

# 气体温度对冷喷涂 7075 铝合金涂层性能的影响

吴增荣<sup>1,2</sup>, 胡永俊<sup>1</sup>, 代明江<sup>2</sup>, 张科杰<sup>2</sup>, 小川和洋<sup>3</sup>, 谢迎春<sup>2</sup>, 黄仁忠<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006; 2. 广东省新材料研究所 现代材料表面工程技术国家工程实验室 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510650;  
3. 日本东北大学, 日本 仙台 980-8579)

**摘要:** **目的** 研究气体温度对冷喷涂 7075 铝合金涂层性能的影响, 以期为制备高性能涂层提供重要参考。**方法** 利用冷喷涂技术, 在较高的工作气体压力 (5 MPa) 下, 通过改变工作气体温度 (450、500、550、600 °C), 采用氮气在纯铝基体上制备了大厚度 7075 铝合金涂层。采用光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM) 对涂层组织结构及孔隙率进行了分析测定, 用维氏显微硬度法测定涂层硬度, 通过拉伸实验测定涂层结合强度, 研究了冷喷涂工作气体温度对 7075 铝合金涂层组织及沉积特性的影响。**结果** 工作气体温度在 450~550 °C 范围时, 对涂层组织及力学性能影响有限。当工作气体温度为 450 °C 时, 涂层孔隙率为 0.14%, 显微硬度为 117.8HV<sub>0.1</sub>, 结合强度超过 55.3 MPa。但过高的工作气体温度并不利于冷喷涂 7075 铝合金涂层的制备, 当喷涂气体温度达到 600 °C 时, 涂层孔隙率升高到 4.2%。**结论** 仅采用廉价的氮气即可制备高致密度和高结合强度的冷喷涂 7075 涂层, 当主气温度在 450~550 °C 区间时, 涂层微观组织和性能随气体温度变化不大, 而过高的工作气体温度 (600 °C) 并不利于冷喷涂 7075 涂层相关性能的提升。

**关键词:** 冷喷涂; 7075 涂层; 气体温度; 显微组织; 性能

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)01-0318-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.038

## Effect of Gas Temperature on Properties of Cold Sprayed 7075 Aluminum Alloy Coatings

WU Zeng-rong<sup>1,2</sup>, HU Yong-jun<sup>1</sup>, DAI Ming-jiang<sup>2</sup>, ZHANG Ke-jie<sup>2</sup>,  
Kazuhiro Ogawa<sup>3</sup>, XIE Ying-chun<sup>2</sup>, HUANG Ren-zhong<sup>2</sup>

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
2. National Engineering Laboratory of Modern Material Surface Engineering Technology, Key Laboratory of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510650, China; 3. Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of gas temperature on the properties of 7075 aluminum alloy coating in order to

收稿日期: 2019-07-12; 修订日期: 2019-12-03

Received: 2019-07-12; Revised: 2019-12-03

基金项目: 广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项资金项目 (2019GDASYL-0503006); 广东省科技计划项目 (2017A070701027, 2014B070705007); 广东省科学院科技提升项目 (2017GDASCX-0202, 2017GDASCX-0111)

Fund: Guangdong Academy of Sciences' Project of Constructing First-class Domestic Research Institutions (2019GDASYL-0503006), Guangdong Science and Technology Program (2017A070701027, 2014B070705007), GDAS' Project of Science Technology Development (2017GDASCX-0202, 2017GDASCX-0111)

作者简介: 吴增荣 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为冷喷涂技术。

Biography: WU Zeng-rong (1993—), Male, Master, Research focus: cold spraying technology.

通讯作者: 黄仁忠 (1977—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为冷喷涂技术。邮箱: huangrenzhong@gdinm.com

Corresponding author: HUANG Ren-zhong (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: cold spray technology. E-mail: huangrenzhong@gdinm.com

provide an important reference for the preparation of high performance coating. 7075 aluminum alloy coatings with large thickness were prepared on pure aluminum substrates by cold spraying technique under high working gas pressure of 5 MPa and changing working gas temperature (450, 500, 550 and 600 °C). Microstructure and porosity of the coatings were characterized by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). Hardness of the coatings was measured by Vickers microhardness. Bonding strength of the coatings was measured by tensile test method. The effect of working gas temperature on the microstructure and deposition characteristics of cold sprayed 7075 aluminum alloy coatings was studied. The working gas temperature had limited influence on the microstructure and mechanical properties of the coatings in the range of 450 °C to 550 °C. When spraying gas temperature was set at 450 °C, the porosity was 0.14%, the microhardness was 117.8HV<sub>0.1</sub>, and the bonding strength was more than 55.3 MPa. However, too high working gas temperature was not conducive to the preparation of cold sprayed 7075 aluminum alloy coatings. When the gas temperature reached 600 °C, the porosity of the coating increased to 4.2%. 7075 aluminum alloy coatings with high density and high bonding strength can be prepared by cheap nitrogen. When gas temperature is set in the range of 450 °C to 550 °C, microstructure and properties of the coatings do not change much with the gas temperature and too high temperature (600 °C) is not beneficial to the improvement of the related properties of 7075 coatings.

