

喷丸辅助对冷喷涂 Ni-Al 含能结构涂层 组织及性能的影响

张涛^{a,b}, 宁先进^{a,b}, 王全胜^{a,b}, 于晓东^{a,b}, 谭成文^{a,b}, 杨晋智^{a,b}, 吴博涵^{a,b}

(北京理工大学 a.材料学院 b.冲击环境材料技术国家级重点实验室, 北京 100081)

摘 要: **目的** 调控冷喷涂 Ni-Al 含能结构涂层的微观结构, 增加涂层中组元间的接触面积, 提高涂层反应速度。**方法** 在 Ni、Al 混合粉末中引入铸钢弹丸, 研究喷丸辅助对冷喷涂 Ni-Al 涂层微观组织、力学性能和反应特征的影响。采用扫描电镜 (SEM) 结合定量金相方法, 表征 Ni-Al 涂层微观形貌和 Ni、Al 组元的接触面积。通过万能材料试验机及分离式霍普金斯压杆 (SHPB) 测试 Ni-Al 涂层的压缩力学性能。采用差示扫描量热分析法 (DSC) 分析 Ni-Al 涂层的反应温度及放热量。通过高速摄影分析 Ni-Al 涂层的自蔓延反应过程和燃烧速度。**结果** 喷丸辅助冷喷涂所制备的 Ni-Al 涂层整体致密、无宏观裂纹。弹丸冲击提高了涂层中 Ni 颗粒的变形程度和 Ni、Al 组元间的接触面积, 对涂层密度和 Ni、Al 活性组元含量无明显影响。喷丸辅助冷喷涂 Ni-Al 在准静态和动态条件下的抗压强度分别为 210~250 MPa 及 310~335 MPa。引入弹丸提高了冷喷涂 Ni-Al 涂层的反应活性, 反应起始温度下降至 422 °C, 并显著提高了冷喷涂 Ni-Al 含能结构涂层的自蔓延燃烧速度。当钢丸添加量为 77% 时, 涂层燃烧速度达到 416 mm/s, 提高近 5 倍。**结论** 喷丸辅助冷喷涂工艺可在保证涂层力学性能的同时, 提高 Ni-Al 含能结构涂层的反应活性, 并显著提高自蔓延燃烧速度, 弹丸含量对涂层成分影响不大。

关键词: 冷喷涂; 喷丸; 含能结构材料; 动态力学性能; 自蔓延反应

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0085-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.010

Influence of In-situ Shot Peening on Microstructure and Properties of Cold-sprayed Ni-Al Energetic Structural Coating

ZHANG Tao^{a,b}, NING Xian-jin^{a,b}, WANG Quan-sheng^{a,b}, YU Xiao-dong^{a,b},
TAN Cheng-wen^{a,b}, YANG Jin-zhi^{a,b}, WU Bo-han^{a,b}

(a.School of Material Science and Engineering, b.National Key Laboratory of Science and Technology on
Materials in Impact Environment, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The work aims to adjust the microstructure of cold-sprayed Ni-Al coating, enhance the contact area of coating

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-10-14

Received: 2019-12-20; Revised: 2020-10-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51671031)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51671031)

作者简介: 张涛 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为冷喷涂技术。

Biography: ZHANG Tao (1995—), Male, Master, Research focus: cold spraying.

通讯作者: 宁先进 (1974—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为表面涂层技术。电子邮箱: nxj@bit.edu.cn

Corresponding author: NING Xian-jin (1974—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: surface coating technology. E-mail: nxj@bit.edu.cn

引文格式: 张涛, 宁先进, 王全胜, 等. 喷丸辅助对冷喷涂 Ni-Al 含能结构涂层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 85-92.

ZHANG Tao, NING Xian-jin, WANG Quan-sheng, et al. Influence of in-situ shot peening on microstructure and properties of cold-sprayed Ni-Al energetic structural coating[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 85-92.

elements and improve the reaction velocity of coating. The cast steel pills were added into the mixed powder of Ni and Al to study the influence of in-situ shot peening on the microstructure, mechanical property and reaction characteristics of Ni-Al coating. The microstructure and contact area between Ni and Al were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and quantitative metallography analysis. The compressive mechanical properties of Ni-Al coating were measured by the universal material testing machine and split Hopkinson bar (SHPB). The reaction temperature and heat release of Ni-Al coating were tested by differential scanning calorimetry (DSC). The self-propagating reaction process and combustion speed of Ni-Al coating were analyzed by high-speed cameras. The Ni-Al energetic structural coating deposited by in-situ shot peening assisted cold spraying was dense and free from macro cracks. The shot peening effect enhanced the deformation extent of the Ni particles inside the coating and contact area between Ni and Al phases significantly while having no obvious effect on the density and composition of Ni-Al coating. The static and dynamic compression strengths of Ni-Al coating deposited by in-situ shot peening assisted cold spraying were 210~250 MPa and 310~335 MPa, separately. The reaction activity was enhanced and the reaction start temperature decreased to 422 °C with the addition of shot peening pills and the self-propagating combustion speed of Ni-Al energetic structural coating was significantly increased. As the volume of pills was 77%, the combustion speed of Ni-Al coating reached 416 mm/s, which was about five times that of Ni-Al coating without addition of cast steel pills. The in-situ shot peening assisted cold spraying can enhance the activity of cold-sprayed Ni-Al energetic structural coating without the loss of mechanical property. The combustion speed of Ni-Al coating can be enhanced significantly, while the content of shot peening pills has no obvious effect on the content of coating.

