

冷喷涂金属基复合涂层及材料研究进展

王吉强, 崔新宇, 熊天英

(中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心, 沈阳 110016)

摘 要: 冷喷涂是近年来一种发展十分迅速的材料固态沉积技术,其具有喷涂温度低和颗粒沉积速度高的特点,在金属基复合涂层及材料制备方面展现出了良好的应用前景。在大量文献整理和分析的基础上,对冷喷涂金属基复合涂层及材料的最新研究进展进行了系统的介绍。首先归纳了机械混合法、球磨法、包覆法以及造粒法等复合粉末的制备方法及其优缺点,为复合粉末的制备和选择提供了参考;其次,分类介绍了采用冷喷涂制备的铝基、镍基、铜基、钴基以及其他金属基复合涂层及材料;再次,分析了退火、激光、搅拌摩擦焊和热机械等后续处理方法对冷喷涂金属基复合涂层及材料组织结构和性能的影响,并介绍了不同后续处理方法的优缺点;最后,总结了冷喷涂金属基复合涂层及材料的潜在应用领域和存在问题。

关键词: 冷喷涂; 复合粉末; 金属基复合涂层及材料; 后续处理

中图分类号: TG148

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2020)04-0051-17

Research Progress of Cold Sprayed Metal Matrix Composite Coatings and Materials

WANG Jiqiang, CUI Xinyu, XIONG Tianying

(Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Cold spray is a rapidly developing solid-state deposition technology in recent years. It has the characteristics of low spraying temperature and high velocity of particles deposition, which shows a good application prospect in preparation of metal matrix composite(MMC) coatings and materials. According to the published papers, the research progress of cold sprayed MMC coatings and materials was systematically introduced. Firstly, preparation methods, such as mechanical mixing method, ball-milling method, coating method and granulation method of the composite powders and their advantages and disadvantages were summarized, which provides reference for the preparation and selection of composite powder. Secondly, different MMC coatings and materials prepared by cold spray were classified. Thirdly, the influence of subsequent treatment methods such as annealing, laser, friction stir welding and thermal mechanics on the microstructure and properties of cold sprayed MMC coatings and materials was analyzed. The advantages and disadvantages of subsequent treatment methods were also discussed. Finally, the application fields and present problems of cold sprayed MMC coatings and materials were summarized.

Keywords: cold spray; composite powders; metal matrix composite coatings and materials; subsequent treatment

0 引 言

金属基复合材料(Metal matrix composite, MMC)是在金属基体中加入增强相复合而成的新

型材料,金属基体主要赋予材料的宏观形态和基本物理特性,增强相赋予材料的特殊性能与功能,其具有很强的可设计性。作为一种新型结构-功能一体化材料,MMC具有高比强度、高比

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-08-09

通信作者: 王吉强(1988—),男(汉),副研究员,博士;研究方向:冷喷涂技术;E-mail: jqwang11s@imr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51801217)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51801217)

引用格式: 王吉强,崔新宇,熊天英.冷喷涂金属基复合涂层及材料研究进展[J].中国表面工程,2020,33(4):51-67.

WANG J Q, CUI X Y, XIONG T Y. Research progress of cold sprayed metal matrix composite coatings and materials[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(4): 51-67.

刚度、耐热、耐磨以及热膨胀系数低等优点,在国防军工、电子、航天和航空等领域具有广泛的应用前景^[1]。目前,制备金属基复合材料的主要方法有搅拌铸造法、液态浸渗法、粉末冶金法和喷射沉积法等^[2]。但这些方法普遍工艺复杂,生产周期长,成本较高。而且制备工艺温度较高,金属和增强相普遍存在有害的界面反应,不适于含易氧化和热敏感材料(如纳米晶、非晶复合材料)MMC 的制备。

近来,发展迅速的冷喷涂技术在金属基复合涂层及材料制备方面展现出了一定的应用前景。冷喷涂的工作过程和原理如下:高压气体(一般为 N_2 、He、空气)分为主气和辅气两路,主气通过加热器加热到喷涂温度,而辅气经过送粉器后携带喷涂粉末进入主气流;粉末和主气在拉瓦尔喷嘴前端混合并通过喷嘴形成超音速气固双相流,而后粉末以极高的速度撞击到基板上发生强烈塑性变形相互结合实现沉积^[3]。冷喷涂技术具有两个最显著的特点:喷涂温度低和颗粒沉积速度快。相比于其他复合材料制备技术,冷喷涂的制备工艺简单、生产周期较短、材料成分调控方便,而且其低温特点可避免其他技术制备过程中有害界面反应的发生^[4]。

基于上述优势,金属基复合涂层及材料的制备和性能研究已成为冷喷涂领域的研究热点。每年都有许多相关文献公开发表,研究内容涵盖复合粉末制备、制备材料微观组织结构研究、耐磨性能、耐蚀性能和力学性能研究以及后处理对制备材料组织结构和性能的影响研究等。制备材料的金属基体主要包括铝基、镍基、铜基、钴基等,增强相种类主要有氧化物、碳化物、氮化物、硫化物、金刚石、碳纳米管(CNT)以及非晶和金属间化合物等,应用领域包括功能涂层制备、增材制造以及零部件修复。文中将系统介绍冷喷涂金属基复合涂层及材料的研究进展。

1 复合粉末的制备方法

由于复合粉末的性质对冷喷涂制备涂层及材料的组织结构和性能有强烈的影响,因此,本文将复合粉末的制备单独作为一部分进行详细介绍,并对不同复合粉末制备方法的优缺点,为冷喷涂复合粉末的制备提供参考。

1.1 机械混合法

机械混合就是将两种或两种以上粉末按一定比例在容器中通过机械方式进行混合。机械混合的特点为混合过程中不同相的粉末基本保持其原始形貌,并且两相之间不发生反应。相比于其他混粉方式,机械混合具有操作简单、适用范围广和经济性好等优点。因此,机械混合是冷喷涂制备复合涂层及材料最常用的混粉方式。然而,采用机械混合粉末制备冷喷涂复合涂层及材料也有不可避免的缺点。第一,由于两相的性质通常差异较大,机械混合粉末不同相之间的沉积效率不同,通常导致制备的复合涂层及材料的成分与原始粉末不同。尤其对于陶瓷等硬质相来说,其沉积效率明显低于金属粉末,复合涂层及材料中陶瓷等硬质颗粒的含量通常低于原始喷涂粉末。例如,如图 1 所示,SPENCER K 等^[5]的研究表明,随原始粉末中 Al_2O_3 含量的提高,其相对沉积效率逐渐下降。Jodoin 等^[6]采用机械混合粉末制备了 $SiC/Al-12Si$ 复合涂层,体积分数为 20% 和 60% 的 SiC 复合粉末分别只有 50% 和 33% 沉积在涂层中。Wang J Q 和 Xiong T Y 等^[7]采用体积分数为 42% 的 B_4C 混合粉末制备了 B_4C/Al 复合材料,复合材料中 B_4C 的体积含量约为 23%。第二,冷喷涂沉积过程中,沉积在涂层及材料中的陶瓷等硬质相不可避免地会遭到后续颗粒的撞击而发生破碎,破碎颗粒内部的裂纹将会大大降低制备涂层及材料的性能^[8]。第三,机械混合很难保证复合粉末的均匀性,导致复合涂层及材料中硬质增强相的分布不够均匀。

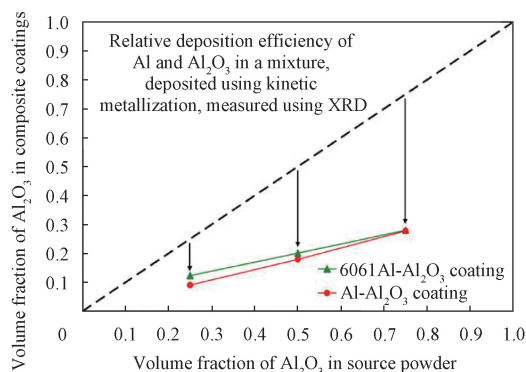


图1 沉积在 Al/Al_2O_3 和 6061 Al/Al_2O_3 复合涂层与原始粉末中 Al_2O_3 含量的对比图^[5]

Fig. 1 Comparison diagram of volume fraction of Al_2O_3 deposited in the coatings and the source powder^[5]

1.2 球磨法

球磨法利用球磨球和球磨罐之间的冲击作用将两种粉末粉碎并进行混合,是仅次于机械混合的常用混粉方式。球磨过程中,增强相粉末破碎并嵌入到基体相粉末内部形成复合粉末。因此,在喷涂过程中不存在机械混合粉末两相沉积效率不同的情况,制备的复合涂层及材料的成分与原始粉末基本相同。例如 KIM J S 等^[9]采用高能球磨 Ti、B、Cu 粉末及自蔓延高温合成的方法制备了 TiB_2 纳米颗粒增强的 Cu 复合粉末,制备复合涂层的 TiB_2 含量与原始粉末相同,体积分数高达 43 vol. %。LUO X T 等^[10]采用高能球磨制备了 cBN/NiCrAl 复合粉末(如图 2 所示),该粉末制备的复合涂层中 cBN 的体积含量达到 40%。

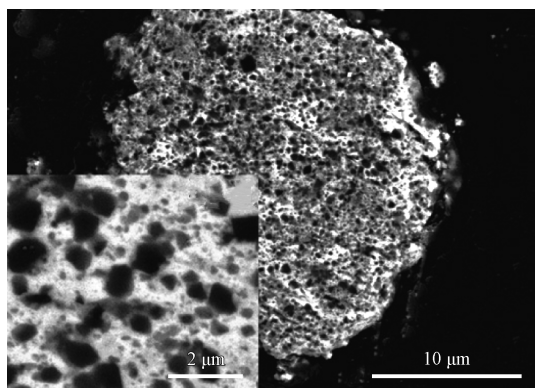


图2 球磨制备的 cBN/NiCrAl 复合粉末截面组织图^[10]

Fig. 2 Cross sectional microstructure of the ball milled cBN/NiCrAl composite powder^[10]

WANG J 等^[11]采用高能球磨和冷喷涂的方法制备了 SnO_2 质量分数为 15% 的 Ag/ SnO_2 复合涂层。PARK C W 等^[12-13]采用高能球磨和冷喷涂制备了 Cu/CNT 和 Cu/CNT/SiC 复合涂层, CNT 在复合涂层中得到了很好的保留。虽然采用球磨法制备的复合涂层及材料中的增强相可以得到更好的保留,并且增强相的分布也更均匀,但其也存在固有的缺点。第一,球磨后形成的复合粉末硬度较高,变形抗力较大,在冷喷涂过程中沉积效率较低,制备的涂层及材料中易存在缺陷。因此,喷涂球磨复合粉末时,需要采用更高的喷涂气体温度和压力,甚至需要采用加速效果更好的 He 气,这无疑大大增加了成本。第二,球磨本身参数众多,工艺复杂,要获得适合冷喷涂特点(形貌、粒度等)的粉末,需要开展大量

