层在基体上的粘结强度。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒的添加有助于复合涂层硬度的提升。Wang 等人<sup>[33]</sup>对比研究了冷喷涂制备纯铝及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合涂层的显微组织以及纳米力学性能，由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的锤击作用使得复合涂层更加致密，相比于冷喷涂制作的纯铝涂层，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合涂层具有更高的显微硬度和弹性模量。Shockley 等人<sup>[34-35]</sup>认为复合涂层的显微硬度主要取决于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的集中程度，和它的表面形貌无关。Irissou 等人<sup>[32]</sup>认为复合涂层的硬度与冷喷涂 Al 颗粒的尺寸有关，大尺寸颗粒的动能大，对试样表面的锤击作用大，由于加工硬化的作用，导致复合涂层的硬度较高。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒的添加有助于复合涂层沉积效率的提升。Irissou 等人<sup>[32]</sup>发现，当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒质量分数为 30% 时，涂层的沉积效率最大，而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒过多，喷涂时产生的回弹现象更严重，会降低复合涂层的沉积率。Qiu 和 Shockley 等人<sup>[34-36]</sup>证明，由于球形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的回弹现象严重，不规则形状的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒相比于球形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 更容易沉积在涂层上。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒的添加有助于复合涂层抗磨损能力的提升。Shockley 等人<sup>[34-35]</sup>研究了不同 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒含量 (质量分数为 0、10%、22%) 对复合材料涂层磨损行为的影响。随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒含量的升高，复合涂层的摩擦系数变得更低、更稳定，磨损率也大幅度下降，摩擦性能的提升和磨痕表面转换层的稳定性相关。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗

粒含量越高，转换层越容易形成。经检测，表面转换层是氧化铝与结晶铝的非晶组织，称为第三体 (如图 6 所示)，圆润的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒更容易形成稳定的第三体。

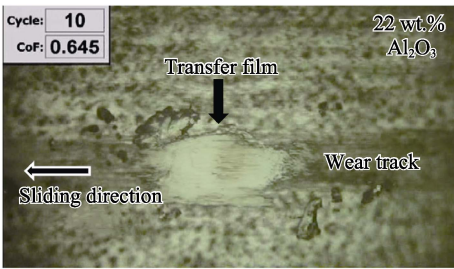


图 6 干磨过程中的表面转换层<sup>[35]</sup>  
Fig.6 Surface transfer layer in dry grinding process<sup>[35]</sup>

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒的添加有助于复合涂层致密度的提升，从而提高复合涂层的耐腐蚀能力。Cong 等人<sup>[37]</sup>冷喷涂制备了高致密 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合涂层，经过 960 h 5%NaCl 溶液腐蚀，复合涂层仍然具有很好的抗腐蚀能力。Bai 等人<sup>[38]</sup>在钢管表面冷喷涂制备了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合材料涂层，复合涂层在腐蚀环境中整体逐渐减薄，并出现孔洞和裂纹，但 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合材料涂层依然能较好地防止低碳钢管保温层下腐蚀的发生。Tao、Irissou、Spencer 等人<sup>[30-32]</sup>通过实验证明，Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的耐蚀性能提高，是由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的添加提升复合涂层的致密度所致。Zhang 等人<sup>[39]</sup>也研究表明，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合涂层的抗腐蚀性能与复合涂层的孔隙率直接相关，复合涂层的孔隙率越低，腐蚀电流就越低，涂层的抗腐蚀能力就越强。

2.2.2 Al/SiC 复合材料涂层

热喷涂制备 Al/SiC 复合材料涂层，易形成针状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 脆性相，形成裂纹源，导致复合涂层的力学性能及耐蚀性显著降低<sup>[40]</sup>。冷喷涂的低温沉积特性可以有效避免这个问题，另外 SiC 的密度 (3.2 g/cm<sup>3</sup>) 与 Al (2.7g/cm<sup>3</sup>) 相近，冷喷涂 SiC 和 Al 颗粒的沉积速度基本一致，有利于喷涂颗粒的有效沉积。Kumar 等人<sup>[40]</sup>采用冷喷涂技术制备了 SiC 颗粒含量不同 (体积分数



