大气等离子和超音速火焰喷涂 CoCrAIYSi-hBN 涂层组织和性能对比

张昂,王长亮,王天颖,郭孟秋,崔永静,田浩亮

(中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护重点实验室,北京 100095)

摘要:目的 针对航空发动机叶片榫头/榫槽摩擦副工作中的微动磨损问题,开展 CoCrAlYSi-hBN 抗微动磨 损涂层研究。方法 通过大气等离子(APS)和超音速火焰(HVOF)喷涂工艺,制备 CoCrAlYSi-hBN 涂层,采用扫描电镜(SEM)研究涂层的形貌和微观组织,采用显微硬度计和拉伸试验机测试涂层的显微硬度和结合强度,采用 SRV 试验机探究涂层的摩擦磨损性能。结果 APS 喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层感化更充分,显微组织均匀,具有更多高含量的 hBN 和孔隙; HVOF 喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层显微组织具有明显的层状结构,涂层致密,hBN 和孔隙含量少; APS 喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层的硬度平均值为 168.4HV_{0.3},结合强度平均值为 44.6 MPa,远小于 HVOF 喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层的硬度(327.1HV_{0.3})和结合强度平均值(59.5 MPa)。相比 HVOF 喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层。CoCrAlYSi-hBN 涂层虽然有更低的摩擦系数(0.75),但涂层磨损更严重,涂层磨痕表面有明显的涂层剥落,HVOF 喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨痕则出现更多的犁沟。结论 HVOF 喷涂工艺制备的 CoCrAlYSi-hBN 涂层的综合性能优于 APS 喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层, 在摩擦过程中,两种工艺制备的 CoCrAlYSi-hBN 涂层都会转移到对偶件上,从而减少对偶件的磨损,有作为叶片榫头抗微动磨损涂层的潜力。

关键词: 等离子喷涂; 超音速火焰喷涂; CoCrAlYSi-hBN 涂层; 显微组织; 抗微动磨损 中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)06-0051-08 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.06.008

Comparison of the Microstructure and Properties of CoCrAlYSi-hBN Coatings Prepared by APS and HVOF Process

ZHANG Ang, WANG Chang-liang, WANG Tian-ying, GUO Meng-qiu, CUI Yong-jing, TIAN Hao-liang

(Key Laboratory of Advanced Corrosion and Protection for Aviation Materials, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Fund: Supported by the National Science and Technology Major Project (2017-VII-0013-0110)

收稿日期: 2021-02-25; 修订日期: 2021-04-12

Received: 2021-02-25; Revised: 2021-04-12

基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0013-0110)

作者简介:张昂(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为热喷涂技术。

Biography: ZHANG Ang (1992—), Male, Master, Research focus: thermal spray technology.

通讯作者:王长亮(1981—),男,博士,研究员,主要研究方向为表面工程、热喷涂涂层技术。

Corresponding author: WANG Chang-liang (1981—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: surface engineering, thermal spray coating technology.

引文格式:张昂,王长亮,王天颖,等.大气等离子和超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层组织和性能对比[J].装备环境工程,2021, 18(6):051-058.

ZHANG Ang, WANG Chang-liang, WANG Tian-ying, et al. Comparison of the microstructure and properties of CoCrAlYSi-hBN coatings prepared by APS and HVOF process[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 051-058.

ABSTRACT: To eliminate the fretting wear in a dovetail attachment of a compress blade to a disc, CoCrAlYSi-hBN coatings are fabricated by the atmosphere plasma spray (APS) and high-velocity oxygen fuel (HVOF) spraying process. The microstructure, hardness, bonding strength and wear property are studyed by using scanning electron microscopy (SEM), microhardness tester, adhesive strength measuring and SRV fretting friction wear tester. The coating prepared by APS had a uniformal microstructure with higher content of hBN and pore. However, the coatings prepared by HVOF have a lamellar and dense microstructure with low content of hBN and pore. The hardness and bonding strength of coating prepared by APS is lower than that of coating prepared by HVOF. Although the friction coefficients of coating fabricated by APS is lower than that of coating prepared by HVOF, the coatings prepared by HVOF present a better wear resistance than that prepared by APS. The worn surface of Co-CrAlYSi-hBN coatings prepared by APS shows apparent spalling and a little indentation. While the worn surface CoCrAlYSi-hBN coatings prepared by HVOF shows apparent spalling. CoCrAlYSi-hBN coatings have the potential to be used on compressor blades.