KEY WORDS: cold spraying; shot peening; energetic structural material; dynamic mechanical property; self-propagating high-temperature synthesis

含能结构材料是一类能在高温或冲击条件下发生剧烈化学反应而释放能量,同时具有较高结构承载能力的特殊结构材料,其常见的体系包括铝热剂型(如 Al-CuO、Al-MoO₃ 等)、金属间化合物型(金属-金属,如 Ni-Al、Fe-Al 等)、金属-氟聚物型(Al-PTFE)等^[1-2]。其中,以 Ni-Al 体系为代表的金属间化合物型含能结构材料具有较好的力学性能,同时其活性组元间生成金属间化合物时的体积能量释放量(6.7 kJ/cm³)与 TNT 相当(6.3 kJ/cm³)^[3],可用于制造活性杀伤元、聚能药型罩、石油射孔弹等,近年来受到广泛关注^[4-6]。常用的含能结构材料制备工艺为粉末冶金方法,包括冷等静压结合无压烧结、热等静压、粉末注射成形等^[7]。冷喷涂作为一种新型的低温固态粉末沉积技术,利用粉末粒子高速撞击基体时,与基体发生协调塑性变形,实现高效沉积,可有效避免含能结构材料制备过程中活性组元间的提前反应和氧化烧损,获得高致密和较高强度的含能结构材料,并可方便地实现薄壁曲面形状零件的近净尺寸成形^[8-9],在含能结构材料制备方面得到广泛关注^[10-17]。

含能结构材料的反应速度与材料的致密度、成分和活性组元的分布形态密切相关,是保证其应用的重要性能。为了改善冷喷涂 Ni-Al 涂层的反应性能,可通过在涂层中添加活性元素或调整涂层微观组织提高反应速度。赵慧林^[11-12]通过在 Ni、Al 粉末中添加 5% 的 Al₁₂Mg₁₇,使冷喷涂制备的 Ni-Al 涂层反应速度从 80 mm/s 提高至 175 mm/s。Bacciocchi^[13]发现当 Ni-Al 含能结构材料的致密度从 40% 提高至接近 100% 时,由于显著提高了 Ni、Al 组元间的接触程度,其反应速度由 20 mm/s 提高至 240 mm/s。Byun 等人^[14]

采用高能球磨获得了高接触度的层片结构 Ni、Al 复合粉末,并采用冷喷涂制备了 Ni-Al 含能结构涂层,显著提高了 Ni-Al 涂层反应活性,反应起始温度降低至 300 °C。赵慧林等^[15]采用包套轧制工艺对 Ni-Al 涂层进行 15 道次冷轧后,涂层中 Ni、Al 组元间的接触面积提高约 30%,涂层反应速度从 80~120 mm/s 提高至 130~140 mm/s。不过,上述方法工艺复杂,效率较低,尤其是对薄壁曲面结构零件的成形比较困难。近年来,雒晓涛等在研究冷喷涂纯 Ti 与 TC4 涂层^[18-20]以及 Al 涂层^[21]时发现,在原始粉末中引入大尺寸弹丸,利用弹丸的“喷丸效应”可增加涂层中已沉积颗粒的变形^[19-21]。同时,喷丸产生的加工硬化可提高涂层的力学性能^[19]。参考以上结果,本文提出一种制备 Ni-Al 二元含能结构材料的新思路,其新颖性在于利用喷丸辅助作用使难变形的 Ni 颗粒发生强烈变形,实现微观组织的原位调控,增加 Ni-Al 涂层活性组元间的接触程度和反应活性,可作为高活性薄壁曲面含能结构零件近净尺寸成形的新方法,并可推广应用于三元及其他含能结构材料的制备中。

为此,本文采用喷丸辅助冷喷涂方法制备 Ni-Al 含能结构涂层,分析了原始粉末中弹丸添加量对冷喷涂 Ni-Al 涂层微观组织和力学性能的影响,通过差示扫描量热分析法(DSC)以及自蔓延燃烧试验,研究了喷丸辅助作用对 Ni-Al 涂层反应活性的影响。

