

浅析热端螺母咬死机理与解决措施

陈秋敏

(中国航发成都发动机有限公司 四川 成都 610503)

摘要: 某型发动机高压涡轮轴与大螺母为螺纹连接的不锈钢零件, 该螺纹咬死不能分解故障重复发生, 采用破坏性机械切断。在探究该故障原因的过程中, 查阅了相关资料, 分析不锈钢螺纹咬死不能分解存在材料、配合等内在原因和润滑、涂覆层、螺纹加工及装配等外在原因。针对内在原因, 制定不同材料的螺纹连接副、设计合理的配合裕度等措施, 以降低摩擦热应力对不锈钢螺纹表面的破坏, 避免材料粘结发生; 针对外在原因, 选取合适的涂覆材料和润滑剂、制定螺纹加工控制要求、装配分解时的拧紧和工装定心要求等措施预防螺纹咬死问题的再次发生。

关键词: 螺纹咬死; 粘结; 热应力; 摩擦

0 引言

某型发动机高压涡轮轴轴承采用压紧大螺母固定, 试车后多次出现螺母螺纹与高压涡轮轴螺纹咬死无法分解的问题。本文分析了热端大螺母不锈钢螺纹咬死问题的产生机理, 制定防止咬死问题发生的措施, 为深入探究发动机在特定情况下发生的螺纹咬死问题提供一般性经验和理论依据。

1 热端螺纹咬死机理

该螺母采用不锈钢材料, 不锈钢螺纹耐腐蚀性好, 但硬度相对较低, 摩擦系数大, 受力后易发生塑性变形, 粘合性强容易发生咬死。该现象产生的内在机理为不锈钢金属合金本身会在表面破坏时, 产生一层薄薄的氧化层以防止更深入的损伤, 当螺纹锁紧和拆卸时, 螺纹牙间的相互运动产生压力和摩擦力, 会破坏螺纹牙型上的氧化膜层, 而摩擦力产生的热能会加剧接触面的损坏速度。氧化层持续破坏, 当金属之间发生直接作用力, 进而发生粘结现象。

而不锈钢螺纹咬死的外部原因则包括多个方面, 比如: 螺纹牙型加工尺寸超差和表面粗糙度差, 装配时有异物进入, 润滑不到位或者润滑失效, 旋入时发生偏心导致施力方向有偏斜, 螺纹牙间未按轴线旋合 (包括工装定位不合适、使用不正确), 以及拧紧时过快或者拧紧力矩过大等。

2 热端螺纹设计要求

发动机的高压涡轮位于燃烧室后, 其自身温度较高。发动机经历各种工作状态, 涡轮部件在复杂的热负荷作用下, 温度并不能稳定维持, 会产生局部瞬时温度变化, 必然导致配合处不同阶段产生不同量的变形。

虽然针对该问题并不能从温度控制方面降低螺纹咬死的风险, 但可以证明特定的高温环境下螺纹咬死的概率相对较大。

2.1 螺纹配合裕度

某型发动机大螺母为直径为 M142×1.5 的内螺纹, 安装在高压涡轮轴上, 与高压涡轮轴外螺纹配合, 位于涡轮盘盘心处, 用于压紧高压涡轮盘。由于该型发动机涡轮部件内部冷却气流流路分布的原因, 发生咬死的大螺母安装的位置为各级涡轮盘盘心温度最高处, 螺母自身尺寸较大, 工作温度和载荷环境较恶劣。考虑到热端部件的工作环境对螺纹咬死的促进机理, 在设计之初给出较大的螺纹配合裕度, 切断的高压涡轮轴和螺母见图 1、图 2 和表 1。