实验进行优化。

1.3 包覆法

包覆法利用化学或物理方法在增强相粉末表面沉积一层金属,制备的粉末为典型的核壳结构。外层的软质金属可以起到粘结硬质增强相的作用。因此,采用包覆粉末可以提高冷喷涂复合涂层中硬质增强相的含量,并可以减少硬质相喷涂过程中的破碎^[14]。例如,LI W Y 等^[15]采用水热氢还原法在 Al_2O_3 表面包覆了一层厚度约为 10 μm 的纯 Ni,以该粉末为原料,采用冷喷涂制备了 Al_2O_3 体积分数为 29% 的 Ni/ Al_2O_3 复合涂层。FENG C 等^[16]采用 CVD 方法制备了 B_4C 体积分数分别为 87%、84%、78% 的 Ni 包 B_4C 粉末,其中采用 B_4C 体积分数为 78% 的复合粉末制备涂层中 B_4C 的体积分数高达 44%。YIN S^[17]采用电镀的方法制备了金刚石质量分数为 50% 的 Cu 包覆金刚石复合粉末(如图 3 所示),采用该粉末制备的复合涂层中金刚石的质量分数高达 43%,并且有效地阻止了金刚石颗粒的破碎。然而,包覆法制备粉末本身工艺复杂,制备的复合粉末种类有限,限制了其应用。

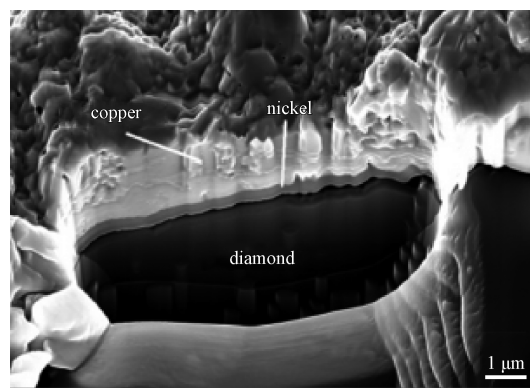


图3 电镀制备的 Cu 包覆金刚石粉末的截面组织图^[17]

Fig. 3 Cross sectional microstructure of the copper-clad diamond powder by electroplating^[17]

1.4 造粒法

造粒是采用一定的方法将细小的粉末团聚为较大尺寸的粉末。该方法解决了冷喷涂过程中基体表面激波导致细小粉末难沉积的问题。例如,BAKSHI S R 等^[18]采用喷雾干燥法制备了质量分数为 5% 的 CNTs 和共晶 Al-Si 复合粉末(如图 4 所示),CNTs 可以很好地沉积在复合涂层内部。AL-HAMDANI K S 等^[19]通过在混粉的

过程中添加聚乙烯醇将细小的 TiC 颗粒黏附在 Al 粉表面形成复合粉末,采用该复合粉末制备涂层中 TiC 的含量是采用机械混合粉末制备涂层的 7 倍。LI C J 等^[20]采用团聚烧结的方法制备了 Co/WC 复合粉末,该复合粉末制备的涂层中 WC

硬质颗粒可以得到很好的保留。ALIDOKHT S A 等^[21]采用团聚烧结的 Ni/WC 与 Ni 的混合粉末为原料,制备的复合涂层中 WC 的含量最高可达 54%。但造粒一般需要专用的设备,除商用的 Co/WC 粉末外,其他类型的造粒粉末研究较少。

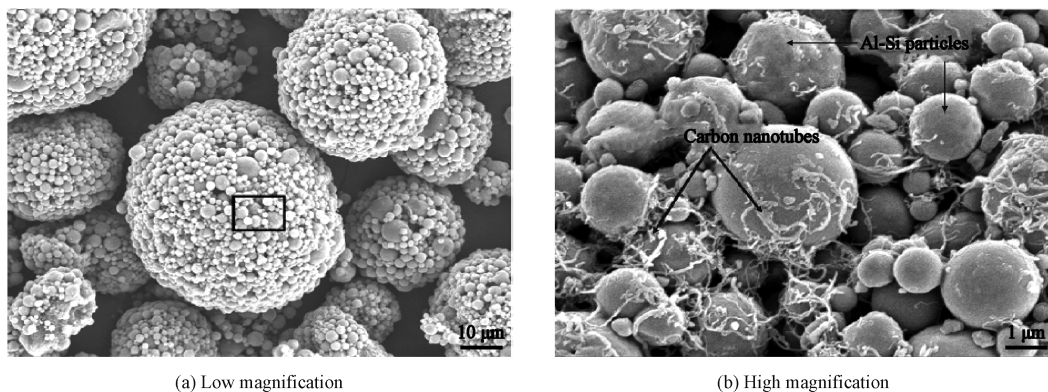


图 4 喷雾干燥法制备的 CNTs/Al-Si 复合粉末形貌^[18]

Fig. 4 Morphologies of spray dried CNTs/Al-Si composite powder^[18]

2 冷喷涂金属基复合涂层及材料

目前,冷喷涂制备的金属基复合涂层及材料种类众多,根据基体相的不同,主要包括铝基、镍基、铜基、钴基以及其他金属基,该部分将分类进行详细介绍。

2.1 铝基复合涂层及材料

铝及铝合金具有轻质、延展性好、耐腐蚀性能高等优点,是冷喷涂研究最广泛的材料。相比于其他金属基复合涂层及材料,采用冷喷涂制备的铝基复合涂层及材料种类最多,增强相包括 Al_2O_3 、SiC、TiN、 B_4C 、 WS_2 、金属间化合物等。大量研究结果表明,添加硬质增强相可显著降低铝基复合涂层及材料的孔隙率,提高其结合力和硬度,进而提高复合涂层材料的抗腐蚀和耐磨性能。其中,增强相的种类、含量、粒度和形貌等都对铝基复合涂层及材料的组织结构和性能有显著影响。

Al_2O_3 是冷喷涂铝基复合涂层及材料最常用的增强相。冷喷涂制备的 Al/ Al_2O_3 复合涂层具有优异的耐蚀耐磨性能。例如,Spencer 等^[5]和 XIONG TY 等^[22]均在镁合金表面制备了 Al/ Al_2O_3 复合涂层,发现 Al_2O_3 的加入可以显著降低复合涂层的孔隙率,增加其结合力和硬度,因

而复合涂层展现出了良好的耐蚀性能。GONG J 等^[23]研究了绝热条件下冷喷涂 Al/ Al_2O_3 复合涂层的耐蚀性能,发现提高 Cl^- 浓度,复合涂层的退化速度明显加快,但 Al_2O_3 的加入并未对涂层的腐蚀性能造成负面影响。SHOCKLEY J M 等^[24]发现随着涂层中 Al_2O_3 含量的提高,界面处的塑性流动和孔洞形成受到抑制,进而提高了涂层的耐磨性能。Zhang M X 等^[25]采用 EBSD 分析了冷喷涂 Al/ Al_2O_3 复合涂层的组织结构,发现 Al_2O_3 的夯实效应导致 Al 颗粒发生更严重的变形,从而提高了涂层的致密性。冷喷涂 Al/ Al_2O_3 复合涂层的硬度、弹性模量、耐磨性能明显高于普通纯 Al 块体,同时发现复合涂层的微观力学性能具有各向异性。LI Z 等^[26]研究了腐蚀后 Al/ Al_2O_3 复合涂层的磨损行为,发现腐蚀破坏了涂层内部颗粒之间的结合,导致磨损体积增大。HEIMANN R B 等^[27]采用冷喷涂在 7075 铝合金表面制备了 Al/ Al_2O_3 复合涂层,发现其具有很低的导热系数和太阳吸收率以及较高的红外发射率和氧化稳定性,在近地轨道的空间材料防护方面具有应用前景。此外, Al_2O_3 主要有球形和不规则两种形貌,许多科研人员研究了 Al_2O_3 形貌对复合涂层的影响。结果均表明,与不规则 Al_2O_3 相比,球形 Al_2O_3 在复合涂层中的保留率明显降低^[28-29],如图 5 所示。FERNANDEZ R

等^[30-31]进一步发现,随着原料粉中 Al_2O_3 含量的增加,球形 Al_2O_3 复合粉末的整体沉积效率呈下降趋势,而不规则 Al_2O_3 复合粉末的整体沉积效率先增加后降低。这主要是因为,相比于球形 Al_2O_3 ,不规则 Al_2O_3 颗粒存在的棱角使其更易嵌入铝基体内部实现沉积。此外,加速气体对不规则 Al_2O_3 颗粒的拖拽系数更高,因而相同条件下不规则 Al_2O_3 颗粒的速度更高,进一步导致不规则 Al_2O_3 嵌入铝基体的可能性增加。上述现象进一步导致不同形貌 Al_2O_3 制备的复合涂层及材料的性能有所差异。例如,Wang J Q 和 Xiong TY 等^[28]发现球形 Al_2O_3 只有少量沉积在材料内部,主要通过反弹起夯实作用,显著提高了制备材料的致密性和拉伸性能;不规则 Al_2O_3 易于沉积在材料内部,大大提高了制备材料的硬度和耐磨性能。LEE H Y 等^[8]发现不规则 Al_2O_3 对基体表面的冲击作用更强,制备的复合涂层的结合力更高。

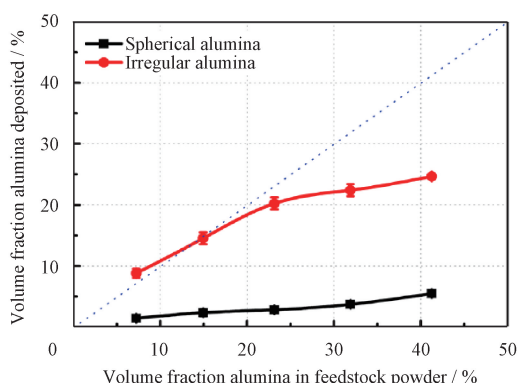


图5 不同形状的 Al_2O_3 沉积在复合涂层与原始粉末中含量的对比图^[28]

Fig. 5 Comparison diagram of volume fraction of Al_2O_3 with different shapes deposited in the coatings and in the source powder^[28]

SiC 同样是冷喷涂铝基复合涂层及材料常用的增强相。部分科研人员研究了 SiC 尺寸对铝基复合涂层及材料的影响。例如,LEE H 等^[32]发现大尺寸 SiC 在涂层和基体界面处形成的撞击坑的尺寸大于小尺寸 SiC 形成的撞击坑的尺寸。YU M 等^[33]发现随 SiC 平均尺寸从 $2\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $67\text{ }\mu\text{m}$,虽然颗粒的速度下降,但动能显著提高,Al5056/SiC 复合涂层的孔隙率逐渐下降,涂层中 SiC 的含量、硬度和结合力逐渐升高。

