

# 原位金属间化合物对冷喷涂 Al-Ni 增材沉积体力学性能的影响

李旭<sup>1a,1b</sup>, 王强<sup>1a,1b</sup>, 杨驹<sup>1a</sup>, 牛文娟<sup>1a</sup>,  
Ming-xing ZHANG<sup>2</sup>, 李洋洋<sup>1a</sup>, 钱润玲<sup>1a</sup>, 韩瑜<sup>1a</sup>

(1.西安建筑科技大学 a.冶金工程学院 b.陕西省冶金工程技术研究中心, 西安 710055;

2.Materials Engineering, School of Mechanical and Mining Engineering,

The University of Queensland, Brisbane, QLD 4072, Australia)

**摘要:**目的 研究 Ni 元素的添加及热处理工艺对冷喷涂 Al-Ni 沉积体的微观组织结构、相组成及力学性能的影响。方法 预先采用冷喷涂技术制备 Al 沉积体、Al-25%Ni (以下称为 AlNi25) 沉积体, 再将制得的沉积体放入具有氩气气氛的管式加热炉中进行热处理。采用光学显微镜、扫描电子显微镜、显微硬度仪、X 射线衍射仪与万能拉伸试验机, 对试样显微组织、物相组成及力学性能进行测试分析。结果 经过热处理的 AlNi25 沉积体的物相主要为 Al、Al<sub>3</sub>Ni。由于热处理过程诱发了柯肯达尔效应, AlNi25 沉积体的孔隙率由喷涂态的 1.4%增加到热处理态的 2.5%。喷涂态 Al 沉积体的硬度为 44.2HV<sub>0.2</sub>, 在 500 °C 下对沉积体进行热处理后, 由于发生回复与再结晶, 硬度值降为 26.72 HV<sub>0.2</sub>。喷涂态 AlNi25 沉积体的硬度为 49.2HV<sub>0.2</sub>, 经过热处理后, 生成的 Al<sub>3</sub>Ni 金属间化合物对沉积体的强化效应与热处理的软化效应相当, 导致最终热处理态 AlNi25 沉积体的硬度为 50.5HV<sub>0.2</sub>, 与喷涂态 AlNi25 沉积体硬度值差别较小。喷涂态 Al 沉积体、AlNi25 沉积体的抗拉强度分别为 57、65 MPa, 经过热处理后, 沉积体内颗粒间的原有界面消失, 热处理态的 Al 沉积体、AlNi25 沉积体的抗拉强度分别为 64.7、107 MPa。同时, 经过热处理后, 两种沉积体的塑性变形能力得到了有效提升。未热处理时, 两种沉积体基本没有塑性; 热处理后, Al 沉积体、AlNi25 沉积体的塑性得到有效提升, 塑性应变分别为 3.7%、0.97%。结论 对冷喷涂 AlNi25 沉积体进行热处理, 原位生成了 Al<sub>3</sub>Ni 金属间化合物, 有效提高了沉积体的硬度、抗拉强度以及塑性变形能力。

**关键词:** 冷喷涂; 热处理; 金属间化合物; 硬度; 抗拉强度

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)10-0294-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.034

收稿日期: 2020-05-26; 修订日期: 2020-09-24

Received: 2020-05-26; Revised: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51801143); 陕西省自然科学基金 (2017JZ012); 陕西省教育厅专项 (18JK0445)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51801143), Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2017JZ012) and Special Research Project of Education Department of Shaanxi Province (18JK0445)

作者简介: 李旭 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为冷喷涂技术及应用。

Biography: LI Xu (1996—), Male, Master, Research focus: development and application of cold spraying technology.

通讯作者: 王强 (1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为冷喷涂技术及应用、轻合金快速增材制造。邮箱: qiang.wang@xauat.edu.cn

Corresponding author: WANG Qiang (1984—), Male, Doctor, Professor, Research focus: cold spraying technology development and application and light alloy rapid additive manufacturing. E-mail: qiang.wang@xauat.edu.cn

引文格式: 李旭, 王强, 杨驹, 等. 原位金属间化合物对冷喷涂 Al-Ni 增材沉积体力学性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 294-302.

LI Xu, WANG Qiang, YANG Ju, et al. Effect of in-situ intermetallic compounds on mechanical properties of Al-Ni deposits by cold spraying[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 294-302.

## Effect of In-situ Intermetallic Compounds on Mechanical Properties of Al-Ni Deposits by Cold Spraying

LI Xu<sup>1a,1b</sup>, WANG Qiang<sup>1a,1b</sup>, YANG Ju<sup>1a</sup>, NIU Wen-juan<sup>1a</sup>,  
Ming-xing ZHANG<sup>2</sup>, LI Yang-yang<sup>1a</sup>, QIAN Run-ling<sup>1a</sup>, HAN Yu<sup>1a</sup>

(1.a.School of Metallurgical Engineering, b.Shaanxi Research Center of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2.Materials Engineering, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, Brisbane, QLD 4072, Australia)

**ABSTRACT:** To study the effects of Ni element addition and heat treatment on the microstructure, phase composition and mechanical properties of cold spraying Al-Ni sediment. Al and Al-25%Ni (hereinafter referred to as AlNi25) deposition were prepared by cold spraying technology in advance, and then the prepared deposition was put into a tubular heating furnace with argon atmosphere for heat treatment. Optical microscope, scanning electron microscope, microhardness tester, X-ray diffractometer and universal tensile testing machine were used to test and analyze the microstructure, phase composition and mechanical properties of the sample. The phase of AlNi25 deposition after heat treatment is mainly Al and Al<sub>3</sub>Ni. The porosity of the AlNi25 deposit increased from 1.4% in the spray state to 2.5% in the heat treatment state due to the kekendall effect induced by the heat treatment. The hardness of sprayed Al deposition is 44.2HV<sub>0.2</sub>. After 500 °C heat treatment, due to the recovery and recrystallization, the hardness value drops to 26.72HV<sub>0.2</sub>. The hardness of the sprayed AlNi25 deposition is 49.2HV<sub>0.2</sub>. After the heat treatment, the strengthening effect of the generated Al<sub>3</sub>Ni intermetallic compounds on the deposit is equivalent to the softening effect of the heat treatment, resulting in the hardness of the final heat-treated AlNi25 deposit is 50.5HV<sub>0.2</sub>, which is slightly different from the sprayed AlNi25 deposition. After heat treatment, the original interface between particles in the deposited body disappears, and the tensile strength of Al deposition and AlNi25 deposition body in heat treatment state is 64.7 MPa and 107 MPa respectively. At the same time, the plastic deformation capacity of the two types of sedimentary bodies was effectively improved. Before heat treatment, the two types of sedimentary bodies had no plasticity. After heat treatment, the plasticity of Al sedimentary body and AlNi25 sedimentary body was effectively improved, and the plastic strain was 3.7% and 0.97% respectively. Al<sub>3</sub>Ni intermetallic compounds were generated in situ by heat treatment of cold spraying AlNi25 deposition, which effectively improved the hardness, tensile strength and plastic deformation capacity of the deposition.