1 实验

1.1 喷涂粉末及 Ni-Al 涂层沉积

图 1 为冷喷涂所用雾化镍粉(北矿新材料科技有限

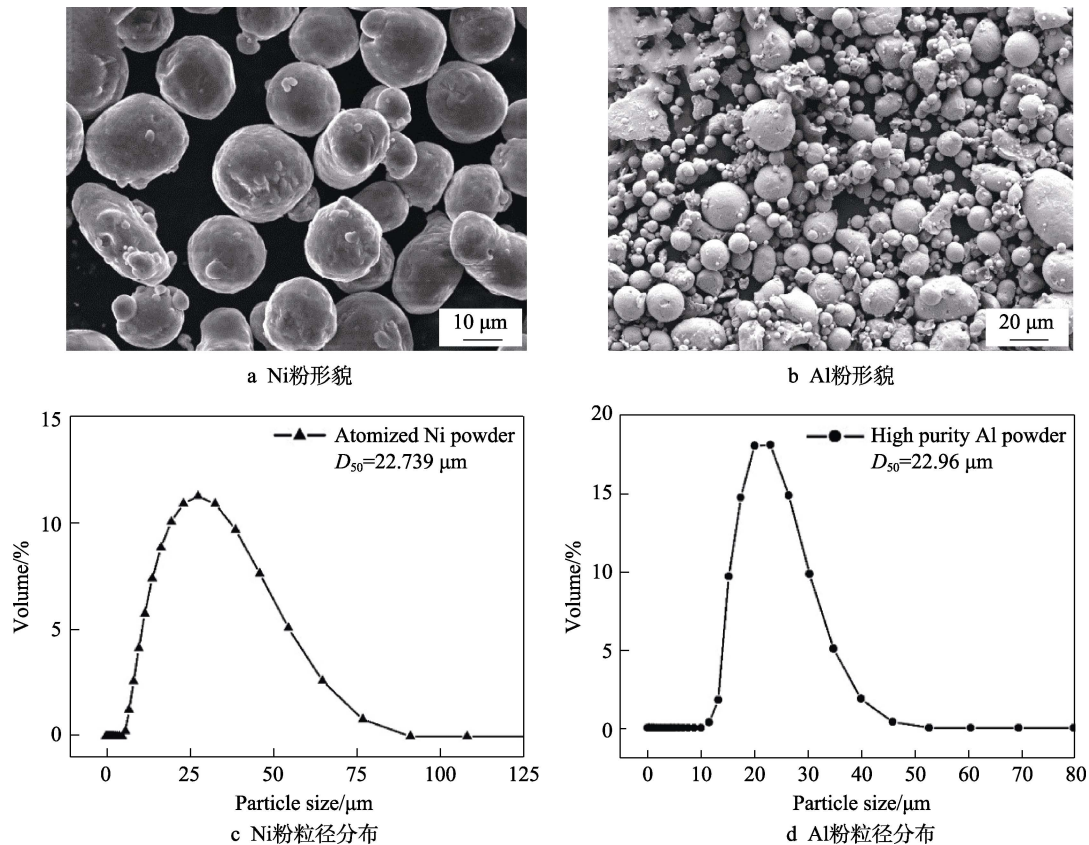


图 1 原始 Ni 粉和 Al 粉的形貌及粒径分布

Fig.1 Morphology and particle size distribution of original Ni and Al powders: a) morphology of Ni powder; b) morphology of Al powder; c) particle size distribution of Ni powder; d) particle size distribution of Al powder

公司)和高纯雾化铝粉(河南远洋铝业有限公司)的形貌及粒径分布。从图 1a、b 可看出,所用雾化镍粉和雾化铝粉均为近球形,两种粉末的平均粒径 D_{50} 分别为 22.7、23.0 μm , 粒径分布如图 1c、d 所示。

首先将 Ni 粉和 Al 粉按照质量比 6.5 : 1 进行机械混合,然后将 6.5Ni-Al 粉末与平均粒径 0.2 mm 的球形铸钢丸按照表 1 所示的体积比进行机械混合,得到冷喷涂所用的混合粉。

表 1 Ni-Al 混合粉末中弹丸的体积含量
Tab.1 Volume content of cast steel pills
in feedstock powder of Ni-Al

Sample	SP0	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
Content of cast steel pills/vol.%	0	30	50	70	77	82

采用美国 Inovati 公司生产的 KM-CDS3.2 低压冷喷涂系统制备 Ni-Al 涂层,采用 TEKNA 公司的刮板式送粉器送粉。冷喷涂系统采用纯度为 99.9% 的氦气作为喷涂气体,氦气气压为 480 kPa,喷涂温度设置为 150 $^{\circ}\text{C}$,喷涂距离为 45 mm,涂层的编号即为对应喷涂粉末的编号。

1.2 Ni-Al 涂层性能分析

采用日立公司 HITACHI S4800 场发射扫描电子

显微镜分析喷丸辅助制备的 Ni-Al 含能结构涂层的微观组织。利用线切割将涂层从基体取下,采用梅特勒-托利多 AL/AB-N 电子天平及密度测试组件,根据阿基米德排水法测量涂层的密度,并结合 Ni、Al 的密度计算涂层中各组分含量。采用德国 NETZSCH 公司生产的 DSC404F3A 高温型差示扫描量热仪对 Ni-Al 涂层的准静态反应和释能特性进行测试。Ni-Al 涂层的静态压缩力学性能采用 MTS810 万能材料试验机测量,采用分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)测试材料在中等应变率条件($\sim 10^3/\text{s}$)下的动态压缩性能,静态压缩和动态压缩试样尺寸分别为 $\phi 3\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 和 $\phi 4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。利用线切割的方式从垂直于喷涂方向取尺寸为 40 mm \times 2 mm \times 0.3 mm 的 Ni-Al 涂层试样,采用酒精喷灯对试样端部进行加热点燃,利用 Phantom V310 高速摄影仪记录试样的自蔓延燃烧过程,根据试样不同时刻的燃烧长度,计算自蔓延反应速度。

2 结果与分析

2.1 喷涂粉末中的弹丸含量对 Ni-Al 涂层微观组织的影响

图 2 为无弹丸添加和添加弹丸后所制备 Ni-Al 涂

层的典型宏观形貌。从图中可看出,与未添加弹丸制备的涂层相比,采用喷丸辅助冷喷涂沉积的 Ni-Al 涂层表面观察到大量凹坑,表面起伏较大。喷丸辅助冷喷涂沉积过程中, Ni、Al 粉末和弹丸均被加速。当弹丸以一定速度撞击已沉积涂层时,一方面对已沉积涂层表面产生喷丸效应,形成凹坑;另一方面,反弹的弹丸可能对 Ni、Al 颗粒形成一定的屏蔽效应,导致喷丸辅助沉积的 Ni-Al 涂层表面起伏提高。

图 3 为无弹丸添加和添加弹丸后所制备 Ni-Al 涂

层的截面形貌。从图 3a 可看出,无钢丸添加的粉末所制备的 Ni-Al 涂层组织致密,其中连续分布的暗灰色区域为 Al 相,类球形的 Ni 颗粒均匀分布在 Al 基体相中。添加弹丸后, Ni-Al 涂层整体致密,利用图像法统计得出孔隙率低于 0.1%,在涂层中无钢丸残留,涂层中的 Al 颗粒、Ni 颗粒均发生了明显的塑性变形,呈现层片状分布;随着弹丸含量的增加, Ni 颗粒的塑性变形程度显著增加,在弹丸作用的边界处, Ni 颗粒的变形最为明显,如图 3c—f 中箭头所示。