特殊螺纹未给出螺纹公差等级, 按 GB/T 197-2003 普通螺纹公差, 内螺纹公差是镀银前 H6, 对应中径公差 +0.25/0, 公差带 0.25mm; 外螺纹的公差等级是 6 级, 对应公差带 0.19mm, 公差位置没有接近的基础标准值, 最大的基础标准值是 -0.067mm, 需再减去 0.063mm 才接近标注的基本偏差 -0.13mm。因此配合最接近的是 6H/6e (实际间隙更大), 属于很大间隙的螺纹配合

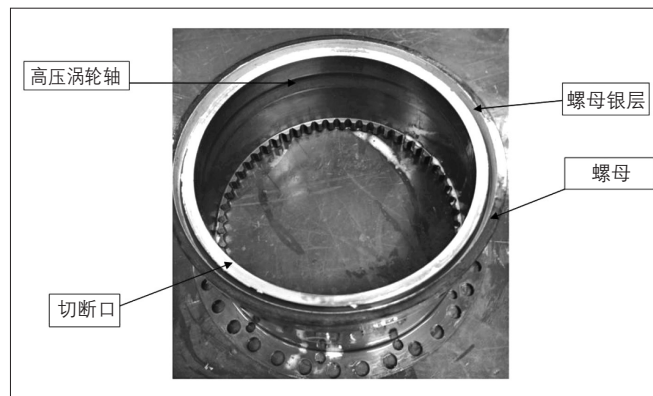


图 1 高压涡轮轴和螺母横截面切断组件

表 1 螺纹基本信息

零件名称	材料	螺纹规格	中径公差（特）	硬度	螺纹表面处理
高压涡轮轴	1Cr11Ni2WMoV	M142×1.5	$\phi 141.026_{-0.32}^{-0.13}$	d=3.18 ~ 3.45	无要求
螺母	1Cr11Ni2WMoV	M142×1.5	镀银前 $\phi 141.026_{0}^{+0.25}$	HB269 ~ 321 (d=3.39 ~ 3.7)	Ep-Ag3

特殊螺纹未给出螺纹公差等级，按 GB/T 197-2003 普通螺纹公差，内螺纹公差是镀银前 H6，对应中径公差 +0.25/0，公差带 0.25mm；外螺纹的公差等级是 6 级，对应公差带 0.19mm，公差位置没有接近的基础标准值，最大的基础标准值是 -0.067mm，需再减去 0.063mm 才接近标注的基本偏差 -0.13mm。因此配合最接近的是 6H/6e（实际间隙更大），属于很大间隙的螺纹配合