**KEY WORDS:** cold spraying; heat treatment; intermetallic compound; hardness; tensile strength

相对于传统的材料去除-切削加工成形技术，增材制造（又称为 3D 打印）是采用材料逐渐累加的方法制造实体零件的技术，可以有效减少材料的浪费<sup>[1]</sup>。根据所采用能量源和成形材料的不同，典型的金属增材制造主要包括激光选区熔化（Selective Laser Melting, SLM）<sup>[2]</sup>、激光金属沉积（Laser Metal Deposition, LMD）<sup>[3]</sup>、电子束选区熔化（Electron Beam Melting, EBM）<sup>[4]</sup>、电子束熔丝沉积成形（Electron Beam Freeform Fabrication, EBFF）<sup>[5]</sup>等技术。目前，增材制造已广泛应用于 Ti、Fe 或 Ni 及其合金零件的生产制造中。然而，由于铝合金熔点低、化学活性高，采用上述激光或电子束等熔融方法进行铝合金零部件制备时，存在激光吸收率低、金属烧损严重等问题<sup>[6-10]</sup>。

冷喷涂技术（Cold Spray）以低温固态沉积为特点，其过程温度远低于原始粉末材料的熔化温度，可以有效避免高温导致材料氧化、相变和烧损等不利影响<sup>[11]</sup>。冷喷涂的技术原理是利用高压氮气（N<sub>2</sub>）或氦气（He）为动力源，通过超音速喷管（Supersonic

Nozzle）将粉末粒子加速到 500~1200 m/s 的速度范围，颗粒在高速撞击下产生剧烈塑性变形，并实现材料的沉积。高的颗粒速度所带来的动能，可以使沉积层获得较为致密的内部组织<sup>[12]</sup>，且非常适合熔点低、易氧化的铝合金增材制造<sup>[13-14]</sup>。

在冷喷涂沉积成形过程中，颗粒的剧烈塑性变形会使沉积体内部产生残余应力和形变硬化效应<sup>[15-17]</sup>，由此导致沉积体的塑性较差，往往无法满足零部件对延展性的使役要求<sup>[18]</sup>。为了改善沉积体的塑性，提升效果显著的方法是对沉积体进行后续热处理（post-annealing）<sup>[19]</sup>。但是，热处理通常会降低增材体的抗拉强度。研究表明<sup>[20]</sup>，在 Al 粉中添加适量的 Ni 后，通过原位生成的金属间化合物可有效提升 Al 沉积体的耐磨损性能和硬度。不过，Ni 元素的添加及热处理原位生成金属间化合物对 Al-Ni 冷喷涂增材沉积体抗拉强度、塑性等性能的影响机制还不清楚。因此，本文重点研究 Ni 元素的添加对冷喷涂 Al 增材沉积体喷涂态和热处理态显微组织、物相结构、硬度、抗拉

强度和塑性等的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

选用雾化技术制备的纯 Al 粉 (质量分数 99.5%) 和纯 Ni 粉 (质量分数 99.8%) 作为冷喷涂原材料。粉末形貌如图 1 所示, 由图可知, 纯 Al、Ni 粉均以表面光滑的球形粉为主。使用激光粒度分析仪

(FL33196-25\_LS230/SVM+) 对粉末进行粒度分析, 粒度分布结果如图 2 所示。测得纯 Al、Ni 粉平均粒度分别为 15、11  $\mu\text{m}$ 。按照质量比 3 : 1, 将 Al 粉与 Ni 粉在 SBH-5 三维混合机中 (设备主轴转速 2.2 r/min, 江阴市康和机械制造有限公司) 机械混合 4 h 后取出。将混匀的粉末放入真空干燥箱中进行干燥处理, 具体参数为: 干燥温度 80  $^{\circ}\text{C}$ , 时间 6 h。选用 1060 铝板作为制备沉积体的基板。

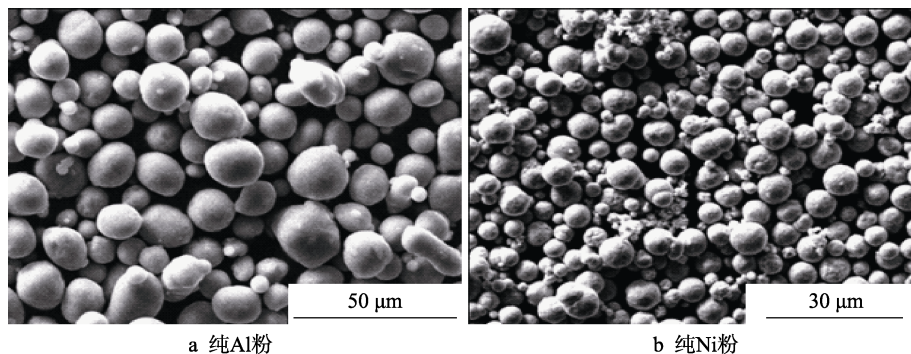


图 1 粉末形貌

Fig.1 Morphology of powder: a) pure Al powder; b) pure Ni powder

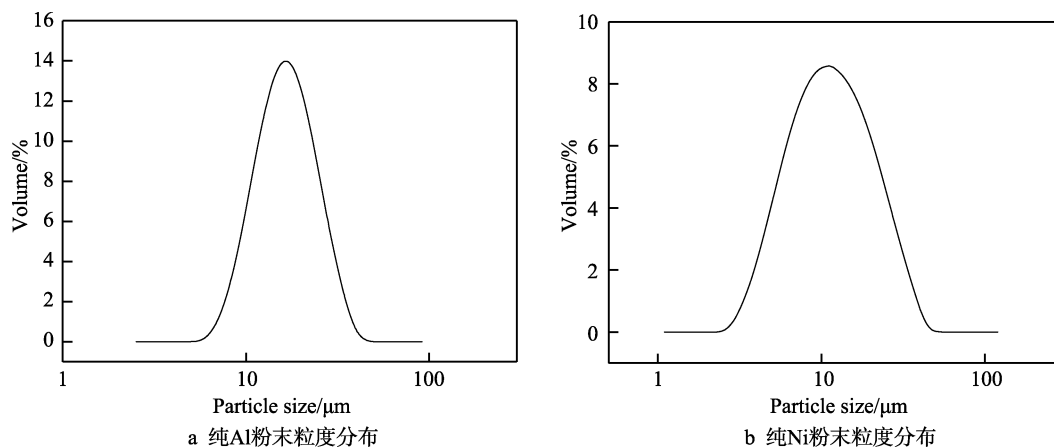


图 2 粉末粒度分布

Fig.2 Particle size distribution of powder: a) pure Al powder; b) pure Ni powder

### 1.2 沉积体制备工艺

使用西安建筑科技大学轻合金快速增材制造技术研发中心的 DYMET®423 (OCPS, Russia) 型冷喷涂设备制备 Al 沉积体、AlNi25 沉积体。选用高纯  $\text{N}_2$  为工作气体, 具体工艺参数如表 1 所示。采用该