**KEY WORDS:** cold spray; 7075 coatings; gas temperature; microstructure; property

航空用铝及铝合金由于密度小、强度高、成形性能好等优点,广泛应用于航空航天器零部件(如飞机蒙皮、隔框、壁板、油路机匣等)的制造。然而铝合金通常耐磨性较差,在大载荷、高振动的服役环境下,零部件配合部位容易因磨损失效而报废,造成安全事故和巨大经济损失<sup>[1-3]</sup>。因此,采用再制造技术对铝合金零部件受损部位进行修复具有重要意义。7075 作为强度最高的常规航空铝合金,可作为修复材料应用于其他变形铝合金以及铸造铝合金零部件的再制造,不仅能够恢复原有尺寸和功能,更能够对受损部位进行强化<sup>[4]</sup>。然而传统表面修复技术,如焊接和热喷涂技术等,由于高温热源的引入,不可避免地会在修复部位产生较大的热影响区,容易产生变形破坏,同时修复层还存在氧化严重、孔隙率高、易产生裂纹等问题<sup>[5-6]</sup>,严重影响铝合金修复件在服役过程中的安全性和可靠性,存在一定的局限性。因此,开发可靠的铝及铝合金零部件修复技术对提升航空工业相关修复技术水平十分重要<sup>[7-8]</sup>。

冷喷涂是 20 世纪 80 年代中期新发展起来的一种新型涂层加工技术<sup>[9]</sup>,并逐步发展成为增材制造与再制造技术。相对于传统再制造技术,冷喷涂过程中材料的温度远低于其熔点,粉末粒子在碰撞基体前处于固态,对基体热影响较小,在整个喷涂过程中,材料发生氧化、相变、晶粒长大的程度低,喷涂材料的成分与组织结构能够保留到涂层中,保证了修复层组织性能的均匀性和稳定性<sup>[10]</sup>,适合作为铝合金等有色金属零部件的修复技术<sup>[11]</sup>。虽然变形铝合金一般塑性较好,有利于粉末变形沉积,但是其较低的密度使得粉末粒子的运动行为更容易受到冷喷涂气流场结构,尤其是基体附近的弓形激波的影响,就目前公开的报道来看,沉积性能并不理想,所制备的沉积体内部往往有较大的空隙率,与基体的结合强度也有限<sup>[12-13]</sup>。7075 作为 Al-Zn-Mg-Cu 变

形铝合金,由于添加了少量的 Zn、Cu 等元素,其密度略有增加,但是塑性相对于纯铝则明显降低(延伸率通常<10%),其冷喷涂工艺性能更差,相关报道尤其是国内的研究十分有限,尚未有采用廉价的氮气作为喷涂气体成功制备 7075 沉积体的公开报道。Sabard 等人<sup>[14]</sup>为提高 7075 铝合金冷喷涂工艺性能,采用对原始粉末固溶热处理以提高粉末塑性的方法,在 6061 铝合金上制备了 7075 铝合金涂层。虽然喷涂气体选用昂贵的氦气,并且热处理后粉末沉积效率从 8.6%提高到 50%,然而涂层内部仍然有较多裂纹、孔洞等缺陷,并且表征涂层性能的关键技术指标——结合强度也未能给出。不仅如此,所制备的涂层厚度仅有约 300 μm,实际应用价值有限。Rokni 等人<sup>[15-17]</sup>则在冷喷涂 7075 方面做了大量系统性的研究工作,从涂层沉积过程中组织结构演变到力学性能,再到后处理(时效)对涂层显微结构和力学性能的影响,都有较为深入的研究,然而其所有冷喷涂 7075 工艺均采用氦气作为喷涂气体,成本较高,难以大批量应用。另外,其研究也没有涉及气体温度这一重要参数对涂层组织性能的影响。实际上,在常规的冷喷涂过程中,虽然相同条件下提高气体温度往往有利于提高粉末粒子速度和颗粒软化程度,从而有利于粉末颗粒的变形沉积<sup>[18]</sup>,但是对于以铝合金为代表的低熔点材料而言,也许并非如此。过高的温度可能导致粉末部分熔化,产生不必要的氧化和相变,导致涂层性能变差。为此,本研究采用高压冷喷涂系统,首次采用氮气作为工作气体成功制备了高致密度、高结合强度、大厚度的 7075 冷喷涂涂层,并且在此基础上,研究了工作气体温度对冷喷 7075 铝合金涂层微观结构、致密度、硬度、结合强度的影响。通过调控过程参数来提升 7075 铝合金涂层的性能,以期制备性能优异的 7075 冷喷涂涂层提供重要参考。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验基体材料选用市购 1060 纯铝板, 尺寸为 100 mm×100 mm×3 mm。喷涂粉末为 7075 铝合金, 图 1a 和图 1b 分别为其表面和截面形貌。可以看到大部

分粉末球形度较差, 且颗粒表面粗糙, 存在卫星球, 符合气雾化工艺制备特征。颗粒内部呈典型的高速凝固形成的胞状枝晶组织, 经采用 Nano Measurer 软件测量, 晶粒尺寸范围为 2.4~8.2  $\mu\text{m}$ , 平均 4.3  $\mu\text{m}$ 。粉末粒径分布则采用 Malvern 激光粒度测试仪湿法测量所得, 如图 2 所示, D10 为 28.1  $\mu\text{m}$ , D50 为 47.9  $\mu\text{m}$ , D90 为 82.1  $\mu\text{m}$ 。

