

热喷涂涂层在航空发动机上的应用及发展

Application and Development of Thermal Spray Coating in Aeroengine

中国人民解放军 5713 工厂 陈礼顺 张 斌 蔡元钢



陈礼顺

中国人民解放军 5713 工厂高级工程师,主要从事航空发动机技术研究与实践工作,先后获得多项科技成果。在省部级学术刊物上发表 30 多篇论文,多篇论文获得湖北省自然科学优秀学术论文奖。

涂层防护技术是一种现成的金属零件表面处理和再次表面处理工艺,具有成本低、性能好、能延长零件寿命、涂层零件尺寸不受控制、涂层厚度可在 0.02mm 至几毫米范围内变化的优点,可以用来修理因磨损、加工不当等造成尺寸偏差的零件并赋予机件抗磨损、抗氧化、抗腐蚀、隔

航空发动机设计性能的提高推进了热喷涂技术向更深的领域发展,热喷涂技术每次取得突破性的进展,必将促进航空发动机事业快速向前发展。

热等性能,广泛应用于航空发动机制造和修理上。为满足日益提高涡轮前温度的要求,在进一步发展新型高温合金和冷却技术的同时,理想的解决办法是在高强度合金的表面涂覆具有最大抗腐蚀性的防护涂层,提高机件抗热疲劳和高温腐蚀的能力,延长机件寿命。防护涂层的制备方法很多,热喷涂是传统的涂层制备方法,新的设备设计及新技术、新材料的开发应用使热喷涂工艺越来越多地应用于航空领域。

热喷涂涂层制备方法

热喷涂是一种表面强化技术,它采用电弧、等离子弧、燃气-氧气等形式的热源,将涂层材料加热熔化或软化,并在高速气流的作用下使之雾化或微细熔滴或高温颗粒,以很高的飞行速度喷射到经过预处理的基体表面,形成具有某种功能的涂层。依据热源形式不同,热喷涂可分为火焰喷涂、电弧喷涂、常压等离子喷涂

(APS)、低压等离子喷涂(LPPS)、超音速火焰喷涂、爆炸喷涂等。

1 火焰喷涂

火焰喷涂以氧-乙炔火焰来熔化待喷涂的粉末后喷射到经预先处理的基件表面形成涂层。由于焰流速度慢,热量不集中,粉末在空气中飞行时间长,因而形成的涂层粗糙多孔(空隙率多为 10%~15%),氧化物和未熔颗粒多,涂层的结合硬度和结合强度较低(多为 20~30MPa)而且易产生裂纹和剥落。主要应用于航空发动机中机匣封严圈、燃烧室衬板、导向器壳体等机件。

2 电弧喷涂

电弧喷涂是将两根电线反向连接在直流电源上,形成短路来加热并熔化材料,用高压空气流吹熔化的金属丝使之喷向基体金属。电弧喷涂经济方便、涂层质量好于火焰喷涂,但只能喷涂一些能导电的材料。在电弧喷涂系统增加一个脉冲等离子,提高了喷涂颗粒的冲击速度和喷涂

面积,使电弧喷涂应用范围大大提高。

3 等离子喷涂

等离子喷涂包括常压等离子喷涂和低压等离子喷涂,是以等离子弧作为热源将粉末熔化并经过膨胀的等离子气体高速喷射到经预先处理的基件表面形成涂层的过程。由于等离子弧温度高(弧柱中心温度可达 15000~33000K)、热量集中,能熔化一切高熔点粉末材料,是一般火焰喷涂和电弧喷涂所不能达到的;能量大、粉末粒子飞行速度快,而且采用氩气作为等离子气体,氢气作为辅助气体,因而粉末的氧化程度低、杂质含量低、纯度高。所形成的涂层致密度高达 88%~90%,孔隙率(3%~8%)、氧化物含量都很低,结合强度(40~50MPa)和硬度较高,但由于残余应力的存在,涂层不能过厚,否则会产生裂纹和剥落且使用和维护费用较为昂贵。

