

# 表面涂层技术在航空发动机上的应用

郝兵 李成刚

(沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

**摘要:**介绍了保护、封严、密封、热障等涂层产品及其在航空发动机上的应用。这些涂层的应用提高了发动机可靠性,延长了发动机使用寿命。

**关键词:**表面涂层 涂覆技术 航空发动机

## Application of Surface Coating Technologies to Aeroengines

Hao Bing Li Chenggang

(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** A variety of coating products are introduced for protection, seal or thermal insulation etc. The application of these coating products to aeroengines not only improves the reliability, but also increases the life.

**Key words:** surface protection; coating technology; aeroengine

### 1 引言

表面涂层技术是指将有机、无机或混合涂层采用刷涂、浸泡、喷涂等方法涂覆于构件表面上,从而改善构件表面性能的一门技术。表面涂层能够对构件起到防护、密封、抗磨、抗冲击、减振、隔热等作用,而且技术工艺简单,可维修性好,大大提高了发动机构件可靠性,延长了发动机使用寿命,因此在航空发动机中得到了广泛应用。

### 2 保护层

管路、附件、叶片、机匣、帽罩等发动机构件直接和大气接触,容易受到大气中水分、尘埃、盐、二氧化硫的侵蚀,因此,其不锈钢和钛合金材料的表面膜易发生局部腐蚀即点蚀。涡轮叶片和燃烧室受到高温燃气冲刷,在热应力以及燃气中S和O元素的作用下发生化学反应,其晶界生成碳化物,造成贫铬区,在酸性物质作用下,材料表面沿晶面开裂,产生晶粒脱落即干腐蚀,经长期高温氧化形成氧化膜,氧化到一定程度之后,材料表面呈片状破裂或网状剥落,造

成微损伤,受到微损伤的构件在振动作用下,会产生微裂纹,微裂纹扩展可导致构件断裂。

抗磨、抗冲击涂层等保护涂层可对构件起到改善工作条件、提高可靠性和延长使用寿命的作用。抗磨、抗冲击涂层,包括叶片榫头和盘榫槽之间涂的耐磨涂层,高压压气机叶片型面上涂的有机硅耐磨涂层,压气机叶片阻尼凸台上涂的防止运转振动时叶片间相互撞击、摩擦、磨损的叶片振动涂层,涡轮叶片防热盐涂层等。

表1列出了几种常用的保护层。

表1 保护层

| 名称       | 使用处    | 产地         |
|----------|--------|------------|
| H06-107H | 管路     | 天津灯塔涂料公司   |
| H06-103H | 机匣     | 上海涂料研究所    |
| H06-105H | 叶片     | 上海涂料研究所    |
| WL-1     | 涡轮叶片   | 北京航空材料研究院  |
| TYF-01   | 燃烧室    | 西安航空发动机公司  |
| TWZ-01   | 机匣     | 北京航空材料研究院  |
| TWZ-07   | 机匣     | 南方航空动力机械公司 |
| TWZ-11   | 燃气导管   | 黎明航空发动机公司  |
| TWZ-12   | 涡轮后机匣  | 贵州航空发动机公司  |
| TWZ-06   | 火焰筒安装边 | 成都航空发动机公司  |

收稿日期:2004-01-13

**第一作者简介:**郝兵(1942—),研究员,1966年毕业于大连理工大学,从事高温应变计研制与应用研究,作为主要参加者,其科研成果曾获国家级二等奖,部级成果奖7项。

### 3 封严与密封涂层

为了提高发动机效率,减少热损失,转、静子之间的间隙要小。转动件在工作中由于受离心负荷和热气流温度场的影响而向外伸长,因此会和静子碰磨,从而危及发动机的安全。为限制转、静子之间的间隙,又不使气流泄漏,在静子、转子叶片或封严齿上涂覆软、硬涂层,用磨损涂层的方法来保持封严。例如 WP6 发动机压气机前轴承机匣涂覆的封严涂层,涡轮第 2 级导向叶片的封严环等。