为23%、47%、52%)的铝基复合涂层,发现随着SiC颗粒含量的增高,复合涂层的硬度、强度、弹性模量及抗磨损能力都有所提高。Sansoucy等人<sup>[41]</sup>研究了SiC颗粒的含量及大小对SiC/Al-12Si复合涂层的微观组织、粘结强度以及硬度的影响,结果证明,当SiC的质量分数从10%增长到20%时,复合涂层的硬度从145HV增加到205HV。Yu等人<sup>[42]</sup>采用冷喷涂制备了SiC/Al5056复合材料涂层,证明喷涂过程中降低气体温度可以提高涂层的沉积效率,但是对于复合涂层中SiC的体积分数没有明显影响。Wang等人<sup>[43]</sup>探究了SiC颗粒的大小对于SiC/Al5056复合涂层的形貌及抗腐蚀能力的影响,发现复合涂层的抗腐蚀能力与SiC颗粒的大小及含量没有直接的关系,而是与复合涂层的致密度有关。Wang等人<sup>[44]</sup>通过观察冷喷涂SiC/Al5056复合材料涂层在Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中由萌生细小裂纹到腐蚀脱落失效,发现沉积层表面粗糙度和SiC/Al5056之间的界面是影响复合材料涂层腐蚀脱落的两大因素。

### 2.2.3 Al/B<sub>4</sub>C 复合材料涂层

Al/B<sub>4</sub>C复合材料在核工业领域中应用广泛,常用于制造储存活性废核燃料的内部运输篮和桶。制造方法一般采用液态铸造方法或粉末冶金技术,但是由于制造过程中温度较高,随着B<sub>4</sub>C颗粒含量的升高,Al/B<sub>4</sub>C复合材料中的孔洞、残余热应力、界面反应也越来越严重,导致Al/B<sub>4</sub>C复合材料的力学性能明显下降<sup>[45]</sup>。Tariq等人<sup>[46]</sup>为了探索复合涂层对中子屏蔽的作用,采用冷喷涂的方法在Al6061合金基体上沉积了约6 mm厚的B<sub>4</sub>C/Al的复合涂层,发现在200~500℃热处理过程中,试样的回复与再结晶对晶界裂纹具有修复作用,

使得复合涂层的强度和塑性显著提高,并在500℃达到最大(塑性1.4%,抗拉强度60 MPa)。经研究发现,复合涂层的中子屏蔽能力与热处理的温度和时间没有较大关联,只随着涂层厚度的增加,呈递减趋势。

### 2.2.4 Al/TiN 复合材料涂层

氮化钛(TiN)呈金黄色,硬度大,化学稳定性好,与金属的润湿性差,具有较好的导电性和超导性。Li等人<sup>[47]</sup>采用冷喷涂技术制备了Al2319/TiN复合涂层,由于增强相TiN的作用,使得复合涂层的粘结强度(从34 MPa到50 MPa)、显微硬度(从106HV到154HV)显著提高,并且指出由于细颗粒TiN在摩擦过程中形成第三体的缘故,使得复合涂层的摩擦系数(从0.75到0.43)及磨损率(从 $36 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{m} \cdot \text{N})$ 到 $2.4 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{m} \cdot \text{N})$ )较纯Al2319涂层明显降低。硼化钛(TiB<sub>2</sub>)同样具有高硬度和脆性,常与TiN、TiC等材料组成复合陶瓷材料,制作各种耐高温部件和装甲防护材料。Xie等人<sup>[48]</sup>采用冷喷涂增材制造技术制备出纳米TiB<sub>2</sub>颗粒增强7075Al复合材料,增加了材料的显微硬度及抗拉强度。

## 2.3 Al/石墨烯复合材料涂层

石墨烯作为石墨的一种衍生材料,是碳原子以sp<sup>2</sup>杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的二维碳纳米材料,具有优异的光学、电学和力学特性,是目前的研究热点<sup>[49]</sup>。为了提高Zn/Al复合涂层对低碳钢的阴极保护能力,Wu等人<sup>[50]</sup>将石墨烯包裹的Al和Zn颗粒采用冷喷涂的方法沉积在低碳钢基体上,形成Zn/Al涂层中均匀分散石墨烯的复合涂层,如图7所示。电