许多军用航空发动机零件采用等离子喷涂来降低机件工作温度,能够提高机件使用寿命,其中有风扇叶片、燃烧室内衬、压气机叶片和空气密封件、高导叶片等。等离子喷涂的应用实例包括:在 TF39 风扇叶片的燕尾喷涂 Cu-Ni-In 以防止擦伤,在发动机燃烧内衬涂 ZrO₂ 热障涂层,在耐磨及防热的碳原件上喷涂 Al₂O₃^[1-2]。

4 超音速火焰喷涂(HP/HVOF)和爆炸型喷涂

进入 20 世纪 90 年代,在热喷涂领域出现了超音速火焰喷涂(HP/HVOF)和爆炸型喷涂(HVOF)两种新型涂层工艺技术,其共同点是物料粒子速度高达 500m/s 以上,超过音速,物料粒子高速撞击基体或涂层表面,导致了涂层致密和基体结合强度高。

(1) 超音速火焰喷涂是近年来发展的新型热喷涂工艺,它将丙烷或氢气、丙烯等与氧气混合并燃烧

以便将涂层粉末(金属粉末或碳化物)预热并以约 300~500m/s 的超音速喷向工件表面形成涂层。超音速喷枪的结构独特,在燃烧室的末端即咽喉部位采用了拉瓦尔曲线设计,使得燃烧室的压力增加,通过该处的焰流获得数倍于音速的速度;而且采用了径向内送粉方式,使得粉末在 10~30cm 的枪管内得到充分的加热和加速,虽然温度不是很高(2870℃),但由于能量集中,受热均匀,因此熔化得非常好;此外,由于粉末粒子的动能大、速度快、粒子在空气中的飞行时间极短、被氧化的机会极少,再加上喷枪系统本身的温度不高(2870℃),所以涂层中几乎没有氧化物,空隙率也极低(小于 2%),涂层致密度为 98%,剪切强度和结合强度都非常高(可达到 60MPa 以上),而且涂层内的残余应力几乎都是压应力,这样就使得涂层可以具有很大的厚度而不至于产生裂纹和剥落,主要用于航空装备关键耐磨零件上^[3]。

(2) 爆炸喷涂是目前喷涂速度最高的一种喷涂工艺,首先它将乙炔气及氧气通入喷枪,同时用氮气将喷涂粉末送入喷枪,点燃后产生突发性爆炸,生成爆炸冲击波来加热涂层粉末,并以 500~800m/s 的超音速喷向工件表面形成涂层。由于高速喷涂具有动能使熔化颗粒冲击到零件表面提高了涂层和基体的结合强度以及涂层致密度和硬度,常用于制作耐磨涂层,如碳化钨/钴及碳化铬/镍铬涂层,典型应用于风扇及压气机叶片阻尼凸台磨损面及燃烧室中段环上。例如 F100 及 TF39 风扇叶片的修理包括钝化前缘或者清理

损伤区域;TF39 风扇叶片凸台进行 TIG 焊并消除应力要进行爆炸喷涂以防止冲击磨损^[3]。

热喷涂工艺流程

热喷涂工艺过程分为喷涂前预处理、喷涂、喷涂后处理,工艺流程:清理→除油→吹砂→保护非喷涂表面→涂层硬度检查→预热→热喷涂→磨修→涂层清理→检查。喷涂前预处理非常重要,除油必须彻底,否则涂层结合力不好,易造成涂层剥落等缺陷;除用汽油和丙酮清洗外,还要对待喷部位进行吹砂,使零件表面洁净,粉末必须烘干,以保证粉末干净,否则涂层容易产生裂纹;检测送粉率,送粉率不合格即造成涂层不合格;用试片检查硬度,合格后方可喷涂零件;喷涂时必须对零件进行冷却,使零件温度低于 200℃,选用不同的喷涂设备对零件进行喷涂,具体喷涂操作按工艺要求参数进行;等离子喷涂镍钴铬铝钇(底层)、镍铬包碳化铬(面层)工艺参数见表 1。喷涂后清除工件喷涂用保护夹具、高温压敏胶带或其他耐热遮蔽物,将零