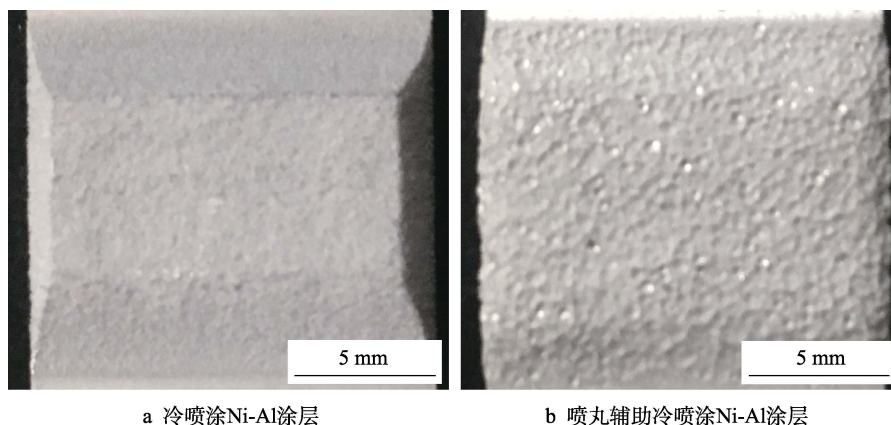


图 2 涂层表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of Ni-Al coatings: a) cold spraying; b) shot peening assisted cold spraying Ni-Al coating

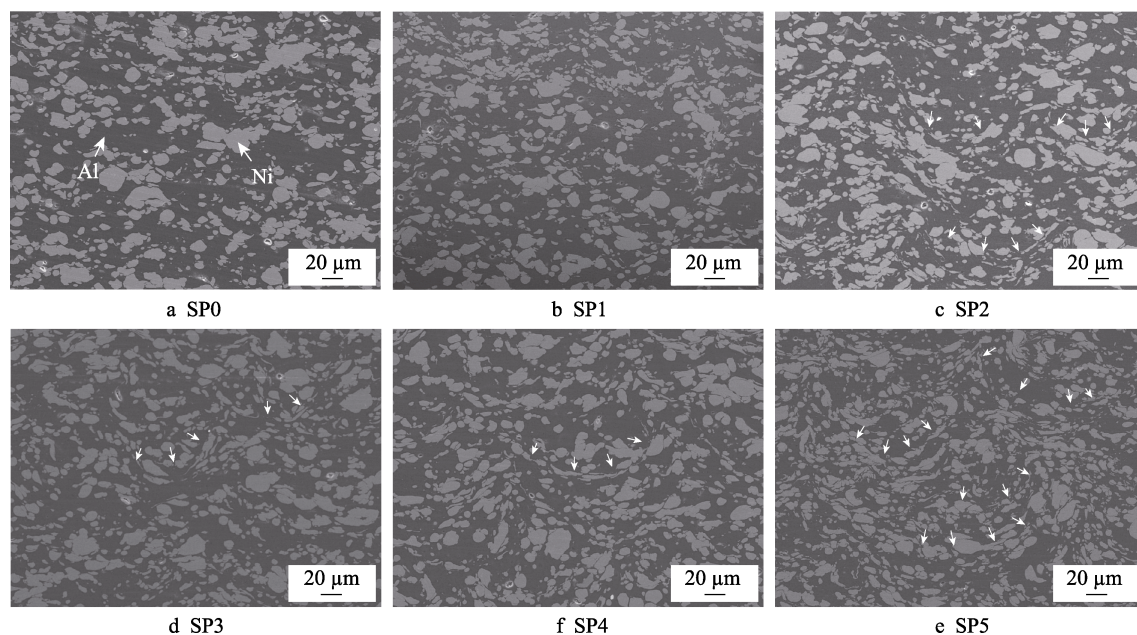


图 3 不同钢丸配比制备的 Ni-Al 涂层截面显微组织

Fig.3 Cross-sectional microstructure of Ni Al coating prepared by different steel pill ratio

冷喷涂时,当粉末粒子速度达到或超过材料的临界速度时,才可实现粒子的有效沉积^[22]。本文对单质 Ni 粉和 Al 粉的沉积试验结果表明,在氦气压力和温度分别为 480 kPa 和 150 °C 的喷涂参数下, Al 粉可实现有效沉积,而 Ni 粉的速度难以达到其临界速度而无法直接沉积。因此可以推断, Ni、Al 混合粉末喷涂时, Ni 颗粒的沉积依赖于 Al 颗粒沉积时的裹挟

作用,且由于 Ni 颗粒强度较高,因此涂层中 Ni 颗粒的变形较小。喷涂粉末中添加弹丸后,铸钢弹丸被加速至约 103 m/s,在 Ni-Al 涂层沉积的同时,弹丸的高速撞击使涂层中的 Ni 颗粒和 Al 颗粒进一步产生强烈的塑性变形,这种原位喷丸强化效应是 Ni-Al 涂层中 Ni 颗粒呈现层片状分布的主要原因。采用 Image Pro 软件对涂层中 Ni 颗粒的长径比及 Ni、Al 接触面积进

行统计, 结果显示无弹丸添加所制备的 Ni-Al 涂层中 Ni 颗粒平均长径比为 2.11, 而添加 80% 体积铸钢丸后, 长径比提高了 30%, 达到 2.65; 相应的 SP0 涂层的接触度 S_v (单位体积中各相的接触面积) 为 $0.039 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$, 而 SP2、SP4、SP5 的接触度分别为 0.111×10^3 、 0.108×10^3 、 $0.110 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$, 比 SP0 涂层提高了近三倍, 可见喷丸辅助工艺显著提高了 Ni-Al 涂层中 Ni、Al 组元间的接触程度。

表 2 为图 3 中 Ni-Al 涂层的密度和 Ni 含量。从表 2 中可见, 无弹丸添加时所制备的 Ni-Al 涂层密度为 4.66 g/cm^3 , 涂层中 Ni 的体积分数为 31.6%; 而喷丸辅助冷喷涂制备 Ni-Al 涂层密度为 $4.60 \sim 4.74 \text{ g/cm}^3$, 对应的 Ni 质量分数约为 30.7%~32.9%。因此, 弹丸含量的变化对涂层中 Ni 与 Al 含量无明显影响, 在喷丸辅助冷喷涂的过程中, 弹丸主要起到了对已沉积的部分进行夯实及增大颗粒形变的作用^[19-20], 并不会改