表 1 冷喷涂制备沉积体工艺参数

Tab.1 Parameters of preparing deposits by cold spraying

Gas pressure/MPa	0.8
Gas temperature/ $^{\circ}\text{C}$	300
Powder feeding rate/( $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ )	16
Spray distance/mm	10
Spray gun speed/( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	15

工艺参数将粉末连续喷涂在基板表面至沉积体厚度达 5 mm, 然后去除基体, 进行后续热处理、结构表征和性能测试。

### 1.3 热处理工艺

将制得的沉积体放入具有氩气气氛的管式加热炉中进行热处理。Zhao<sup>[21]</sup>通过 DSC 实验研究报道了 Al、Ni 元素在 500  $^{\circ}\text{C}$  时可发生反应, 生成金属间化合物。参考上述结果, 本实验制定的热处理过程如下: 管式加热炉先以 15  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的加热速率升温至 450  $^{\circ}\text{C}$ , 保温 10 min, 再以 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  加热速率加热至 500  $^{\circ}\text{C}$ , 沉积体在该温度下保温 8 h, 然后随炉冷却至室温, 最后进行微观组织与力学性能的测试表征。

## 1.4 沉积体结构表征及性能检测

使用 Reichert Jung Polyvar(Leica)金相显微镜和 JEOLJSM-6460 扫描电子显微镜观察粉末形貌、沉积体截面组织,并结合 EDS 能谱分析沉积体内元素种类及含量。使用 Image Pro Plus (IPP) 图像分析软件计算沉积体的孔隙率,在每个沉积体的截面上任意捕捉 10 张 250 倍的背散射电子图像进行图像分析,测量沉积体的孔隙率,并取其平均值为相应状态下沉积体的孔隙率。使用 HVS-1000 硬度计进行显微硬度测试,硬度值取 10 次测量的平均值,实验载荷为 200 g,饱和时间为 15 s。采用 Instron M8801 电液伺服万能拉伸试验机进行拉伸实验,每种沉积体测量三组试样,取其平均值作为该沉积体最终的抗拉强度,按照 GB/T 228—2002 设计了拉伸试样,具体尺寸如图 3 所示。

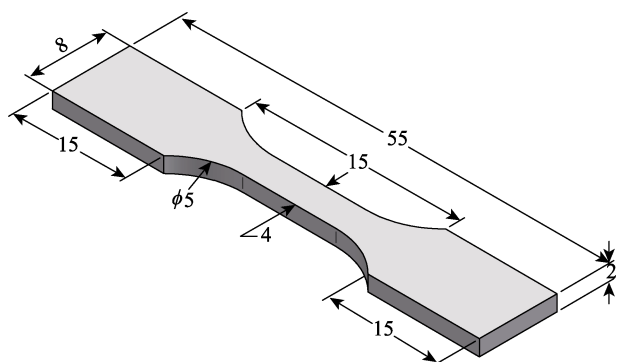


图 3 拉伸试样示意图

Fig.3 Schematic diagram of tensile samples

## 2 结果与分析

### 2.1 组织演变规律

纯 Al、AlNi25 复合沉积体的横截面金相显微组织如图 4 所示。其中图 4a、b 分别为 Al 沉积体、AlNi25 沉积体低倍显微组织,从低倍形貌像中难以识别金属颗粒的具体变形状态,因此对沉积体进行了腐蚀处理(腐蚀液成分为 5 mL HF+50 mL H<sub>2</sub>O),得到的颗粒变形状态如图 4c、d 所示。由图 4a、c 可知,Al 颗粒在沉积过程中发生了剧烈的塑性变形,颗粒-颗粒间的界面结合良好。从图 4b、d 中可知,AlNi25 复合沉积体中 Ni 颗粒仍保持近球形形状,且均匀分布于 Al 沉积体中,说明 Ni 颗粒在沉积过程中未发生明显塑性变形,但是由图 4c、d 可知,AlNi25 沉积体中 Al 颗粒的塑性变形更加剧烈,这是因为 Ni 颗粒与 Al 颗粒相比硬度较高,在沉积过程中撞击已沉积的 Al 颗粒时,会将大部分动能传递给较软的 Al 颗粒,促进 Al 颗粒进一步变形,从而导致 Ni 颗粒的变形比较小<sup>[22]</sup>。

图 5 是 AlNi25 沉积体喷涂态和热处理态的背散射电子形貌像和 EDS 能谱分析结果。分析结果表明,点 001 中只存在 Ni 元素;点 003 存在 Ni 元素与 Al 元素,且 Al、Ni 的原子比接近 3:1。与图 5a 相比,相同放大倍数下,图 5b 中 Ni 颗粒发生了明显的长大,说明在热处理过程中,AlNi25 沉积体中的 Al、Ni 颗粒之间发生了互扩散。图 6 为热处理态沉积体的 XRD 分析结果,由图可知,沉积体热处理过程中原位生成了 Al<sub>3</sub>Ni 金属间化合物,这与文献[23]的报道一致。

