文章编号:1673-9981(2021)05-0496-06

冷喷涂工艺参数对 CoNiCrAIY 涂层沉积影响

谌曲平¹,孙 文^{2,3*},江柱中¹,孙训东^{2,3},张科杰²,黄仁忠²,云海涛¹,郑彩凤¹

(1. 中国航发南方工业公司,湖南 株洲 412002; 2. 广东省科学院新材料研究所,广东广州 510650; 3. 华南理工大学 材料科学与工程学院,广东广州 510006)



摘要:采用数值模拟和试验研究相结合的方法,研究了冷喷涂工艺参数对 CoNiCrAIY 涂层微观结构和力学性能的影响.运用 Ansys CFD 软件建立了冷喷涂 CoNiCrAIY 高速射流场三维模型,系统研究喷涂气体种类、温度、压力及粉末粒径分布对粉末粒子温度和速度变化的影响规律.采用高压冷喷涂系统,在镍基高温合金 GH625基体上沉积 CoNiCrAIY 涂层,利用光学显微镜观察 CoNiCrAIY 涂层 的微观结构,并且利用 ImageJ 软件检测涂层的孔隙率,随后通过硬度计及拉伸试验检测涂层的显微硬度和结合强度.结果表明:随着气体温度升高粉末在喷枪出口处的温度及速度也升高,随着喷涂气体压力的升高粉末在喷枪出口处的速度增大,但是对气体压力的变化对粉末温度影响较小;在氮气气氛和 1000 ℃条件下获得的冷喷涂 CoNiCrAIY 涂层的孔隙率为1.9% 左右、结合强度超过 70 MPa; 在氨气气氛和 700 ℃条件下制备的 CoNiCrAIY 涂层的孔隙率约为0.4% 左右、结合强度超过 70 MPa; 经真空热处理后涂层的孔隙率与热处理前的相比,其孔隙率稍有降低;喷涂态 CoNiCrAIY 涂层的维氏显微硬度约为 550 HV_{0.3}, 热处理后 CoNiCrAIY 涂层的维氏显微硬度约为 350 HV_{0.3}, 机处理后 CoNiCrAIY 涂层的维氏显微硬度约为 350 HV_{0.3}, 机处理前的显微硬度.

关键词:冷喷涂;CoNiCrAlY涂层;数值模拟;微观结构;真空热处理

中图分类号:TG146 **文献标识码:** A

引文格式: 谌曲平,孙文,江柱中,等. 冷喷涂工艺参数对 CoNiCrAlY 涂层沉积影响[J]. 材料研究与应用,2021,15(5): 496-501.

CHEN Quping, SUN Wen, JIANG Zhuzhong, et al. Effect of process parameters on cold spray deposition of CoNiCrAlY coatings[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(5):496-501.

CoNiCrAlY可用于航空发动机热端部件上的高温涂层,包括包覆涂层、粘结层和高温可磨耗封严涂层^[1],其役性能与其制备工艺密切相关,目前该涂层的制备技术主要采用电弧离子镀^[2,3]、等离子喷涂(APS)^[4]、超音速火焰喷涂(HVOF)^[5]和真空等离子喷涂(VPS/LPPS)^[6],其中VPS技术由于其制备的涂层致密、氧化少、结合强度高,是目前制备CoNiCrAlY高温封严涂层的首选加工技术^[7].但是

VPS技术在制备封严涂层的过程中需经历抽真空、 基体预热、喷涂后的降温及退出真空氛围等过程,因 此该方法的生产效率较低、成本较高,而且涂层沉积 过程中会产生较大的热应力,增加了涂层开裂的风 险,导致制备大厚度涂层尤为困难,亟需开发新工艺 来制备性能优越的CoNiCrAlY封严涂层,同时能提 高生产效率、降低生产成本.

相比于上述传统的热喷涂技术,冷喷涂加工过

收稿日期:2021-11-19

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2020B0101330001);广州市科技计划项目(202007020008);广东省科学院平台建设项目 (2021GDASYL-20210302005);中国航发南方工业有限公司研究项目(N-21030105,417X20200005)

作者简介: 谌曲平(1973-), 湖南岳阳, 男, 高级工程师, 大学本科, 主要研究方向为航空发动机特种工艺, E-mail: chquping@163. com 通讯作者: 孙文(1991-), 男, 博士, 主要从事冷喷涂增材制造方面的研究, E-mail: ntusunwen@hotmail. com

程中不涉及熔化-凝固过程,对沉积材料和基体的热影响显著降低,能够有效避免氧化、相变、变形和开裂等,沉积效率高、能够快速喷涂大厚度涂层,适用于航空零部件的制造^[8-9].鉴于此,拟采用新型冷喷涂技术在大气室温环境下高效制备氧化程度低、结合强度高的大厚度CoNiCrAlY涂层,由于目前尚缺少关于冷喷涂技术制备CoNiCrAlY涂层工艺参数系统研究的报道,本研究将采用数值模拟与试验研究相结合的方法,研究冷喷涂参数对CoNiCrAlY涂层的微观组织结构及力学性能的影响,为冷喷涂制备大厚度CoNiCrAlY涂层制备提供基础.