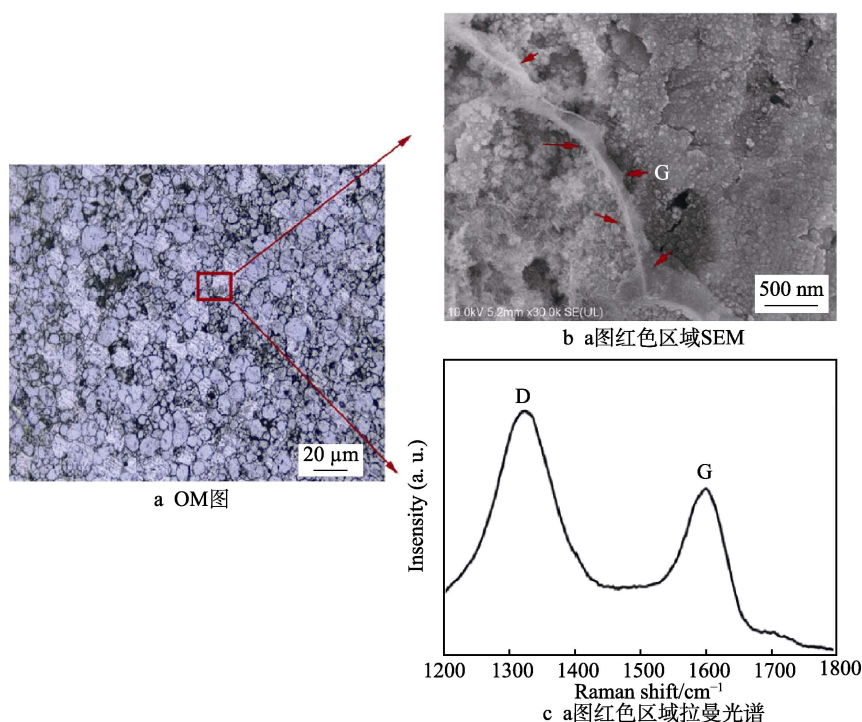


图7 冷喷涂 Zn-0.2wt% G/Al 复合涂层<sup>[50]</sup>

Fig.7 Image of Zn-0.2 wt% G/Al composite coating: a) OM image; b) SEM image and c) Raman spectrum acquired from the red box on fig.a

化学测试表明, 分散石墨烯的 Zn/Al 复合涂层的自腐蚀电位低, 腐蚀电流高, 说明石墨烯的掺杂提高了 Zn/Al 复合涂层的阴极保护能力。Huang 等人<sup>[51]</sup>用冷喷涂的方法制备了 Ni 包裹的石墨颗粒/Al 复合涂层, 在 450 °C 退火处理 4 h, 形成了  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ 、 $\text{Al}_3\text{Ni}$  相包覆石墨颗粒的 Al 基复合涂层。当退火温度升高到 550 °C 时, 石墨颗粒基本被烧损, 在复合涂层中留下孔洞。

### 3 冷喷涂制备铝基复合材料涂层后处理方法

冷喷涂沉积是依靠高速颗粒碰撞过程中发生绝热剪切失稳效应制备涂层, 冷喷涂沉积复合材料涂层根据沉积材料的塑性变形能力的不同, 通常存在以下问题: 1) 沉积层致密度问题; 2) 复合材料沉积层中异质颗粒间界面结合问题; 3) 沉积层中塑性变形粒子结合界面导致的力学性能差的问题。因此, 需要对冷喷涂沉积层进行后处理来消除缺陷, 提高沉积层性能。

#### 3.1 热处理

对冷喷涂铝基复合涂层进行热处理, 主要有两种功效: 通过热处理诱导涂层中形成金属间化合物; 复合涂层的微观组织的再结晶处理及界面调控。对于热处理诱导铝基金属间化合物已经在 2.1 部分有较详细的综述, 通过对冷喷涂沉积层进行热处理, 可以形成  $\text{Fe}_x\text{Al}_y$ 、 $\text{Ti}_x\text{Al}_y$ 、 $\text{Ni}_x\text{Al}_y$  和  $\text{Zn}_x\text{Al}_y$  等金属间化合物掺杂的铝基复合涂层, 赋予铝基复合涂层抗高温、耐磨和抗腐蚀性能。另外, Podrabinnik 等人<sup>[22]</sup>采用激光辅助冷喷涂的方法制备出 Al/Ni 复合涂层, 在辅助激光的退火作用下, 涂层中形成了  $\text{Al}_x\text{Ni}_y$  金属间化合物。