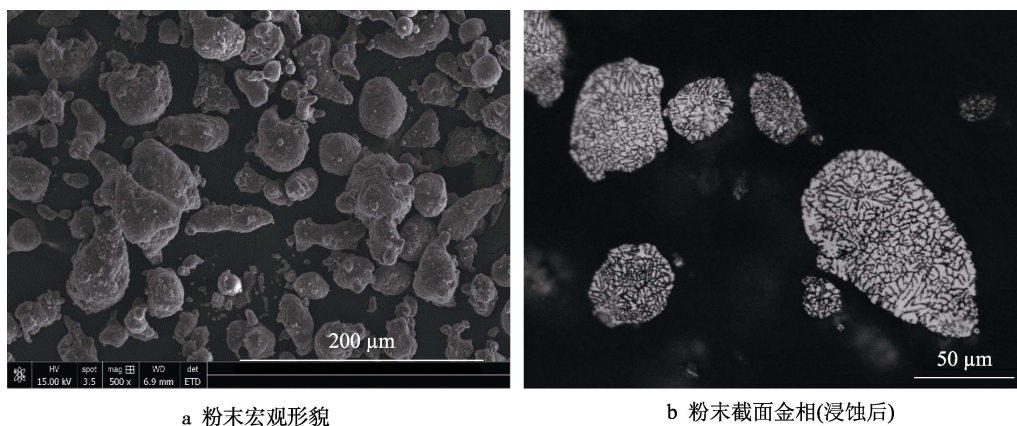


图 1 实验用 7075 铝合金粉末  
Fig.1 7075 aluminum alloy powder for experiment: a) macromorphology of powders;  
b) cross-section OM image of powder particle (after etch)

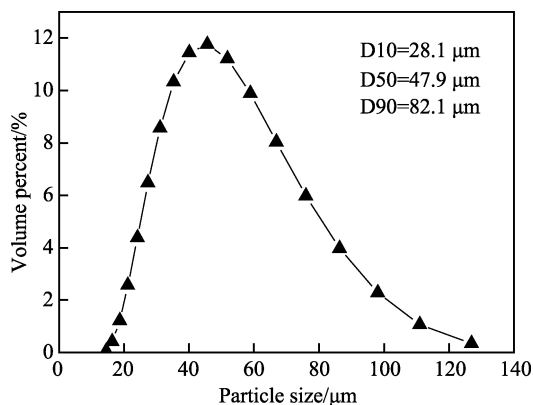


图 2 7075 粉末颗粒粒径分布  
Fig.2 Size distribution of as-received 7075 powders

### 1.2 涂层和试样制备

实验前先将基体进行喷砂处理, 随后采用丙酮超声波清洗干净并吹干。采用日本等离子技研工业株式会社研制的 PCS1000 高温高压冷喷涂系统,  $\text{N}_2$  作为工作气体, 在纯铝基体上制备了 7075 铝合金涂层, 具体喷涂工艺参数如表 1 所示。

### 1.3 涂层性能表征

涂层截面和粉末颗粒采用 LEICA DMINM MW550 金相显微镜观察。涂层孔隙率采用图像法测定: 先随机选取 5 张涂层截面微观照片, 利用 Leica 软件对每张照片进行分析并计算孔隙率, 最后取其平均值。为观察涂层内部颗粒变形和结合情况, 采用 Keller 试剂

表 1 冷喷涂 7075 铝合金涂层工艺参数

Tab.1 Processing parameters of cold sprayed 7075 aluminum alloy coatings

No.	Parameter			
	Gas temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Gas pressure/MPa	Spraying distance/mm	Spraying angle/ $^{\circ}$
1	450	5	30	90
2	500	5	30	90
3	550	5	30	90
4	600	5	30	90

( $\text{H}_2\text{O}$  95%,  $\text{HNO}_3$  2.5%,  $\text{HCl}$  1.5%,  $\text{HF}$  1%) 浸蚀涂层试样 25 s, 清洗干净后进行金相观察。除此之外, 用 JSM-5910 扫描电镜对涂层内部微观组织做进一步的观察分析, 并采用配套的 EDS 能谱仪进行元素成分半定量分析。采用 MH-5D 型显微硬度计对涂层进行显微硬度测量, 在每组试样上分别选取 5 个测试点, 施加载荷为 100 g, 加载时间为 15 s, 然后计算其平均值作为该涂层的显微硬度。涂层结合强度测试按照 ASTM C633 标准进行: 先用 FM1000 胶将试样与对偶件相连, 用夹具锁紧后, 在 190  $^{\circ}\text{C}$  下加热 3 h, 使胶充分润湿界面并粘接牢固, 再采用 GP-TS2000M 万能试验机进行拉伸实验。

## 2 结果及分析

### 2.1 涂层组织结构分析

图 3 为通过冷喷涂技术在不同气体温度下制备

的 7075 铝合金涂层截面金相低倍图像, 可以看到在 400~550 °C 范围内, 涂层与基体结合良好, 涂层内部相对致密, 无明显孔洞及夹杂, 孔隙率均小于 0.5%, 厚度也都超过 1 mm。说明本实验条件下, 采用 5 MPa 廉价高压氮气, 能够在纯铝基体上制备大厚度致密 7075 铝合金涂层。对比图 3a、b、c 还可以发现, 随

着喷涂温度由 450 °C 升高到 550 °C, 涂层宏观结构并未发现明显区别, 然而当工作气体温度升高到 600 °C, 涂层结构出现了明显的突变, 尽管涂层/基体界面依然结合良好, 未出现未结合区域, 但涂层内部出现了微米级扁平状孔洞, 分布于整个涂层内部, 涂层致密度明显低于前三者。