NORMAND B 等^[34-35]发现, SiC 的尺寸约为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,Al5056/SiC 复合涂层呈现出更高的喷涂效率和耐腐蚀性能。部分科研人员研究了 SiC 含量对铝基复合涂层及材料的影响。例如,LI W Y 等^[36-37]发现喷涂温度会提高沉积效率,但不会影响 Al5056/SiC 涂层中 SiC 的含量。随粉末中 SiC 含量的提高,沉积效率和涂层结合力先增加后降低。而随涂层中 SiC 含量的提高,涂层的硬度升高,磨损量显著降低。Wang J Q 和 Xiong T Y 等^[38]采用冷喷涂制备了厚度为 5 mm 的 Al/SiC 复合材料,系统研究了 SiC 含量和热处理对复合材料力学性能的影响,发现随 SiC 含量的提高,材料的抗弯强度和硬度升高,合适的热处理会促进颗粒界面融合,从而显著提高复合材料的抗弯强度。KUMAR S 等^[39]发现随着 SiC 含量的提高,Al/SiC 复合涂层的硬度、机械强度、弹性模量和耐磨性能均有所提高,热处理可进一步提高复合涂层的耐磨性。KAYALI E S 等^[40]采用冷喷涂制备了 7075Al/SiC 复合涂层,陶瓷颗粒的加入提高了涂层的致密性、硬度和耐磨性。涂层硬度随陶瓷颗粒含量的增加而增加,但对涂层耐磨性能的影响不显著。此外,JEONG C Y 等^[41]采用冷喷涂制备的 Al/SiC 复合涂层大大提高了铸造 A356 铝合金的高周疲劳性能。

此外,部分文献开展了 TiN、 B_4C 、金刚石、 WS_2 和金属间化合物等颗粒增强 Al 基复合涂层及材料的组织结构和性能研究。LI W Y 等^[42-44]研究了冷喷涂 Al5056/TiN 和 Al2319/TiN 复合涂层的组织结构和摩擦性能,发现 Al5056/TiN 复合涂层中 TiN 的含量基本与原始粉末中保持一致,而 Al2319/TiN 复合涂层中 TiN 的体积含量 (38.7%) 高于原始粉末中 TiN 的体积含量 (32.7%)。随 TiN 含量的提高,两种复合涂层的硬度和耐磨性能明显提高,且采用球磨后的 Al5056/TiN 复合粉末为喷涂原料制备的复合涂层的耐磨性能进一步提高。热处理通过消除冷喷涂过程中的加工硬化,大大降低了复合涂层的硬度^[45]。YANDOUZI M 等^[46]对比了球磨和机械混合 Al-12Si/ B_4C 粉末制备的复合涂层的组织结构和力学性能,发现球磨后 B_4C 均匀分布在 Al-12Si 基体相中,该粉末制备的复合涂层中 B_4C 的含量更高,硬度和耐磨性能更好。Osswald

等^[47-48]采用高能球磨和冷喷涂的方法制备了纳米金刚石增强的 Al 基复合涂层,复合涂层的最高硬度和弹性模量分别达到 3.27 和 98.3 GPa。KWON H 等^[49]采用低压冷喷涂制备了金刚石增强的 Al 基复合材料。相比于冷喷涂纯 Al,复合材料的硬度和热导率提高。BU H 等^[50]研究了金属间化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ /Al 复合涂层的微观组织、力学性能和耐腐蚀性能。结果表明,虽然 $Mg_{17}Al_{12}$ 颗粒在涂层中仅保留了一小部分(小于 10%),但加入 $Mg_{17}Al_{12}$ 硬质颗粒可以显著降低涂层的孔隙率,提高涂层的硬度和结合强度,复合涂层可显著提高 AZ91D 镁合金的耐蚀性能。Agarwal 等^[18]采用冷喷涂制备了含有质量分数为 0.5 和 1% 的 CNTs 增强的铝基复合涂层,由于铝硅共晶颗粒与铝基体之间的冲击和剪切而发生断裂,沉积在涂层内部的 CNTs 的长度会缩短,涂层中 CNTs 富集区域的弹性模量大幅提高。Agarwal 等^[51]采用冷喷涂制备了 Al/WS₂ 减摩涂层,热处理后涂层的致密度、硬度和耐磨性能提高。Bacciochini 等^[52]采用冷喷涂制备了 Al/CuO 铝热反应材料。

2.2 镍基复合涂层及材料

镍及其合金具有优良的耐蚀和耐高温性能,同样是冷喷涂制备复合涂层及材料的常用基体相。Li W Y 等^[15, 53]采用 Ni 包覆的 Al_2O_3 粉末制备的复合涂层中 Al_2O_3 的体积分数达到了 29±6 vol. %,硬度为 173±33 HV_{0.2},并表现出了良好的抗高温氧化和高温磨损性能。SIRVENT P 等^[54]采用冷喷涂制备的 Ni/ Al_2O_3 复合涂层在 640 °C 下具有良好的抗高温氧化性能。KOIVULUOTO H 等^[55]采用冷喷涂制备了 Ni-20Cr/ Al_2O_3 复合涂层,同样发现涂层中 Al_2O_3 的含量明显低于粉末中 Al_2O_3 的含量,但 Al_2O_3 的加入提高了涂层的致密度、硬度和耐盐雾腐蚀性能。SINGH H 等^[56-57]采用冷喷涂制备的 Ni-20Cr/TiC 和 Ni-20Cr/TiC/Re 具有良好的抗高温熔盐腐蚀性能。且采用冷喷涂制备的 Ni-20Cr/Cr₃C₂ 复合涂层的硬度、致密性和结合力进一步提高。上述 3 种冷喷涂制备的复合涂层在电厂锅炉的高温防护方面展现出了良好的应用前景。Feng 等^[16]的研究表明,相比于机械混合粉末,采用 Ni 包覆 B_4C 粉末制备的复合涂层中 B_4C 的含量明显提升(如

图 6 所示), B_4C 的破碎现象减轻,复合涂层的硬度提高。SMID I 等^[58-59]以化学镀制备的 Ni 包覆 hBN 复合粉末为原料,采用冷喷涂制备的复合涂层的摩擦系数显著降低,结合强度和耐磨性能显著提高。AZARMI F 等^[60-61]研究了 Ni_3Al 金属间化合物尺寸对冷喷涂 Ni/ Ni_3Al 复合涂层组织结构和力学性能的影响,发现 Ni_3Al 尺寸对其分布和涂层的孔隙率影响不大,但由于小尺寸 Ni_3Al 的速度更高,其在涂层内部的结合更好,制备的复合涂层的弹性模量和硬度更高。相比于粉末冶金,冷喷涂制备的 Ni/ Ni_3Al 复合材料具有更高的强度和致密性。MCDONALD A G 等^[62-63]采用低压冷喷涂制备了 Ni/WC 涂层,发现随粉末中 WC 含量的提高,涂层中 WC 的含量逐渐提高,涂层的孔隙率下降。相比于超音速火焰喷涂和高压冷喷涂制备的复合涂层,尽管采用质量分数为 96% WC+4% Ni 粉末制备的复合涂层硬度较低,但磨损量与上述两种方法制备的复合涂层接近。ALIDOKHT S A 等^[21, 64-66]系统研究了冷喷涂 Ni/WC 复合涂层的组织结构和性能。首先研究了球形 WC 尺寸对颗粒沉积行为的影响,发现涂层中 WC 的含量明显低于原始粉末中 WC 的含量。与大尺寸 WC 相比,小尺寸的 WC 颗粒更易保留在复合涂层内部。虽然涂层中的 WC 颗粒稳定了摩擦系数,降低了滑动摩擦磨损量。但涂层中 WC 的含量较低,无法有效提高其冲蚀性能。随后,他们采用团聚烧结的 Ni/WC 与 Ni 的混合粉末为原料,制备的复合涂层中 WC 的含量显著提高。但团聚烧结粉末中 WC 的颗粒尺寸较小,在滑动摩擦磨损过程中承担的载荷有限,导致该涂

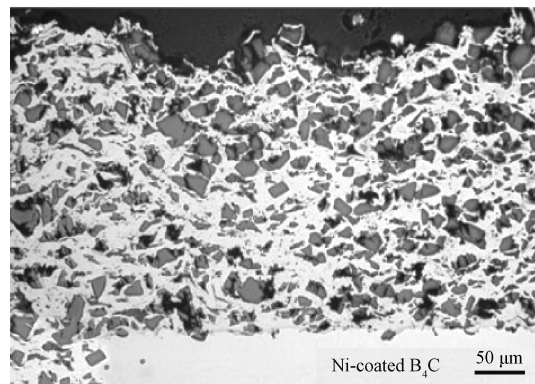


图 6 采用 Ni 包覆 B_4C 粉末制备的涂层截面组织图^[16]

Fig. 6 Cross sectional microstructure of coating using nickel-clad B_4C powders^[16]

层的耐磨性能并不优异。LUO X T 和 LI C J 等^[10, 67-70]采用机械合金化和冷喷涂制备了 cBNp/NiCrAl 纳米复合涂层,含有体积分数 40% cBNp 的复合涂层硬度高达 1175 HV,含有 20% cBNp/NiCrAl 复合涂层的耐磨性能与超音速火焰喷涂的 WC-12Co 涂层相当。750 °C 热处理 5 h 后,复合涂层内部颗粒界面结合增强,耐磨性能进一步提高。而在 cBNp/NiCrAl 纳米复合涂层中引入 20% 大尺寸 BN 颗粒后,制备的双相增强复合涂层的硬度高达 1330 HV,耐磨性能显著提高。

2.3 铜基复合涂层及材料

铜及其合金具有良好的塑性和优异的导电导热性能,但强度和耐磨性能较差。冷喷涂 Cu 基复合涂层及材料的研究主要集中在提高其耐磨性能以及进一步提高其导电导热性能。研究表明,添加硬质陶瓷、非晶、准晶和金刚石等颗粒通常可以增加 Cu 颗粒的变形程度,降低复合涂层的孔隙率,提高 Cu 基复合涂层的硬度、耐磨性能和耐蚀性能等。TRIANTOU K I 等^[71]采用冷喷涂制备了 Cu/Al₂O₃ 复合涂层,Al₂O₃ 的添加提高了涂层的硬度和耐磨性能,并且相比于添加大尺寸 Al₂O₃,添加小尺寸 Al₂O₃ 的复合涂层的耐磨性能更好。WINNICKI M 等^[72]采用冷喷涂制备了 Cu/Al₂O₃ 和 Cu/SiC 复合涂层,发现陶瓷颗粒的加入显著提高了 Cu 颗粒的变形程度,大大降低了复合涂层的孔隙率,从而提高了复合涂层的硬度、电导率和耐蚀性能。Yang J 等^[73]发现 Al₂O₃ 的加入可以提高冷喷涂 Cu/Al₂O₃ 复合涂层的致密度、硬度和结合强度,并且随着 Al₂O₃ 含量的提高,复合涂层在模拟海水中的磨损率逐渐下降。LI XB 等^[74-75]采用冷喷涂制备了 Cu/Cu₂O 防腐防污涂层,发现 Cu₂O 的加入降低了涂层的孔隙率。Cu₂O 和 Cu 形成原电池促进了 Cu 的溶解,从而在涂层表面形成富 Cu²⁺ 的水膜,使涂层表现出防污性能。GUO X 等^[76]制备的 TiN 增强的锡青铜复合涂层的致密度、硬度和耐磨性能明显高于锡青铜涂层。随后,他们研究了冷喷涂 AlCuFeB 准晶/锡青铜复合涂层的微观组织、硬度和耐磨性能,发现准晶颗粒的加入降低了涂层的孔隙率和摩擦系数,提高了涂层的硬度和耐磨性能^[77]。KANG N 等^[78]采用冷喷涂制备了