表 2 喷丸辅助冷喷涂制备的 Ni-Al 涂层密度和 Ni 含量
Tab.2 Density and Ni content of Ni-Al coatings prepared by shot peening assisted cold spraying

Sample	SP0	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
Density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	4.66	4.60	4.66	4.74	4.68	4.62
Content of Ni/vol.%	31.6	30.7	31.6	32.9	31.9	31.0

变材料的成分。

2.2 弹丸含量对 Ni-Al 涂层力学性能的影响

冷喷涂时, 粉末粒子高速撞击基体后会发生强烈的塑性变形^[9,23], 并发生一定的扁平化^[24], 因此冷喷涂涂层在结构上表现出一定的各向异性。为了明确弹丸添加对冷喷涂 Ni-Al 涂层力学性能的影响, 本研究选择 SP0、SP2、SP3、SP4 四种粉末制备厚度为 7 mm 的 Ni-Al 涂层, 分别在垂直于涂层方向和平行于涂层方向切取圆柱形试样, 测试 Ni-Al 涂层的静态压缩和动态压缩性能。图 4 为 SP0、SP2、SP3、SP4 粉末制备的 Ni-Al 涂层分别在垂直和平行于涂层方向上的静态和动态压缩应力-应变曲线。从图 4a、b 所示的静态压缩曲线上可看出, 压缩应力的最大值对应的应变均小于 5%, 随后明显下降, 说明涂层内部出现损伤, 承载能力下降, 最终材料表现为 45° 剪切失效。图 4c、d 显示, 在 3000/s 的动态压缩条件下, Ni-Al 涂层试样达到应力最大值后, 保持基本稳定的流变应力, 未出现应变强化现象, 与静态压缩相比, 涂层的屈服强度有一定的增加。

从图 4 中可看出, 涂层的静态压缩强度约 210~250 MPa, 动态压缩强度约 310~335 MPa, 高于文献^[16]中报道的冷喷涂 Ni-Al 含能结构涂层的静态抗

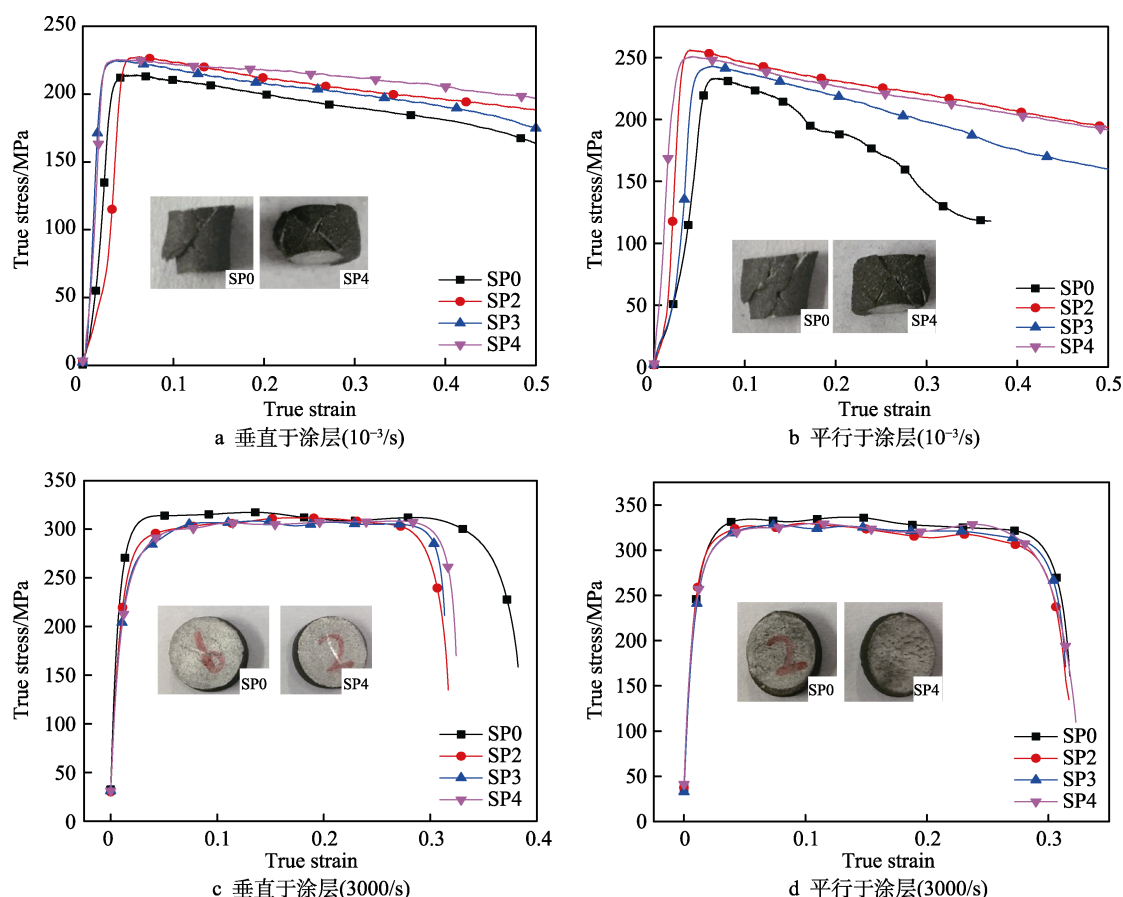


图 4 喷丸辅助冷喷涂 Ni-Al 涂层静态和动态压缩力学性能

Fig.4 Static and dynamic mechanical properties of Ni-Al coatings prepared by shot peening assisted cold spraying: a) perpendicular to coating ($10^{-3}/\text{s}$); b) parallel to coating ($10^{-3}/\text{s}$); c) perpendicular to coating (3000/s); d) parallel to coating (3000/s)