1 实验部分

首先采用CFD软件(Ansys Fluent)建立冷喷涂 CoNiCrAlY涂层的高速射流场三维模型,通过高精 度网格划分来表征全流场内气体与粉末粒子之间的 能量和动量传递效果.基于冷喷涂过程中气流流动 稳定且处于可压缩状态的假设,建立气流仿真模 型.利用k-ε模型模拟湍流和使用Rossin-Ramler颗 粒分布的离散相模型(DPM),对流体与固体颗粒之 间的相互作用进行建模^[10],系统研究喷涂气体种 类、温度、压力及粉末粒径分布对粉末粒子温度和速 度变化的影响规律.

1.1 原 料

实验以 CoNiCrAlY 粉末 (Oerlikon Metco Amdry 9951, USA)作为喷涂粉末,选用镍基高温合金 GH625作为基体材料,它们的化学元素成分列于表1.图1为实验所用粉末的 SEM图.从图1可以看出,大多数 CoNiCrAlY 粉末形状为球形,少数为椭球形,粒径约为5~40 μm,平均粒径约为20 μm.

		表下 CONICIAIT 初末和 GH025 墨体的化子元素
	Table 1	Chemical compositions of CoNiCrAIY powder and GH625 substrate
kl		含量 w/%
124		

++ *·1											
1/1 科	Со	Ni	Cr	Al	Υ	Mo	Nb	Fe	Ti	Si	其它
CoNiCrAlY	余量	32	21	8	0.5	—	—	_	_	—	<1
GH625	0.7	余量	23	0.3	—	9	3.8	4.2	0.4	0.3	<0.5

いいれい料土和でしたりを甘休め水谷二丰



图 1 CoNiCrAIY 粉末形貌和粒度分布 Fig. 1 SEM micrograph of CoNiCrAIY feedstock powder and powder size distribution

1.2 方 法

在制备涂层前需对基材进行砂纸打磨、抛光、丙醇超声清洗、压缩空气干燥预处理,然后使用氮气或 氦气作为喷涂载气进行冷喷涂,具体的工艺参数列 于表2.

利用光学显微镜观察 CoNiCrAlY 涂层微观结

构,利用 ImageJ 软件检测涂层的孔隙率.根据标准 ASTM C633 对冷喷涂 CoNiCrAlY 涂层的结合强度 进行测试,首先用高强度的片胶将涂层表面与对偶 件连接,然后进行拉伸试验,胶的强度一般为50~70 MPa.如果涂层与基体的结合强度大于片胶与涂层 的结合强度或片胶自身的强度,则失效部位将不位

Table 2 Cold spray parameters used for Conicrary coaling deposition							
编号	气体	温度/℃	压力/MPa	送粉量/(g·min ⁻¹)	走枪速度/(mm·s ⁻¹)		
1	N_2	1000	5	85	500		
2	He	500	3	85	500		
3	He	600	3	85	500		
4	He	700	3	85	500		

表 2 冷喷涂 CoNiCrAIY 涂层试验工艺参数 Table 2 Cold spray parameters used for CoNiCrAIY coating depo

于涂层与基体的界面,即涂层与基体结合强度至少 大于或等于所测得的数值.将上述四组试样置于真 空炉中,在1080℃条件下保温4.5h进行扩散处理 后随炉冷却至室温,之后研究真空热处理对涂层内 部微观组织的影响、研究真空热处理前后涂层的孔 隙率和显微硬度的变化,探讨真空热处理对涂层组 织结构与性能影响规律.利用维氏显微硬度计,检 测喷涂态和热处理态 CoNiCrAlY 涂层的硬度.

