

石墨封严涂层典型质量问题浅析

李银凤¹ 陈伟² 周诗伟³

1. 湖南南方通用航空发动机有限公司; 2. 中航动力株洲航空零部件制造有限公司;

3. 湖南南方通用航空发动机有限公司

[摘要]封严涂层技术应用是航空发动机控制发动机气路间隙的重要手段,采用气路封严技术可有效降低油耗,延长发动机使用寿命,提高发动机效率。本文介绍了一种手工涂覆的石墨封严涂层在实际应用时常见的典型质量问题、影响因素及解决方案。

[关键词]航空发动机、石墨封严涂层、手工涂覆

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-6261.2021.12.1129

一、引言

在航空发动机中,由于发动机转子及机匣材料热膨胀差异、离心力下的叶片伸长效应,零件加工误差、装配公差、零部件振动引起的位移和变形等因素的影响,导致发动机转子与静子之间间隙过小,引起转子和静子的刮擦磨损及机匣、叶片的损伤,严重时甚至会导致发动机出现重大故障,因此,叶片与机匣的间隙不能太小,为提高发动机效率,保护叶片和机匣不受刮擦损伤,在航空发动机气路密封的设计和开发中引入可磨耗封严涂层,维持最小气路间隙以提高发动机性能。

本文介绍的石墨封严涂层是一种手工涂覆的可磨耗封严涂层,即把涂层手工涂覆在静子件上,当发动机工作时,动子件(叶片等)、静子件之间产生干涉、摩擦、消耗一部分涂层,使动、静子件在发动机工作状态下的达到最小间隙,防止工作气体从高压侧沿叶片尖部向低压侧沿机匣与转子叶片叶尖的径向间隙泄露。

二、石墨封严涂层简介

石墨封严涂层是由油漆、石棉、石墨、铝粉、玻璃纤维等硬质颗粒和溶剂按一定的比例配制而成的膏状涂料,采用手工涂覆的方法涂覆在工件表面,经高温烘烤而形成的封严涂层。其中油漆作为粘结剂,硬质颗粒作为粉末填料,在配制过程中油漆将硬质颗粒粘接起来并牢固得结合在工作表面,在加热烘烤后,涂料分子中官能团发生交联反应固化成膜,并将硬质填料包容其中固定在工作表面上形成涂层。不同配方的石墨封严涂层耐热温度不同,低温的石墨封严涂层工作温度不高于150℃,主要应用于航空发动机压气机部件前端和附件传动部件,高温的石墨封严涂层工作温度不高于300℃,主要应用于航空发动机燃烧室部件,BH封严涂层工作温度不高于350℃,主要应用于发动机压气机部件后端。

三、石墨封严涂层涂覆工艺流程

(一) 表面预处理

涂覆石墨封严涂层前需采用有机溶剂除油、吹砂等方式对待涂工件表面进行表面预处理,确保待涂表面清洁无污。

(二) 保护

涂覆前需采用胶带纸或专用防护工装将非涂覆面进行保护。

(三) 涂料配制

按照一定的配比将油漆等漆料,石棉、石墨、铝粉等固体粉料采用机械搅拌的方式充分混合均匀,并用油漆稀释剂将涂料调到便于涂覆的膏状形态。固体料在配制前需进行焙烧,确保干燥无水分。

(四) 涂覆

配制好的涂料用刮刀分多道手工涂覆到工件上,涂覆过

程中需压紧挤出气体,使涂料与基体贴合紧密。每道涂覆完需晾置一段时间,待涂层表干后才能涂覆下一道,直到涂层厚度满足工艺要求,然后在有抽风的室温环境继续晾干,确保涂层完全表干。