有的静子叶片是插入静子内环的,二者的间隙造成气流损失,这时可采用密封涂层封住,这要求密封涂层耐温、抗振、柔软,长期不老化。

表 2 和表 3 列出了部分封严、密封涂层的概况。

表 2 封严涂层

| 名称     | 使用处     | 生产厂       |
|--------|---------|-----------|
| TFY-01 | 压气机机匣   | 西安航空发动机公司 |
| TFY-03 | 涡轮外环    | 成都航空发动机公司 |
| TFY-05 | 高压外环    | 黎明航空发动机公司 |
| TFY-06 | 导向叶片缘板  | 黎明航空发动机公司 |
| TFY-08 | 高压涡轮外环  | 北京工艺所     |
| TFY-11 | 压气机机匣   | 黎明航空发动机公司 |
| TFY-12 | 高压压气机机匣 | 黎明航空发动机公司 |
| TFY-09 | 高压涡轮封严环 | 北京工艺所     |

表 3 密封涂层

| 名称     | 使用温度(°C) | 生产厂        |
|--------|----------|------------|
| HM108  | 110      | 北京航空材料研究院  |
| HM109  | 120      | 北京航空材料研究院  |
| HM30   | 250      | 北京航空材料研究院  |
| XM-31  | 230      | 北京航空材料研究院  |
| XJ-51  | 250      | 南方航空动力机械公司 |
| XJ-55  | 300      | 南方航空动力机械公司 |
| YGM-1  | 200      | 北京航空材料研究院  |
| HM106  | 120      | 北京航空材料研究院  |
| XJ-56  | 150      | 南方航空动力机械公司 |
| HM1001 | 200      | 上海有机氟材料研究所 |

### 4 橡胶涂层

航空发动机压气机叶片在工作中处于高离心负荷状态,在振动作用下最易被破坏,所以对叶片减振非常重要。叶片振动的形式包括强迫振动、颤振、旋

转失速和随机振动,为保证发动机安全工作,就要使压气机叶片振动不致过大,为此,在叶片设计上可采取加凸尖、减振环、阻尼块、带冠叶片、宽弦叶片、加强肋、削尖等减振措施。为了改善压气机工作特性,扩大稳定工作范围,使发动机有良好的起动和加速性能,在非设计点状态下不发生喘振,在压气机设计中还可采用可转进口导流叶片、可转静子叶片、可变弯度的进口导流叶片、进气处理机匣和放气带等。

国外的发动机也有的采用了橡胶涂层,即将橡胶涂层涂于压气机叶片燕尾槽底部,然后将叶片装入压气机盘的燕尾槽内。橡胶涂层属于高弹性分子材料,振动时可吸收能量,有明显的阻尼作用,且耐磨、耐老化,密封性好,使用寿命长、易更换、便于维护,能够明显提高叶片的使用寿命。

表 4 列出了部分橡胶涂层概况。

表 4 橡胶涂层

| 名称   | 使用温度(°C) | 生产厂       |
|------|----------|-----------|
| 氯丁   | 130      | 沈阳第四橡胶厂   |
| 丁晴   | 50       | 沈阳第四橡胶厂   |
| 聚硫   | 80       | 沈阳油漆厂     |
| 硅橡胶  | 300      | 上海橡胶研究所   |
| 丁苯   | 20       | 沈阳第四橡胶厂   |
| 丁基   | 150      | 徐州化工研究院   |
| 氟橡胶  | 50       | 沈阳橡胶研究设计院 |
| 乙丙橡胶 | 150      | 沈阳橡胶研究设计院 |

### 5 热障涂层

大量试验证明,热障涂层热变形小、耐蚀、耐磨、密封性好,用在发动机高温部件上可提高发动机效率和延长发动机使用寿命,已成为航空发动机设计和维护的关键技术之一。

美国 PW 公司在 JT3D 和 JT38D 发动机的风扇叶片、压气机叶片、燃烧室、涡轮叶片等处采用了热障涂层,目前,已将热障涂层发展到了第 3 代,应用了大推重比发动机 PW4000 上。英国 RR 公司的 Spey 发动机有 200 多个零件使用了热障涂层,尤其是在第 1~3 级涡轮叶片叶冠上均使用了热障涂层,从而改善了叶片可靠性,提高了发动机效率。美国 GE 公司,在 20 世纪 70 年代中期,将热障涂层广泛用于延长燃烧室和加力燃烧室组件的使用寿命;80 年代,等离子喷涂热障涂层的应用已经扩展到高压涡轮导向叶片。