表 1 等离子喷涂镍钴铬铝钇、镍铬包碳化铬工艺参数

喷涂参数		底层参数值	面层参数值
电弧电流 /A		580~630	590~640
电弧电压 /V		50~70	60~70
功率 /kW		35~40	40~45
送粉速度 / (g·min ⁻¹)		30~60	30~60
喷涂距离 /mm		100~150	100~130
Ar	压力 /MPa	0.52	0.52
	流量 / (L·h ⁻¹)	30~50	30~50
H ₂	压力 /MPa	0.54	0.54
	流量 / (L·h ⁻¹)	10~20	15~22
喷嘴型号		GP	GP
转台速度 / (r·min ⁻¹)		20~50	20~50
送粉气	压力 /MPa	0.2~0.3	0.2~0.3
	流量 / (L·h ⁻¹)	300	300

件擦拭干净^[1]。

热喷涂工艺制备的涂层类别

航空发动机上利用热喷涂工艺制备的涂层主要有封严涂层、耐磨涂层、高温防护涂层及热障涂层；涂层材料主要以镍基粉末为主，如镍/石墨、镍/硅藻土、镍铬硼硅等。

1 封严涂层

封严涂层又叫控隙涂层或密封涂层，用于气路密封处，以减少气体泄漏、降低油耗、增加喘振裕度、提高压气机和涡轮效率。如涡轮外环（即叶尖径向间隙）的封严，按设计要求，叶尖间隙与叶片长度的比值每增加1%，涡轮效率损失就增加1%~3%。封严涂层制备工艺方法一般为火焰喷涂、等离子喷涂，如在高压涡轮封严篦齿上喷涂坚硬的抗磨损灰色氧化铝涂层，随着转子高速旋转，像砂轮一样磨削与其对应的金属蜂窝密封环，并尽量使本身不受磨损，要求涂层结合强度高、硬度高、隔热性好。封严涂层的选用应注意与工作温度相匹配，否则可能因涂层硬度太高或太低造成封严失效。

2 耐磨涂层

采用耐磨涂层是提高航空发动机零件的抗热疲劳和高温腐蚀能力、延长其寿命的有效方法之一。耐磨涂层分为碳化物涂层、氧化物涂层、合金涂层。

碳化物涂层也叫硬金属涂层，这类涂层利用碳具有很高硬度、耐高温、并有一定润滑作用等性能，具有良好的抗冲击性、韧性、与基体结合性和致密性。一般采用等离子喷涂、超音速喷涂、爆炸喷涂工艺制作而成。典型材料有碳化钨-钴涂层、碳化铬-镍铬涂层、碳化钛涂层等。图1和2为机件耐磨涂层在使用中掉块、裂纹；图3为采用碳化铬-镍铬涂层修复好的机件。