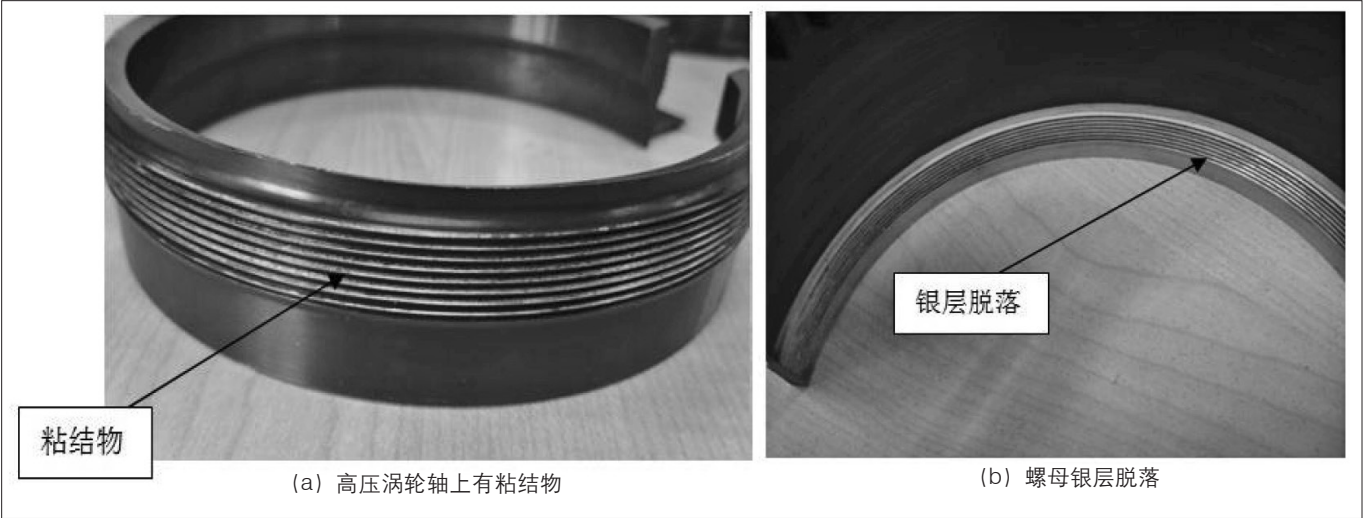


图 2 切断的高压涡轮轴和螺母螺纹表面图

2.2 材料的选择

选用相同的不锈钢材料配合比选用不同材料更容易产生咬死现象，比如 400 系列的不锈钢和 316 系列的不锈钢就不容易发生咬死。解决的措施为选用不同的材料配合，或者给定材料为不同的硬度。综合考虑 1Cr11Ni2WMoV 良好的力学性能和抗腐蚀性能，设计上选取了相同材料但不同热处理状态的两种螺纹配合，以避免粘结。

2.3 镀层和润滑剂

根据螺纹咬死机理可知，减小螺纹副之间的摩擦是抗咬死的关键措施，而防粘接措施可以有效控制摩擦，尤其是在配合零件为相同材料、螺纹表面质量不佳或表面不清洁时起到较好的作用。防粘接措施可分为两个方面：润滑和涂覆镀层。

航空发动机用润滑剂分为润滑油、润滑脂和固体润滑剂，要求高低温性能优良，稳定性好，具有抗腐蚀性等较高要求。根据 GJB 594A 要求，用于减摩的镀覆层为硬铬镀层、银镀层、铅锡合金镀层和铅铟合金镀层，防高温粘接的镀层为铜镀层、银镀层和磷化膜层。涂覆材料的选择、涂覆方法和涂覆厚度等要尽可能地适应连接件的使用工况条件，需工艺实施方便且有限期限长。

设计选取的银镀层为常用的功能性涂层，结合装配时涂覆高温润滑脂，起到螺纹间的高温防粘接作用，降

低表面摩擦和表面接触区瞬间产生的高温，有效阻隔基体接触，提高滑动摩擦副的抗咬死能力。

3 螺纹咬死原因分析和解决措施

3.1 螺纹加工质量控制

螺纹尺寸包括公称直径、顶径、牙型角、螺距和表面粗糙度等，螺纹的加工质量越好，表面光洁度越好，咬死的概率就越低。尤其在螺纹牙型角有偏斜的情况下（比如加工过程中刀具的不正常摆动使牙型出现沿加工方向的不平整），在螺纹配合面受力时相互压紧，分解时螺纹配合面为凹凸状相互压紧则无法分解。

为明确本次螺纹配合面粘接是否与螺纹加工尺寸不合格有关，对高压涡轮轴和螺母损坏的螺纹进行尺寸检测，检测结果见表 2、表 3。

表 2 分析结果如下：

表 2 高压涡轮轴螺纹检测结果

测量项目	问题轴	要求值
大径/mm	$\phi 141.573 \sim \phi 141.821$	$\phi 141.732 \sim \phi 141.969$
中径/mm	$\phi 140.780 \sim \phi 140.830$	$\phi 141.026_{-0.32}^{-0.13}$
小径/mm	$\phi 139.683 \sim \phi 139.726$	$\phi 139.928 \sim \phi 140.376$
螺距/mm	1.497 ~ 1.503	1.5
牙型半角	29° 14' 57" ~ 30° 21' 23"	30° ± 15'