为提高发动机燃烧室可靠性,防止发生热变形

进而产生裂纹,英国 RB211 发动机燃烧室衬套表面采用了热喷氧化锆涂层,从而极大地提高了燃烧室的使用寿命。

随着航空航天技术的发展,中国的隔热高温涂层技术也有了长足进步,热障涂层早就应用于发动机燃烧室、喷口、涡轮叶片等处。如 WP7 发动机火焰筒使用了高温珐琅涂层。又如 WP6 发动机第 1 级涡轮叶片的榫齿延伸段曾发生断裂,采用钴铬镍热喷耐磨涂层有效排除了这一故障。目前中国热障涂层使用的最高温度可达 1350℃。

表 5 列出了部分热障涂层的概况。

表 5 热障涂层

| 名称     | 使用处  | 生产厂       |
|--------|------|-----------|
| TGR-01 | 喷嘴   | 西安航空发动机公司 |
| TGR-02 | 隔热屏  | 北京工艺所     |
| TGR-03 | 火焰筒  | 成都航空发动机公司 |
| TGR-04 | 喷口   | 黎明航空发动机公司 |
| TGR-05 | 喷口   | 重庆仪表材料研究所 |
| TGR-06 | 导向叶片 | 重庆仪表材料研究所 |
| TGR-21 | 尾喷管  | 黎明航空发动机公司 |
| TGR-22 | 燃烧室  | 黎明航空发动机公司 |

发动机设计技术的发展要求涡轮叶片承受更高的温度,在叶片材料的性能难以提高的情况下,只有靠发展热障涂层来解决这一问题。近些年来,热障涂层技术已成为涡轮叶片设计的一个重要组成部分。国外著名的航空发动机公司对热障涂层在涡轮

叶片上的应用进行了大量试验,并进行了热障涂层厚度、性能、材料、裂纹、疲劳、剥落机理、隔热等专项研究。为了研究高温部件的力学特性,英国 RR 公司和美国 NASA 采用等离子喷涂的热障涂层技术研制成功了温度为 1000℃ 的高温应变计。

## 6 结束语

涂层技术是表面工程技术的一个分支,其中的防锈、防冰、防雾、阻燃、耐油等涂层都在发动机上得到了应用,对提高发动机可靠性起到了一定作用。

## 参考文献

- 1 陶春虎,等. 航空发动机转动部件的失效与预防. 北京:国防工业出版社,2000.
- 2 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册(第 2 版). 北京:中国标准出版社,2002.
- 3 粟诒. 等离子喷涂和燃烧火焰喷涂技术. 北京:国防工业出版社,1984.
- 4 翟海潮,等. 粘接与表面粘涂技术. 北京:化学工业出版社,1995.
- 5 小若正伦. 金属的腐蚀破坏与防蚀技术. 北京:化学工业出版社,1988.
- 6 航空制造工程手册编委会. 航空制造工程手册. 北京:航空工业出版社,1997.
- 7 徐楨士,等. 表面工程. 北京:机械工业出版社,2000.
- 8 陈光,等. 航空燃气涡轮发动机结构设计. 北京:航空学院出版社,1988.

(责任编辑 刘静)

# GE 90 发动机的降噪技术

发动机的噪声是飞机的主要噪声源。大涵道比涡扇发动机降低噪声主要通过选择适当的发动机循环参数(增大涵道比、降低风扇转速、降低发动机的排气速度)和低噪声设计来实现。

除了采用增大涵道比(8.4)和较低的风扇转速(371m/s)降低发动机噪声外,GE 公司 20 世纪 90 年代全新研制的 GE90 大涵道比涡扇发动机还大量采用了部件降噪技术。这些技术包括:(1)进气/风扇机匣前后优化处理;(2)风扇叶片低噪声设计;(3)风扇与进口导向叶片的间距加大;(4)进口导向叶片

数量优化;(5)减小风扇叶尖间隙;(6)可定制进口导向叶片与舱吊挂一体化设计;(7)风扇涵道/畸变优化设计;(8)最大反推力状态下增压级降噪设计;(9)在最大反推力状态下最后 1 级转子与支板间距的优化设计;(10)采用吸声衬垫和长的整流罩。通过采用上述技术,GE90 发动机取得了很好的静音效果。

另外,GE 公司还在进一步开发掠形风扇转子叶片、弯掠导向叶片和小突片喷管等发动机降噪技术。这些技术目前已经在 GE90-115、CF6-80、CF34 等发动机上得到验证。

(梁春华)