压强度 (196 MPa), 而与冷喷涂 Ni-Al-W 含能结构涂层的静态抗压强度 (250 MPa) 和动态抗压强度 (351 MPa) 相当^[17]。总体上, 随着弹丸添加量的提高, 喷丸辅助冷喷涂 Ni-Al 涂层的压缩强度仅有少量提高, 涂层力学性能无明显各向异性。

2.3 弹丸含量对 Ni-Al 涂层热性能及自蔓延反应速度的影响

图 5 为不同弹丸含量的粉末所制备 Ni-Al 涂层的 DSC 测试曲线。从图中可见, Ni-Al 涂层试样均在 520、570、640 °C 出现三个放热峰。前期研究^[15]显示, 520 °C 的放热峰对应 Ni、Al 两相通过固相扩散生成 NiAl_3 的反应, 而 570 °C 的放热峰对应 NiAl_3 与 Ni 界面处进一步生成 Ni_2Al_3 相的固相扩散反应。当温度达到 640 °C 时, 涂层中的 Al 开始熔化, Ni(s) 与 Al(l) 发生剧烈的固-液反应, 生成 NiAl 并放出大量的热量。无喷丸添加制备的 Ni-Al 涂层反应起始温度约为 438 °C, 而喷丸辅助制备的涂层反应起始温度降低至 422 °C, DSC 曲线积分得到的放热量均在 1.0 kJ/g 左右, 说明弹丸添加到一定程度后, 提高了 Ni-Al 的反应活性, 而对涂层的反应放热量无明显影响。Byun 研究显示^[14], Ni、Al 粉末高能球磨后, 冷喷涂制备的 Ni-Al 涂层反应起始温度降低至 300 °C。由于强烈的机械活化能使粉末内部产生大量的缺陷和位错, 降低反应激活能^[25-26], 因此上述高能球磨产生的反应起始温度降低可归结为 Ni-Al 反应激活能的降低。本研究中, 添加弹丸后, Ni、Al 颗粒在沉积过程中经受

弹丸的反复撞击, 产生强烈的塑性变形, 在涂层内局部区域形成多次机械活化, 也在一定程度上降低了喷丸辅助冷喷涂 Ni-Al 涂层的反应起始温度。

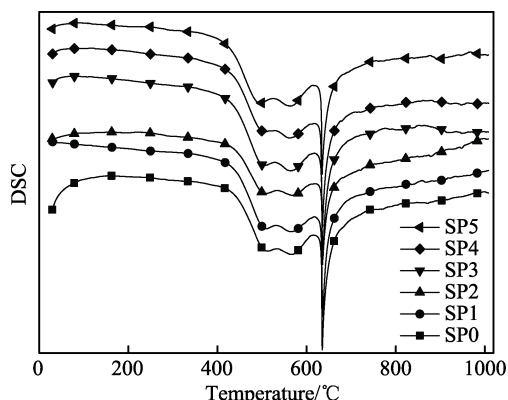


图 5 喷丸辅助沉积制备的 Ni-Al 涂层 DSC 曲线
Fig.5 DSC curves of Ni-Al coatings prepared by shot peening assisted cold spraying

图 6 为未添加弹丸 (SP0)、弹丸含量 50% (SP2) 和 77% (SP4) 粉末所制备 Ni-Al 涂层自蔓延燃烧的高速摄影图像和计算得到的自蔓延反应速度。从图中可看出, Ni-Al 试样点燃后均发生了自持反应, 燃烧波稳定地向未反应的区域延伸。未添加弹丸粉末制备的 Ni-Al 涂层自蔓延燃烧速度为 77 mm/s; 添加 50% 弹丸后, 制备的 Ni-Al 涂层燃烧速度提高至 370 mm/s; 弹丸含量为 77% 时, Ni-Al 涂层燃烧速度达到 416 mm/s。喷丸辅助效应使冷喷涂 Ni-Al 涂层的燃烧速度提高了近 5 倍。

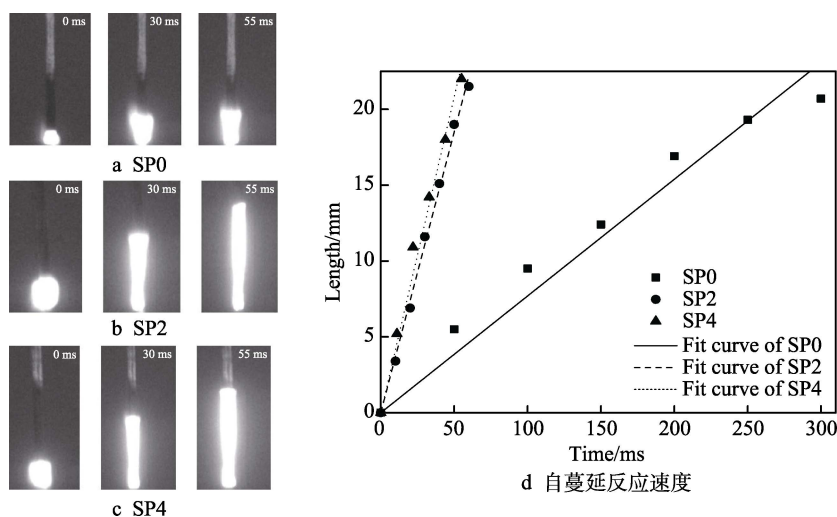


图 6 SP0、SP2 和 SP4 粉末所制备 Ni-Al 涂层自蔓延燃烧过程和自蔓延反应速度
Fig.6 Self-propagating combustion process of Ni-Al coatings of (a) SP0, (b) SP2, (c) SP4 and (d) combustion velocity

叠层结构的反应材料中, 自蔓延燃烧波速与材料反应热的生成速率有关^[27], Hardt 等人^[28]通过叠层结构简化模型, 建立了反应热生成速率与反应激活能及材料间接触度的关系, 即反应热生成速率与组元间接触的平方成正比。在此基础上, 赵慧林等^[15]针对包套