氧化物涂层指含量在97%以上的氧化铝、氧化钛、氧化铬涂层。特

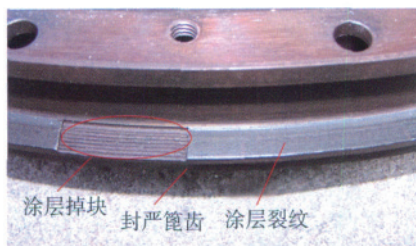


图1 涂层裂纹及掉块

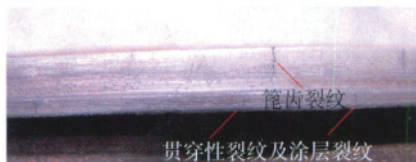


图2 贯穿性裂纹及涂层裂纹

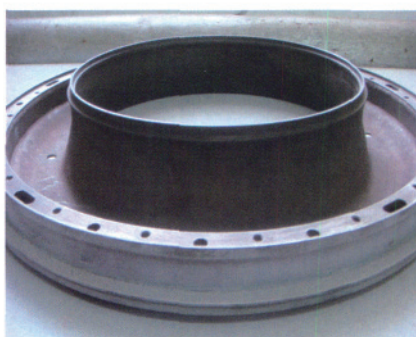


图3 采用碳化铬-镍铬涂层修复好的机件

点是熔点高、较脆，有良好的热稳定性、耐磨损性、抗腐蚀、抗氧化性，采用爆炸喷涂和等离子喷涂工艺制得的氧化铝涂层硬度好，可用作硬支承耐磨涂层。

合金涂层，常见的镍铬硼硅涂层和钴铬钨涂层（见表2），前者属自熔性合金，硬度较碳化物涂层稍低，但塑性好，易喷涂，有自愈性，也可与碳化钛组成耐磨涂层，该涂层采用镍合铝（Ni80-A120）作底层，使用温度可达900℃。钴铬钨涂层类似镍铬硼硅涂层，以镍包铝涂层作底层，采用等离子喷涂工艺，用于发动机涡轮叶片叶冠冠尼面。

3 高温防护涂层

高温防护涂层分为氧化物陶瓷涂层和 MCrAlX 合金涂层。

氧化物陶瓷涂层是在基体表面沉积一定厚度的致密的具有高熔点的氧化物陶瓷涂层（见表3），可以有效地提高基体材料的耐磨损、耐高温、抗高温氧化、耐腐蚀等性能，一般采用等离子喷涂工艺。

MCrAlX 合金涂层具有更高的高温抗氧化和抗热腐蚀性能。根据 M、X 所代表的金属元素不同分别有 NiCoCrAlY、NiCoCrAlYHf、NiCoCrAlYTahf 等多种组合涂层，这类涂层在高温下能自动生成致密的高熔点氧化物，并且具有自动修补成氧化膜的功能。一般采用真空等离子喷涂工艺制作 MCrAlX 合金涂层（见表4）。MCrAlX 系列涂层的采用使叶片抗热腐蚀能力大幅度提高，寿命再次延长。据悉，JT9D-7R4G2（用于波音747飞机）、LM2500、GT29、GT43、TW2000、TW4000 等发动机均采用 MCrAlX 类型涂层。

表2 钴铬钨涂层组成及性能

涂层牌号		STL-3G	X-40
底层		Ni80-A120	Ni80-A120
面层元素质量分数 %	Co	余量	余量
	Cr	25~32	24.5~26.5
	W	3~6	7.2~8.2
	Si	1.4~2.0	
	Ni		9.5~11.5
涂层厚度 /mm		> 0.3	> 0.3
密度 (g·cm ⁻³)		7.06	7.80
结合强度 /MPa		24.5~34.3	34.3~39.2
硬度 HRC		48~52	42~46
抗氧化性能 900℃ /50h		增重 1.93mg/cm ³	增重 0.3~0.64mg/cm ³

表3 部分氧化物的熔点

涂层材料	Al ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃
熔点 /℃	2040	1920	2700	2435

表4 采用真空等离子喷涂制作MCrAlX涂层
主要性能

项目	数据
工作温度 / °C	1150
硬度 HRC	30~35
结合强度 / MPa	70~80
气孔率 / %	< 1
抗氧化性 1050 °C / 200h	完全抗氧化

4 热障涂层(TBCs)

热障涂层利用陶瓷材料良好的耐高温、耐腐蚀、耐磨损和绝热等性能,使其以涂层形式与合金基体结合,从而提高金属结构件抗高温腐蚀环境的能力。热障涂层常应用于航空发动机高温零部件的表面改性,防止热端部件受氧化等侵害,从而延长发动机使用寿命,有两层或梯度层等结构形式,目前大量使用的为两层结构,包括表面陶瓷层和起过渡作用的粘接层,厚度从几十微米到几百微米不等。面层主要是 Y_2O_3 稳定的 ZrO_2 ,粘接层采用NiCrAlY、NiCoCrAlY等合金,主要采用等离子喷涂方法制备。据报道,这种热障涂层可产生150°C左右的温降,即提高涡轮前温度150°C左右,满足了航空发动机工作温度不断升级的需要。

涡轮叶片使用陶瓷热障涂层是提高发动机性能的一条重要途径,因为0.4mm厚的氧化锆涂层,可使高温合金表面温度降低100~300°C,发动机全负荷时,实测涡轮进口燃气温度为1370°C,涂层表面温度为1080°C,叶片金属温度为930°C,同时大大节省了冷却空气量的消耗,提高了涡轮效率。有资料表明:一级涡轮叶片表面喷涂0.25mm厚的陶瓷热障涂层,可使冷却空气流量减少50%,比油耗改善1.3%,叶片寿命提高4倍^[2,4]。