KEY WORDS: APS; HVOF; CoCrAlYSi-hBN coatings; microstructure; antifretting wear

航空发动机叶片广泛使用榫头/榫槽结构连接到 轮盘上,叶片榫头/榫槽摩擦副在服役过程中的严格 工况(如振动交变应力、高温等)导致其极易发生微 动磨损,因此叶片榫头/榫槽需要高温抗微动磨损涂 层满足其特殊工况和实际应用的要求^[1-4]。CuNiIn涂 层在 350 ℃以下能稳定存在,硬度低,耐腐蚀性能 好,是目前广泛使用在叶片榫头的一种抗微动磨损 涂层^[5-8]。随着对航空发动机性能需求的提升,叶片 榫头工作环境越来越苛刻,CuNiIn 已无法满足叶片 榫头的工况^[9-11]。

MCrAIY 是一类良好的抗高温氧化材料体系,能耐 900 ℃的高温,常用作叶片表面的抗高温氧化涂层和热障涂层的过渡层^[12-18]。以 MCrAIY 为基相,然后加入润滑相(如 hBN、Cr₂O₃等),形成的高温金属基自润滑复合涂层有望作为高温抗微动磨损涂层^[10,19-25]。其中,CoCrAIYSi-hBN 涂层是一种具有广阔应用前景的高温抗微动磨损涂层,可以作为榫头/榫槽微动磨损的防护涂层^[26-27]。CoCrAIYSi 为主相,在叶片榫头上喷涂,软硬适宜且工作温度能达 900 ℃,具有良好的抗氧化性能; hBN 作为润滑相,进一步降低涂层与对偶件的摩擦系数,保护榫槽不被磨损^[28]。

CoCrAlYSi-hBN 涂层可以采用等离子(APS)喷涂和超音速火焰(HVOF)喷涂工艺制备^[27,29]。等离子喷涂工艺具有焰流温度高,可喷涂材料广泛的优点;超音速火焰喷涂可以在不过分加热粒子的前提下



就能使粒子获得很大的动能,火焰速度可达到 5 倍的 音速,获得涂层的孔隙率和氧化物夹杂低,具有高的 结合强度^[30-34]。目前对 CoCrAlYSi-hBN 涂层喷涂工 艺的研究报道很少,而对于采用 APS 和 HVOF 两种 喷涂技术制备 CoCrAlYSi-hBN 涂层并进行对比的研 究未见报道。

文中采用大气等离子喷涂和超音速火焰喷涂技 术制备了 CoCrAlYSi-hBN 涂层,研究并比较了两种 喷涂涂层的显微组织和性能。

1 试验

1.1 涂层制备

喷涂粉末采用 CoCrAlYSi 和 hBN 的机械混合粉 末,其主要化学成分见表 1。喷涂粉末形貌如图 1 所 示,方框 1 中的球形颗粒为 CoCrAlYSi 金属合金, 粒度分布在 8~45 μm,方框 2 中衬度较深的片为 h-BN,粉末粒度分布在 50~229 μm。

表 1 CoCrAlYSi-hBN 粉末化学成分与 含量(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition and content (mass fraction, %) of the CoCrAlYSi-hBN powder

Co	Cr	Al	Y	Si	hBN
Balance	25	5	0.27	1.75	15



图 1 CoCrAlYSi-hBN 粉末形貌 Fig.1 Morphology of CoCrAlYSi-hBN powder

• 53 ·

分别采用 Multicoat 等离子喷涂系统和 DJ2700 超 音速火焰喷涂设备制备 CoCrAlYSi-hBN 涂层。试样 基体材料选用 TiAl 合金,喷涂前对基体表面采用丙 酮或酒精清洗去油、除污,随后进行喷砂粗化处理。 喷砂选用 46 目白刚玉,喷砂压力为 0.3~0.5 MPa。等 离子和超音速火焰喷涂工艺参数分别见表 2 和表 3。

Tab.2 Spraying parameters of APS process								
The flow rate of Ar	The flow rate of H_2	Current	The flow rate of Carrier gas Ar	Stirrer speed	Spray distance			
50 L/min	6 L/min	400 A	4 L/min	20%	100 mm			