2 结果及讨论

2.1 数值模拟分析

数值模拟结果如图2所示.从图2(a)和图2(b)

可见:随着气体温度升高,粉末在喷枪出口处的温度 和速度也升高,从而使粉末粒子撞击后的塑性变形 程度越大,进而有利于涂层沉积质量的提高;在温度 分别为600,800和1000℃及气压5MPa和氮气气氛 条件下,CoNiCrAIY粉末颗粒在喷嘴出口处的温度 和速度分别约为192,344,397℃和703,741和787 m/s. 从图2(c)和图2(d)可见:随着喷涂气体压力 的升高粉末在喷枪出口处速度也越大,但气体压力 的变化对粉末温度的影响较小,在气压分别为3,4 和5MPa条件下粉末温度几乎相当约为400℃;在 气压分别为3,4和5MPa及温度为1000℃和氮气气 氛条件下,CoNiCrAIY粉末颗粒在喷嘴出口处的速 度分别约为706,729和787 m/s. 从图2(e)和图2



图2 冷喷涂CoNiCrAlY气固两相流数值模拟

(a)气体温度对粉末粒子温度的影响;(b)气体温度对粉末粒子速度的影响;(c)气体压力对粉末粒子温度的影响;(d)气体压力 对粉末粒子速度的影响;(e)粉末粒径对粉末温度的影响;(f)粉末粒径对粉末粒子速度的影响

Fig. 2 CFD numerical analysis results of cold spraying CoNiCrAlY deposition

(a) the effect of gas temperature on particle temperature; (b) the effect of gas temperature on particle velocity; (c) the effect of gas pressure on particle temperature; (d) the effect of gas pressure on particle velocity; (e) the effect of particle size on particle temperature; (f) the effect of particle size on particle velocity

(f)可见,粉末粒径对其温度和速度影响较大,粉末 粒径越小,对流场温度和速度变化均较为敏感,粒径 越大则越不敏感,这是由于粉末粒径越小比表面积 越大,颗粒与加速气体间的换热速率越快,从而使得 粉末颗粒的温度越高,并且粉末粒径越小,质量越 小,从而粉末颗粒的速度越大.在温度为1000℃及 氮气气氛条件下,当粉末粒径分别为10,20和40µm 时,其在喷嘴出口处的温度和速度分别约为412, 397和201℃及607,787和935 m/s.综合粉末温度 和速度来看,本模拟条件下粉末最佳粒径为20µm.

2.2 工艺参数对涂层结构的影响

图 3 为不同参数下的冷喷涂 CoNiCrAlY 涂层的微观结构. 从图 3(a)和图 3(b)可见,在使用氮气

和1000℃条件下获得的冷喷涂 CoNiCrAlY 涂层的 孔隙率约为1.9%,并且空隙较均匀分布于涂层内 部,CoNiCrAlY 涂层与基体界面之间结合良好,没 有明显的未结合区域.从图3(c)~图3(h)可见:在 使用氦气喷涂及温度分别为500,600和700℃条件 下,所制备的CoNiCrAlY 涂层的内部孔隙率较低均 为1% 以下,并且随着氦气温度的升高CoNiCrAlY 粉末粒子的速度增大,从而粒子的变形程度增大,使 涂层孔隙率进一步降低,并且沉积效率进一步提高; 当温度为700℃条件下制备的CoNiCrAlY 涂层的孔 隙率约为0.4%,CoNiCrAlY 涂层与基体界面之间 结合良好,没有明显的未结合区域或者裂纹、分层、 剥落、气泡等缺陷.



图 3 冷喷涂 CoNiCrAlY 涂层的光学显微镜观察的微观结构
(a),(b)1000 ℃, N₂;(c),(d)500 ℃, He;(e),(f)600 ℃, He;(g),(h)700 ℃, He
Fig. 3 Optical microstructures of cold sprayed CoNiCrAlY coatings

2.3 工艺参数对涂层力学性能的影响

表3为冷喷涂工艺参数对CoNiCrAlY涂层结 合强度和显微硬度的影响结果.由表3可知,不同 参数下冷喷涂CoNiCrAlY的结合强度均超过50

表 3 冷喷涂工艺参数对 CoNiCrAIY 涂层结合强度和显微 硬度的影响

Table 3 Bonding strength and micro-hardness of cold sprayed CoNiCrAIY coatings

	工业会物	付入 把 库 / MD	涂层显微硬度
骊亏	上乙奓剱	结合独度/MPa	$(HV_{0.3})$
1	N₂,1000 ℃	57	570.4
2	He,500 ℃	大于62(胶断)	560.4
3	He,600 ℃	大于70(胶断)	573.3
4	He,700 ℃	大于65(胶断)	599.3

MPa. 其中使用氮气和1000℃的工艺参数所制备 的CoNiCrAlY涂层的结合强度为57 MPa,失效部 位位于CoNiCrAlY涂层与GH625基体界面处;使 用氦气制备的CoNiCrAlY涂层的结合强度均超过 了60 MPa,失效部位为胶断.使用氦气制备的 CoNiCrAlY涂层的结合强度大于使用氦气制备的 CoNiCrAlY涂层的结合强度,这是由于使用氦气情 况下粒子的速度大于使用氦气时粒子的速度,造成 粒子与基体间的冶金结合区域的面积增大从而使得 涂层的结合强度提高^[11-13].在硬度方面,使用氦气 和1000℃的工艺参数制备的CoNiCrAlY涂层的显 微硬度达到了570 HV_{0.3}左右,使用氦气喷涂及温度 500,600 和700℃条件下制备的CoNiCrAlY涂层的 硬度分别为560.4,573.3和599.3 HV_{0.3},与使用氮 气制备的CoNiCrAlY涂层的硬度相当.