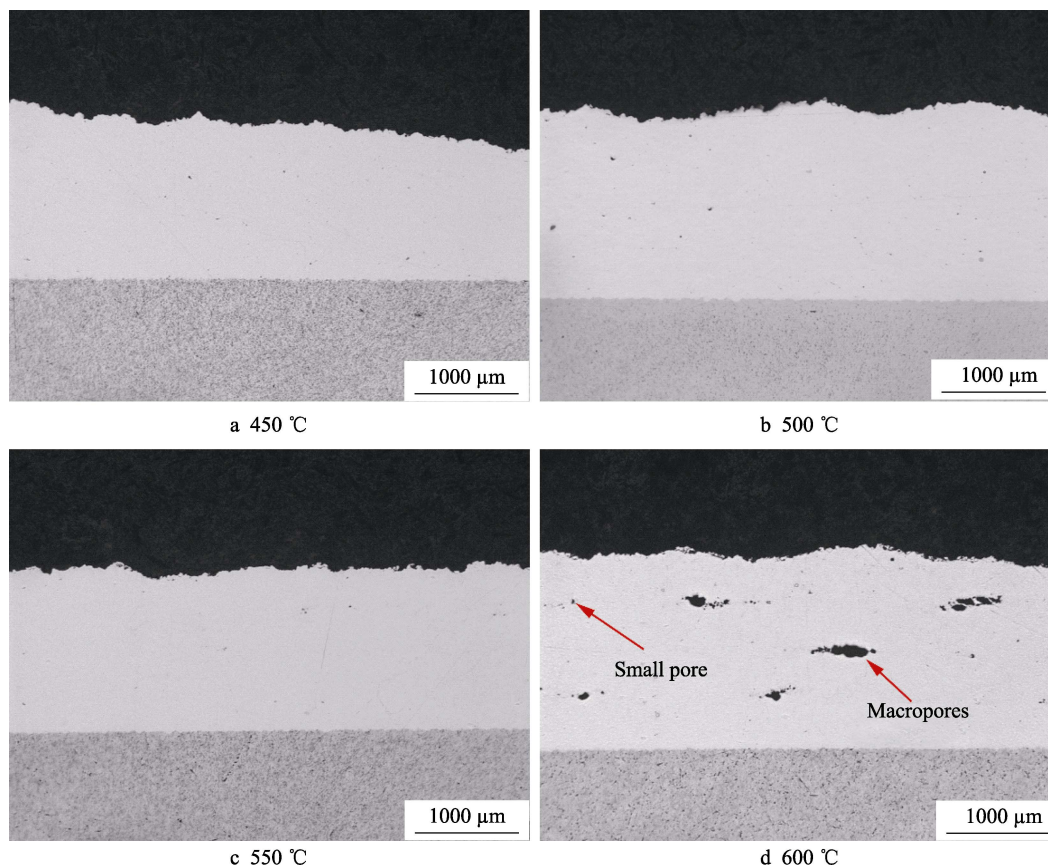


图 3 冷喷涂 7075 涂层微观结构

Fig.3 Microstructure of cold sprayed 7075 coatings

为了进一步观察粉末颗粒的变形行为及粉末颗粒之间、粉末与基体之间的结合情况, 对 4 种温度下制备的涂层试样浸蚀后进行金相观察<sup>[19]</sup>。如图 4 所示, 可以清晰看到涂层内部的粒子堆积结构, 颗粒内部晶粒也清晰可见。粉末颗粒均经历了不同程度的变形, 呈扁平化趋势。虽然由于部分粒子变形不足够充分, 在部分交界三角区存在约数微米大小的孔洞, 但总体上粒子之间结合良好, 界面连续且无明显缺陷, 为涂层较高的内聚力提供了基本保障。涂层与基体界面呈锯齿状, 部分粉末颗粒嵌入基体, 形成了有效的机械咬合, 且无裂纹和孔洞, 因此预计涂层有较高的结合强度。

对比 4 种温度下粉末颗粒变形情况和内部晶粒分布还可以看到, 随着主气温度的提升, 粉末变形程度有略微增大的趋势, 颗粒内部晶粒沿变形方向取向更加明显, 并且当温度达到 600 °C 时, 相同浸蚀条件下粉末颗粒边界相对更不明显, 颗粒内部晶粒大小均匀化程度也略有提升。

为进一步研究变形颗粒内部组织结构, 选取 550、450 °C 喷涂试样为代表进行 SEM 检测分析。如图 5a 红色虚线和箭头所示, 为典型的冷喷涂粒子变形结构。根据晶界析出相的分布可以看到, 颗粒内部变形非常不均匀, 粉末中心位置仍为胞状枝晶结构, 其大小和形态与原始粉末相比变化不大。而颗粒边缘则发生了强烈的塑性变形, 呈流线形态。另外晶粒尺寸也相对较小, 说明在冷喷涂过程中, 颗粒边界发生了晶粒细化<sup>[20]</sup>。

为进一步研究晶界析出相成分, 在晶界和晶粒内部各选取两个点进行 EDS 元素半定量分析, 如图 5b 所示, 测得各点元素含量如表 2 所示。可以发现, 7075 涂层中晶粒边界上铜和镁的含量高于晶粒, 而对于 7075 铝合金来说, 其主要强化相有  $\eta$ [Mg(Zn,Cu,Al<sub>2</sub>)] 和 T(Al<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub>) 等<sup>[21]</sup>, 由此可推测图 5 中的白色区域应该是沿晶界析出的强化相 Mg(Zn,Cu,Al<sub>2</sub>) 和 Al<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub>, 晶粒内部则为铝基固溶体。对于强化相的来源, 根据上文对原始粉末和涂层内部微观组织分