影响涂层质量的因素很多,诸如喷涂工艺参数、喷涂操作人员、测量、环境、设备、材料等,因此要获得合格的防护涂层,首先要选择合适的涂层

材料及其配比,涂层不应产生应力,特别是张应力,涂层不要太脆;根据防护涂层的要求选择合适防护涂层制备方法、制备参数,保证制备的防护涂层具有高硬度、高温抗氧化、耐磨耗、耐磨蚀性能,涂层延性和韧性满足寿命周期要求。

涂层性能检测方法

对制备的涂层除了测量涂层的孔隙率和沉积率外,还要进行硬度、拉伸、热振、弯曲等试验以检测涂层的基本性能。

(1) 硬度试验是测定涂层在一定载荷下抵抗弹性变形、塑性变形或破坏的能力及材料抵抗残余变形和反破坏的能力,是衡量金属材料软硬程度的一项重要性能指标。

(2) 拉伸试验是测定涂层在拉伸载荷作用下的试验,它是材料机械性能试验的基本方法之一,主要用于检测涂层是否符合规定的标准和研究材料的性能。

(3) 热振试验是将试样进行加热和冷却周期性地交变试验,致使涂层内的应力呈周期性变化,即涂层经受循环应力作用,检测涂层经过这种不同温度环境的变化后结合力变化的情况。

(4) 弯曲试验是测定涂层承受弯曲载荷时的力学特性试验,主要用于测定涂层的弯曲强度并能反映塑性指标的挠度。

应用及发展趋势

热喷涂技术在航空发动机领域取得日益广泛的应用,国内航空企业已在十几个型号的发动机制造和修理中采用了热喷涂工艺制作防护涂层,如某航空发动机后机匣安装边涂一层镍铬硼硅-镍/铝涂层、中机匣封严圈喷涂NiAl-NiC涂层、火焰筒内壁喷涂氧化锆涂层、外壁涂高温陶瓷涂层、导向器叶片喷涂耐高温涂层、涡轮叶片涂耐高温涂层、叶冠涂

钴铬钨耐磨涂层、二级导向器壳体喷涂镍铬铝包硅藻土涂层、高压涡轮封严齿喷涂自粘接性NiAl底层和 Al_2O_3 主动磨削涂层等,增加了机件抗磨损、抗氧化、抗腐蚀、隔热等能力,提高了发动机效率,延长了发动机寿命。

我国空军航空装备快速发展,FWS-10发动机火焰筒、燃烧室部件、31Φ发动机机匣采用热障涂层。现役发动机修理过程中也可以利用热障涂层来修复发动机热端部件。随着大推比发动机的研制,提出涡轮前温度为1000~1300°C,涂层隔热效果大于150°C、寿命大于2000h的要求,对热障涂层的使用温度和使用寿命提出了更高的要求^[2]。

结束语

航空发动机设计性能的提高推进了热喷涂技术向更深的领域发展,热喷涂技术每次取得突破性的进展,必将促进航空发动机事业快速向前发展。随着大寿命发动机越来越多,涂层裂纹及掉块故障也越来越多,通过热喷涂技术,延长了航空发动机零部件使用寿命,成功地对磨损、磨蚀、高温易氧化的航空产品进行了修复,并成为航空发动机制造和修理中不可缺少的工序,保证了航空产品质量,取得了巨大的经济效益。随着新型战机的引进和国产化,新工艺、新技术、新设备的不断发展,涂层防护技术特别是热障涂层技术应用范围将更加扩大。

参考文献

- [1] 张玉麒. 航空制造工程手册·表面处理. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [2] 钱苗根. 材料表面技术及其应用手册. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [3] 曾杰. 超音速火焰喷涂涂层评析. 航空制造技术, 2004(3): 72-74.
- [4] 郭文有. 航空制造工程手册·发动机叶片工艺. 北京: 航空工业出版社, 1997.

(责编 良辰)