2.4 真空热处理对涂层结构及力学性能的影响

图 4 为 CoNiCrAlY 涂层经真空热处理后的金 相图. 从图 4 可以看出:经热处理后的涂层孔隙率 比热处理前的稍有降低;在使用氮气、1000 ℃条件 下冷喷涂制备的涂层 CoNiCrAlY 的孔隙率为1.5% 左右;使用氦气制备的 CoNiCrAlY 涂层经热处理后 孔隙率约为0.2%. 这是由于真空热处理有利于促 进涂层与基体及变形颗粒间的扩散,从而有利于提 高涂层的结合强度及涂层本身的强度,热处理后涂 层的结合强度均超过了76 MPa,失效部位为胶断.





(a) 1000 °C, N2;(b) 500 °C, He;(c) 600 °C, He;(d) 700 °C, He

Fig. 4 Optical microstructures of heat-treated CoNiCrAlY coatings in vacuum at 1080 °C for 4.5 h

表4为冷喷涂 CoNiCrAlY 涂层真空热处理后的显微硬度.从表4可知,冷喷涂 CoNiCrAlY 涂层 经真空热处理过后的显微硬度约为 350 HV_{0.3},与热 处理前的硬度相比(约 550 HV_{0.3})明显降低.这是 由于真空热处理过程中,CoNiCrAlY 涂层中应力释

表 4 冷喷涂 CoNiCrAIY 涂层真空热处理后的显微硬度 Table 4 Micro-hardness values of heat-treated CoNi-CrAIY coatings

编号	丁廿会粉	左 ム 忠 庙 /MD。	涂层显微硬度
	工乙参奴	項口理/JVII d	$(HV_{0.3})$
1	N_2 ,1000 °C	大于76(胶断)	359.8
2	He,500 ℃	大于77(胶断)	327.6
3	He,600 ℃	大于80(胶断)	354.4
4	He,700 ℃	大于83(胶断)	349.0

放及位错密度降低引起的^[14-16],热处理后的硬度降 低有利于降低涂层的耐磨性,从而起到更好的高温 可磨耗的性能要求.

3 结 语

通过采用数值模拟手段,系统地研究了喷涂气体温度、压力及粉末粒径对CoNiCrAlY粉末温度和速度的影响,进而研究了冷喷涂工艺参数对CoNiCrAlY涂层微观结构和力学性能的影响,并研究了真空热处理对冷喷涂CoNiCrAlY涂层微观结构的影响.

(1)随着气体温度升高,粉末在喷枪出口处温度 和速度也升高.随着喷涂气体压力的升高,粉末在 喷枪出口处速度也增大,但是气体压力的变化对粉 末温度影响较小,20 μm 为模拟条件下粉末最佳 粒径.

(2) 采 用 氮 气 及 1000 ℃ 条 件 下 制 备 的 CoNiCrAlY 涂层的结合强度约为 57 MPa,使用氦 气作为载气制备的 CoNiCrAlY 涂层结合强度进一 步提高并均超过了 60 MPa,且均为胶断.热处理后 CoNiCrAlY 涂层的结合强度进一步提高,均超过 76 MPa,且均为胶断.

(3) 采 用 氮 气 及 1000 ℃ 条 件 下 制 备 的 CoNiCrAlY 涂层孔隙率约为1.9%,使用氦气700 ℃ 条件下制备的 CoNiCrAlY 涂层的孔隙率仅为0.4% 左右.从成本角度来看,使用氦气及1000 ℃条件下 所制备涂层更加廉价.

(4)喷涂态涂层 CoNiCrAlY 的维氏显微硬度约为550 HV_{0.3},热处理后涂层 CoNiCrAlY 的维氏显微 硬度约为350 HV_{0.3},明显低于热处理前的显微硬度.