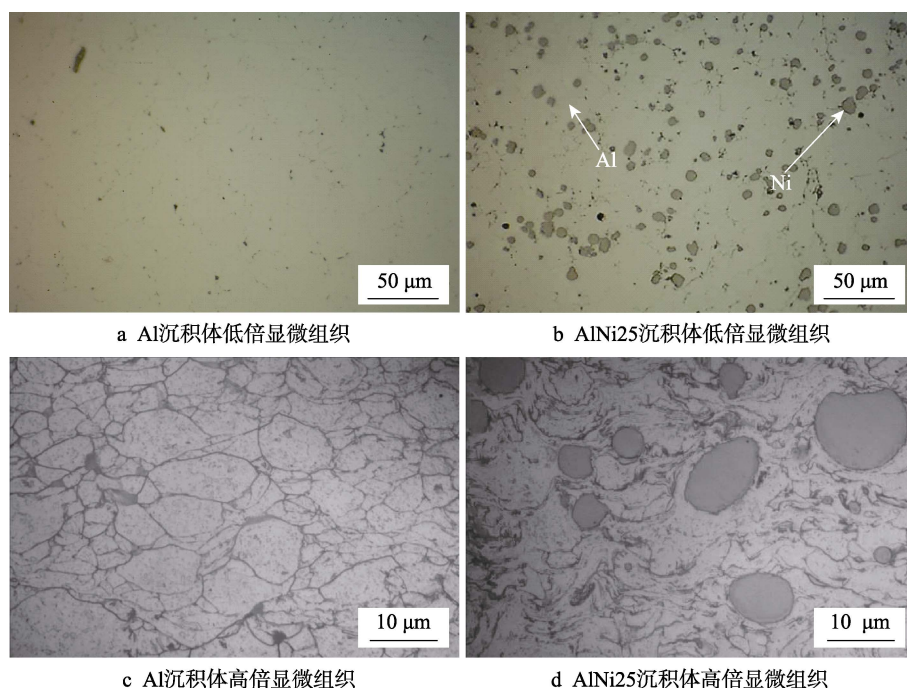


图 4 喷涂态沉积体横截面金相显微组织

Fig.4 Cross-sectional morphology of deposits under metallographic microscope: a) low-magnification microstructures of Al deposits; b) low-magnification microstructures of AlNi25 deposits; c) high-magnification microstructures of Al deposits; d) high-magnification microstructures of AlNi25 deposits

对比图 5a、b 发现,经过热处理后,沉积体中的孔隙增多,所以对不同状态的 AlNi25 沉积体进行孔隙率表征,得到喷涂态 AlNi25 沉积体和热处理态 AlNi25 沉积体的平均孔隙率分别为 1.4% 和 2.5%,所以热处理会促进沉积体中孔隙的增加。对于这一现象,Spencer<sup>[22]</sup>、Adabi<sup>[23]</sup>和 Rieck<sup>[24]</sup>等人的研究指出,在热处理过程中,Al 向 Ni 的扩散速率高于 Ni 向 Al 扩散的速率,因为两种原子的相互扩散速率不同,导致发生了柯肯达尔效应,即会在原子扩散速率较快的一侧形成孔隙。所以经过热处理后,与喷涂态沉积体相比,热处理态沉积体的孔隙率略有升高。

## 2.2 热处理对沉积体硬度的影响

不同状态下的 Al 沉积体、AlNi25 沉积体硬度测试结果如图 7 所示。喷涂态纯 Al 沉积体的硬度为 44.2HV<sub>0.2</sub>,经过 500 °C 热处理后为 26.72HV<sub>0.2</sub>,硬度显著降低。分析认为硬度降低的原因与颗粒的沉积行为密切相关。一般来说,冷喷涂沉积体的成形主要是由超音速颗粒撞击基体或已沉积颗粒发生剧烈塑性变形,实现颗粒间的有效结合,最终形成沉积体。因此,沉积体中存在大量的变形组织,包括高密度位错、剪切带、亚晶等亚稳态结构<sup>[25]</sup>。经退火后,沉积

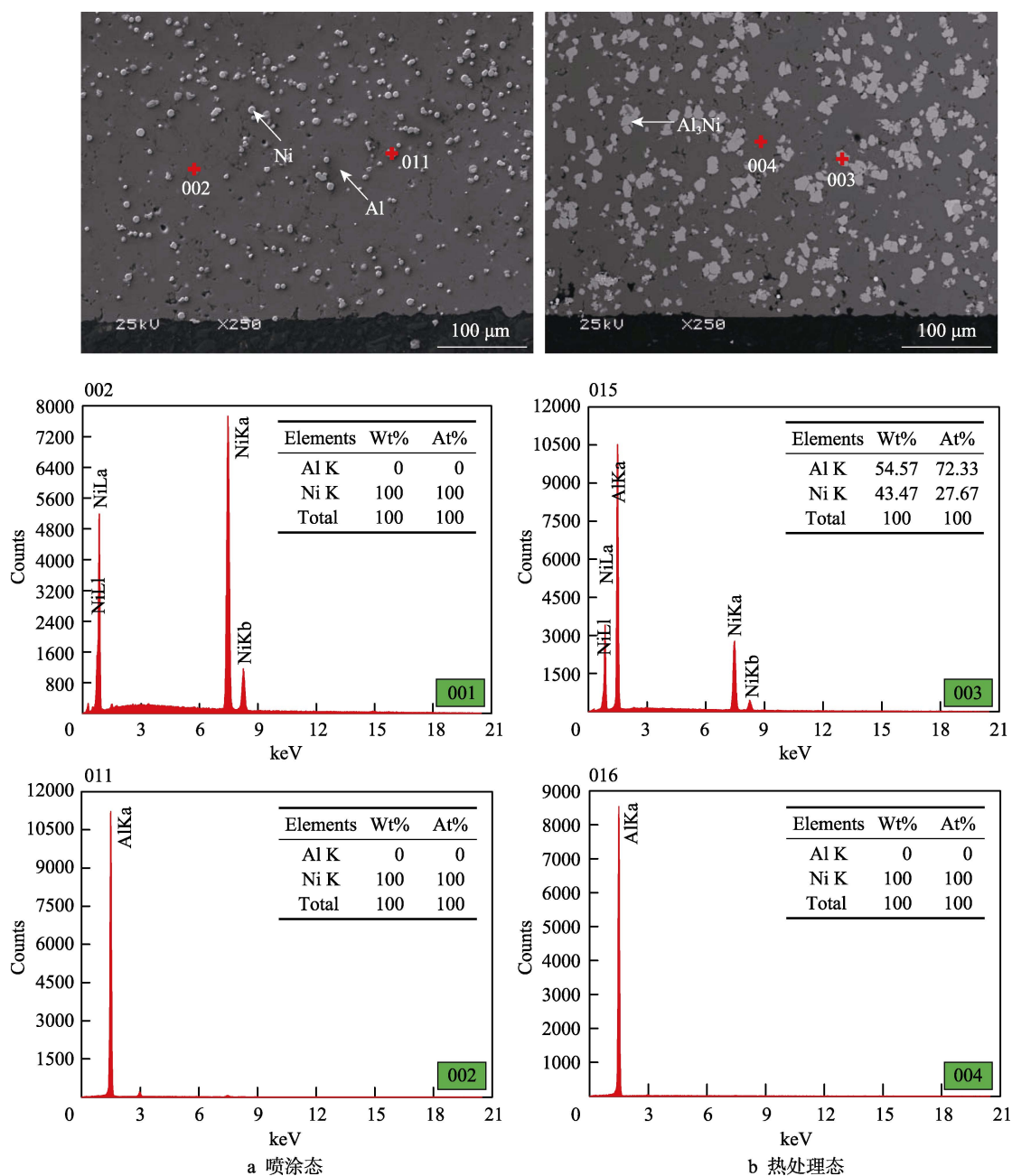


图 5 AlNi25 沉积体横截面背散射电子形貌与 EDS 能谱图

Fig.5 Backscattering electron morphology and EDS energy spectrum of AlNi25 deposits at cross section: a) spraying state; b) heat treatment state