表 3 螺母螺纹检测结果

测量项目	问题螺母	要求值
中径 /mm	—	141.026 ^{+0.25} ₀
螺距 /mm	1.498 ~ 1.502	1.5
牙型半角	29° 15′ ~ 29° 56′	30° ± 15′

(1) 问题轴的大径、小径均超差，不合格，牙型半角不合格；

(2) 螺距合格。

表 3 分析结果如下：

(1) 问题螺母牙型半角不合格；

(2) 螺距合格。

螺纹配合面在螺纹齿的斜面处，故牙型半角超差对螺纹配合的影响会更大。牙型半角超差较大，牙型倾斜导致配合间隙减小，在正常拧紧条件下造成配合面过渡压紧，促使螺纹咬死。

经加工过程复查，识别出用于螺纹加工的刀体变形、刀尖偏斜的不合格刀具，要求后续加工前应对刀具进行投影检查，确保刀具合格、螺纹加工合格。

3.2 防粘接措施

本次咬死问题发生后，机械破坏了解下的螺母，目视螺纹无明显磨损、划痕，螺纹非配合面银层完整，螺纹配合面银层局部脱落，表面凹凸不平，有屑块堆积现象。在体视显微镜下观察，螺纹工作面镀层有明显掉块，挤压变形和崩裂。通过金相测量，发现银层厚度超出设计要求（设计要求为 3 ~ 5 μm）。

分析认为，银层本身起防粘结作用，但超厚过多（超出设计要求 3 ~ 4 倍）导致螺纹间隙减小，银本身也为金属，翘起、堆积较多且在高温下发生氧化，从而导致螺纹面的粘结、咬死。

经过工艺复查与整改，后续加严涂覆过程中电流密度和涂覆时间等参数控制，并改进检测测具，将测具精度提高到 1 μm，确保涂层厚度满足设计要求。

3.3 装配和拆卸

在不同旋合速度下，螺纹配合面摩擦热量会随着旋合速度的增加而升高，速度过快会使温度急速上升，故降低装配时拧紧速度能降低咬死风险。在进行装配前，

清洗螺纹配合面并涂覆高温润滑脂，实际装配采用定心夹紧工装进行，工装设计能够起到定位、轴线对中的作用，使用过程符合要求。结合力矩扳手和倍增器施加力矩，旋入的速度力量控制要适当，不要过快、过大，严格按照要求进行预紧和最终拧紧。

4 结语

综上所述，螺纹不能分解是由于额外摩擦力和不正常的热量集中，加剧了接触面的损坏速度，导致螺纹副的咬死，加之出现螺纹尺寸不合格、表面粗糙度不佳、牙型角存在较大超差，以及不按要求涂覆镀层和润滑剂、装配旋入速度过快、轴线未对中等都会导致摩擦热量局部累积，发生螺纹咬死现象。

针对以上原因，为防止螺纹咬死无法分解，可针对性地采取如下措施：

(1) 螺纹连接件应采用不同材料，若为相同材料的螺纹零件要采用不同的热处理硬度，以避免粘结；

(2) 对螺纹加工精度和表面质量严格控制；

(3) 选取合适的涂覆材料和润滑剂，保证涂层合格、润滑有效；

(4) 控制装配时的拧紧、拆卸过程，必要时规定旋入速度；

(5) 工装设计需满足定心要求，并按要求正确使用，保证相配合零件轴线对中。

参考文献：

[1] 潘泽宇. 热紧螺栓防咬死技术研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.
[2] 李文顶，孔鸣杰. 不锈钢螺纹联接副损伤及咬死现象分析与解决措施 [J]. 机电工程技术，2013(01):97-99.
[3] 李雨玲，邓波. 关于前轴颈螺母咬死故障分析 [J]. 现代工业经济和信息化，2020(01):27-28.

作者简介：陈秋敏（1987.08-），女，汉族，陕西西安人，硕士研究生，工程师，研究方向：航空发动机结构设计。