表 2 大气等离子喷涂工艺参数

表 3	超音速火焰喷涂工艺参数
Tab.3 Spray	ying parameters of HVOF proces

The flow rate of O ₂	The flow rate of C_3H_8	The flow rate of Air	Feed pressure	Spray distance
28 L/min	28 L/min	40 L/min	15.86 kPa	325 mm

1.2 涂层性能表征

采用 Quanta 600 型扫描电镜分析粉末形貌、粒度 及涂层表面和截面显微形貌,用孔隙率分析软件测试 涂层孔隙和 hBN 含量。采用 Struers Duramin 型显微 硬度计测试涂层的显微硬度,载荷为 300 g,加载时 间为 15 s,每个试样测 10 个测试点。根据 HB 5476— 1991《热喷涂涂层结合强度试验方法》在 Instron5882 型拉伸机上测试涂层与基体的结合强度,每个试样测 试 3 个值,取其平均值。采用 SRV 摩擦磨损试验机 线接触磨损测试 CoCrAlYSi-hBN 涂层的摩擦磨损性 能,上试样为 GH141 高温合金,下试样基体为 TiAl



a 大气等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层表面

合金,在其表面喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层。摩擦磨 损试验条件:载荷为 100 N,行程为 0.2 mm,频率为 50 Hz,温度为 550 ℃。

2 结果及分析

2.1 涂层显微组织

大气等离子喷涂工艺和超音速火焰喷涂工艺制备的 CoCrAlYSi-hBN 涂层的表面和截面微观组织如图 2 所示。两种涂层都包含亮的部分和暗的部分,亮的地方为 CoCrAlYSi,暗的部分为 hBN 和孔隙。从



b 超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层表面



c大气等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层截面

d 超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层截面

图 2 大气等离子和超音速火焰喷涂 CoCrAIYSi-hBN 涂层表面和截面形貌 Fig.2 Surface (a, b) and (c, d) cross section microstructures of CoCrAIYSi-hBN coatings under (a, c) APS and (b, d) HVOF 表面形貌来看,超音速火焰喷涂工艺制备的 CoCrA-IYSi-hBN 涂层表面大部分仍呈现未熔颗粒形态(图 2b)。相比超音速火焰喷涂工艺制备的涂层,等离子 喷涂工艺制备的 CoCrAlYSi-hBN 涂层粒子虽然也有 少部分未熔球形颗粒,但整体上看铺展更充分,扁平 化程度更高(图 2a)。由于等离子喷涂工艺是采用等 离子弧作为热源,其焰流温度远大于超音速火焰,因 此,在等离子喷涂过程中,粉末粒子熔融更充分,撞 击表面后充分变形扁平化,堆积紧密。在超音速火焰 喷涂过程中,火焰温度相对较低,焰流速度快,使得 粒子处于半熔融态,凝固后仍保持颗粒状。

从截面形貌(图 2c 和图 2d)来看,等离子喷涂工 艺制备的 CoCrAlYSi-hBN 涂层的截面微观组织比较均 匀,超音速火焰喷涂工艺制备的 CoCrAlYSi-hBN 涂层 的截面微观组织具有典型的层状结构。这是由于高速高 温的喷涂粒子喷涂到基体时,在高冲击力的作用下变形 充分, 经历急速冷却、凝固, 并不断堆积、重叠, 最终 形成片层堆积结构,但等离子喷涂热源温度高,粉末熔 化更充分,等离子喷涂涂层层状结构不明显,组织较均 匀。另外,相比等离子喷涂涂层,超音速火焰喷涂得到 的 CoCrAlYSi-hBN 具有更多的未熔颗粒,与表面形貌 对应。两种工艺喷涂的 CoCrAlYSi-hBN 涂层都由 3 部 分组成:浅灰色基体,灰色及黑色夹杂。其中浅灰色部 分为 CoCrAlYSi 合金,灰色部分为氧化物夹杂,黑色 部分为 hBN 相及涂层孔隙, CoCrAlYSi 合金相作为骨 架基体支撑着整个涂层。等离子喷涂得到的 CoCrAl-YSi-hBN 涂层具有更多的 hBN 和孔隙。通过 image J 图像处理软件对涂层显微照片进行分析,采用面积法测 定了涂层中 hBN 相和孔隙所占比例。等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层中 hBN+孔隙的占比为 10.09%,