利用热处理对冷喷涂沉积层进行再结晶, 能够有效提高沉积层的组织均匀性, 改善异质颗粒间界面结合强度。Tariq 等人<sup>[46]</sup>在 200 °C 条件下热处理冷喷涂  $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$  复合涂层, 由于回复与再结晶机制, 喷涂颗粒之间的细小裂纹及孔洞得到修复, 复合涂层的塑性和强度得到提升。当热处理温度达到 500 °C 时, 复合涂层的塑性提升 1.4%, 抗拉强度提高到 60 MPa, 涂层的孔隙率降低为 1.9%。Kumar 等人<sup>[40]</sup>对冷喷涂 Al/SiC 复合涂层在 400 °C 的真空环境中热处理 4 h, 显著改善了 Al/SiC 界面的润湿性和复合涂层组织均匀性。

#### 3.2 搅拌摩擦处理

搅拌摩擦是基于传统搅拌摩擦焊发展的一种新的表面改性的后处理方法, 可以调控微观组织, 获得细晶粒结构、表面纳米化的复合材料。有研究人员尝试采用搅拌摩擦技术对冷喷涂涂层进行处理, 提高涂层的力学性能。Yang 等人<sup>[52]</sup>采用搅拌摩擦的后处理方式来提高冷喷涂 AA2024/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合涂层的耐腐蚀

能力, 证明搅拌摩擦处理之后  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的分布更加均匀, 经过 4 道搅拌摩擦处理的复合涂层的位错密度及微观应力也显著降低, 并且在经过 2 道搅拌摩擦处理之后, 复合涂层的抗腐蚀能力最好。Huang 等人<sup>[53]</sup>采用搅拌摩擦对冷喷涂 SiC/Al5056 复合涂层进行后处理, 由于搅拌摩擦对 SiC 颗粒的搅拌及破碎作用, 使得复合涂层中 SiC 颗粒更加细小 (从 12.2  $\mu\text{m}$  到 4.4  $\mu\text{m}$ ), 分布更加均匀, 如图 8 所示, 使得复合涂层的显微硬度大幅度提升 (从 92.5HV 到 185.7HV), 摩擦系数有所降低 (0.39 到 0.25)。

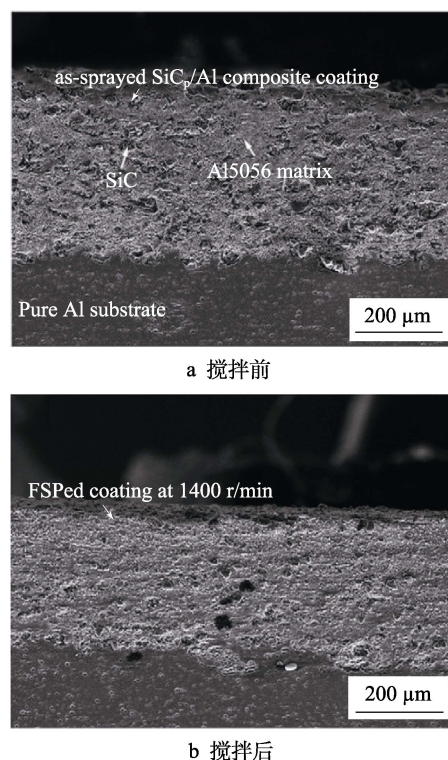


图 8 冷喷涂 SiC/Al5056 复合涂层<sup>[53]</sup>

Fig.8 SEM micrographs of cold spraying SiC/Al5056 composite coating: a) before friction stir processing; b) after friction stir processing

