

某航空发动机热端部件涂层技术

Coating Technology for the Hottest Part of Aeroengine

中国人民解放军第 5713 工厂 陈礼顺 孙勇汉 蔡元刚



陈礼顺

北京航空航天大学航空硕士、高级工程师。现就职于中国人民解放军第 5713 工厂,从事航空发动机性能研究工作。负责参与的科研项目获得军队科技进步三等奖,多篇论文获得湖北省自然科学优秀学术论文奖。

为提高航空发动机热端部件抗腐蚀、抗高温氧化、抗磨损等能力,延长机件使用寿命,通常采取在发动机热端部件喷涂具有耐蚀、高温抗氧化、耐磨损等功能的防护涂层^[1]。由于设计原因,某航空发动机在工作过

程中,一级涡轮导向器隔热屏封严篦齿的外篦齿暴露在高温燃烧区,未得到有效的冷却,产生极大的热应力,引起篦齿根部背面涂层裂纹甚至掉块,如图 1 所示。统计分析表明:某航空发动机工作到大寿命时,一级涡轮导向器隔热屏 NiCr- Cr₃C₂ 涂层裂纹故障率高达 80%,因此研究热端部件 NiCr- Cr₃C₂ 涂层修复技术成为目前一项急待解决的问题。

程中,一级涡轮导向器隔热屏封严篦齿的外篦齿暴露在高温燃烧区,未得到有效的冷却,产生极大的热应力,引起篦齿根部背面涂层裂纹甚至掉块,如图 1 所示。统计分析表明:某航空发动机工作到大寿命时,一级涡轮导向器隔热屏 NiCr- Cr₃C₂ 涂层裂

纹故障率高达 80%,因此研究热端部件 NiCr- Cr₃C₂ 涂层修复技术成为目前一项急待解决的问题。要解决涂层裂纹甚至掉块的故障,就需要提高涂层的结合强度,保证涂层获得相当的耐蚀、高温抗氧化、耐磨损等能力,为此必须适当调整涂层材料的成分配比^[1-2]。

调整涂层材料的成分配比

一级涡轮导向器隔热屏原涂层是采用底层为镍铬铝钎,面层为 20%Ni5%Cr-75%Cr₃C₂ 混合粉喷涂制成。因镍铬铝钎作为涂层底层能够满足结合强度要求,所以成分无需调整。NiCr- Cr₃C₂ 涂层是一种碳化物涂层,它利用碳具有很高硬度、耐高温、并有一定润滑作用等性能,使涂层具有良好的抗冲击性、韧性



图1 涂层裂纹及掉块的宏观形貌

等; NiCr- Cr_3C_2 复合粉中的 Ni 在喷涂过程中会与底层镍钴铬铝钼中的 Al 发生反应, 增加涂层与基体的黏结性能。因此, 采取适当降低 Cr_3C_2 的含量、提高 NiCr 中 Ni 含量的方法, 提高涂层与基体的结合强度。

1 面层材料及配比

NiCr- Cr_3C_2 涂层由 NiCr 合金与 Cr_3C_2 粉末组成, 不同的结构形式、组

合力强、高硬度、高温抗氧化、耐磨耗、耐磨蚀, 用于 830°C 由硬表面引起的磨损或磨粒磨损, 和其它粉末组成成分相比最适合航空发动机热端部件工作特点, 因此采用包覆型的 25%Ni5%Cr-70% Cr_3C_2 复合粉代替混合型的 20% Ni5%Cr-75% Cr_3C_2 混合粉^[6]。

2 包覆型复合粉的制备工艺

包覆型 NiCr- Cr_3C_2 复合粉是采用高压氢还原技术在 Cr_3C_2 粉的表面包裹镍层, 再采用包覆法在镍包 Cr_3C_2 的表面粘结超细铬粉制成。图 3 给出了制备的 NiCr- Cr_3C_2 复合粉体的表面形貌。由图 3 可见, 复合粉体呈一定的菱形, 尺寸分布均匀, 粒度分布在 $50\sim 70\mu\text{m}$ 之间。检测表明复合粉体的流动速度不大于 0.6s/g , 松装密度大于 1.6g/ml 。