超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层中 hBN+孔隙的 占比为1.59%。这是由于在超音速喷涂过程中,一方面, 火焰速度很快,但 hBN 不熔融, hBN 撞击到基体上被 反射出去;另一方面,每遍涂层增加的厚度很低,hBN 嵌入涂层中的量很少,最终导致涂层中的 hBN 和孔隙 含量很低。因此最终超音速火焰喷涂的 CoCrAlYSi-hBN 涂层的显微组织主要由致密的 CoCrAlYSi、氧化物夹杂 和细小的孔隙组成;而等离子喷涂的 CoCrAlYSi-hBN 涂层则含有较高的孔隙和 hBN。

2.2 涂层硬度

大气等离子和超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层的硬度值见表 4。超音速火焰喷涂 CoCrAlYSihBN 涂层的硬度平均值为 327.1HV_{0.3},远远高于等离 子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层(168.4HV_{0.3})。超音速 火焰喷涂工艺喷涂粒子速度快,超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层致密,且涂层中 hBN 含量少, 涂层硬度更高。涂层截面金相也证实了超音速火焰喷 涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层比等离子喷涂 CoCrAlYSihBN 涂层更加致密,孔隙和 hBN 含量更低。因此超 音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层硬度远远高于等 离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层。

2.3 涂层/基体结合强度

涂层结合强度的测试结果见表 5。超音速火焰喷 涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层结合强度的平均值为 59.5 MPa,高于等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层(44.6 MPa)。这是由于与等离子喷涂工艺相比,超音速火 焰喷涂工艺粒子焰流速度快,喷涂粉末粒子具有更大 的动能,形成的涂层具有更高的结合强度。

表 4 大气等离子和超音速火焰喷涂 CoCrAIYSi-hBN 涂层显微硬度测试结果 Tab.4 Testing results of hardness of CoCrAIYSi-hBN coatings prepared by APS and HVOF

		e					U	1 1	5		
Drogoss	Hardness(HV _{0.3)}									Average(IIV)	
1 ³	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	Average($\Pi v_{0.3}$)
APS	124.4	131.0	222.4	155.7	164.4	88.7	213.0	121.5	217.6	244.9	168.4
HVOF	374.4	292.4	342.1	309.2	354.7	287.6	338.7	289.5	310.5	371.6	327.1

表 5 大气等离子和超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂 层结合强度试验结果

Tab.5Testing results of bonding strength of CoCrAlYSi-hBN coatings prepared by APS and HVOF

Process	Bond	ing strgent	Avorago/MDa	
	1'	2'	3'	- Average/wit a
APS	42.4	47.9	43.4	44.6
HVOF	62.8	57.6	58.1	59.5

2.4 涂层摩擦磨损性能

采用 SRV 销盘线接触磨损的方式对分别采用等 离子和超音速火焰喷涂工艺制备的 CoCrAlYSi-hBN 涂层与 CH141 基体组成的摩擦副的摩擦磨损性能进 行测试。涂层与 GH141 摩擦副的磨损系数如图 4 所 示,摩擦系数出现一个迅速上升的过程,然后摩擦系 数趋于稳定。超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层 的摩擦系数约为 0.75,略大于等离子喷涂 CoCrAlYSihBN 涂层的摩擦系数。

磨痕的磨损形貌采用扫描电镜和白光干涉仪进 行测试分析,如图 5 和图 6 所示。观察实验后磨痕形 貌,超音速火焰喷涂和等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层与 GH141 摩擦副都有明显的摩擦痕迹。大气等 离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨痕表面有明显的涂



图 4 大气等离子和超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层 与 GH141 合金摩擦副摩擦系数曲线

Fig.4 Friction coefficient curves of CoCrAlYSi-hBN coatings prepared by APS and HVOF and CH141 alloy

层剥落坑,超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨 痕更多的是犁沟,也有轻微剥落现象出现。等离子喷 涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨痕表面有明显的涂层剥离, 是由于在高温下,涂层发生软化,强度降低,并且等 离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层本身硬度偏低,在摩 擦副的挤压下更容易发生塑性变形。变形区在反复摩 擦的应力作用下,会产生大块的疲劳剥落,形成剥落 坑,从而导致等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层的明 显剥离。超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨痕 表面剥离轻微,出现一些犁沟。这是由于超音速火焰 喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层硬度高,磨屑中的磨粒导 致涂层表面出现犁沟。随着摩擦时间的延长,超音速 火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层在反复摩擦的应力作 用下出现涂层剥落。