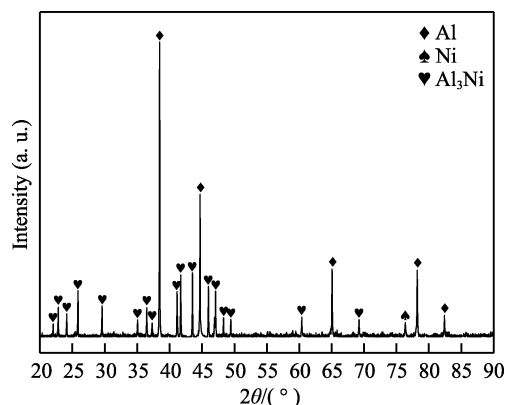
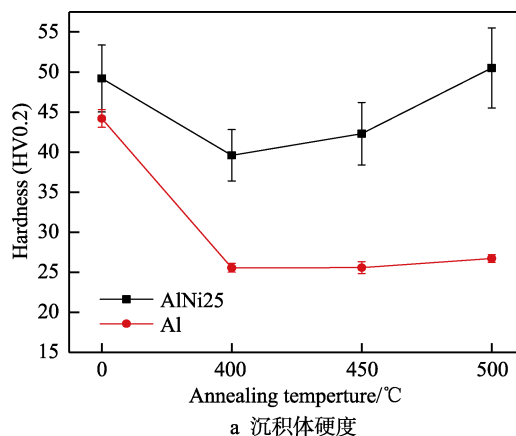


图 6 500 °C 热处理条件下 AlNi<sub>25</sub> 沉积体 X 射线衍射谱  
Fig.6 X-ray diffraction spectrum of AlNi<sub>25</sub> deposit under  
500 °C heat treatment



a 沉积体硬度

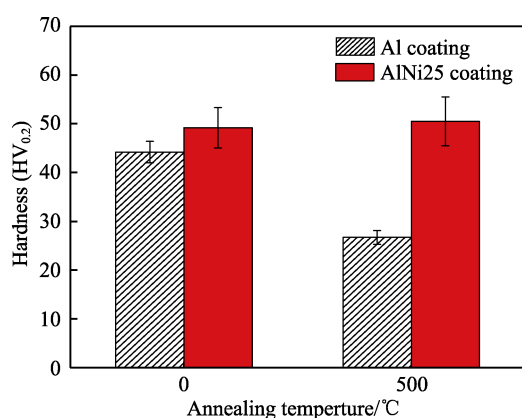
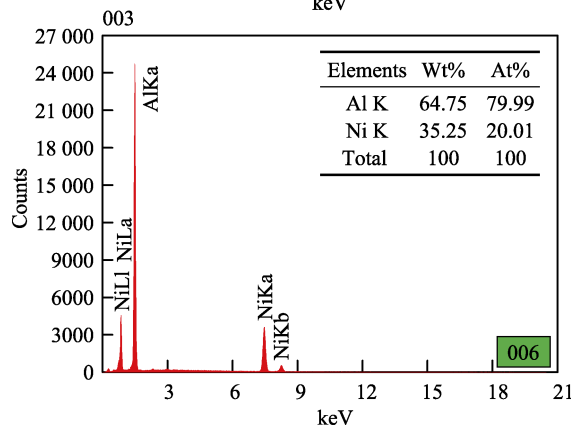
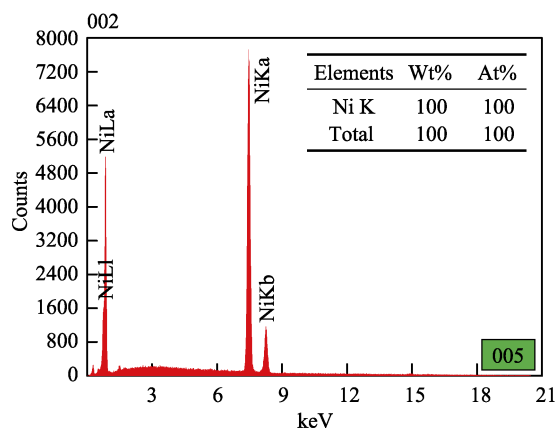
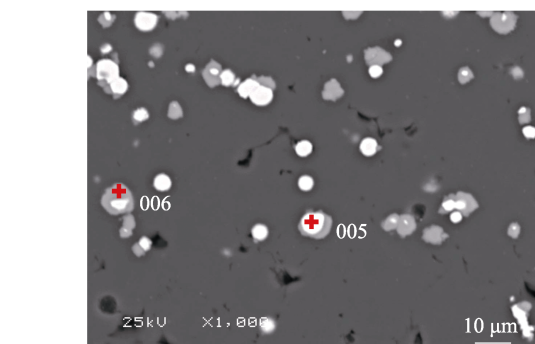


图 7 AlNi25 沉积体在不同状态下的显微硬度  
Fig.7 Microhardness of the AlNi25 deposit in different states

体发生回复再结晶,加工硬化效应消失,导致硬度降低<sup>[26]</sup>。

AlNi25 沉积体有大量的硬质 Ni 颗粒, 在沉积过程中, Ni 颗粒对先沉积的 Al 颗粒进行持续夯实, 导致 Al 颗粒变形更剧烈, 加工硬化程度进一步增加; 另一方面, 相对较硬的 Ni 颗粒也可提升 AlNi25 沉积体的整体硬度, 所以喷涂态 AlNi25 复合沉积体的硬度高于喷涂态纯 Al 沉积体的硬度。此外, AlNi25 沉积体经过 500 °C 热处理后, 硬度值基本不变。