(五) 固化

涂层完全表干后,将工件放入干燥箱中进行加温固化。固化后的涂层应完整,不允许有气泡、夹渣、疏松、裂纹、剥落、分层及机械杂质等缺陷。

(六) 车削

涂层固化完后拆除保护,清理非涂覆表面多余的涂层,采用车削的方式将涂层加工到规定尺寸。

四、常见质量问题及分析

(一) 空鼓

问题描述:石墨封严涂层在实际应用时,涂层固化后偶尔会出现空鼓现象,目视可见涂层中部有鼓起,用木槌轻轻敲击有空响,将鼓起部位敲碎后可见涂层与基体已分离。

问题分析:产生上述问题的原因主要是涂料配制时加入的稀释剂太多,涂覆过程中晾干时涂料内部的稀释剂来不及挥发,表面的涂层已表干并形成了一层涂膜阻挡了内部稀释剂的挥发,当加热固化时,内部未完全挥发的稀释剂受热膨胀,在涂层内部形成气腔,从而形成了空鼓现象。

解决方案:空鼓问题可以从根本上减小稀释剂的加入量,也可通过增加涂覆道数,减少每道的涂覆厚度,增加涂覆环境的抽风量等方法,提高涂料稀释剂的挥发效率,确保涂覆过程中稀释剂完全挥发。

(二) 孔洞

问题描述:

石墨封严涂层最常见的质量问题是车削后涂层外观有直径大于3mm的孔洞。

问题分析:

产生孔洞的原因主要是石墨封严涂层涂料是由油漆和各种固体粉末配制而成的,在混合搅拌的过程中不可避免的产生气泡,且油漆粘性大,气泡不易排出,涂覆过程要求用刮刀压紧挤出气体,但只能将较大气泡中的气体挤出,小气泡表面张力大,无法排出。

解决方案:

针对涂料配制时搅拌产生的气泡,可以在配制时增加消泡操作,将搅拌好的涂料放置在振动台上,用机械振动的方式使涂料内部的气泡移动并汇聚到涂料表面,再将气泡挑破,可消除部分气泡,但因涂料粘度大,气泡移动阻力大,此法仍不能完全消除气泡。

此外还可通过改进涂覆方法来解决,石墨封严涂层涂

覆厚度一般为2mm以上，而车削后最终留在零件上的涂层约0.5mm左右，大部分涂层都被车削掉，实际留在零件上的涂层是前3道涂覆上去的涂料，因此将原本的前3道涂料分成更多次（4道以上）涂覆到工件表面，确保每一次涂覆厚度都只薄薄地涂覆一层，使气泡无处可藏。实践证明，采用此法可有效解决涂层孔洞缺陷，车削后的涂层细致光泽。

（三）掉块

问题描述：

石墨封严涂层掉块指的是涂层在车削或者工作后局部与基体分离脱落，导致涂层不完整的现象。涂层掉块一般有3种形式。第一种是从涂层中间掉块，第二种是从涂层车削方向末端掉块，第三种是涂层在整个截面上断裂

问题分析：

第一种掉块形式是轻微空鼓导致的，因空鼓不明显，在涂层固化后肉眼无法识别，在车削和工作过程中，空鼓部位被削破，从而露出基体。

第二种掉块形式与车削工艺参数选择不当有关，当车刀移动速度过快，进刀量过大时，涂层受到的挤压力过大就会导致涂层崩块。

第三种掉块形式与工件变形有关，一般出现在大尺寸薄壁环形件上，薄壁环形件在分解、转工或加工时很容易发生变形，零件涂覆封严涂层是在其自由状态下进行的，后续车削涂层或零件工作时零件会受到夹具或对象件的挤压力，而长轴附近受力最大，此处的涂层受力也最大，易出现垂直于涂层与基体界面的裂纹，当受力达到一定程度时，涂层剥落，出现断裂的现象。

解决方案：

针对空鼓原因产生掉块现象，可采用减少空鼓的措施来解决；针对车削参数不当导致的崩溃现象，可优化车削参数，减小进刀量和进刀速度来解决；针对因零件变形导致的涂层断裂现象，可在涂覆封严涂层之前进行校正变形，使零件自由状态下的椭圆度控制在约束状态下的圆度水平，避免零件在装夹时受到过大约束力来解决。