ZrCuAlNiTi 非晶/Cu 复合材料,发现非晶颗粒通过夯实作用提高了 Cu 颗粒的变形程度,大大降低了制备材料的孔隙率,复合材料的强度、塑性和耐磨性能均高于纯 Cu。CIMENOGLU H 等^[79]研究了粉末中 Al₂Cu 含量对 Al₂Cu/Cu 复合涂层组织结构、导电和耐磨性能的影响,发现添加体积分数为 5% 和 10% 的 Al₂Cu 颗粒可以显著降低涂层孔隙率,提高涂层的电导率和耐磨性能。Dudina 等^[20]采用高能球磨机械合金化和自蔓延高温法合成了纳米 TiB₂ 增强的 Cu 基复合粉末,以该粉末为原料冷喷涂制备的复合涂层很好保留了原始粉末的纳米结构。YIN S 等^[17, 80]采用电镀 Cu 包覆的金刚石粉末制备的复合涂层中金刚石的含量(质量分数)高达 43%,金刚石的增强作用使得复合涂层展现出了优异的耐磨性能。Li H 等^[81]采用冷喷涂制备了 Cu/金刚石复合涂层,发现金刚石的加入显著降低了复合涂层的摩擦系数,从而提高了涂层在模拟海水中的耐摩擦性能,电化学测试进一步表明涂层具有良好的耐蚀性能。

部分学者通过添加 CNT 提高了 Cu 基复合涂层的导热性能。例如,如图 7 所示,CHO S 等^[82]采用球磨和冷喷涂的方法制备的 CNT/Cu 复合涂层的热导率明显高于冷喷涂纯 Cu 涂层的热导率。PARK C W 等^[13, 83]同样采用机械合金化和冷喷涂的方法制备了含有不同体积分数的 CNT 的 Cu/CNT 复合涂层,当热通量 > 20 kW/m² 时,复合涂层的最大传热系数可达普通铜板的 1.74 倍。随后,通过在复合涂层中添加 AlN,制

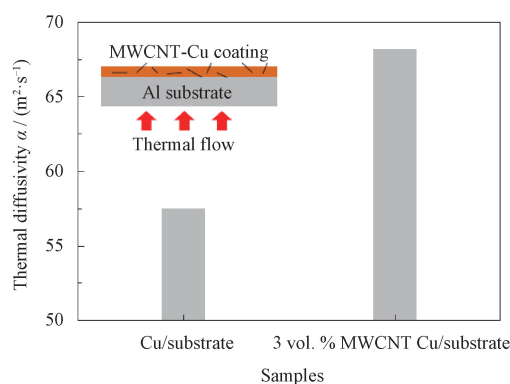


图7 冷喷涂制备的纯 Cu 和 3 vol. % MWCNT/Cu 涂层的热扩散系数对比图^[82]

Fig. 7 Thermal diffusivities coefficient comparison of cold sprayed pure Cu and 3 vol. % MWCNT/Cu coating^[82]

备出的 Cu/CNT/AlN 复合涂层与 R134a 制冷剂的润湿性进一步提高^[84]。此外,添加硫化物和石墨等可以提高 Cu 基复合涂层的减磨性能。ZHANG Y 等^[85-87]通过添加 MS₂ 大大降低了冷喷涂 Cu/MoS₂ 复合涂层的滑动摩擦系数,在涂层中加入 WC 颗粒制备的 Cu/MoS₂/WC 三元复合涂层的耐磨和微动磨损性能进一步提高。YU Y 等^[88]采用冷喷涂制备了具有低摩擦系数的 Cu/Al₂O₃/石墨固体润滑涂层。

2.4 钴基复合涂层及材料

WC-Co 金属基复合涂层的耐磨性能十分优异,可以在严重磨损工况下为基材提供长效保护。目前,该涂层的制备主要依靠高温热喷涂工艺(主要是超音速火焰)来熔化粉末中的 Co 基体相,以实现颗粒间的结合。然而,热喷涂过高的工艺温度往往导致硬质 WC 增强相发生脱碳、相变和氧化,显著降低了制备涂层的力学性能和耐磨性能。近来,大量研究人员开展了冷喷涂 WC-Co 复合涂层研究,发现冷喷涂工作温度低,喷涂过程中粉末不会发生相变、氧化等,制备的 WC-Co 复合涂层硬度和耐磨性能显著提高。KIM H J 等^[89-90]和 COUTO M 等^[91]采用冷喷涂制备了 WC-Co 复合涂层,组织结构分析表明喷涂过程中粉末无相变、脱碳等,复合涂层具有良好的耐磨耐蚀性能。LI C J 等^[20]采用冷喷涂制备的 WC-12Co 复合涂层很好的保留了原始粉末中的纳米结构,其硬度高达 1800 HV_{0.3},与相应的烧结块体材料硬度相当。随后,他们发现多孔的 WC-12Co 粉末变形能力更高,更易在基体上实现沉积^[92-93]。Andrew 等^[94]研究了 WC-17Co 复合粉末中 WC 尺寸对其冷喷涂沉积行为的影响,发现含有微米尺寸 WC 的复合粉末无法有效沉积,而采用含有纳米尺寸 WC 的复合粉末制备的复合涂层的厚度超过 500 μm,涂层硬度高达 HV1000 以上。WANG H T 等^[95]研究了不同比例的纳米和微米 WC-17Co 混合粉末的冷喷涂性能,发现随着粉末中纳米 WC-17Co 比例的提高,涂层的硬度提高,断裂韧性下降。采用纳米和微米 WC-17Co 混合粉末制备的复合涂层的硬度、断裂韧性和耐磨性能可与超音速火焰喷涂制备的 WC-12Co 复合涂层相媲美。LUO X T 和 LI C J 等^[96]以球磨制备的具有核壳结构的 WC-10Co/WC-

75Co 复合粉末为原料,在不牺牲硬度的情况下提高了冷喷涂 WC-Co 复合涂层的断裂韧性。

2.5 其他金属基复合涂层及材料

随着冷喷涂技术和设备的不断发展,冷喷涂可以制备的金属基复合涂层及材料的范围不断扩大。除常用的 Al、Cu、Ni 和 Co 外,研究人员开展了冷喷涂 Ag、Ti、Ta、Mg 以及钢等金属基复合涂层及材料的研究。ROLLAND G 等^[97]系统研究了冷喷涂制备 Ag/SnO₂ 电触头材料的微观组织结构、力学和电性能。相比传统粉末冶金法,冷喷涂制备的 Ag/SnO₂ 电触头材料性能更优。WANG J 等^[11]采用高能球磨和冷喷涂制备了 Ag/SnO₂ 复合涂层,发现退火可提高复合涂层的结合力、致密度和耐电弧侵蚀性能。MOHANTY P 等^[98]和 Dosta 等^[99]均采用冷喷涂制备了 HAP(羟基磷灰石)/Ti 生物活性涂层。ALIDOKHT S A 等^[100]研究了冷喷涂 Ti/TiC 复合涂层的滑动摩擦行为,发现 TiC 的加入不仅可以增强 Ti 基体相,还可以在摩擦过程中促进保护膜的形成。因此,相比纯 Ti 涂层,Ti/TiC 复合涂层展现出了更加优异的耐磨性能。Chromik 等^[101]研究了冷喷涂 Ti6Al4V/TiC 复合涂层的高温摩擦磨损行为,发现低温下 TiC 有助于抵抗材料的局部变形,从而提高了涂层的耐磨性能。而高温下由于氧化的发生,复合涂层的磨损量甚至呈现负增长。Wang J Q 和 Xiong T Y 等^[102]采用冷喷涂制备的 Ta/HAP 复合涂层具有良好的生物活性。WANG Y 等^[103]采用冷喷涂制备了 SiC/AZ91D 镁合金复合涂层,发现涂层中 SiC 的含量低于原始粉末中 SiC 的含量,SiC 的加入显著降低了涂层的孔隙率,提高了涂层的硬度和腐蚀电位。SPENCER K 等^[104]和 Chen J 等^[105]均采用冷喷涂制备了 316 L 不锈钢/SiC 复合涂层,发现 Al₂O₃ 的撞击增加了 316 L 不锈钢粉末的变形程度,从而提高了涂层内部的冶金结合程度,提高了涂层的硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能。

3 后续处理

冷喷涂金属基复合涂层及材料内部通常存在孔洞以及结合不良的颗粒界面等缺陷,导致沉积材料的硬度、耐蚀、耐磨以及力学性能急剧降低。而且,由于高速颗粒的撞击变形,冷喷涂金

属基复合涂层及材料会产生严重的加工硬化和残余压应力,导致沉积材料硬度较高,塑性较差。此外,由于颗粒不同部分的变形程度不同,冷喷涂材料颗粒内部的晶粒分布不均匀。因此,需要采用合适的后续处理方法,通过调控冷喷涂材料的组织结构改善其性能。

3.1 退火处理

退火处理是当前冷喷涂金属基复合涂层及材料后处理的最主要方法。其不仅可以通过原子扩散增强变形颗粒间界面结合,愈合部分孔隙,而且可以通过回复和再结晶消除冷喷涂材料内部的加工硬化和残余应力,从而提高沉积材料性能。

LI W Y 等^[45]研究了真空退火对冷喷涂 Al5356/TiN 复合涂层组织结构和硬度的影响,发现退火不仅可以通过原子扩散增加涂层与基体的结合力,还可以去除涂层中的加工硬化,降低涂层的硬度(如图8所示)。LI C J 等^[20]发现后续退火处理可提高冷喷涂 WC-12Co 复合涂层的韧性。MOHANTY P 等^[98]发现后续退火可以消除 HAP/Ti 复合涂层内部的缺陷和残余应力,退火后复合涂层的硬度、剪切强度和耐蚀性能显著提高。KANG N 等^[78]发现退火处理可以通过再结晶消除加工硬化,退火后的冷喷涂 ZrCuAlNiTi 非晶/Cu 复合材料的塑性大大提高。Wang J Q 和 Xiong T Y 等^[39]发现 200 °C 退火处理通过扩散促进了颗粒间的界面结合,提高了冷喷涂 Al/SiC 复合材料的弯曲强度,继续提高退火温度,