图 5 大气等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层与对磨副 GH141 合金磨痕形貌及三维轮廓 Fig.5 (a, b) SEM morphology and (c, d) three-dimensional contours of (a, c) CoCrAlYSi-hBN coatings prepared by APS and (b, d) GH141 alloy worn surfaces

白光干涉测得的三维轮廓清晰地表明超音速火 焰喷涂和等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨痕低出 基准面很多,磨损严重,对偶件 GH141 合金表面磨 痕则高出基准面,出现了材料的增加,表明等离子喷 涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层转移到了 GH141 对偶件上。 等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN涂层磨痕表面凹凸不平, 磨痕宽度约为 650 μm,最大磨痕深度达到 47.5 μm, 涂层磨损体积为 61 137 537 μm³。相应对偶件的磨痕 宽度也约为 650 μm,磨痕表面出现了材料的增加, 增加高度最高处约为 55 μm。超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨痕表面整体较平整,宽度约为 650 μm,最大磨痕深度达到 6.5 μm,涂层磨损体积为 19 458 315 μm³。相应对偶件的磨痕宽度也约为 650 μm,磨痕表面出现了材料的增加,测得的增加高度 最大值约为 3.75 μm,表明超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层转移到了 GH141 对偶件上。由



图 6 超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层与 GH141 合金磨痕形貌及三维轮廓 Fig.6 (a, b) SEM morphology and (c, d) three-dimensional contours of (a, c) CoCrAlYSi-hBN coatings prepared by HVOF and (b, d) CH141 alloy worn surfaces

于等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层硬度远低于超音 速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层,所以等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨损更严重,磨损体积是超音速 火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨损体积的 3 倍多, 如图 7 所示。



图 7 大气等离子和超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 磨损体积

Fig.7 Wear volume of CoCrAlYSi-hBN coatings prepared by APS and HVOF

3 结论

采用大气等离子喷涂和超音速火焰喷涂工艺制

备了 CoCrAlYSi-hBN 涂层,研究并比较了两种喷涂 涂层的显微组织、硬度、结合强度和抗微动磨损性能, 得到以下结论:

1)大气等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层熔化更 充分,显微组织均匀,具有更多高含量的 hBN 和孔 隙;超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层显微组织 具有明显的层状结构,涂层更致密,hBN 和孔隙含量 更少。

2)大气等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层硬度平均值为 168.4HV_{0.3},结合强度平均值为 44.6 MPa,远 小于超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层的硬度 (327.1HV_{0.3})和结合强度(59.5 MPa)。

3)在摩擦过程中,等离子喷涂和超音速火焰 CoCrAlYSi-hBN 涂层都会转移到对偶件 GH141 上。 相比超音速火焰喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层,等离子 喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层虽然有更低的摩擦系数, 但等离子喷涂 CoCrAlYSi-hBN 涂层磨损更严重。

参考文献:

 李康,付雪松,周文龙. 钛合金榫头微动疲劳试验研究 现状与发展[J]. 钛工业进展, 2014, 31(4): 1-5.
 LI K, FU X S, ZHOU W L. Present situation and development of titanium alloy dovetail fretting fatigue test[J]. Tianium, 2014, 31(4): 1-5.