表1 粉末组成及性能

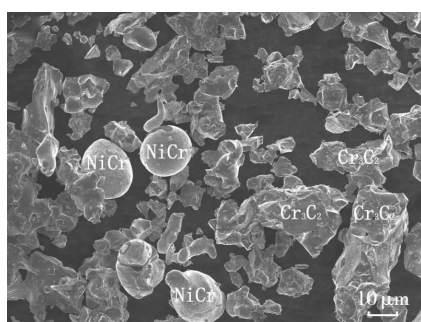
序号	结构型式	组成 /%		名义粒度	典型性能及应用
		NiCr	Cr_3C_2		
1	混合	7	93	-325 目 +15 μm	硬度高、韧性好, 具有一定的抗腐蚀能力
2	混合	15	85	-140 目 +11 μm	在 815°C 的高温中耐磨抗氧化
3	混合	25	75	-140 目 +11 μm	在 815°C 的高温中抗冲蚀、气蚀、微振和磨粒磨损; 良好的耐腐蚀性
4	混合	25	75	-325 目 +5 μm	抗燃气腐蚀, 尤其在含硫气氛中; 良好的润滑性
5	包覆	20	80	-325 目 +11 μm	所有 HVOF 喷涂的 NiCr- Cr_3C_2 涂层中, 这种涂层具有最高的微观和宏观硬度, 且表面最光洁; 在 $540\sim 815^\circ\text{C}$ 磨损及侵蚀条件下推荐采用; 良好的抗冲蚀性能
6	包覆	25	75	-170 目 +320 目	硬度高, 高温耐磨抗氧化, 耐磨蚀; 用于 830°C 粒子冲刷面抗磨
7	包覆	30	70	-170 目 +320 目	结合力强, 高硬度, 高温抗氧化, 耐磨耗, 耐磨蚀; 用于 830°C 由硬表面引起的磨损或磨粒磨损
8	包覆	50	50	-325 目 +11 μm	NiCr 含量高, 涂层坚韧, 在 $540\sim 815^\circ\text{C}$ 由硬表面引起的磨损或磨粒磨损时, 推荐使用

成成分、颗粒度, 涂层的性能也不相同, 具体情况见表 1^[3-5]。

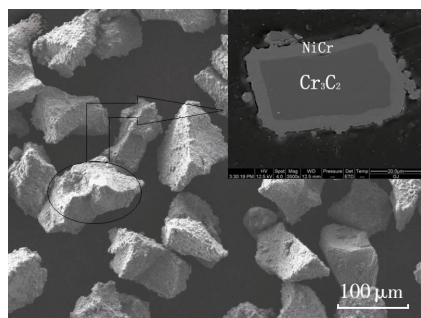
由表 1 可知, NiCr 合金与 Cr_3C_2 粉末的结构形式有 2 种, 一种是混合式团聚粉, 另一种是包覆式复合粉, 如图 2 所示。

混合式粉末涂层韧性好, 在高温燃气中抗气蚀、腐蚀能力强, 但在喷涂过程中 Cr_3C_2 于 $500\sim 700^\circ\text{C}$ 时易氧化成 Cr_2O_3 , 其硬度降低; 包覆式粉末涂层结合力强, 硬度高, 表面光洁, 在高温中耐磨抗氧化能力强, 且在喷涂过程中因 NiCr 合金抗氧化性好, 很好地保护了 Cr_3C_2 , 使 Cr_3C_2 未被氧化而损失, 从而使涂层保持了很高的硬度。因此, NiCr 合金与 Cr_3C_2 粉末的结构形式选用包覆式。

由表 1 可知, 30%NiCr-70% Cr_3C_2 复合粉体制备的涂层具有结



(a) 混合式



(b) 包覆式

图2 NiCr- Cr_3C_2 粉末形貌

试验方法与表征

1 试验材料

试验用基体材料为 1Cr18Ni9Ti, 根据不同的试验, 基体尺寸分为 2 种, 一种尺寸为 $25.4\text{mm} \times 10\text{mm}$, 另一种尺寸为 $80\text{mm} \times 20\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。涂层材料选用中科院过程研究所研制的 NiCr 和 Cr_3C_2 粉末, 复合粉体粒度分布在 $50\sim 70\mu\text{m}$ 之间。图 2 为原始粉末的 SEM 形貌。

2 涂层制备

涂层制备前, 先将零件置于丙酮中进行超声波清洗, 去除表面氧化物及油污, 再对基体表面进行喷砂粗化处理。然后, 采用中航工业北京航空制造工程研究所研制的 APS-2000 大气等离子喷涂系统(采用氩气作为等离子气体, 氢气作为辅助气体, 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 $88\%\sim 90\%$, 孔隙率为 $3\%\sim 8\%$, 氧化物含量很低, 结合强度为 $40\sim 50\text{MPa}$, 硬度较高), 按表 2 等离子喷涂工艺参数在试样表面喷涂厚度约 $70\sim 150\mu\text{m}$ 的镍钴铬铝钼复合粉末作为底层, 喷涂厚度约 $200\sim 300\mu\text{m}$ 的镍铬包碳化铬粉末 30%NiCr-70% Cr_3C_2 作为面层, 喷涂出表面未被氧化的银灰色致密涂层。

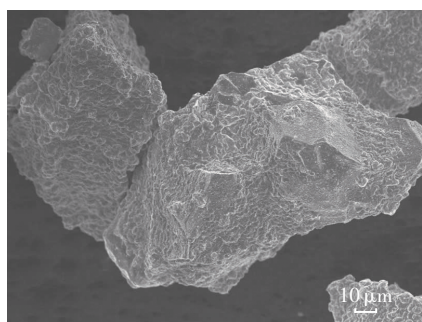
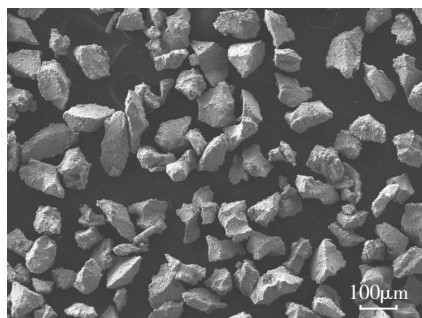