参考文献:

- [1]运广涛,李其连,程旭东. MCrAIY涂层在航空发动 机热端部件上的应用[J]. 热喷涂技术,2015(2): 6-11.
- [2] 谢世明,代明江,林松盛,等. 电弧离子镀工艺参数对 NiCoCrAlYTa涂层沉积的影响[J].表面技术,2017 (1):29-35.
- [3] 谭飞,林松盛,石倩,等. 电弧离子镀制备NiCrAlY涂 层及其抗高温氧化性能[J]. 真空,2020,57(5):7-10
- [4] DEMIRCI M, BAGCI M. High temperature solid particle erosion comparison of atmospheric plasma sprayed MCrAIY coatings [J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2021 (9) :35007.

- [5] 陈雄伟,毕刚,赵娜,等.超音速火焰喷涂 MCrAlY层的抗冲击性能及冲击失效机理[J].材料保护,2011
 (2):18-22.
- [6] 邓新建. 真空等离子喷涂 MCrAlY 涂层的高温抗氧化 性能研究[J]. 航空工艺技术,1995(4):35-40.
- [7] 邓新建,张东辉,朱轶峰.真空等离子喷涂 MCrAlY
 涂层耐高温腐蚀性能研究[J].航空工艺技术,1996
 (2):17-18.
- [8] 黄仁忠,孙文,郭双全,等. 冷喷涂技术的研究进展与应用[J]. 中国表面工程,2020,33(4):16-25.
- [9] SUN W, TAN A W Y, et al. Post-process treatments on supersonic cold sprayed coatings: A review [J]. Coatings, 2020, 10(2): 123.
- [10] SHUO Y, MEYER M, LI W, et al. Particle acceleration, and heat transfer in cold spray: A review[J]. J Therm Spray Tech, 2016, 25:874-896. https://doi.org/10.1007/s11666-016-0406-8.
- [11] SUN W, BHOWMIK A, TAN A W Y, et al. Improving microstructural and mechanical characteristics of cold-sprayed Inconel 718 deposits via local induction heat treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 797:1268-1279.

- [12] BHOWMIK A, TAN A W Y, SUN W, et al. On the heat-treatment induced evolution of residual stress and remarkable enhancement of adhesion strength of cold sprayed Ti-6Al-4V coatings [J]. Results in Materials, 2020 (7):100119.
- [13] XIE Y, YIN S, CHEN C, et al. New insights into the coating/substrate interfacial bonding mechanism in cold spray[J]. Scripta Materialia,2016,125:1-4.
- [14] CHEN C, XIE Y, HUANG R, et al. On the role of oxide film's cleaning effect into the metallurgical bonding during cold spray[J]. Materials Letters, 2018 (10):199-202.
- [15] XIE Y, PLANCHE M P, RAOELISON R, et al. Effect of substrate preheating on adhesive strength of SS 316L cold spray coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2016, 25:123-130.
- [16] XIE Y, CHEN C, RAOELISON R, et al. Strengthened peening effect on metallurgical bonding formation in cold spray additive manufacturing [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28: 769-779.

Effect of process parameters on cold spray deposition of CoNiCrAlY coatings

CHEN Quping¹, SUN Wen^{23*}, JIANG Zhuzhong¹, SUN Xundong²³, ZHANG Kejie², HUANG Renzhong², YUN Haitao¹, ZHENG Caifeng¹

(1. China National South Aviation Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China; 2. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. School of Materials Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510006, China)

Abstract: In this study, numerical and experimental methods were used to study the effects of cold spraying parameters on the microstructures and mechanical properties. Ansys CFD software was adopted to establish the 3D model of particle acceleration process and study the effects of gas type, temperature, pressure and powder particle size distribution on the temperatures and velocities of powder particles. Following that, CoNiCrAIY coatings were deposited on GH625 substrates by high pressure cold spray system. Optical microscopy was used to analyze the microstructures and ImageJ software was used to measure the porosity level of the CoNiCrAIY coatings. The results showed that the particle velocity and temperature increased with the increase of gas temperature. As the spraying gas pressure increased, the speed of the powder particle at the spray nozzle outlet was also higher, but the change of gas pressure had less effect on the particle temperature. Besides, the cold sprayed CoNiCrAIY coating obtained under the conditions of nitrogen and 1000 °C had a porosity of about 1.9% and a bonding strength of about 57 MPa. The porosity of the CoNiCrAIY coating after the vacuum heat treatment was slightly lower than that before the heat treatment. The Vickers microhardness of the sprayed CoNiCrAIY was about 550 HV_{0.3}, and it was about 350 HV_{0.3} after vacuum heat treatment, which was significantly lower than that of as-sprayed coating.

Key words: cold spray; CoNiCrAlY coating; numerical analysis; microstructures; vacuum heat treatment