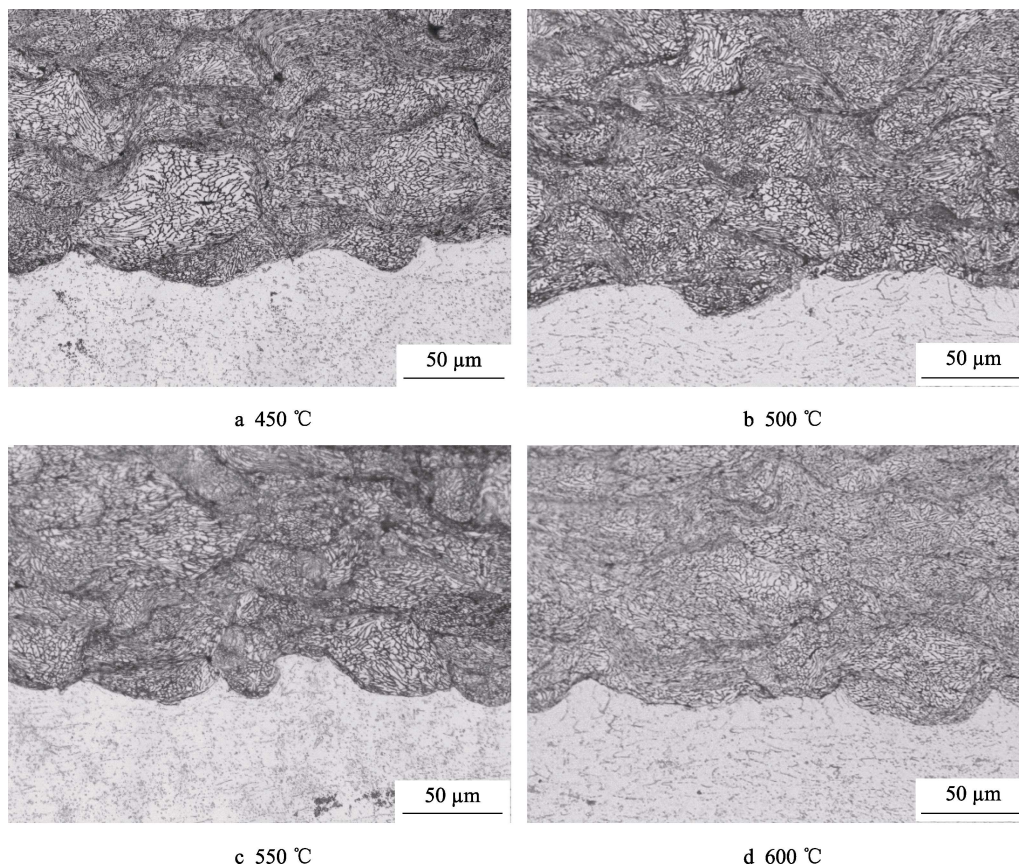


图 4 7075 涂层腐蚀后组织结构

Fig.4 OM microstructure of 7075 coatings after etch

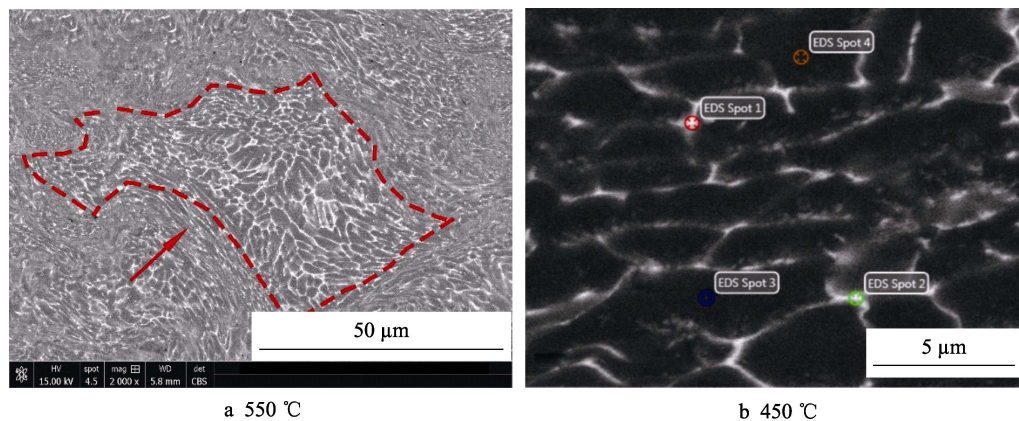


图 5 涂层 SEM 图

Fig.5 SEM image of coatings

析, 强化相应为原始粉末所保留。强化相的存在, 加上粉末粒子沉积时大变形产生的加工硬化以及晶粒细化作用, 将有助于涂层强度的提升。

表 2 450 °C 涂层 EDS 元素分析结果

Tab.2 EDS analysis of 7075 coatings deposited at 450 °C %

Elements	Spot1	Spot2	Spot3	Spot4
Al	81.9	82.9	95.8	95.9
Zn	6.6	6.1	1.3	1.3
Mg	8.2	8.0	2.6	2.4
Cu	3.3	3.0	0.3	0.4

## 2.2 涂层孔隙率

孔隙率检测结果显示, 当主气温度为 450、500、550 °C 时, 涂层平均孔隙率分别为 0.15%、0.21%、0.14%。可以发现, 其他过程参数完全相同的情况下, 主气温度从 450 °C 升高到 550 °C, 孔隙率并无明显变化, 且都处于很低水平 (<0.5%)。这说明随着主气压强达到 5 MPa 高压时, 气体温度为 450 °C 时, 涂层内部已较为致密。但是, 随着喷涂工作气体温度继续升高到 600 °C 时, 涂层的孔隙率发生了突变, 达到了 4.2%, 如图 3d 所示, 涂层内部同一高度处出现