- [2] 崔慧然,李宏然,崔启政,等. 航空发动机及燃气轮机 叶片涂层概述 [J]. 热喷涂技术, 2019, 11(1): 82-94.
 CUI H R, LI H R, CUI Q Z, et al. Summary of blade coatings for aero-engine and gas turbine[J]. Thermal Spray technology, 2019, 11(1): 82-94.
- [3] RAJENDRAN R. Gas turbine coatings—An overview[J]. Engineering failure analysis, 2012, 26: 355-369.
- [4] DEMASI-MARCIN J T, GUPTA D K. Protective coatings in the gas turbine engine[J]. Surface and coatings technology, 1994, 68/69: 1-9.
- [5] MARY C, FOUVRY S, MARTIN J M, et. al. Pressure and temperature effects on fretting wear damage of a Cu-Ni-In plasma coating versus Ti17 titanium alloy contact[J]. Wear, 2011, 272(1): 18-37.
- [6] MARY C, FOUVRY S, MARTIN J M, et. al. High temperature fretting wear of a Ti alloy/CuNiIn contact[J]. Surface and coatings technology, 2008, 203(5-7): 691-698.
- [7] HAGER C H, SANDERS J, SHARMA S, et. al. Gross slip fretting wear of CrCN, TiAlN, Ni, and CuNiIn coatings on Ti6Al4V interfaces[J]. Wear, 2007, 263(1-6): 430-443.
- [8] FRIDRICI V, FOUVRY S, KAPSA P. Fretting wear behavior of a Cu-Ni-In plasma coating[J]. Surface and coatings technology, 2003, 163-164: 429-434.
- [9] SATHISHA C H, RAVIKUMAR B N, ANAND K, et. al. Elevated temperature fretting wear behavior of cobaltbased alloys[J]. Journal of tribology, 2016, 138(3): 031601-1.
- [10] KIM K, KORSUNSKY A M. Dissipated energy and fretting damage in CoCrAlY-MoS₂ coatings[J]. Tribology international, 2010, 43(3): 676-684.
- [11] 刘大响. 一代新材料, 一代新型发动机: 航空发动机的发展趋势及其对材料的需求[J]. 材料工程, 2017, 45(10): 1-5.
 LIU D X. One generation of new material, one generation of new type engine: Development trend of aero-engine and its requirements for materials[J]. Journal of materials

and its requirents for materials[J]. Journal of materials engineering, 2017, 45(10): 1-5.

- [12] 刘沛静. 抗氧化耐磨 MCrAIY 系涂层概述[J]. 辽宁化工, 2018, 47(1): 57-59.
 LIU P J. An overview about anti-oxidation wear-resisting MCrAIY coating[J]. Liaoning chemical industry, 2018, 47(1): 57-59.
- [13] CHEN Y, ZHAO X F, XIAO P. Effect of microstructure on early oxidation of MCrAlY coatings[J]. Acta materialia, 2018, 159: 150-162.
- [14] PAHLAVANYALI S, SABOUR A, HIRBOD M. The hot corrosion behaviour of HVOF sprayed MCrAIX coatings under Na₂SO₄(+NaCl) salt films[J]. Materials and corrosion, 2003, 54(9): 687-693.
- [15] ZHANG P M, YUAN K, PENG R L, et. al. Long-term oxidation of MCrAIY coatings at 1000 °C and an Al-activity based coating life criterion[J]. Surface and

coatings technology, 2017,332:12-21.

- [16] 高俊国, 陆峰, 汤智慧, 等. 喷涂距离对超音速火焰喷涂 CoCrAlYTa 涂层组织性能的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 1-4.
 GAO J G, LU F, TANG Z H, et al. The influence of spraying distance on structure and properties of CoCrA-IYTa coating prepared by HVOF[J]. Surface technology, 2013, 42(1): 1-4.
- [17] 彭新姜, 孙旭东, 宫骏, 等. 梯度 NiCoCrAlYSi 涂层的 循环氧化及热腐蚀行为[J]. 金属学报, 2016, 52(5): 625-631.

PENG X J, XUN X D, GONG J, et. al. Cyclic oxidationand hot corrosion behaviors of a gradient NiCoCrA-IYSi coating[J]. Acta metallurgica sinica, 2016, 52(5): 625-631.