为揭示 Al 沉积体、AlNi25 沉积体在热处理过程中的硬度变化规律, 设置了两组对比试验。将同样条件下制备的沉积体分别在 400、450 °C 下进行热处理, 其中热处理过程与 500 °C 热处理一致。不同热处理温度下沉积体的硬度值如图 8a 所示。从图 8a 硬度结果可知, 在三组热处理温度下, Al 沉积体的硬度基本保持不变, 这是因为在 400 °C 热处理条件下, Al 沉积体已经发生了充分的回复再结晶, 继续提高热处理温度对沉积体硬度的影响较小。对于 AlNi25 沉积体, 当热处理温度为 400 °C 时, 沉积体的硬度为 39.6HV<sub>0.2</sub>, 低于喷涂态 AlNi25 沉积体的硬度, 但是高于相应热处理温度下纯 Al 沉积体的硬度。热处理



### b 组织形貌及能谱分析

图 8 沉积体硬度与组织形貌

Fig.8 Hardness (a) and microstructure (b) of the deposit

温度为 400 ℃ 时的 AlNi25 沉积体微观组织如图 8b 所示, 由图可知, Al、Ni 元素已经发生了互扩散,

形成了明显的扩散带。由 EDS 能谱结果 (图 8b) 可知, 在扩散带区域, Al、Ni 原子量比约为 4:1, 相应的 Ni 元素在扩散带的含量远高于 Ni 元素在 Al 中的最大固溶度。对经过 400 °C 热处理的 AlNi25 沉积体进行物相分析, 相应的结果如图 9 所示, 在 400 °C 的热处理条件下, Al、Ni 元素已经发生反应, 生成了  $\text{Al}_3\text{Ni}$  金属间化合物。因为金属间化合物在沉积体组织中可起到硬化相的作用, 所以相应热处理温度下 AlNi25 沉积体的硬度较高, 但是因为在该热处理温度下金属间化合物的生成量较低, 金属间化合物对沉积体的增强效应低于回复再结晶造成的软化效应, 所以与喷涂态 AlNi25 沉积体相比, 经过 400 °C 热处理的沉积体硬度降低。但是, 随着热处理温度的升高, AlNi25 沉积体的硬度值逐渐增加, 当热处理温度为 500 °C 时, 相应的硬度值为 50.5HV<sub>0.2</sub>, 与喷涂态 AlNi25 沉积体的硬度基本相等。分析认为, 随着热处理温度的升高, 生成的  $\text{Al}_3\text{Ni}$  金属间化合物逐渐增加, 金属间化合物对沉积体的强化效应逐渐增强, 所以 500 °C 热处理 AlNi25 沉积体的硬度与喷涂态 AlNi25 沉积体的硬度基本相等。

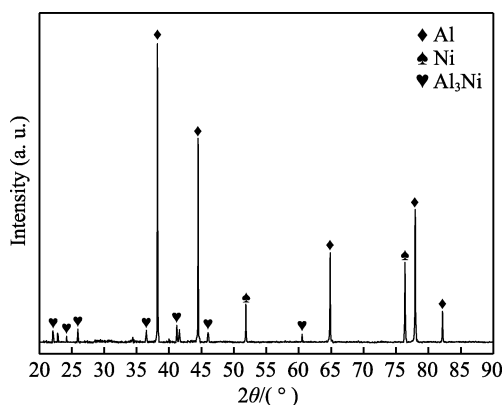


图 9 400 °C 热处理条件下 AlNi25 沉积体 X 射线衍射谱  
Fig.9 X-ray diffraction spectrum of AlNi25 deposit under 400 °C heat treatment

### 2.3 热处理温度对沉积体抗拉强度的影响

为揭示热处理过程中原位生成的金属间化合物对沉积体拉伸性能的影响, 对喷涂态 Al 沉积体与 AlNi25 沉积体进行拉伸实验, 因为喷涂态沉积体基本没有塑性, 所以只给出喷涂态沉积体的抗拉强度, 结果如图 10 所示。Al 沉积体与 AlNi25 沉积体的平均抗拉强度分别为 57、65 MPa。可知喷涂态 AlNi25 沉积体的抗拉强度高于 Al 沉积体的抗拉强度, 这是因为在喷涂过程中, 混合粉末中的 Ni 颗粒对已沉积的 Al 颗粒进行持续夯实, 导致 AlNi25 沉积体中 Al 颗粒的变形更加剧烈, 相邻金属颗粒间的结合更加紧密。

为进一步研究原位金属间化合物的生成对沉积体抗拉强度的影响, 对经过 500 °C 热处理的 Al 沉积体与 AlNi25 沉积体进行拉伸实验, 结果如图 11 所示,

平均抗拉强度分别为 64.7、107 MPa, 均高于喷涂态沉积体的抗拉强度。此外, 从图 11 可知, 两种沉积体的塑性得到了极大的提升。这是因为经过 500 °C 热处理后, 沉积体发生回复再结晶, 加工硬化效应消失<sup>[26]</sup>, 消除了沉积体中存在的大量变形组织、高密度位错、剪切带、亚晶等亚稳态结构<sup>[25]</sup>, 沉积体的塑性得到了有效提升。

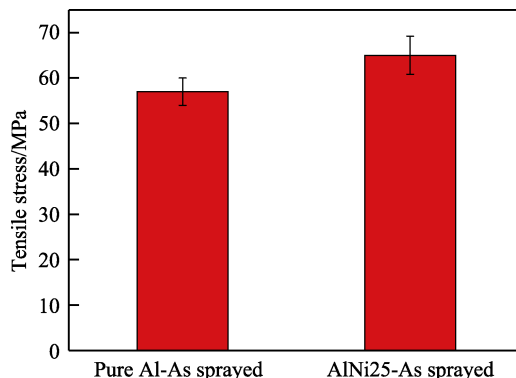
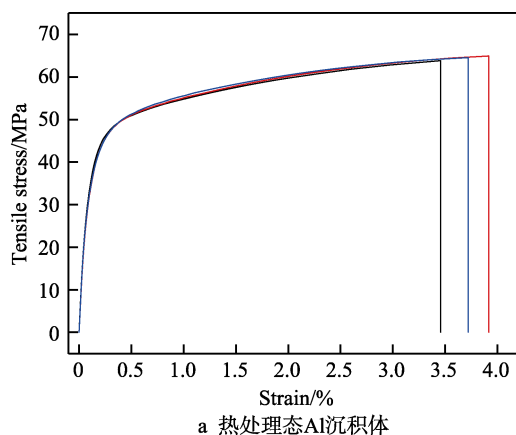
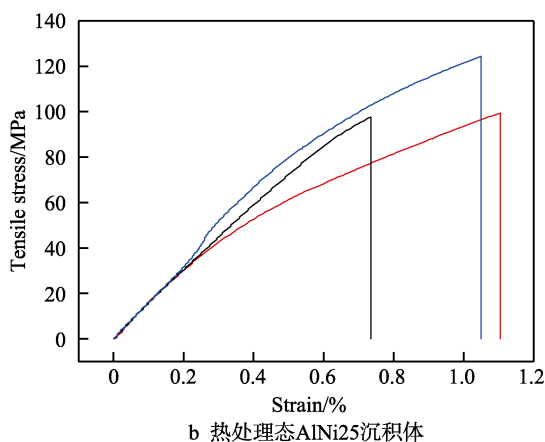