了扁平状的宏观大孔隙，其尺寸达到了百微米级。这可能是由于当喷涂气体温度进一步上升，一方面粉末颗粒沉积时温度更高，另一方面粉末撞击基体时速度也有所提升<sup>[22-23]</sup>，撞击后因大变形产生的热量也更高，综合作用使得粉末颗粒沉积后的温度，尤其是边缘部位温度提升，随着喷枪移动，沉积粒子直接暴露在空气中导致氧化较严重，后续沉积性能变差，产生层间分离现象，促进了扁平大孔隙的产生。关于其更为具体的形成机制，还有待下一步的专门研究。

### 2.3 涂层显微硬度

显微硬度是涂层微观组织的宏观体现，很大程度上与涂层力学性能直接相关。本实验条件下冷喷涂 7075 涂层显微硬度测量结果如图 6 所示，可以看到，随着主气温度的升高，冷喷涂 7075 铝合金涂层的平均硬度变化不大，涂层硬度受主气温度的影响较小。但 4 种温度条件下冷喷涂制备的 7075 铝合金涂层相对于 7075 板材的硬度值（102HV<sub>0.1</sub>，图 6 红色线）均有一定程度的提高。当主气温度为 500 °C 时，涂层的平均显微硬度达到了最高值 119.5HV<sub>0.1</sub>，这主要归因于冷喷涂粒子碰撞过程中，剧烈的塑形变形引起的加工硬化作用。随着颗粒撞击基体后塑性变形的进行，碰撞位置晶粒细化，位错密度不断增大，同时位错在运动时相互交割、缠结加剧，使位错运动阻力增大，引起变形阻力增大，提高了冷喷涂 7075 铝合金涂层的硬度。值得注意的是，当主气温度提高到 600 °C 时，涂层的硬度表现出降低的趋势，平均硬度仅为 107.4HV<sub>0.1</sub>。这是由于，一方面涂层孔隙率的升高降低了涂层的整体硬度；另一方面，对于熔点较低的 7075 铝合金，在 600 °C 较高的主气温度条件下，如前所述，粒子沉积时的温度和速度均较高，在撞击基体的瞬间，大量的动能转化为热能，在粒子边缘尤其是发生绝热剪切失稳的位置，温度升高可能达到熔点<sup>[24-25]</sup>，涂层局部位置甚至可能发生熔化，附近区域因温度升高产生的软化作用也大于加工硬化产生的硬化作用，使得涂层硬度降低，其数值几乎接近普通板材。

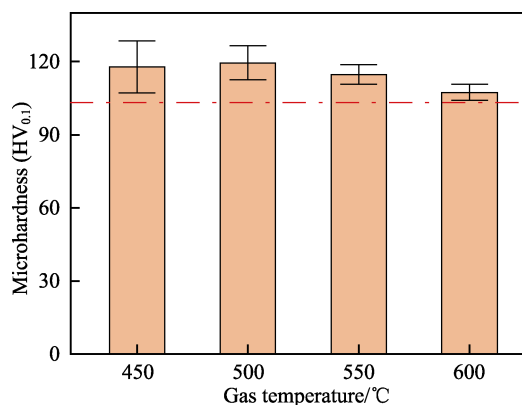


图 6 不同喷涂温度涂层显微硬度  
Fig.6 Microhardness of coatings at different spraying temperature

### 2.4 涂层结合强度

涂层结合强度作为涂层性能最重要指标之一，反映了涂层的力学性能，涂层结合强度的优劣直接决定了冷喷涂 7075 铝合金是否能用于轻质合金零部件的表面修复。图 7 显示了不同主气温度条件下，涂层的结合强度测试结果。

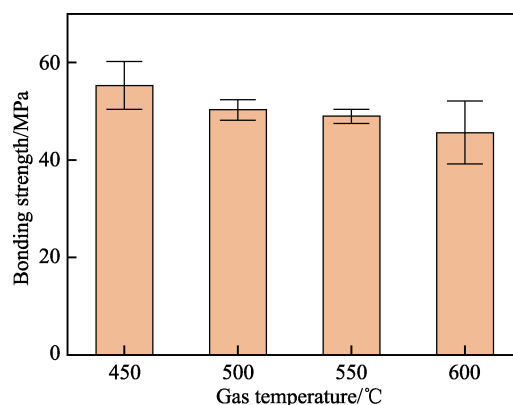


图 7 不同喷涂温度涂层拉伸实验结果  
Fig.7 Tensile test results of coatings at different processing temperature

可以看到，测得的结合强度值均大于 45 MPa，最低值和最高值分别为 45.6 MPa 和 55.3 MPa。然而分析试样断裂面可以看到，所有样品中，其断裂面均发生在涂层与对偶件连接的 FM1000 胶面（图 8），也就是说拉伸过程中 FM1000 胶均先于涂层/基体界面失



图 8 结合强度测试试样失效模式  
Fig.8 Failure mode of samples in bonding strength test

效,可能是该胶与涂层润湿性不好,导致胶与涂层界面成为体系最弱部位。因此该结合强度测试结果并不能真实地反映本实验条件下冷喷涂 7075 铝合金涂层与纯铝基体的结合强度。但是可以确定的是,涂层结合强度均高于所测得的值。也就是说 450 °C 条件下涂层的结合强度大于 55.3 MPa。该实验结果证明,冷喷涂技术通过提高工作气体压力,利用价格相对便宜的氮气也可以制备出具有较高结合强度的 7075 铝合金涂层,这对于低成本修复轻质合金零部件,具有重要的现实意义。