- [18] 陶翀, 宋丹. 等离子喷涂 MCrAIY 涂层的高温氧化性能
 [J]. 理化检验-物理分册, 2019, 55(2): 79-83.
 TAO C, SONG D. High temperature oxidation properties of plasma sprayed MCrAIY coatings[J]. Physical testing and chemical analysis part A: Physical testing, 2019, 55(2): 79-83.
- [19] 郝恩康,安宇龙,赵晓琴,等. 热喷涂高温自润滑涂层研究现状[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 104-111.
 HAO E K, AN Y L, ZHAO X Q, et. al. High temperature self-lubricating coatings prepared by thermal spraying[J].
 Surface technology, 2018, 47(6): 104-111.
- [20] BOLELLI G, CANDELI A, LUSVARGHI L, et al. "Hybrid" plasma spraying of NiCrAlY+Al₂O₃+h-BN composite coatings for sliding wear applications[J]. Wear, 2017, 378-379: 68-81.
- [21] HOU G, AN Y, ZHAO X, et, al. Effect of alumina dispersion on oxidation behavior as well as friction and wear behavior of HVOF-sprayed CoCrAlYTaCSi coating at elevated temperature up to 1000 °C[J]. Acta materialia, 2015, 95: 164-175.
- [22] BOTTO D, LAVELLA M. High temperature tribological study of cobalt-based coatings reinforced with different percentages of alumina[J]. Wear, 2014, 318(1-2): 89-97.
- [23] DU L Z, ZHANG W, ZHANG W T, et. al. Tribological and oxidation behaviors of the plasma sprayed NiCo-CrAlY-Cr₂O₃-AgVO₃ coating[J]. Surface and coatings technology, 2016, 298: 7-14.
- [24] ZHANG T, LAN H, HUANG C, et. al. Formation mechanism of the lubrication film on the plasma sprayed NiCo-CrAlY-Cr₂O₃-AgMo coating at high temperatures[J]. Surface and coatings technology, 2017, 319: 47-54.
- [25] 周小龙, 曾德长, 王刚, 等. AC-HVAF 制备 Cr₃C₂-25CoNiCrAlY 和 Cr₃C₂-25NiCr 涂层的高温氧化及摩擦 磨损行为[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 102-109. ZHOU X L, ZENG D C, WANG G. High temperature oxidation and tribological behavior of Cr₃C₂-25CoNiCr-AlY and Cr₃C₂-25NiCr coatings prepared by AC-HV-AF[J]. China surface engineering, 2017, 30(5): 102-109.
- [26] HAJMRLE K, CHILKOWICH A P. Low friction cobalt

based coatings for titanium alloys: United States, 5601933[P]. 1999-09-21.

- [27] MARQUER M, PHILIPPON S, FAURE L, et, al. Influence of two APS coatings on the high-speed tribological behavior of a contact between titanium alloys[J]. Tribology international, 2019, 136: 13-22.
- [28] CAO Y. Effects of hBN content on the microstructure and properties of atmospheric plasma-sprayed NiCr/Cr₃C₂hBN composite coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2016, 25(4): 650-659.
- [29] 张昂, 王长亮, 王天颖, 等. 超音速火焰喷涂 CoCrAIYSi-hBN 涂层组织和性能[J]. 航空材料学报.
 2020, 40(5): 53-59.
 ZHANG A, WANG C L, WANG T Y, et. al. The microstructure and properties of CoCrAIYSi-hBN coating prepared by HVOF[J]. Journal of aeronautical materials, 2020, 40(5): 53-59.
- [30] RUIZ-LUNA H, LOZANO-MANDUJANO D, ALVAR-ADO-OROZCO J M, et al. Effect of HVOF processing parameters on the properties of nicocraly coatings by de-

sign of experiments[J]. Journal of thermal spray technology, 2014, 23(6): 950-961.

- [31] ROBERT C, TUCKER J. Surface engineering[M]. [s. 1.]: ASM international, 1994: 497-509.
- [32] HERMAN H, SAMPATH S, MCCUNE R. Thermal spray: Current status and future trends[J]. MRS bulletin, 2000, 7: 17-25.
- [33] TAN X H, XU J M, LI Q, 等. 微米尺度与纳米尺度陶 瓷颗粒等离子喷涂(APS)、超音速火焰喷涂(HVOF)、 冷喷涂制备 MCrAlY-Al₂O₃ 复合涂层的微结构与性能 对比[J]. 热喷涂技术, 2014, 6(4): 60-65. TAN X H, XU J M, LI Q, et al. Comparison of microstructure and properties of MCrAlY-Al₂O₃ composite coatings with both micro-sized and nano-sized ceramic particles deposited by plasma spraying, HVOF and cold Spraying[J]. Thermal spray technology, 2014, 6(4): 60-65.
- [34] BABU P S, MADHAVI Y, KRISHNA L R, et. al. Thermal spray coatings for erosion-corrosion resistant applications[J]. Transactions of the indian institute of metals, 2020, 73(9): 2141-2159.