图 10 喷涂态 Al 沉积体和 AlNi25 沉积体的抗拉强度  
Fig.10 Tensile strength of Al deposit and AlNi25 deposit in spraying state



a 热处理态 Al 沉积体



b 热处理态 AlNi25 沉积体

图 11 热处理态沉积体应力应变曲线

Fig.11 Stress-strain curve of deposits at heat treatment state: a) Al deposit; b) AlNi25 deposit

由以上分析结果可知, 经过热处理后, Al 沉积体、AlNi25 沉积体的抗拉强度均有提升。对于 Al 沉

积体, 抗拉强度提升的主要原因是在热处理过程中, 同种金属元素发生了充分的扩散, 原有的颗粒界面消失; 同时, 在热处理过程中, 变形颗粒发生了充分的回复再结晶, 消除了由剧烈塑性变形引起的形变硬化效应, 所以热处理态 Al 沉积体的塑性也得到了较大的提升。相对于 Al 沉积体, 热处理后 AlNi25 沉积体的抗拉强度提升更加明显, 达到 107 MPa。同时, 与喷涂态 AlNi25 沉积体相比, 热处理态 AlNi25 沉积体具有良好的塑性。Wang<sup>[27]</sup>使用 He 气作为动力源制备的 Al+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 沉积体的抗拉强度为 110 MPa, 但是沉积体基本没有塑性。为分析经过热处理后, AlNi25 沉积体抗拉强度与塑性变形能力的提升机理, 做出如图 12 所示的分析示意图。由 2.1 节研究可知, 喷涂态与热处理态沉积体内都存在孔隙, 所以沉积体承受外部拉应力时, 会在不规则孔隙的尖端造成应力集中, 易在孔隙处萌发裂纹, 削弱沉积体的力学性能, 如图 12a 所示。而经过热处理的 AlNi25 沉积体原位生成了大量的 Al<sub>3</sub>Ni 金属间化合物, Al<sub>3</sub>Ni 金属间化合物可在沉积体中起到强化相的作用。热处理态 AlNi25 沉积体受到外部拉应力时, 会在孔隙尖端形成裂纹, 当裂纹扩展到金属间化合物与 Al 沉积体界

面处时, 由于格里菲斯效应, 裂纹要进一步扩展必须克服 Al 沉积体与金属间化合物之间的断裂应力 (如图 12b 所示, 相应的格里菲斯效应公式<sup>[28]</sup>见 (1) 式), 所以沉积体中适量的金属间化合物可有效抑制裂纹的扩展, 提高沉积体的抗拉强度。但是由于金属间化合物的塑性变形能力较差, 所以从图 11a、b 可知, 热处理态 AlNi25 沉积体的塑性低于热处理态 Al 沉积体的塑性。不过与喷涂态 AlNi25 沉积体相比, 热处理态 AlNi25 沉积体的塑性提升效果显著。这是因为经过 500 °C 热处理后, AlNi25 沉积体发生回复再结晶, 颗粒间的界面消失, 使得加工硬化效应消失<sup>[26]</sup>, 有利于提升沉积体的塑性; 同时热处理过程中, 在 Ni 颗粒区域形成了金属间化合物, 但是金属间化合物在整个热处理态沉积体的组织中所占的比例较低, 其中大部分组织为发生回复再结晶的纯 Al, 也使热处理态 AlNi25 沉积体具有良好的塑性。

$$\sigma_{pm} = \left( \frac{\pi E \gamma_{pm}}{(1-\nu^2)} \right) \quad (1)$$

其中,  $\sigma_{pm}$  是基体与二次相之间的断裂应力,  $\gamma_{pm}$  是断裂表面能,  $E$  和  $\nu$  是弹性模量和泊松比。

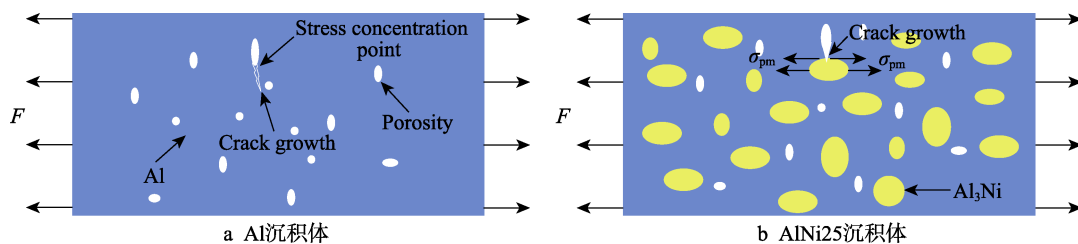


图 12 热处理态沉积体应力分析示意图

Fig.12 Stress analysis diagram of deposit at heat treatment state: a) Al deposit; b) AlNi25 deposit

### 3 结论

1) 经过热处理的 AlNi25 沉积体内的物相主要为 Al、Al<sub>3</sub>Ni, 且经过 500 °C 热处理后, AlNi25 沉积体的孔隙率由 1.4% 增加到 2.5%。

2) 喷涂态的 Al 沉积体由于在沉积过程中发生了剧烈塑性变形, 导致硬度较高, 而对 Al 沉积体进行热处理后, 由于发生了回复再结晶, 硬度值降低。热处理态 AlNi25 沉积体生成的 Al<sub>3</sub>Ni 金属间化合物对沉积体起到强化效应, 增加了 AlNi25 沉积体的硬度, 且随着热处理温度的升高, 强化效应越加显著, 500 °C 热处理 AlNi25 沉积体的硬度略高于喷涂态 AlNi25 沉积体。

3) 喷涂态的 Al 沉积体、AlNi25 沉积体的抗拉强度分别为 57、65 MPa, 而经过热处理后, 因为粒子间原有界面消失, 且 AlNi25 沉积体中生成了具有强化效应的 Al<sub>3</sub>Ni 金属间化合物, 所以热处理态的 Al 沉积体、AlNi25 沉积体的抗拉强度、塑性都得到了明显的提升, 其抗拉强度分别为 64.7、107 MPa。