### 3 结论

1) 采用廉价的氮气,通过提高冷喷涂的主气压力(5 MPa)制备出了孔隙率低(0.14%)、界面结合良好、力学性能优异的大厚度 7075 铝合金涂层,在本实验最优条件下,涂层与纯铝基体的结合强度超过 55.3 MPa。

2) 当主气温度从 450 °C 升高到 550 °C 时,冷喷涂 7075 铝合金涂层微观组织及性能受主气温度的影响较小;随着工作气体温度的升高,粉末变形程度有略微增大的趋势,颗粒内部晶粒沿变形方向取向更加明显。但显微硬度并未增加,甚至有轻微下降,这可能是由于粒子速度和温度均随着工作气体温度的升高而升高,过高的粒子温升可能导致材料软化效应部分抵消了由于粒子碰撞速度提高、塑形变形加剧而引起的加工硬化效应。

3) 利用高压冷喷涂系统制备 7075 涂层,过高的工作气体温度并不利于冷喷涂 7075 铝合金涂层的制备。当气体温度达到 600 °C 时,涂层微观结构出现明显变化,原先致密的涂层出现了数百微米级的扁平状大孔隙,涂层孔隙率高达 4.2%。

### 参考文献:

- [1] 陈亚莉. 铝合金在航空领域中的应用[J]. 有色金属加工, 2003, 32(2): 11-15.  
CHEN Ya-li. Application of aluminum alloy in aviation[J]. Processing of non-ferrous metals, 2003, 32(2): 11-15.
- [2] DIXON B, MOLENT L, BARTER S. A study of fatigue variability in aluminum alloy 7050-T7451[J]. International journal of fatigue, 2016, 92: 130-146.
- [3] DIXON B, BARTER S, MAZEIKA R. Quantification of the fatigue severity of porosity in aluminum alloy 7050-T7451 thick plate[J]. International journal of fatigue, 2018, 114: 217-225.
- [4] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials and design, 2014, 56: 862-871.
- [5] SIRVEN P, GARRIDO M A, CLAUDIO J M, et al. Effect

of higher deposition temperatures on the microstructure and mechanical properties of Al 2024 cold sprayed coatings[J]. Surface & coatings technology, 2018, 337: 461-470.

- [6] 张伟, 郭永明, 陈永雄. 热喷涂技术在产品再制造领域的应用及发展趋势[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 1-10.  
ZHANG Wei, GUO Yong-ming, CHEN Yong-xiong. Applications and future development of thermal spraying technologies for remanufacturing engineering[J]. China surface engineering, 2011, 24(6): 1-10.
- [7] 石仲川, 刘德鑫, 张晓云, 等. 冷喷涂技术的研究现状及在航空工业领域内的应用[J]. 材料导报, 2012, 26(9): 70-74.  
SHI Zhong-chuan, LIU De-xin, ZHANG Xiao-yun, et al. Research of cold gas dynamic spray technology and its application in aviation industry[J]. Material report, 2012, 26(9): 70-74.
- [8] ASSADI H, HKREYE H, HGÄRTNER F, et al. Cold spraying—A materials perspective[J]. Acta materialia, 2016, 116: 382-407.
- [9] GRIGORIE V, OKUNKOVA S, SOVA A, et al. Cold spraying: from process fundamentals towards advanced applications[J]. Surface & coatings technology, 2015, 268: 77-84.
- [10] ALKHIMOV A P, KOSAREV V F, PAPYRIN A N. A method of cold gas-dynamic deposition[J]. Dold akad nauk sssr, 1990, 315: 1062-1065.
- [11] ROKNI M R, WIDENER C A, NUTT S R, et al. The effects of heat treatment on 7075 Al cold spray deposits[J]. Surface & coatings technology, 2017, 310: 278-285.
- [12] YUMING X, WYMAN Z, MINGXING Z. Effect of the thickness of cold sprayed aluminum alloy coating on the adhesive bond strength with an aluminum alloy substrate[J]. Surface & coatings technology, 2015, 270: 259-265.
- [13] 杨立稳, 李相波, 程旭东, 等. 不同基体低压冷喷涂铝合金涂层物理性能研究[J]. 材料导报, 2015, 29(26): 73-77.  
YANG Li-wen, LI Xiang-bo, CHENG Xu-dong, et al. Research on physical properties of low pressure cold sprayed aluminum alloy coatings with different substrates[J]. Material report, 2015, 29(26): 73-77.
- [14] SABARD A, DE V L H L, HUSSAIN T. Microstructural evolution in solution heat treatment of gas-atomized Al alloy (7075) powder for cold spray[J]. Therm spray tech, 2018, 27: 145-158.
- [15] ROKNI M R, WIDENER C A, CHAMPAGNE V K, et al. Microstructure and mechanical properties of cold sprayed 7075 deposition during non-isothermal annealing[J]. Surface and coatings technology, 2015, 276: 305-315.
- [16] ROKNI M R, WIDENER C A, CRAWFORD G A. Microstructural evolution of 7075 Al gas atomized powder and high-pressure cold sprayed deposition[J]. Surface