#### 3.3 热等静压处理

热等静压 (HIP) 是在特殊的容器中对样品进行高温和等静压处理, 同步的热处理和高压处理可以控制沉积层致密度。热等静压技术在粉末冶金工业中起着关键的作用, 在铸造工业中也是减少铸件在凝固过程中形成内部缺陷 (微观孔洞及裂纹) 的常用手段。近些年也有研究人员对选区激光熔化的成形件进行热等静压后处理, 提高试件的致密度和塑性。在冷喷涂技术沉积硬度较高的金属材料时 (如 TC4 合金), 由于合金颗粒塑性较差, 难以变形, 导致此类材料冷喷涂沉积层中孔洞较多。已有研究者证明了热等静压处理提高冷喷涂沉积层致密度的有效性。Chen 等人<sup>[54]</sup>为了减少冷喷涂 Ti6Al4V 成形件内部的残留孔洞, 采



用热等静压技术对试件进行微观组织调控, 结果证明, 热等静压处理后的试件组织致密, 仅存在少量不规则的细小孔洞(如图9所示), 处理后试件抗拉强度显著提高(374.39~963.41 MPa)。

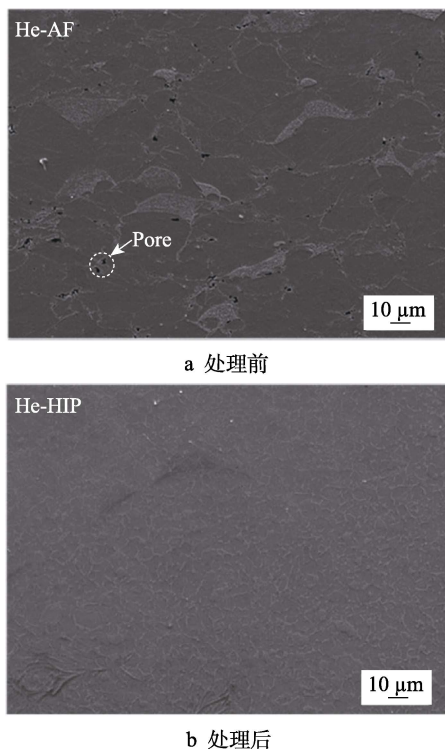


图9 冷喷涂 Ti6Al4V 合金微观组织<sup>[54]</sup>

Fig.9 SEM micrographs of cold spraying Ti6Al4V alloy: a) Before HIP; b) After HIP

### 3.4 激光重熔处理

激光重熔是利用高能密度激光束对涂层进行照射, 使基体表面与预置涂层同时快速熔化形成熔融层, 接着快速冷却凝固的过程。对于冷喷涂技术而言, 虽然低温沉积的优势能使沉积层很好地避免了热缺陷, 但是沉积层不致密、孔隙率高仍然是喷涂层的一大缺点。使用激光重熔处理后, 能够大幅度降低沉积层的孔隙率, 并且能消除表面涂层的层状组织, 使得涂层组织致密, 微观缺陷减少。陈正涵等人<sup>[55]</sup>探究了激光重熔处理对冷喷涂镍铝青铜涂层组织性能的影响。Astarita 等人<sup>[56]</sup>采用激光重熔技术对冷喷涂钛涂层进行后处理, 将处理后的涂层分为重熔区(RZ)、热影响区(HAZ)、冷喷涂基础区(BM), 其中重熔区硬度可达468~485HV, 较冷喷涂基础区(160HV)大幅度提高。

## 4 结语

铝及铝合金是航空航天领域应用最多的轻质金属, 铝基复合材料的研究成为突破单一金属性能瓶颈的主要途径。冷喷涂技术作为一种新型低温固态沉积

技术, 能够避免铝基复合材料涂层沉积过程中增强相的氧化、相变和分解等问题, 有望成为金属基复合材料制备的新方法, 主要体现在以下方面:

1) 虽然低压和中高压冷喷涂装备能够实现低硬度纯金属(Al)、高硬度合金(TC4)和高硬度金属陶瓷(Co-WC)等材料的有效沉积, 但研究证明原位喷丸和激光辐照辅助冷喷涂能够进一步改善沉积层质量, 所以复合冷喷涂制备技术的探索将成为新的研究热点。

2) 含铝金属间化合物在低温下脆性大, 很难利用冷喷涂技术直接沉积, 利用冷喷涂铝和其他金属的混合粉末, 经过对沉积层进行热处理诱导, 形成Al/Fe、Al/Ti、Al/Ni等金属间化合物夹杂的复合涂层, 将成为制备金属间化合物复合材料的新方法。