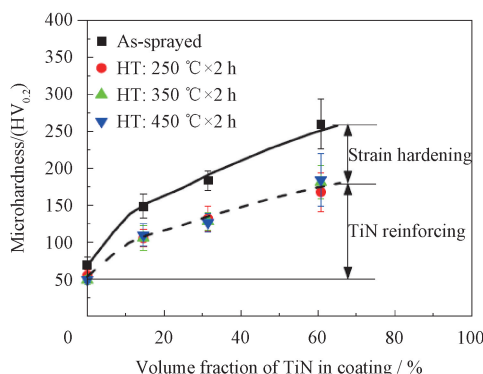


图8 喷涂态和不同温度退火后 Al5356/TiN 复合涂层的硬度^[45]

Fig. 8 Microhardness of as-sprayed composite coating and annealed Al5356/TiN composite coatings at different temperatures^[45]

Al/SiC 复合材料的弯曲强度略有下降,但塑性大幅提高。他们进一步的研究结果表明^[106],退火处理不仅可以促进颗粒间的界面结合,而且可以通过回复和再结晶消除冷喷涂 AlSi₈Cu₃/Al₂O₃ 复合材料的加工硬化,显著提高制备材料的塑性。Clare 等^[107]的研究表明,退火处理可以通过 Al 原子的扩散提高颗粒和颗粒以及涂层和基体间的界面结合,从而降低了冷喷涂 6061Al/TiC 复合涂层的孔隙率,提高了复合涂层的韧性和内聚力,进而提高了复合涂层的耐磨性能。

此外,退火处理可以通过不同元素间的扩散形成新的物相,进而提高涂层与基体以及涂层内部颗粒之间的界面结合。例如,SPENCER K 等^[5]发现后续退火处理可以在冷喷涂 Al/Al₂O₃ 复合涂层与镁合金基体间形成 Mg₁₇Al₁₂ 的金属间化合物层,从而提高了涂层和基体的结合力。WANG H T 和 LI C J 等^[108]研究了退火温度对冷喷涂 Fe(Al)/Al₂O₃ 复合涂层组织结构的影响,发现 600 °C 以上退火处理后 Fe(Al) 固溶体完全转变为 FeAl 金属间化合物,通过退火制备了 Al₂O₃ 增强的 FeAl 金属间化合物涂层。CHEN C 等^[109]采用固溶处理了冷喷涂 WC 增强的马氏体时效钢复合材料,发现在 WC 周围形成了较厚的扩散层,从而增加了复合材料颗粒间的界面结合和内聚力,显著提高了复合材料的拉伸性能。SAHA G C 等^[110]发现退火处理会在冷喷涂 Ti/WC 复合涂层内的 Ti 和 WC 颗粒之间形成 TiC 层,从而提高了 Ti 和 WC 颗粒间的界面结合,提高了制备材料的硬度和耐磨性能。

退火处理可以通过改善冷喷涂金属基复合涂层及材料的组织结构提高其性能,具有工艺简单、成本较低和适用范围广(不仅可以处理涂层,也可以处理块体)的优势,但也存在不可避免的缺点:①退火处理只能消除制备材料内部的部分缺陷;②退火处理通常无法改变冷喷涂金属基复合涂层及材料中增强相的尺寸、形貌和分布。

3.2 激光处理

激光处理通过高功率密度的激光束快速加热基体,从而改善材料的表面状况和组织结构,近来已被用于处理冷喷涂金属基复合涂层及材料。部分学者采用后续激光重熔处理有效地改善了冷喷涂金属基复合涂层及材料的组织结构。

例如, WOLFE D E 等^[111]采用激光重熔处理了冷喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\%\text{NiCr}$ (质量分数) 复合涂层, 虽然部分 Cr_3C_2 在激光处理过程中发生了脱碳相变, 但该处理方法大大提高了复合涂层的致密度和颗粒间的界面结合, 使复合涂层的硬度从 $450 \text{ HV}_{0.5}$ 提高到 $1015 \text{ HV}_{0.5}$ 。FOMIN V M 等^[112-113]发现激光处理可有效提高冷喷涂 $\text{Ni}/\text{B}_4\text{C}$ 复合涂

层颗粒间的界面结合, 并可显著降低复合涂层中 B_4C 的尺寸 (如图 9 所示), 从而大幅提高了复合涂层的硬度。KANG N 等^[114]采用激光重熔处理显著降低了冷喷涂 Al/Si 复合涂层的表面粗糙度, 并且激光处理显著细化了复合涂层的组织结构, 大尺寸的 Si 颗粒熔化后以原子的形式固溶到 Al 基体中。

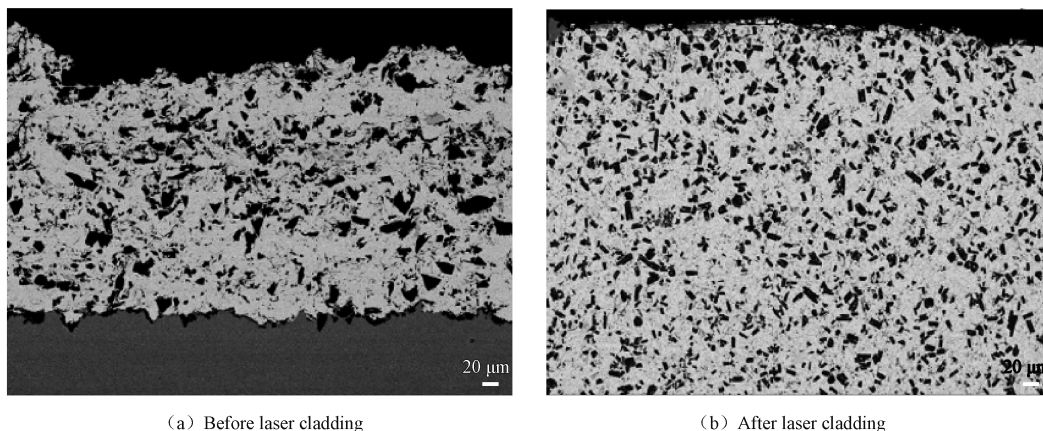


图 9 喷涂态(a)和激光熔覆后(b) $\text{Ni}/\text{B}_4\text{C}$ 复合涂层的截面组织^[113]

Fig. 9 Cross sectional microstructure of $\text{Ni}/\text{B}_4\text{C}$ coating before (a) and after laser cladding(b)^[113]

此外, 部分学者开展了激光原位加热辅助冷喷涂技术制备硬质复合涂层的研究。该技术中激光对喷涂粉末和基材同时进行低于材料熔点的加热软化处理, 既保持了冷喷涂固态沉积低的热输入、低氧化以及高的沉积速度等优点, 同时显著增加了颗粒的变形程度, 提高了制备涂层的性能, 克服了传统冷喷涂难以沉积高硬度材料的缺点^[115]。YAO J 等^[116]采用激光辅助冷喷涂制备了高致密的 $\text{Ni60}/\text{金刚石}$ 复合涂层, 发现随激光加热温度的提高, 涂层中金刚石的含量逐渐升高, 金刚石在喷涂过程中未发生石墨化, 复合涂层展现出了优异的耐磨性能。随后, 他们对比了激光辅助冷喷涂和激光熔覆制备的 $\text{Stellite-6}/\text{WC}$ 复合涂层的组织结构和性能。相比于激光熔覆, 激光辅助冷喷涂制备的涂层致密度更高, 孔洞和裂纹等缺陷更少, 具有更低的裂纹敏感性和更优异的摩擦性能^[117]。

无论是后续激光重熔还是激光辅助加热软化处理, 都可以有效改善冷喷涂金属基复合涂层及材料的组织结构和性能, 是一种极具应用前景的冷喷涂材料后处理方法。然而, 激光处理本身工艺较为复杂, 耦合冷喷涂后工艺复杂性进一步

提高。因此, 要想获得良好的激光处理效果, 需要开展大量优化实验。

3.3 搅拌摩擦焊处理

搅拌摩擦焊利用高速旋转的焊具与工件摩擦产生的热量使被焊材料局部发生软化和塑性流动。研究表明, 搅拌摩擦焊可有效改善冷喷涂金属基复合涂层及材料的组织均匀性。例如, Gerlich 等^[118]发现搅拌摩擦焊可以有效分散冷喷涂 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合涂层中的 Al_2O_3 , 降低 Al_2O_3 颗粒的尺寸及 Al_2O_3 颗粒之间的平均距离, 从而提高了复合涂层的硬度。LI W Y 等^[119]研究了搅拌摩擦焊处理对冷喷涂 $\text{SiCp}/\text{Al5056}$ 复合涂层组织结构和硬度的影响, 发现搅拌摩擦焊处理后的复合涂层无新物相产生, 搅拌摩擦焊有效地细化了 Al5056 晶粒和 SiC 颗粒的尺寸, 并且使 SiC 的分布更加均匀。由于处理后的硬度和摩擦力增大, 复合涂层的摩擦系数升高。他们还采用搅拌摩擦焊处理了冷喷涂 $\text{Al2024}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合涂层, 处理后材料的强度和塑性大幅提高^[120-121]。PEAT T 等^[122-123]采用搅拌摩擦焊处理了多种复合涂层如 $\text{WC-CoCr}/\text{Al5083}$ 、 Cr_3C_2-

NiCr/Al5083、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al5083}$ 、WC-CoCr/AISI316 以及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AISI316}$, 并研究了处理后复合涂层的冲蚀性能。如图 10 所示, 发现搅拌摩擦焊可以细化增强相颗粒尺寸, 改善颗粒分布, 降低增强相颗粒间的平均距离, 从而提高了复合涂层的硬度和耐冲蚀性能。

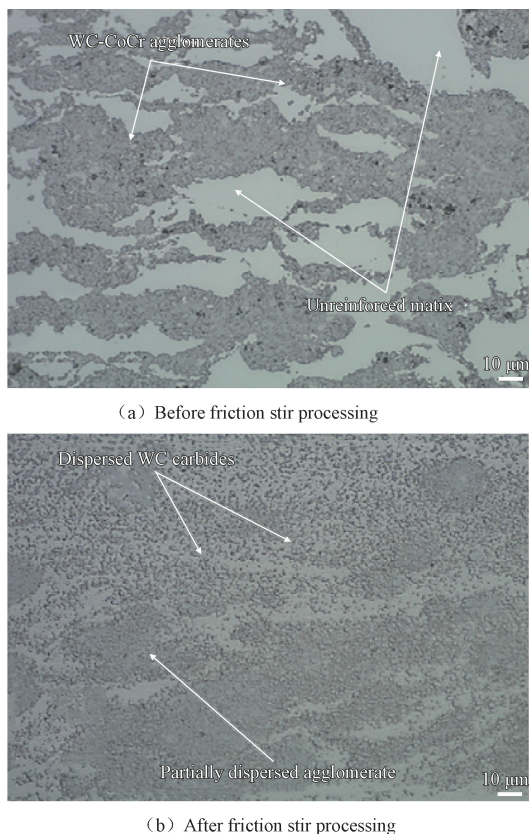


图 10 喷涂态(a)和搅拌摩擦焊处理后(b) WC-CoCr/Al-SI316 不锈钢复合涂层的截面组织^[123]