（四）开裂

问题描述：

封严涂层开裂是指发生在涂层内部或涂层与基体界面处的肉眼可见的裂缝，有的涂层开裂在涂层固化冷却后即暴露，有的在车削或试车以后才会暴露。

问题分析：发生在涂层内部的开裂一般出现在第二层以后，主要是涂覆时两道涂层之间的晾干时间过长导致的，上道涂层晾干的时间太长，涂层硬化程度高，而后道涂层涂覆较厚，加温固化前后道涂层的硬化程度低于前道涂层，在固化时两道涂层的热膨胀系数不一致导致涂层分离。发生在涂层与基体之间的开裂通常是第一、二道涂层晾干时间不够且涂覆时收边不当，涂层与基体的热膨胀系数不一致导致的。

解决方案：涂覆时前四道应薄涂，涂层需晾干至用手指压不发软即涂覆下一道，晾干时间尽量保持相当，时间不能太长。第五道后可适当根据尺寸要求增加涂覆厚度，晾干时间相应延长，直至用手指压不发软再涂覆下一道。涂覆时应做好收边，在清理干净多余涂料的同时还需保证涂料能将基体包裹起来。

（五）发软

问题描述：

正常的石墨封严涂层在车削时，车削下来的涂层是呈粉末状的，零件上的涂层表面坚硬细致，有光泽。涂层发软是指涂层在涂覆时长时间无法晾干，固化后涂层表面坚硬，但车削时车削下来的涂层成条状或螺旋状、零件上的涂层起皮、粘刀具的现象。

问题分析：

涂层发软的直接原因是涂层未固化完全，涂层的固化程度与涂料配方中的油漆树脂含量有关，尤其是烘干漆，树脂含量越高，涂料干燥和固化所需的时间就越长。在实际配料时要求将油漆先用稀释剂调至规定的粘度后再按比例称取，最终制成的涂料中油漆的固体含量偏高可能是操作原因，如配料时油漆粘度高于工艺要求，或者称取的油漆质量超出了工艺要求的比例；也可能是原材料的原因，如原漆中固体含量偏高。

解决方案：

配料时严格按工艺要求进行操作，原漆入厂验收时监控固体含量，不让固体含量超标的油漆流入生产线。在原材料不变的情况下，可通过加大抽风量、降低环境湿度的办法促进涂料在涂覆过程中的干燥速度，并适当延长每道之间的室温晾干时间，最后一道涂覆完成后需将涂层晾干至表面形成坚硬的涂膜再进炉加温固化。

（六）疏松

问题描述：

石墨封严涂层疏松是指固化后的涂层在车削后涂层局部或整体质地疏松，多孔，涂层呈黑色且无光泽。

问题分析：

涂层疏松的直接原因是涂料中粘结剂偏少，即油漆的树脂含量偏少。出现局部疏松的原因可能是涂料配制时未充分搅拌均匀，油漆分布不均匀，油漆偏少的地方固体料未充分被油漆包裹，粘结性差导致涂层疏松；整体出现疏松的情况可能是配料时油漆的粘度低于工艺要求的粘度，或称取的油漆重量低于工艺要求的配比，也可能是原漆的固体含量偏低导致的。

解决方案：

配料时严格按工艺要求进行操作，原漆入厂验收时监控树脂含量，不让固体含量偏低的油漆流入生产线。

五、结束语

石墨封严涂层作为航空发动机气路封严的重要手段，涂层质量关乎发动机的功率，威胁飞机的飞行安全。而涂层质量问题80%是施工不当造成的，在涂层加工过程中，原材料的质量、涂料配制时的搅拌、稀释剂的加入量、涂覆过程的涂覆道数、涂覆厚度、晾干时间、收边，车削时的进刀量、进刀速度等都是影响涂层质量的因素，各因素质量严格控制才能保证涂层质量。

参考文献：

- [1] 刘凤伟，涡扇压气机封严涂层高刮削性判据的探讨[D]。北京：中国科学院，2010
- [2] 北京航空制造工程研究所。《航空制造技术》。北京：航空工业出版社，2013.12