### 参考文献:

- [1] LI W, YANG K, YIN S, et al. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review[J]. Journal of materials science & technology, 2018, 34(3): 440-457.
- [2] FOROOZMEHR A, BADROSSAMAY M, FOROOZMEHR E, et al. Finite element simulation of selective laser melting process considering optical penetration depth of laser in powder bed[J]. Materials & design, 2016, 89: 255-263.
- [3] CAO S, GU D. Laser metal deposition additive manufacturing of TiC/Inconel625 nanocomposites: Relation of densification, microstructures and performance[J]. Journal of materials research, 30(23): 3616-3628.
- [4] MILTON S, DUCHOSAL A, CHALON F, et al. Thermal study during milling of Ti6Al4V produced by electron beam melting (EBM) process[J]. Journal of manufacturing processes, 2019, 38: 256-265.
- [5] CHEN G, SHU X, LIU J, et al. Crystallographic texture and mechanical properties by electron beam freeform fabrication of copper/steel gradient composite materials[J].

- Vacuum, 2020, 171: 1-7.
- [6] MURR L E. Frontiers of 3D printing/additive manufacturing: From human organs to aircraft fabrication[J]. Journal of materials science & technology, 2016, 32(10): 987-995.
- [7] 王慧远, 张行, 徐新宇, 等. 超塑性轻合金组织稳定性的研究进展及展望[J]. 金属学报, 2018, 54(11): 1618-1624.
- WANG H Y, ZHANG H, XU X Y, et al. Current research and future prospect on microstructure stability of superplastic light alloys[J]. Acta metallurgica sinica, 2018, 54(11): 1618-1624.
- [8] 燕云程, 黄蓓, 李维俊, 等. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强度铝合金的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(S2): 358-364.
- YAN Y C, HUANG B, LI W J, et al. Research progress of Al-Zn-Mg-Cu ultra-high strength aluminum alloy[J]. Materials review, 2018, 32(S2): 358-364.
- [9] 李成祥, 李海岩, 张耀磊, 等. ZM6 铸造镁合金在空间飞行器主承力结构中的应用研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 36-40.
- LI C X, LI H Y, ZHANG Y L, et al. The Application of ZM6 casting magnesium alloy in the principal bearing structure of spacecraft[J]. Journal of ordnance equipment engineering, 2018, 39(6): 36-40.
- [10] 李晓谦, 蒋日鹏. 航空航天用高性能轻合金大型复杂结构件制造基础研究进展[J]. 中国基础科学, 2015, 17(1): 11-20.
- LI X Q, JIANG R P. Progress of the basic research on the manufacture of high-performance light alloy large complex structural components used in aerospace and aeronautics [J]. China basic science, 2015, 17(1): 11-20.
- [11] WANG Q, ZHANG M X. Review on recent research and development of cold spray technologies[J]. Key engineering materials, 2013, 533: 1-52.
- [12] ASSADI H, KREYE H, GÄRTNER F, et al. Cold spraying—A materials perspective[J]. Acta materialia, 2016, 116: 382-407.
- [13] WANG Q, SUN Q, ZHANG M X, et al. The influence of cold and detonation thermal spraying processes on the microstructure and properties of Al-based composite coatings on Mg alloy[J]. Surface and coatings technology, 2018, 352: 627-633.
- [14] XIONG Y, ZHUANG W, ZHANG M. Effect of the thickness of cold sprayed aluminium alloy coating on the adhesive bond strength with an aluminium alloy substrate [J]. Surface and coatings technology, 2015, 270: 259-265.
- [15] HUSSAIN T, MCCARTNEY D, SHIPWAY P, et al. Bonding mechanisms in cold spraying: The contributions of metallurgical and mechanical components[J]. Journal of thermal spray technology, 2009, 18(3): 364-379.
- [16] ASSADI H, GÄRTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding mechanism in cold gas spraying[J]. Acta materialia, 2003, 51(15): 4379-4394.
- [17] WANG Q, BIRBILIS N, ZHANG M X. Interfacial structure between particles in an aluminum deposit produced by cold spray[J]. Materials letters, 2011, 65(11): 1576-1578.
- [18] ASTARITA A, DURANTE M, LANGELLA A, et al. Mechanical characterization of low-pressure cold-sprayed metal coatings on aluminium[J]. Surface and interface analysis, 2013, 45(10): 1530-1535.
- [19] WANG Q, BIRBILIS N, ZHANG M X. On the formation of a diffusion bond from cold-spray coatings[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2012, 43(5): 1395-1399.
- [20] HSIAO W T, SU C Y, HUANG T S, et al. Wear resistance and microstructural properties of Ni-Al/h-BN/WC-Co coatings deposited using plasma spraying[J]. Materials characterization, 2013, 79: 84-92.
- [21] ZHAO H, TAN C, YU X, et al. Enhanced reactivity of Ni-Al reactive material formed by cold spraying combined with cold-pack rolling[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 741: 883-894.
- [22] 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: 3019-3025.
- [23] ADABI M, AMADEH A A. Formation mechanisms of Ni-Al intermetallics during heat treatment of Ni coating on 6061 Al substrate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(12): 3959-3966.
- [24] JANSSEN M M P, RIECK G D. Reaction diffusion and Kirkendall-effect in the nickel-aluminum system[J]. Transactions of the Metallurgical Society of Aime, 1967, 239: 1372-1385.
- [25] WANG Q, BIRBILIS N, ZHANG M X. Interfacial structure between particles in an aluminum deposit produced by cold spray[J]. Materials letters, 2011, 65(11): 1576-1578.
- [26] 章华兵, 张俊宝, 梁永立, 等. 退火处理对冷喷涂 Ni 涂层组织与力学性能的影响[J]. 宝钢技术, 2009(1): 46-51.
- ZHANG H B, ZHANG J B, LIANG Y L, et al. Effect of annealing treatment on microstructures and mechanical properties of cold-sprayed Ni coating[J]. Baosteel technology, 2009(1): 46-51.
- [27] WANG Q, SPENCER K, BIRBILIS N, et al. The influence of ceramic particles on bond strength of cold spray composite coatings on AZ91 alloy substrate[J]. Surface and coatings technology, 2010, 205(1): 50-56.
- [28] LIU Y, DENG C, GONG B, et al. Effects of heterogeneity and coarse secondary phases on mechanical properties of 7050-T7451 aluminum alloy friction stir welding joint[J]. Materials science and engineering: A, 2019, 764: 1-11.