Fig. 10 Cross sectional microstructure of the WC-CoCr/Al-SI316 coating before (a) and after friction stir processing (b)^[123]

搅拌摩擦焊可有效细化冷喷涂金属基复合涂层及材料的基体相晶粒和增强相尺寸, 进一步提高其性能。然而, 搅拌摩擦焊处理材料的深度有限, 不适合块体材料的后续处理。此外, 由于硬质颗粒的存在, 处理冷喷涂金属基复合涂层及材料时焊具夹持的搅拌针损耗较快。

3.4 热机械处理

除上述几种方法外, 部分学者还采用了热轧制和热压等热机械方法处理冷喷涂金属基复合涂层及材料。Wang J Q 和 Xiong T Y 等^[124]研究

了热轧制处理对冷喷涂 Al/ B_4C 复合材料的影响, 发现热轧制过程中 Al 发生动态回复再结晶, 大大细化了 Al 基体相的晶粒, 且热轧制通过促进原子扩散显著提高了 Al/Al 和 Al/ B_4C 颗粒间的界面结合, 显著降低了材料的孔隙率并改善了 B_4C 颗粒的分布情况。因此, 如图 11 所示, 热轧制后 Al/ B_4C 复合材料的屈服强度、抗拉强度和伸长率显著提高。此后, 他们采用热压和热轧制的复合方法处理了冷喷涂 Al/ B_4C 复合材料^[125]。研究结果表明, 复合处理进一步细化了材料内部的晶粒尺寸, 降低了材料的孔隙率, 促进了 Al/Al 和 Al/ B_4C 颗粒间的冶金结合。因此, 相比于热轧制处理后的复合材料, 热压和热轧制复合处理后的 Al/ B_4C 材料的屈服强度、抗拉强度和伸长率进一步提高。

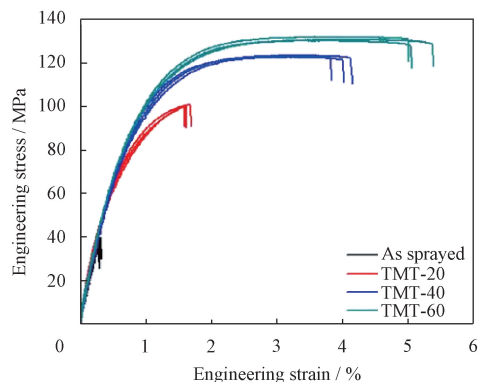


图 11 喷涂态和不同道次热轧处理后 Al/ B_4C 复合材料的拉伸应力应变曲线^[124]

Fig. 11 Engineering stress-strain curves of as-sprayed and hot rolled Al/ B_4C composites^[124]

热轧制和热压等可通过材料的进一步变形细化晶粒并愈合颗粒间的界面、孔洞等缺陷, 从而有效提高冷喷涂金属基复合材料的力学性能。然而, 这些热机械方法通常只适合简单形状部件的处理, 限制了其应用范围。

4 冷喷涂金属基复合涂层及材料的应用

正如前文所述, 金属基复合涂层及材料具有可设计性, 通过改变基体相和增强相的种类和性质, 即可获得所需的性能。因此, 冷喷涂金属基复合涂层及材料的应用领域十分广泛。下面将根据冷喷涂金属基复合涂层及材料的性能和潜

在应用分类进行简要的介绍。

4.1 耐蚀涂层

冷喷涂制备的 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[22]、6061 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[5]、 $\text{Al5056}/\text{SiC}$ ^[37,38]、 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}/\text{Al}$ ^[50]、 $\text{Ni}-20\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[55]等复合涂层的耐腐蚀性能明显高于相应的金属涂层,可以显著提高镁合金和钢等基材的耐腐蚀性能。这主要是由于硬质颗粒的添加会进一步提高金属粉末的变形程度,显著降低了涂层的孔隙率。

4.2 耐磨涂层

在涂层中添加高硬度的颗粒可以显著提高其耐磨性能。因此,冷喷涂制备的 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[23]、 Al/SiC ^[40]、7075 $\text{Al}/\text{B}_4\text{C}$ ^[41]、 $\text{Al5056}/\text{TiN}$ ^[42-44]、 Ni/WC ^[62-63]、 Co/WC ^[91-92]等复合涂层展现出了良好的耐磨性能。

4.3 减摩涂层

添加 WS_2 、 BN 、 MoS_2 和石墨等后,可以显著降低复合涂层的摩擦系数。因此,采用冷喷涂制备的 Al/WS_2 ^[51]、 Ni/hBN ^[58-59]、 Cu/MoS_2 ^[85-87] 和 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{石墨}$ ^[88]等复合涂层展现出了良好的减摩性能。

4.4 耐高温涂层

冷喷涂制备的 Ni 基复合涂层具有良好的抗高温氧化性能。例如 $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[15, 53]、 $\text{Ni}-20\text{Cr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[55]、 $\text{Ni}-20\text{Cr}/\text{TiC}$ 和 $\text{Ni}-20\text{Cr}/\text{TiC}/\text{Re}$ ^[56]等复合涂层在高温防护方面展现出了良好的应用前景。

4.5 导电导热涂层

冷喷涂制备的 Cu 基复合涂层兼具耐磨和高导电导热性能,例如 $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Cu}$ ^[82]、 $\text{Cu}/\text{金刚石}$ ^[17, 80]、 Cu/CNT ^[13, 83]等复合涂层。

4.6 生物医用涂层

Ti 、 Ta 等金属本身具有良好的生物活性,添加 HAP 后制备的 Ti/HAP ^[98] 和 Ta/HAP ^[102]等复合涂层的生物活性进一步提高,在生物医用材料方面具有良好的应用前景。

4.7 增材制造与修复

由于热应力小,制备材料的厚度没有限制,冷喷涂金属基复合材料可以在增材制造和修复

领域获得应用。例如, FARJAM A 等^[126]采用冷喷涂增材制造了可用于热交换器的金字塔形 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 阵列。Wang J Q 和 Xiong T Y 等^[7,38]采用冷喷涂增材制造了 $\text{Al}/\text{B}_4\text{C}$ 和 Al/SiC 复合材料,并研究了其力学性能。CHEN C 等^[109]采用冷喷涂增材制造了 WC 增强的马氏体时效钢复合材料。HUANG C J 等^[127]采用冷喷涂 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 修复了黄铜部件,两者之间的界面结合良好,并且修复部分的磨损量低于黄铜基体。

5 结 语

虽然当前采用冷喷涂制备了多种颗粒增强的金属基复合涂层及材料并研究了其相关性能,但依然存在以下问题:适合冷喷涂技术特点的专用复合粉末种类较少;难以有效控制冷喷涂复合涂层及材料内部增强相的尺寸、含量和分布;对基体相和增强相颗粒间的界面结合关注不够;缺乏适合复合粉末的喷涂工艺参数以及有效改善冷喷涂复合涂层及材料组织结构和性能的后续处理工艺。

因此,为了进一步提高冷喷涂制备金属基复合涂层及材料的性能,拓展其应用范围,需要从以下方面开展相关研究:开发适合冷喷涂技术的专用复合粉末,尤其是球磨和包覆复合粉末;深入研究基体相与增强相颗粒间的界面微观组织结构,系统研究增强相颗粒的种类、尺寸、含量和分布对冷喷涂金属基复合涂层及材料性能的影响;围绕制备材料所需的性能要求,开发合适的后处理手段调控冷喷涂金属基复合涂层及材料的组织结构。

参考文献

- [1] 马国彬, 谭建波. 颗粒增强金属基复合材料的研究现状[J]. 铸造设备与工艺, 2019, (2): 50-54.
MA G B, TAN J B. Research status of particle reinforced metal matrix composites [J]. Foundry Equipment and Technology, 2019, (2): 50-54 (in Chinese).
- [2] 汝娟坚, 贺涵. 陶瓷颗粒增强金属基复合材料的制备方法及其研究进展[J]. 科技创新与应用, 2019, (19): 116-117.
RU J J, HE H. Preparation and research progress of ceramic particle reinforced metal matrix composites [J]. Technology Innovation and Application, 2019, (19): 116-117 (in Chinese).
- [3] ASSADI H, KREYE H, GARTNER F, et al. Cold spraying-A materials perspective [J]. Acta Materialia, 2016, 116:

- 382-407.
- [4] 李文亚,黄春杰,余敏,等.冷喷涂制备复合材料涂层研究现状[J].材料工程,2013,(8):1-10.
- LI W Y, HUANG C J, YU M, et al. State-of-the-art of cold spraying composites coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, (8): 1-10 (in Chinese).
- [5] SPENCER K, FABIJANIC D M, ZHANG M X. The use of Al-Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204(3):336-344.
- [6] SANSOUCY E, MARCOUX P, AJDELSZTAJN L, et al. Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(16): 3988-3996.
- [7] TARIQ N H, GYANSAH L, WANG J Q, et al. Cold spray additive manufacturing: A viable strategy to fabricate thick B₄C/Al composite coatings for neutron shielding applications [J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 339: 224-236.
- [8] LEE H Y, JUNG S H, LEE S Y, et al. Correlation between Al₂O₃ particles and interface of Al-Al₂O₃ coatings by cold spray [J]. Applied Surface Science, 2005, 252(5): 1891-1898.
- [9] KIM J S, KWON Y S, LOMOVSKY O I, et al. Cold spraying of in situ produced TiB₂-Cu nanocomposite powders [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(11-12): 2292-2296.
- [10] LUO X T, YANG G J, LI C J. Multiple strengthening mechanisms of cold-sprayed cBNp/NiCrAl composite coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(20): 4808-4813.
- [11] WANG J, ZHOU X, LU L, et al. Microstructure and properties of Ag/SnO₂ coatings prepared by cold spraying [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 236: 224-229.
- [12] PIALAGO E J, KWON O K, PARK C W. Cold spray deposition of mechanically alloyed ternary Cu-CNT-SiC composite powders[J]. Ceramics International, 2015, 41(5): 6764-6775.
- [13] PIALAGO E J, PARK C W. Cold spray deposition characteristics of mechanically alloyed Cu-CNT composite powders [J]. Applied Surface Science, 2014, 308: 63-74.
- [14] NA H, BAE G, SHIN S, et al. Advanced deposition characteristics of kinetic sprayed bronze/diamond composite by tailoring feedstock properties [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3-4): 463-468.
- [15] LI W Y, ZHANG C, LIAO H, et al. Characterizations of cold-sprayed Nickel-Alumina composite coating with relatively large Nickel-coated Alumina powder [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(19): 4855-4860.
- [16] FENG C, GUIPONT V, JEANDIN M, et al. B₄C/Ni composite coatings prepared by cold spray of blended or CVD-coated powders [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(3-4): 561-570.
- [17] YIN S, XIE Y, CIZEK J, et al. Advanced diamond-reinforced metal matrix composites via cold spray: Properties and deposition mechanism [J]. Composites Part B-Engineering, 2017, 113: 44-54.
- [18] BAKSHI S R, SINGH V, BALANI K, et al. Carbon nanotube reinforced aluminum composite coating via cold spraying [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(21): 5162-5169.
- [19] AL-HAMDANI K S, MURRAY J W, HUSSAIN T, et al. Cold sprayed metal-ceramic coatings using satellited powders [J]. Materials Letters, 2017, 198: 184-187.
- [20] LI C J, YANG G J, GAO P H, et al. Characterization of nanostructured WC-Co deposited by cold spraying [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(5-6): 1011-1020.
- [21] ALIDOKHT S A, VO P, YUE S, et al. Cold Spray deposition of Ni and WC-reinforced Ni matrix composite coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26(8): 1908-1921.
- [22] TAO Y S, XIONG T Y, SUN C, et al. Effect of alpha-Al₂O₃ on the properties of cold sprayed Al/alpha-Al₂O₃ composite coatings on AZ91D magnesium alloy [J]. Applied Surface Science, 2009, 256(1): 261-266.
- [23] BAI X, TANG J, GONG J, et al. Corrosion performance of Al-Al₂O₃ cold sprayed coatings on mild carbon steel pipe under thermal insulation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017, 25(4):533-539.
- [24] SHOCKLEY J M, STRAUSS H W, CHROMIK R R, et al. In situ tribometry of cold-sprayed Al-Al₂O₃ composite coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 215: 350-356.
- [25] WANG Q, BIRBILIS N, HUANG H, et al. Microstructure characterization and nanomechanics of cold-sprayed pure Al and Al-Al₂O₃ composite coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 232: 216-223.
- [26] CONG D, LI Z, HE Q, et al. Wear behavior of corroded Al-Al₂O₃ composite coatings prepared by cold spray [J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 326: 247-254.
- [27] HEIMANN R B, KLEIMAN J I, LITOVSKY E, et al. High-pressure cold gas dynamic (CGD)-sprayed alumina-reinforced aluminum coatings for potential application as space construction material [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 252: 113-119.
- [28] QIU X, TARIQ N H, QI L, et al. Effects of dissimilar alumina particulates on microstructure and properties of cold-sprayed alumina/A380 composite coatings [J]. Acta Metallurgica Sinica-English Letters, 2019, 32(12): 1449-1458.
- [29] SHOCKLEY J M, DESCARTES S, VO P, et al. The influence of Al₂O₃ particle morphology on the coating formation and dry sliding wear behavior of cold sprayed Al-Al₂O₃ composites [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 270: 324-333.
- [30] FERNANDEZ R, JODOIN B. Cold spray aluminum-alumina cermet coatings: Effect of alumina content [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2018, 27(4): 603-623.
- [31] FERNANDEZ R, JODOIN B. Cold spray aluminum-alumina cermet coatings: Effect of alumina morphology [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28(4): 737-755.
- [32] LEE H, KO K. Effect of SiC particle size on cold sprayed Al-SiC composite coatings [J]. Surface Engineering, 2009, 25(8): 606-611.

- [33] YANG T, YU M, CHEN H, et al. Characterisation of cold sprayed Al5056/SiCp coating: Effect of SiC particle size [J]. *Surface Engineering*, 2016, 32(9): 641–649.
- [34] WANG Y, NORMAND B, MARY N, et al. Microstructure and corrosion behavior of cold sprayed SiCp/Al 5056 composite coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 251: 264–275.
- [35] WANG Y, NORMAND B, MARY N, et al. Effects of ceramic particle size on microstructure and the corrosion behavior of cold sprayed SiCp/Al5056 composite coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 315: 314–325.
- [36] 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 SiCp/Al 5056 composite coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 220: 102–106.
- [37] YU M, SUO X K, LI W Y, et al. Microstructure, mechanical property and wear performance of cold sprayed Al5056/SiCp composite coatings: Effect of reinforcement content [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 289: 188–196.
- [38] GYANSAH L, TARIQ N H, TANG J R, et al. Cold spraying SiC/Al metal matrix composites: Effects of SiC contents and heat treatment on microstructure, thermophysical and flexural properties [J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(2): 1–10.
- [39] 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 & Coatings Technology*, 2017, 318: 62–71.
- [40] MEYDANOGLU O, JODOIN B, KAYALI E S. Microstructure, mechanical properties and corrosion performance of 7075 Al matrix ceramic particle reinforced composite coatings produced by the cold gas dynamic spraying process [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 235: 108–116.
- [41] JEONG C Y, HA S. Fatigue properties of Al-Si casting alloy with cold sprayed Al/SiC coating [J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2008, 21(1–4): 235–238.
- [42] LI W Y, ZHANG G, GUO X, et al. Characterizations of cold-sprayed TiN particle-reinforced Al alloy-based composites – from structures to tribological behaviour [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2007, 9(7): 577–583.
- [43] 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.
- [44] LI W Y, ZHANG G, ZHANG C, et al. Effect of ball milling of feedstock powder on microstructure and properties of TiN particle-reinforced Al alloy-based composites fabricated by cold spraying [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, 17(3): 316–322.
- [45] LI W Y, YANG C, LIAO H L. Effect of vacuum heat treatment on microstructure and microhardness of cold-sprayed TiN particle-reinforced Al alloy-based composites [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(1): 388–394.
- [46] YANDOUZI M, BOTTGER A J, HENDRIKX R A, et al. Microstructure and mechanical properties of B₄C reinforced Al-based matrix composite coatings deposited by CGDS and PGDS processes [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205(7): 2234–2346.
- [47] WOO D J, SNEED B, PEERALLY F, et al. Synthesis of nanodiamond-reinforced aluminum metal composite powders and coatings using high-energy ball milling and cold spray [J]. *Carbon*, 2013, 63: 404–415.
- [48] WOO D J, HEER F C, BREWER L N, et al. Synthesis of nanodiamond-reinforced aluminum metal matrix composites using cold-spray deposition [J]. *Carbon*, 2015, 86: 15–25.
- [49] KWON H, CHO S, KAWASAKI A. Diamond-reinforced metal matrix bulk materials fabricated by a low-pressure cold-spray process [J]. *Materials Transactions*, 2015, 56(1): 108–112.
- [50] BU H, YANDOUZI M, LU C, et al. Cold spray blended Al+Mg₁₇Al₁₂ coating for corrosion protection of AZ91D magnesium alloy [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 207: 155–162.
- [51] LOGANATHAN A, RENGIFO S, HERNANDEZ A F, et al. Effect of 2D WS₂ addition on cold-sprayed aluminum coating [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2017, 26(7): 1585–1597.
- [52] BACCIOCHINI A, RADULESCU M I, YANDOUZI M, et al. Reactive structural materials consolidated by cold spray: Al-CuO thermite [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 226: 60–67.
- [53] LI W Y, HUANG C J, YU M, et al. Investigation of high temperature oxidation behavior and tribological performance on cold sprayed nickel-alumina composite coating [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 239: 95–101.
- [54] SIRVENT P, CRUZ D, MUNEZ C J, et al. Microstructure and high-temperature oxidation behavior of cold gas-sprayed Ni-Al₂O₃ coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(4): 694–703.
- [55] KOIVULUOTO H, VUORISTO P. Effect of ceramic particles on properties of cold-sprayed Ni-20Cr+Al₂O₃ coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, 18(4): 555–562.
- [56] SINGH H, BALA N, KAUR N, et al. Effect of additions of TiC and Re on high temperature corrosion performance of cold sprayed Ni-20Cr coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 280: 50–63.
- [57] SINGH H, SIDHU T S, KARTHIKEYAN J, et al. Development and characterization of Cr₃C₂-NiCr coated superalloy by novel cold spray process [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, 31(11): 1476–1482.
- [58] NESHASTEHRIZ M, SMID I, SEGALL A E. In-Situ agglomeration and de-agglomeration by milling of nano-engineered lubricant particulate composites for cold spray deposition [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23(7): 1191–1198.
- [59] NESHASTEHRIZ M, SMID I, SEGALL A E, et al. On the bonding mechanism in cold spray of deformable hex-BN-Ni clusters [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(5): 982–991.
- [60] CHANDANAYAKA T, AZARMI F. Investigation on the effect of reinforcement particle size on the mechanical properties of the cold sprayed Ni-Ni₃Al composites [J]. *Journal of*