图3 不同倍数的NiCr-Cr₃C₂复合粉体的表面形貌

表2 等离子喷涂工艺参数

喷涂参数	电流/A	电压/V	氩气流量 / (L·min ⁻¹)	氢气流量 / (L·min ⁻¹)	喷涂距离 /mm	送粉率/(g·min ⁻¹)
底层参数值	610	65	40	15	100	40~45
面层参数值	610	65	40	15	100	40~45

3 试验表征

采用装配EDS附件的JL-SM5910扫描电子显微镜对喷涂试样的显微结构进行分析;采用日本津岛生产的AG-IS100KN的电子拉力试验机测试涂层的结合强度和弯曲强度。将试样切成尺寸为 $\phi 25.4\text{mm}$ 的圆片,用E-7胶将其与对偶件粘接后放入烘箱内 100°C 固化3h。取出后在室温下静置24h后用拉力机测试涂层的结合强度,试验3组,取三者的算术平均值。将试样通过电子拉力试验机(AG-IS100KN)围绕 $R=12.5\text{mm}$ 的芯棒型面上慢慢弯曲成 90° (涂层朝外),试验3组,用肉眼或5倍放大镜检查涂层情况。采用北京时代公司生产的TH320全洛氏硬度计测试涂层硬度,载荷为15N,硬度测试5~10个点,取算术平均值。采用热振试验检测涂层经受冷热循环应力的能

力,热振试验在马弗炉(RJM-2.8-10A)内进行,首先将试样加热到 850°C ,保温5~10min,然后迅速水淬至室温作为一个热冲击循环,共经过5~10个热循环,试验3组^[7-8]。

试验结果与讨论

1 涂层的显微结构分析

从扫描电子显微镜下涂层的显微结构可知,大气等离子喷涂涂层呈明显的扁片层状结构,层与层之间结合紧密,除个别存在大孔外,大部分孔隙比较小(μm 级)。对涂层内部不同区域的元素成分进行能谱分析,分析结果表明:浅灰色区域富含Ni、Fe、O元素,而深灰色区域主要以Cr的碳化物为主,结合区域主要以Al、Ni、Fe为主,同时伴随有少量Si、Mo

的化合物。此外,涂层显微结构存在一些黑点即气孔,这可能是在喷涂过程中,镍铬包碳化铬粉末在等离子焰流中不能获得较好的熔融效果,未充分熔融的粉末沉积在基体上不能完全铺开,使得后续喷涂粒子撞击到涂层上时与其产生间隙;加之在喷涂环境中存在大量的空气,熔融颗粒容易吸附这些气体,冷却凝固时无法及时彻底地排除,于是在组织中留下缺陷,从而形成气孔。

2 涂层的基本性能分析

技术文件要求涂层的硬度标准 $\geq 32\text{HRc}$,结合强度标准 $\geq 34\text{MPa}$,热振试验涂层不应出现剥落、裂纹、起皮,弯曲试验涂层R处不允许有连贯的裂纹和剥落。测试结果表明:涂层硬度33.5~50.5 HRc,结合强度平均值为49MPa;在热振循环中涂层试样表面无剥落、裂纹、起皮现象;

涂层试样弯曲后R处涂层无连贯的裂纹和剥落。

3 分析讨论

镍铬包碳化铬中Ni具有细化晶粒、增强韧性的作用,Cr的硬度高,生成的 Cr_3C_2 氧化膜能阻止气体对涂层的进一步氧化,同时还可以增强涂层的耐磨性。NiCr-Cr₃C₂复合粉中的Ni在喷涂过程中会与底层镍铬铝钼中的Al发生反应,增加涂层与基体的黏结性能。Al是强脱氧剂,生成的 Al_2O_3 可以抑制外部介质对母材金属的进一步腐蚀。因此镍铬铝钼底层不但能与基体,也能与涂层形成微冶金结合,提高涂层结合力,增加涂层结合强度^[9]。

结论

(1)涂层的材料及其配比选用包覆式的30%NiCr-70%Cr₃C₂复合粉。采用高压氢还原及粘结法制备的NiCr-Cr₃C₂复合粉粒度分布均匀、流动速度快、松装密度合适,具有很好的热喷涂送粉性能。

(2)采用大气等离子喷涂系统制备的涂层表面光洁,在高温中耐磨抗氧化能力强,能获得表面未被氧化的银灰色致密涂层。

(3)硬度、拉伸、热震、弯曲试验表明:制备的涂层其显微硬度、结合强度、抗热震性、抗弯曲性等性能优异,能满足航空发动机热端部件涂层的防护要求。

(4)通过对航空发动机热端部件涂层防护技术的研究,通过选用合适的涂层的材料及其配比,完善了制备NiCr-Cr₃C₂涂层的工艺方法,进一步掌握了航空发动机热端部件防护涂层的修理技术,成功地对磨损、磨蚀、高温易氧化的航空产品进行了修复,保证了航空产品质量。

本文共有参考文献9篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 亦非)