冷轧后的冷喷涂 Ni-Al 涂层结构, 基于一维瞬态傅里叶导热方程, 推导了自蔓延燃烧波速与组元间接触度、反应激活能、密度的关系, 推导结果与试验结果吻合较好。弹丸添加对冷喷涂 Ni-Al 涂层的成分和密度影响很小, 主要影响 Ni-Al 涂层的反应激活能和组

元间的接触度。添加弹丸后, 制备的 Ni-Al (SP2、SP4) 涂层中的组元接触度比未添加弹丸涂层 (SP0) 提高了近三倍, 同时降低了 Ni-Al 涂层的反应激活能, 因而显著提高了喷丸辅助冷喷涂 Ni-Al 涂层的自蔓延反应速度。

3 结论

1) 喷丸辅助冷喷涂技术可沉积 Ni、Al 组元分布均匀的致密 Ni-Al 含能结构涂层, 在弹丸冲击作用下, 涂层中的 Al 颗粒及 Ni 颗粒均发生了强烈的塑性变形, 原始粉末中弹丸含量对涂层中 Al 颗粒及 Ni 颗粒的含量影响均不大。

2) 喷丸辅助冷喷涂沉积的 Ni-Al 涂层的静态 ($10^{-3}/s$) 压缩强度约 210~250 MPa, 动态 (3000/s) 压缩强度约 310~335 MPa, 各向异性不明显。

3) 随着原始粉末中弹丸含量的增加, 所沉积 Ni-Al 含能结构涂层的反应起始温度降至约 422 °C, 反应热焓值约 1.0 kJ/g。

4) 喷丸辅助沉积显著提高了涂层的自蔓延燃烧速度, 与未添加弹丸制备的 Ni-Al 涂层 77 mm/s 的自蔓延速度相比, 喷丸辅助沉积的涂层提高到 416 mm/s, 提高了近 5 倍。

参考文献:

- [1] 陶玉强, 白书欣, 阳世清, 等. 反应结构材料制备技术的研究现状[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(10): 2079-2090.
TAO Yu-qiang, BAI Shu-xin, YANG Shi-qing, et al. Research status of preparation technology for reactive material structures[J]. Chinese journal of nonferrous metals, 2017, 27(10): 2079-2090.
- [2] DREIZIN E L. Metal-based reactive nanomaterials[J]. Progress in energy & combustion science, 2009, 35(2): 141-167.
- [3] CHURCH P, CLARIDGE R, OTTLEY P, et al. Investigation of a nickel-aluminum reactive shaped charge liner[J]. Journal of applied mechanics, 2013, 80(3): 1-24.
- [4] 王泽山. 含能材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 12-17.
WANG Ze-shan. Introduction to energetic materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005: 12-17.
- [5] 曹召勋, 王军, 徐永东, 等. Al-Ni 活性金属材料力学性能及其释能行为研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(5): 96-102.
CAO Zhao-xun, WANG Jun, XU Yong-dong, et al. Mechanical properties and impact energy release behavior of Al-Ni reactive metallic materials[J]. Ordnance material science and engineering, 2018, 41(5): 96-102.
- [6] 陈元建, 陈进, 王军, 等. Al-Ni-W 活性材料动态力学行为及其释能特性[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(5): 71-75.
CHEN Yuan-jian, CHEN Jin, WANG Jun, et al. Dynamic mechanical behavior and energy release characteristics of Al-Ni-W reactive material[J]. Ordnance material science and engineering, 2018, 41(5): 71-75.
- [7] 张先锋, 赵晓宁. 多功能含能结构材料研究进展[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 731-739.
ZHANG Xian-feng, ZHAO Xiao-ning. Review on multifunctional energetic structural materials[J]. Chinese journal of energetic materials, 2009, 17(6): 731-739.
- [8] 李文亚, 张冬冬, 黄春杰, 等. 冷喷涂技术在增材制造和修复再制造领域的应用研究现状[J]. 焊接, 2016(4): 2-8.
LI Wen-ya, ZHANG Dong-dong, HUANG Chun-jie, et al. State of the art of cold spraying additive manufacturing and remanufacturing[J]. Welding & joining, 2016(4): 2-8.
- [9] 苏贤涌, 周香林, 崔华, 等. 冷喷涂技术的研究进展[J]. 表面技术, 2007, 36(5): 71-74.
SU Xian-yong, ZHOU Xiang-lin, CUI Hua, et al. Research progress in cold gas dynamic spray technology[J]. Surface technology, 2007, 36(5): 71-74.
- [10] BACCIOCHINI A, RADULESCU M I, YANDOUZI M, et al. Reactive structural materials consolidated by cold spray: Al-CuO thermite[J]. Surface and coatings technology, 2013, 226: 60-67.
- [11] 赵慧林. 冷喷涂 Ni-Al 基活性材料组元调控基反应特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
ZHAO Hui-lin. Research on composition regulation and reactivity characteristics of cold-sprayed Ni-Al based reactive materials[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019.
- [12] ZHAO H L, NING X J, TAN C W, et al. Influence of $Al_{12}Mg_{17}$ additive on performance of cold-sprayed Ni-Al reactive material[J]. Journal of thermal spray technology, 2019, 28(3): 1-14.
- [13] BACCIOCHINI A, RADULESCU M I, CHARRON-TOUSIGNANT Y, et al. Enhanced reactivity of mechanically-activated nano-scale gasless reactive materials consolidated by coldspray[J]. Surface and coatings technology, 2012, 206(21): 4343-4378.
- [14] BYUN G J, KIM J I, LEE C H, et al. Kinetic spraying deposition of reactive-enhanced Al-Ni composite for shaped charge liner applications[J]. Journal of thermal spray technology, 2016, 25(3): 483-493.
- [15] ZHAO H L, TAN C W, YU X D, et al. Enhanced reactivity of Ni-Al reactive material formed by cold spraying combined with cold-pack rolling[J]. Journal of alloys & compounds, 2018, 741: 883-894.
- [16] 张度宝. Ni-Al 金属反应材料的制备和性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
ZHANG Du-bao. Study on preparation and properties of Ni-Al metallic energetic material[D]. Nanjing: Nanjing