- and coatings technology, 2014, 251: 254-263.
- [17] ROKNI M R, WIDENER C A, CHAMPAGNE V K, et al. The effects of heat treatment on 7075 Al cold spray deposits[J]. Surface & coatings technology, 2016, 310: 1-8.
- [18] 靳磊, 彭徽, 李文亚, 等. 冷喷涂工艺参数对 TC4 涂层性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2018(1): 62-66.  
JIN Lei, PENG Hui, LI Wenya, et al. Effect of cold spray parameters on properties of TC4 coatings[J]. Aerospace materials & technology, 2018(1): 62-66.
- [19] XIANG Qiu, HAQ T N U, WANG Ji-qiang, et al. Microstructure, microhardness and tribological behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced A380 aluminum alloy composite coatings prepared by cold spray technique[J]. Surface and coatings technology, 2018, 350: 391-400.
- [20] YINGCHUN X, SHUO Y, JAN C, et al. Formation mechanism and microstructure characterization of nickel-aluminum intertwining interface in cold spray[J]. Surface and coatings technology, 2018, 337: 447-452.
- [21] SABARD A, LOVELOCK H L D V, HUSSAIN T. Microstructural evolution in solution heat treatment of gas-atomized Al alloy (7075) powder for cold spray[J]. Journal of thermal spray technology, 2018: 145-158.
- [22] YIN S, SUO X, LIAO H, et al. Significant influence of carrier gas temperature during the cold spray process[J]. Surface engineering, 2014, 30(6): 443-450.
- [23] 唐文勇, 张克声, 蒋学勤, 等. 主气流温度对高压冷喷涂粉末速度和温度的影响[J]. 表面技术, 2016, 45: 38-43.  
TANG Wen-yong, ZHANG Ke-sheng, JIANG Xue-qin, et al. Effects of main gas temperature on powder velocity and temperature in high pressure cold spraying[J]. Surface technology, 2016, 45: 38-43.
- [24] LI C J, LI W Y, WANG Y Y. Formation of metastable phases in cold-sprayed soft metallic deposit[J]. Surface & coatings technology, 2005, 198(1): 469-473.
- [25] WENYA L I, ZHANG C, GUO X, et al. Study on impact fusion at particle interfaces and its effect on coating microstructure in cold spraying[J]. Applied surface science, 2007, 254(2): 517-526.

(上接第 310 页)

- [9] 董学强, 郭太雄, 李峰, 等. 热浸镀铝锌液中 Ti 添加量对镀层性能的影响[J]. 材料保护, 2015, 48(8): 63-65.  
DONG Xue-qiang, GUO Tai-xiong, LI Feng, et al. Influence of Ti content in hot-dip Al-Zn bath on structure and properties of alloy coatings[J]. Materials protection, 2015, 48(8): 63-65.
- [10] WU G, ZHANG J, REN Y, et al. Investigation of Ti addition effects on the thickness of 55 pct Al-Zn-1.6 pct Si coating by first-principles calculation [J]. Metallurgical & materials transactions A, 2012, 43(6): 2012-2017.
- [11] 岳崇锋, 江社明, 刘昕, 等. Ti 对热镀锌铝硅镀层锌花大小及结构的影响[J]. 材料保护, 2014, 47(12): 45-46.  
YUE Chong-reng, JIANG She-ming, LIU Xin, et al. Effect of titanium on spangle size and microstructure of hot-dipped aluminum-zinc-silicon coatings[J]. Materials protection, 2014, 47(12): 45-46.
- [12] 欧阳明辉, 李智, 王鑫铭, 等. 55%Al-Zn 池中底渣的形成与控制[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 13(3): 139-144.  
OUYANG Ming-hui, LI Zhi, WANG Xin-ming, et al. Control of bottom dross in 55%Al-Zn bath[J]. Materials science and engineering of powder metallurgy, 2008, 13(3): 139-144.
- [13] 刘春富, 彭浩平, 苏旭平, 等. 热浸镀 Galvalume 熔池中铝锌渣的形态及分布[J]. 云南冶金, 2012, 41(6): 44-48.  
LIU Chun-fu, PENG Hao-ping, SU Xu-ping, et al. The form and distribution of Al-Zn slag in Galvalume bath[J]. Yunnan metallurgy, 2012, 41(6): 44-48.
- [14] 潘修河, 涂浩, 苏旭平, 等. 温度和铝含量对铝锌池中锌渣形成的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(2): 259-265.  
PAN Xiu-he, TU Hao, SU Xu-ping, et al. Effects of temperature and aluminium content on formation of zinc dross in zinc-aluminium bath[J]. Materials science and engineering of powder metallurgy, 2015, 20(2): 259-265.
- [15] LUO Qun, JIN Feng, LI Qian. The mechanism of dross formation during hot-dip Al-Zn Alloy coating process[J]. J manuf sci prod, 2013, 13(1/2): 85-89.
- [16] CARPENTER K R, DIPPENAR R, et al. Synthesis of intermetallics based on the Fe-Al-Si-Zn alloy system by magneto-mechanical milling of ductile elemental powders[J]. Advanced materials research vols, 2007(15-17): 1032-1037.
- [17] XU Jin, GU Qin-fen, LI Qian, et al. Influence of Ti and La additions on the formation of intermetallic compounds in the Al-Zn-Si bath[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2016, 47A: 6542-6554.
- [18] 张闯, 周俐, 谢一夔, 等. 圆锅流场中锌渣的物理模拟研究[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 299-306.  
ZHANG Chuang, ZHOU Li, XIE Yi-kui, et al. Physical simulation of zinc-slag in circular pot flow field[J]. Surface technology, 2018, 47(12): 299-306.