3) 冷喷涂技术能够成功制备Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al/SiC、Al/B<sub>4</sub>C、Al/TiN、Al/TiB等陶瓷复合材料涂层, 也可以实现Al/石墨烯复合材料涂层的制备, 是一种有潜力的金属基陶瓷复合材料涂层制备新方法。

4) 冷喷涂铝基复合材料涂层呈颗粒形变咬合状态, 需要依靠后处理工艺调控冷喷涂沉积层的组织结构和力学性能, 合理后处理策略的研究对于改善沉积层性能具有重要意义。

5) 冷喷涂技术已经被证实能够有效地制备铝基复合材料涂层, 冷喷涂专用装备开发、复合材料结构设计和后处理策略的体系化研究, 将成为推动冷喷涂技术在金属基复合材料增材制造和选区再制造方面应用的关键。

### 参考文献:

- [1] GAO Y T, GUAN Y X, LI K, et al. Failure behaviors of C/C composite tube under lateral compression loading[J]. Nuclear engineering and technology, 2019, 51(7): 1822-1827.
- [2] LI Q Y, LI J, HE G. Compressive properties and damping capacities of magnesium reinforced with continuous steel wire[J]. Materials science and engineering: A, 2017, 680: 92-96.
- [3] HUFENBACH W, ULLRICH H, GUDE M, et al. Manufacture studies and impact behaviour of light metal matrix composites reinforced by steel wires[J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2012, 12(3): 265-272.
- [4] PAKZAMAN H R, DIVANDARI M, KHAVANDI A. Effect of nickel coating on steel wire reinforcement on mechanical properties of aluminum matrix composites produced via lost foam casting[C]// Proceedings of iran international aluminum conference (IIAC2012). Arak, I R: [s. n.], 2012.
- [5] LI Q Y, LI J, HE G. Compressive properties and damping capacities of magnesium reinforced with continuous steel wire[J]. Materials science and engineering: A, 2017, 680:



- 92-96.
- [6] ZHOU Z Z, YAO B B, DUAN L Y, et al. Production and anisotropic compressibility of 304 stainless steel fiber/ZA8 zinc alloy interpenetrating phase composites[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 727: 146-152.
- [7] HAGA T, TAKAHASHI K. Casting of composite strip using a twin roll caster[J]. Journal of materials processing technology, 2004, 157-158: 701-705.
- [8] LI W Y, YANG K, YIN S, et al. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review[J]. Journal of materials science and technology, 2018, 34(3): 440-457.
- [9] MOHAMMAD D, PANG X, HAMID J. The effect of pure aluminum cold spray coating on corrosion and corrosion fatigue of magnesium (3%Al-1%Zn) extrusion[J]. Surface and coatings technology, 2016, 309: 423-435.
- [10] DA SILVA F S, CINCA N, DOSTA S, et al. Corrosion behavior of WC-Co coatings deposited by cold gas spray onto AA 7075-T6[J]. Corrosion science, 2018, 136: 231-243.
- [11] WANG L S, ZHOU H F, ZHANG K J, et al. Effect of the powder particle structure and substrate hardness during vacuum cold spraying of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ [J]. Ceramics international, 2017, 43(5): 4390-4398.
- [12] TAKANA H, OGAWA K, SHOJI T, et al. Computational simulation of cold spray process assisted by electrostatic force[J]. Powder technology, 2008, 185(2): 116-123.
- [13] LUO X T, YAO M L, MA N S, et al. Deposition behavior, microstructure and mechanical properties of an in-situ micro-forging assisted cold spray enabled additively manufactured Inconel 718 alloy[J]. Materials and design, 2018, 155: 384-395.
- [14] WEI Y K, LUO X T, CHU X, et al. Solid-state additive manufacturing high performance aluminum alloy 6061 enabled by an in-situ micro-forging assisted cold spray[J]. Materials science and engineering: A, 2020, 776: 139024.
- [15] LUPOI R, SPARKES M, COCKBURN A, et al. High speed titanium coatings by supersonic laser deposition[J]. Materials letters, 2011, 65(21-22): 3205-3207.
- [16] BRAY M, COCKBURN A, O'NEILL W. The laser-assisted cold spray process and deposit characterisation[J]. Surface and coatings technology, 2009, 203: 2851-2857.
- [17] YAO J H, YANG L J, LI B. Beneficial effects of laser irradiation on the deposition process of diamond/Ni60 composite coating with cold spray[J]. Applied surface science, 2015, 330: 300-308.
- [18] 靳子昂, 朱丽娜, 刘明, 等. 热喷涂技术制备铝涂层及其在 3.5%NaCl 溶液中耐腐蚀性的研究现状[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 220-229.
- JIN Zi-ang, ZHU Li-na, LIU Ming, et al. Research status of aluminum coating prepared by thermal spraying technology and its corrosion resistance in 3.5%NaCl solution[J]. Surface technology. 2019, 48(10): 220-229.
- [19] WANG H T, LI C J, YANG G J, et al. Cold spraying of Fe/Al powder mixture: Coating characteristics and influence of heat treatment on the phase structure[J]. Applied surface science, 2008, 255(5): 2538-2544.
- [20] LEE H Y, JUNG S H, LEE S Y, et al. Fabrication of cold sprayed Al-intermetallic compounds coatings by post annealing[J]. Materials science and engineering: A, 2006, 433(1-2): 139-143.
- [21] NOVOSELOVA T, CELOTTO S, MORGAN R, et al. Formation of TiAl intermetallics by heat treatment of cold-sprayed precursor deposits[J]. Journal of alloys and compounds, 2007, 436(1-2): 69-77.
- [22] PODRABINNIK P, GRIGORIEV S, SHISHUKOVSKY L. Laser post annealing of cold-sprayed Al/alumina-Ni composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2015, 271: 265-268.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] YANG F Q. Interaction between diffusion and chemical stresses[J]. Materials science and engineering A, 2005, 409(1-2): 153-159.
- [26] SUO Y H, SHEN S P. Coupling diffusion-reaction-mechanics model for oxidation[J]. Acta mechanica, 2015, 226(10): 3375-3386.
- [27] 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.
- [28] CIZEK J, MAN O, ROUPCOVA P, et al. Oxidation performance of cold spray Ti-Al barrier coated  $\gamma$ -TiAl intermetallic substrates[J]. Surface and coatings technology, 2015, 268: 85-89.
- [29] LIANG Y L, WANG Z B, ZHANG J, et al. Enhanced bonding property of cold-sprayed Zn-Al coating on interstitial-free steel substrate with a nanostructured surface layer[J]. Applied surface science, 2016, 385: 341-348.
- [30] TAO Y S, XIONG T Y, SUN C, et al. Effect of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the properties of cold sprayed Al/ $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite coatings on AZ91D magnesium alloy[J]. Applied surface science, 2009, 256(1): 261-266.
- [31] SPENCER K, FABIJANIC D M, ZHANG M X. The use of Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys[J]. Surface and coatings technology, 2009, 204(3): 336-344.
- [32] IRISSOU E, LEGOUX J G, ARENAULT B, et al. Investigation of Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  cold spray coating formation and properties[J]. Journal of thermal spray technology, 2007, 16(5-6): 661-668.
- [33] WANG Q, BIRBILIS N, HUANG H, et al. Microstructure characterization and nanomechanics of cold-sprayed pure Al and Al- $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2013, 232: 216-223.
- [34] SHOCKLEY J M, STRAUSS H W, CHROMIK R R, et al.