- Materials Engineering and Performance, 2014, 23(5): 1815–1822.
- [61] AZARMI F, TANGPONG X W, CHANDANAYAKA T. Investigation on mechanical properties of cold sprayed Ni-Ni₃Al composites [J]. Surface Engineering, 2015, 31(11): 832–839.
- [62] MELENDEZ N M, MCDONALD A G. Development of WC-based metal matrix composite coatings using low-pressure cold gas dynamic spraying [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 214: 101–109.
- [63] MELENDEZ N M, NARULKAR V V, FISHER G A, et al. Effect of reinforcing particles on the wear rate of low-pressure cold-sprayed WC-based MMC coatings [J]. Wear, 2013, 306(1–2): 185–195.
- [64] ALIDOKHT S A, MANIMUNDA P, VO P, et al. Cold spray deposition of a Ni-WC composite coating and its dry sliding wear behavior [J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 308: 424–434.
- [65] ALIDOKHT S A, PHUONG V, YUE S, et al. Erosive wear behavior of cold-sprayed Ni-WC composite coating [J]. Wear, 2017, 376: 566–577.
- [66] ALIDOKHT S A, YUE S, CHROMIK R R. Effect of WC morphology on dry sliding wear behavior of cold-sprayed Ni-WC composite coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 357: 849–63.
- [67] LUO X T, LI C J. Thermal Stability of Microstructure and hardness of cold-sprayed cBN/NiCrAl nanocomposite coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(3–4): 578–585.
- [68] LUO X T, YANG E J, SHANG F L, et al. Microstructure, mechanical properties, and two-body abrasive wear behavior of cold-sprayed 20 vol. % Cubic BN-NiCrAl nanocomposite coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(7): 1181–1190.
- [69] LUO X T, LI C J. Large sized cubic BN reinforced nanocomposite with improved abrasive wear resistance deposited by cold spray [J]. Materials & Design. 2015, 83: 249–256.
- [70] LUO X T, LI C J. Tailoring the composite interface at lower temperature by the nanoscale interfacial active layer formed in cold sprayed cBN/NiCrAl nanocomposite [J]. Materials & Design. 2018, 140: 387–399.
- [71] TRIANTOU K I, PANTELIS D I, GUIPONT V, et al. Microstructure and tribological behavior of copper and composite copper plus alumina cold sprayed coatings for various alumina contents [J]. Wear, 2015, 336: 96–107.
- [72] WINNICKI M, BASZCZUK A, JASIORSKI M, et al. Corrosion resistance of copper coatings deposited by cold spraying [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26(8): 1935–1946.
- [73] CHEN W, YU Y, ANH K T, et al. Microstructure, mechanical properties and tribological behavior of the low-pressure cold sprayed tin bronze-alumina coating in artificial seawater [J]. Tribology International, 2020, 142.
- [74] DING R, LI X, WANG J, et al. Electrochemical corrosion kinetics of cold spray copper composite coatings in a high potential region [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2018, 50(11): 784–803.
- [75] RUI D, LI X, JIA W, et al. Releasing kinetics of dissolved copper and antifouling mechanism of cold sprayed copper composite coatings for submarine screen doors of ships [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 763: 525–537.
- [76] GUO X, ZHANG G, LI W, et al. Investigation of the microstructure and tribological behavior of cold-sprayed tin-bronze-based composite coatings [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(6): 3822–3828.
- [77] GUO X, CHEN J, YU H, et al. A study on the microstructure and tribological behavior of cold-sprayed metal matrix composites reinforced by particulate quasicrystal [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 268: 94–98.
- [78] KANG N, CODDET P, LIAO H, et al. The effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of cold spray Zr base metal glass/Cu composite [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 280: 64–71.
- [79] TAZEGUL O, DYLMISHI V, CIMENOGLU H. Copper matrix composite coatings produced by cold spraying process for electrical applications [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, 16(3): 344–350.
- [80] ALDWELL B, YIN S, MCDONNELL K A, et al. A novel method for metal-diamond composite coating deposition with cold spray and formation mechanism [J]. Scripta Materialia, 2016, 115: 10–13.
- [81] WANG Z, CHEN X, GONG Y, et al. Tribocorrosion behaviours of cold-sprayed diamond-Cu composite coatings in artificial sea water [J]. Surface Engineering, 2018, 34(5): 392–398.
- [82] CHO S, TAKAGI K, KWON H, et al. Multi-walled carbon nanotube-reinforced copper nanocomposite coating fabricated by low-pressure cold spray process [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(16): 3488–3494.
- [83] PIALAGO E T, KWON O K, PARK C W. Nucleate boiling heat transfer of R134a on cold sprayed CNT-Cu composite coatings [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 56(1–2): 112–119.
- [84] PIALAGO E T, KWON O K, KIM M S, et al. Ternary Cu-CNT-AlN composite coatings consolidated by cold spray deposition of mechanically alloyed powders [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 199–209.
- [85] ZHANG Y, SHOCKLEY J M, VO P, et al. Tribological behavior of a cold-sprayed cu-mos₂ composite coating during Dry Sliding Wear [J]. Tribology Letters, 2016, 62(1): 1–12.
- [86] ZHANG Y, EPSHTEYN Y, CHROMIK R R. Dry sliding wear behaviour of cold-sprayed Cu-MoS₂ and Cu-MoS₂-WC composite coatings: The influence of WC [J]. Tribology International, 2018, 123: 296–306.
- [87] ZHANG Y, DESCARTES S, CHROMIK R R. Influence of WC on third body behaviour during fretting of cold-sprayed Cu-MoS₂-WC composites [J]. Tribology International, 2019, 134: 15–25.
- [88] CHEN W, YU Y, CHENG J, et al. Microstructure, Mechanical properties and dry sliding wear behavior of Cu-Al₂O₃-Graphite solid-lubricating coatings deposited by low-pressure cold spraying [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2018, 27(8): 1652–1663.

- [89] KIM H J, LEE C H, HWANG S Y. Superhard nano WC-12%Co coating by cold spray deposition [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2005, 391(1-2): 243-248.
- [90] KIM H J, LEE C H, HWANG S Y. Fabrication of WC-Co coatings by cold spray deposition [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 191(2-3): 335-340.
- [91] COUTO M, DOSTA S, TORRELL M, et al. Cold spray deposition of WC-17 and 12Co cermets onto aluminum [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 235: 54-61.
- [92] GAO P H, LI C J, YANG G J, et al. Influence of substrate hardness on deposition behavior of single porous WC-12Co particle in cold spraying [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 203(3-4): 384-390.
- [93] GAO P H, LI Y G, LI C J, et al. Influence of powder porous structure on the deposition behavior of cold-sprayed WC-12Co coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, 17(5-6): 742-749.
- [94] ANG A M, BERNDT C C, CHEANG P. Deposition effects of WC particle size on cold sprayed WC-Co coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205(10): 3260-3267.
- [95] WANG H T, CHEN X, BAI X B, et al. Microstructure and properties of cold sprayed multimodal WC-17Co deposits [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2014, 45: 196-203.
- [96] LUO X T, LI C X, SHANG F L, et al. WC-Co composite coating deposited by cold spraying of a core-shell-structured WC-Co powder [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, 24(1-2): 100-107.
- [97] ROLLAND G, SALLAMAND P, GUIPONT V, et al. Damage study of cold-sprayed composite materials for application to electrical contacts [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, 21(5): 758-772.
- [98] ZHOU X, MOHANTY P. Electrochemical behavior of cold sprayed hydroxyapatite/titanium composite in Hanks' solution [J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 65: 134-140.
- [99] GUILLEM-MARTI J, CINCA N, PUNSET M, et al. Porous titanium-hydroxyapatite composite coating obtained on titanium by cold gas spray with high bond strength for biomedical applications [J]. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 2019, 180: 245-253.
- [100] ALIDOKHT S A, MUNAGALA V V, CHROMIK R R. Role of third bodies in friction and wear of cold-sprayed Ti and Ti-TiC composite coatings [J]. *Tribology Letters*, 2017, 65: 1-15.
- [101] MUNAGALA V V, TORGERSO N T B, SCHARF T W, et al. High temperature friction and wear behavior of cold-sprayed Ti6Al4V and Ti6Al4V-TiC composite coatings [J]. *Wear*, 2019, 426: 357-69.
- [102] TANG J R, ZHAO Z P, LIU H, et al. A novel bioactive Ta/hydroxyapatite composite coating fabricated by cold spraying [J]. *Materials Letters*, 2019, 250: 197-201.
- [103] WANG Y, NORMAND B, SUO X, et al. Cold-sprayed AZ91D coating and SiC/AZ91D composite coatings [J]. *Coatings*, 2018, 8: 1-13.
- [104] SPENCER K, FABIJANIC D M, ZHANG M X. The influence of Al₂O₃ reinforcement on the properties of stainless steel cold spray coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 206(14): 3275-3282.
- [105] CHEN J, MA B, LIU G, et al. Wear and corrosion properties of 316L-SiC composite coating deposited by cold spray on magnesium alloy [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(6): 1381-1392.
- [106] QIU X, TARIQ N H, QI L, et al. A hybrid approach to improve microstructure and mechanical properties of cold spray additively manufactured A380 aluminum composites [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2020, 772.
- [107] AL-HAMDANI K S, MURRAY J W, HUSSAIN T, et al. Heat-treatment and mechanical properties of cold-sprayed high strength Al alloys from satellited feedstocks [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 374: 21-31.
- [108] WANG H T, LI C J, YANG G J, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and property of cold-sprayed nanostructured FeAl/Al₂O₃ intermetallic composite coating [J]. *Vacuum*, 2008, 83(1): 146-152.
- [109] CHEN C, XIE Y, YAN X, et al. Cold sprayed WC reinforced maraging steel 300 composites; Microstructure characterization and mechanical properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 785: 499-511.
- [110] TANG J, SAHA G C, RICHTER P, et al. Effects of post-spray heat treatment on hardness and wear properties of Ti-WC high-pressure cold spray coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, 27(7): 1153-1164.
- [111] WOLFE D E, EDEN T J, POTTER J K, et al. Investigation and characterization of Cr₃C₂-based wear-resistant coatings applied by the cold spray process [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, 15(3): 400-412.
- [112] FOMIN V M, GOLYSHEV A A, KOSAREV V F, et al. Creation of heterogeneous materials on the basis of B₄C and Ni powders by the method of cold spraying with subsequent layer-by-layer laser treatment [J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, 58(5): 947-955.
- [113] FOMIN V M, GOLYSHEV A A, Malikov A G, et al. Optimization of laser cladding of cold spray coatings with B₄C and Ni powders [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 020054.
- [114] KANG N, VERDY C, CODDET P, et al. Effects of laser remelting process on the microstructure, roughness and microhardness of in-situ cold sprayed hypoeutectic Al-Si coating [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 318: 355-359.
- [115] BRAY M, COCKBURN A, O'NEILL W. The laser-assisted cold spray process and deposit characterisation [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 203(19): 2851-2857.
- [116] YAO J, YANG L, LI B, et al. 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.
- [117] LI B, JIN Y, YAO J, et al. Solid-state fabrication of WCp-reinforced Stellite-6 composite coatings with supersonic laser deposition [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 321: 386-396.
- [118] HODDER K J, IZADI H, MCDONALD A G, et al. Fabri-

- cation of aluminum-alumina metal matrix composites via cold gas dynamic spraying at low pressure followed by friction stir processing [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2012, 556: 114–121.
- [119] HUANG C J, LI W Y, ZHANG Z, et al. Modification of a cold sprayed SiCp/Al5056 composite coating by friction stir processing [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 296: 69–75.
- [120] YANG K, LI W Y, HUANG C J, et al. Optimization of cold-sprayed AA2024/Al₂O₃ metal matrix composites via friction stir processing: Effect of rotation speeds [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(11): 2167–2177.
- [121] YANG K, LI W Y, NIU P, et al. Cold sprayed AA2024/Al₂O₃ 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.
- [122] PEAT T, GALLOWAY A, TOUMPIS A, et al. The erosion performance of cold spray deposited metal matrix composite coatings with subsequent friction stir processing [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 396: 1635–1648.
- [123] PEAT T, GALLOWAY A, TOUMPIS A, et al. Enhanced erosion performance of cold spray co-deposited AISI316 MMCs modified by friction stir processing [J]. *Materials & Design*, 2017, 120: 22–35.
- [124] TARIQ N H, GYANSAH L, QIU X, et al. Thermo-mechanical post-treatment: A strategic approach to improve microstructure and mechanical properties of cold spray additively manufactured composites [J]. *Materials & Design*, 2018, 156: 287–299.
- [125] TARIQ N H, GYANSAH L, QIU X, et al. Achieving strength-ductility synergy in cold spray additively manufactured Al/B₄C composites through a hybrid post-deposition treatment [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(6): 1053–1063.
- [126] FARJAM A, CORMIER Y, DUPUIS P, et al. Influence of alumina addition to aluminum fins for compact heat exchangers produced by cold spray additive manufacturing [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, 24(7): 1256–1268.
- [127] HUANG C J, WU H J, XIE Y C, et al. Advanced brass-based composites via cold-spray additive-manufacturing and its potential in component repairing [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 371: 211–223.