- University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [17] 宋丹丹. Ni-Al-W 活性复合材料组织与性能关系研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
SONG Dan-dan. Study on the relationship between microstructure and properties of Ni-Al-W active composite materials[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [18] 李长久, 雒晓涛, 杨冠军. 一种高致密度冷喷涂金属/金属基沉积体的制备方法和应用: 中国, CN104894554A [P]. 2015-04-10.
LI Chang-jiu, LUO Xiao-tao, YANG Guan-jun. A method for manufacturing high dense cold sprayed metal or metal deposit and its deposition: China, CN104894554A [P]. 2015-04-10.
- [19] LUO X T, WEI Y K, WANG Y, et al. Microstructure and mechanical property of Ti and Ti6Al4V prepared by an in-situ shot peening assisted cold spraying[J]. Materials & design, 2015, 85: 527-533.
- [20] ZHOU H X, LI C X, JI G, et al. Local microstructure inhomogeneity and gas temperature effect in in-situ shot-peening assisted cold-sprayed Ti-6Al-4V coating[J]. Journal of alloy and compound, 2018, 766: 694-704.
- [21] 雒晓涛, 魏瑛康, 张越, 等. 原位微锻造冷喷涂制备高致密铝基涂层及耐腐蚀性能[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 48-53.
LUO Xiao-tao, WEI Ying-kang, ZHANG Yue, et al. Fully dense Al coatings sprayed by in-situ micro-forging assisted cold spray and corrosion protection[J]. Surface technology, 2019, 48(4): 48-53.
- [22] ASSADI H, GARTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding mechanism in cold gas spraying[J]. Acta materialia, 2003, 51(15): 4379-4394.
- [23] 李文亚, 李长久. 冷喷涂特征[J]. 中国表面工程, 2002, 15(1): 12-16.
LI Wen-ya, LI Chang-jiu. Characteristics of cold spray process[J]. China surface engineering, 2002, 15(1): 12-16.
- [24] FENG B, XIONG T Y. Anisotropy of bulk pure aluminum fabricate by cold spray[C]// International thermal spray conference and exposition-ITSC. Orlando: FL, 2018.
- [25] 马乃恒, 方小汉, 梁工英, 等. 机械活化对 Al-Ti-C 粉料合成反应激活能的影响[J]. 金属学报, 2000, 36(11): 1169-1171.
MA Nai-heng, FANG Xiao-han, LIANG Gong-ying, et al. Influence of mechanical activation on reaction activation energy of Al-Ti-C powder mixture in synthesis process[J]. Acta metallurgica sinica, 2000, 36(11): 1169-1171.
- [26] 韩婷婷, 龙威, 周小平. Mg₃Sb₂ 金属间化合物的机械化学合成工艺[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(3): 41-48.
HAN Ting-ting, LONG Wei, ZHOU Xiao-ping. Mechanical and chemical synthesis process of Mg₃Sb₂ intermetallic compound[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(3): 41-48.
- [27] HOLT J B, MUNIR Z A. Combustion synthesis of titanium carbide: Theory and experiment[J]. Journal of materials science, 1986, 21(1): 251-259.
- [28] HART A P, PHUNG P V. Propagation of gasless reactions in solids—I. Analytical study of exothermic intermetallic reaction rates[J]. Combustion and flame, 1973, 21: 77-89.

(上接第 49 页)

- [26] MA Y C, FAN B M, ZHOU T, et al. Molecular assembly between weak crosslinking cyclodextrin polymer and trans-cinnamaldehyde for corrosion inhibition towards mild steel in 3.5% NaCl solution: Experimental and theoretical studies[J]. Polymers, 2019, 11(4): 635.
- [27] 樊保民, 郝华, 杨彪, 等. 超分子缓蚀剂在冷凝水管线钢表面的组装机理[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 22-29.
FAN Bao-min, HAO Hua, YANG Biao, et al. Assembly mechanism of a supramolecular corrosion inhibitor on the condensate pipeline steel[J]. Surface technology, 2018, 47(10): 22-29.
- [28] 李丛妮, 李俊莉, 李霁阳, 等. 醇醚基双咪唑啉缓蚀剂的性能及机理研究[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 302-308.
LI Cong-ni, LI Jun-li, LI Ji-yang, et al. Properties and mechanism of alcohol-ether-based bimidazoline corrosion inhibitor[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 302-308.
- [29] MA Y C, ZHOU T T, ZHU W Q, et al. Understanding the anticorrosive mechanism of a cross-linked supramolecular polymer for mild steel in the condensate water: Comprehensive experimental, molecular docking, and molecular dynamics investigations[J]. Journal of molecular modeling, 2020, 81: 46-72.
- [30] 黄文恒, 黄茜, 鲜磊, 等. 硫酸介质中丙氨酸复合缓蚀剂的研究[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 356-364.
HUANG Wen-heng, HUANG Xi, XIAN Lei, et al. Complex corrosion inhibitor of alanine in sulfuric acid medium[J]. Surface technology, 2019, 48(11): 356-364.
- [31] ITUEN E, MKPENIE V, YUANHUA L, et al. Inhibition of erosion corrosion of pipework steel in descaling solution using 5-hydroxytryptamine-based additives: Empirical and computational studies[J]. Journal of molecular structure, 2020, 1204: 127562.
- [32] OLASUNKANMI L, EBENSO E. Experimental and computational studies on propanone derivatives of quinoxaline-6-yl-4,5-dihydropyrazole as inhibitors of mild steel corrosion in hydrochloric acid[J]. Journal of colloid and interface science, 2020, 561: 104-116.
- [33] KUMAR D, JAIN V, RAI B. Imidazole derivatives as corrosion inhibitors for copper: A DFT and reactive force field study[J]. Corrosion science, 2020, 171: 108725.