- In situ tribometry of cold-sprayed Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2013, 215: 350-356.
- [35] SHOCKLEY J M, DESCARTES S, VO P, et al. The influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle morphology on the coating formation and dry sliding wear behavior of cold sprayed Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites[J]. Surface and coatings technology, 2015, 270: 324-333.
- [36] QIU X, TARIQ N U H, QI L, et al. Influence of particulate morphology on microstructure and tribological properties of cold sprayed A380/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings[J]. Journal of materials science and technology, 2020, 44: 9-18.
- [37] CONG D L, LI Z S, HE Q B, et al. Wear behavior of corroded Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings prepared by cold spray[J]. Surface and coatings technology, 2017, 326: 247-254.
- [38] BAI X M, TANG J Q, GONG J M, et al. Corrosion performance of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cold sprayed coatings on mild carbon steel pipe under thermal insulation[J]. Chinese journal of chemical engineering, 2017, 25(4): 533-539.
- [39] 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.
- [40] KUMAR S, REDDY S K, JOSHI S V. Microstructure and performance of cold sprayed Al-SiC composite coatings with high fraction of particulates[J]. Surface and coatings technology, 2017, 318: 62-71.
- [41] SANSOUCY E, MARCOUX P, AJDELAZTAJN L, et al. Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process[J]. Surface and coatings technology, 2008, 202(16): 3988-3996.
- [42] YU M, LI W Y, SUO X K, et al. Effects of gas temperature and ceramic particle content on microstructure and microhardness of cold sprayed SiC<sub>p</sub>/Al 5056 composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2013, 220: 102-106.
- [43] WANG Y, NORMAND B, MARY N, et al. Effects of ceramic particle size on microstructure and the corrosion behavior of cold sprayed SiC<sub>p</sub>/Al 5056 composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2017, 315: 314-325.
- [44] WANG Y Y, NORMAND B, MARY N, et al. Microstructure and corrosion behavior of cold sprayed SiC<sub>p</sub>/Al 5056 composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2014, 251: 264-275.
- [45] TARIQ N U H, GYANSAH L, QIU X, et al. Achieving strength-ductility synergy in cold spray additively manufactured Al/B<sub>4</sub>C composites through a hybrid post-deposition treatment[J]. Journal of materials science and technology, 2019, 35(6): 1053-1063.
- [46] TARIQ N H, GYANSAH L, WANG J Q, et al. Cold spray additive manufacturing: A viable strategy to fabricate thick B<sub>4</sub>C/Al composite coatings for neutron shielding applications[J]. Surface and coatings technology, 2018, 339: 224-236.
- [47] LI W Y, ZHANG G, LIAO H L, et al. Characterizations of cold sprayed TiN particle reinforced Al2319 composite coating[J]. Journal of materials processing technology, 2008, 202(1-3): 508-513.
- [48] XIE X L, MA Y, CHEN C Y, et al. Cold spray additive manufacturing of metal matrix composites (MMCs) using a novel nano-TiB<sub>2</sub>-reinforced 7075Al powder[J]. Journal of alloys and compounds, 2020, 819: 152962.
- [49] 陈建华, 李文戈, 赵远涛, 等. 石墨烯在防腐防污涂料中的应用进展[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 89-97.
- CHEN Jian-hua, LI Wen-ge, ZHAO Yuan-tao, et al. Application of graphene in anti-corrosive and anti-fouling coating[J]. Surface technology, 2019, 48(6): 89-97.
- [50] WU H S, ZHANG L Y, LIU C S, et al. Deposition of Zn-G/Al composite coating with excellent cathodic protection on low-carbon steel by low-pressure cold spraying[J]. Journal of alloys and compounds, 2020, 821: 153483.
- [51] HUANG C J, LI W Y, PLANCHE M P, et al. In-situ formation of Ni-Al intermetallics-coated graphite/Al composite in a cold-sprayed coating and its high temperature tribological behaviors[J]. Journal of materials science and technology, 2017, 33(6): 507-515.
- [52] YANG K, LI W, NIU P, et al. Cold sprayed AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites improved by friction stir processing: Microstructure characterization, mechanical performance and strengthening mechanisms[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 736: 115-123.
- [53] HUANG C J, LI W Y, ZHANG Z H, et al. Modification of a cold sprayed SiC<sub>p</sub>/Al 5056 composite coating by friction stir processing[J]. Surface and coatings technology, 2016, 296: 69-75.
- [54] CHEN C Y, XIE Y C, YAN X C, et al. Effect of hot isostatic pressing (HIP) on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy fabricated by cold spray additive manufacturing[J]. Additive manufacturing, 2019, 27: 595-605.
- [55] 陈正涵, 孙晓峰, 李占明, 等. 激光重熔对冷喷涂镍铝青铜涂层组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(8): 116-122.
- CHEN Zheng-han, SUN Xiao-feng, LI Zhan-ming, et al. Effect of remelting on microstructure and properties of nickel aluminum bronze coating prepared by cold spraying[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(8): 116-122.
- [56] ASTARITA A, GENNA S, LEONE C, et al. Study of the laser remelting of a cold sprayed titanium layer[J]. Procedia CIRP, 2015, 33: 452-457.