

# 航空发动机沉头铆钉断裂故障分析

王宏卫\*, 吴雪猛, 赵静, 张洋, 杨坤

国营四达机械制造有限公司, 陕西 咸阳

收稿日期: 2023年2月10日; 录用日期: 2023年3月9日; 发布日期: 2023年3月15日

## 摘要

针对试车后发动机反推门沉头铆钉断裂故障, 通过对断裂铆钉进行断口宏观检查、能谱分析、金相检查和力矩试验, 结合铆钉的使用情况进行了系统的故障分析, 判定该发动机反推门沉头铆钉断裂性质为镉脆断裂。试车中反推门超过正常使用温度, 使镉元素渗入铆钉基体, 是导致铆钉发生镉脆断裂的原因。结合分析结果为发动机反推门的维修及使用提供建议, 以防同类故障再次发生。

## 关键词

30CrMnSiA铆钉, 断裂, 超温, 镉脆

# Fault Analysis on Countersunk Head Rivet in Aero-Engine

Hongwei Wang\*, Xuemeng Wu, Jing Zhao, Yang Zhang, Kun Yang

State-Owned Stara Machinery Manufacturing Company, Xianyang Shaanxi

Received: Feb. 10<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 9<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 15<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Aiming at the fracture of countersunk head rivet of engine back thrust door after the test of aircraft engine operating condition, through macroscopic and microscopic inspection of fracture, energy spectrum analysis, metallographic inspection and torque test of fractured rivet, combined with the use of rivet system fault analysis, it is determined that the fracture property of countersunk head rivet of engine back thrust door is cadmium brittle fracture. The reason for cadmium brittle fracture of rivet is that the back pushing door exceeds the normal operating temperature in the test of aircraft engine operating condition, which makes cadmium penetrate into the rivet matrix. Combined with the analysis results, the suggestions are provided for the maintenance and use of en-

\*通讯作者。

gine backsliding door to prevent similar failures from happening again.

## Keywords

30CrMnSiA Rivet, Fracture, Over-Temperature, Cadmium Embrittlement

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

30CrMnSiA 是航空制造业中常用的调质高强度钢[1]。在淬火和高温回火状态下具有较高的强度和韧性,该钢冷变形塑性较好,切削加工性能良好,适用于航空用机械加工零件、钣金件和铆钉等[2]。在铆接中,利用自身形变或过盈连接被铆接的零件[3]。

断裂铆钉为 120°沉头高抗剪铆钉,材料为 30CrMnSiA,航标标准件,作用是紧固反推们壳体,热处理工艺:(900 ± 10)°C油淬和(500 ± 20)°C回火,抗拉强度为(1080~1280) MPa,表面处理:镀镉 6 μm,经铬酸钝化、螺纹滚压成形。反推门材料为 LY12 硬铝,表面涂覆一层银亮色耐高温漆层。断裂铆钉为发动机原台铆钉,修理过程仅使用力矩扳手检查铆钉是否松动,铆钉总使用 3999 小时 01 分,本次发动机大修时检查铆钉正常,试车后发现数件铆钉断裂。

本文通过宏观微观断口检查、能谱分析、金相分析、力矩试验等方法研究铆钉的开裂原因,并结合铆钉的使用情况、加工工艺和性能要求,综合分析故障产生的原因,为修理单位提供修理意见,以避免同类故障再次发生。

## 2. 试验过程及结果

### 2.1. 宏观检查



Figure 1. Reverse the drop site of the door rivet

图 1. 反推门铆钉掉落部位

查反推门表面,表面漆层有不同程度起泡现象,铆钉脱落处外壳颜色淡黄色,表面漆层起泡较为明显,距离脱落处越远颜色越淡,根据颜色差异分别命名为 1 区、2 区、3 区,3 区为铝合金表面正常颜色,见图 1。

观察铆钉孔,铆钉孔无变形和磨损特征,见图 2。搜集铆钉残骸,发现铆钉断裂部位位于头部与杆

部转接 R 处，部分铆钉头部完全脱落，部分铆钉头部残缺，断口颜色呈黑灰色，无明显变形，见图 3、图 4，正常铆钉呈金黄色，镀层光亮，见图 5。



**Figure 2.** Rivets come off and paint is bulging  
**图 2.** 铆钉脱落以及漆层鼓包



**Figure 3.** Failure rivet head  
**图 3.** 失效铆钉头部



**Figure 4.** Rivet rod break  
**图 4.** 铆钉杆断口



**Figure 5.** Comparison of normal rivets and rivet remains  
**图 5.** 正常铆钉与铆钉残骸对比

## 2.2. 微观检查

鉴于铆钉断裂特征较为相似，取一件头部残骸在电镜下观察，铆钉头部表面颜色不同，见图 6；断口均呈冰糖状堆积，显示沿晶分离形貌，见图 7，局部金属熔化后凝固形成流痕，见图 8、图 9。

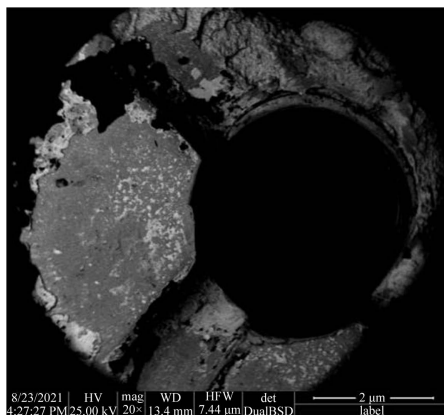


Figure 6. Macromorphology of rivet head

图 6. 铆钉头宏观形貌

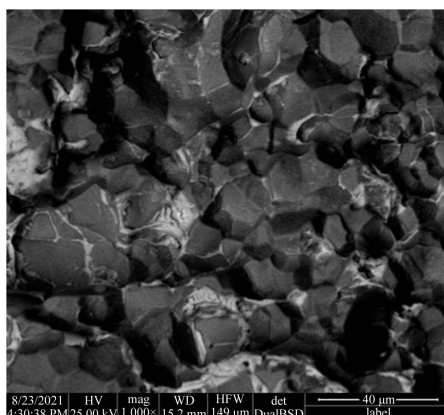


Figure 7. Morphology along the crystal fracture

图 7. 沿晶断口形貌

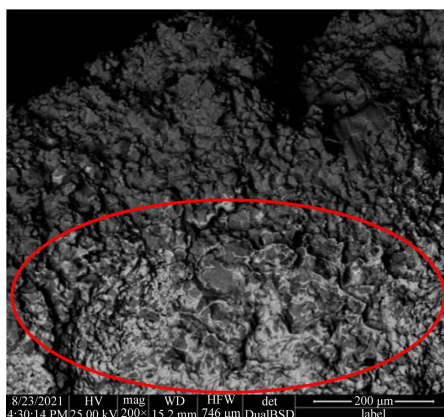
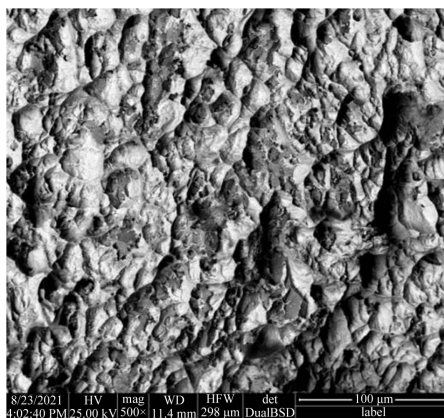


Figure 8. Crystal surface external residue

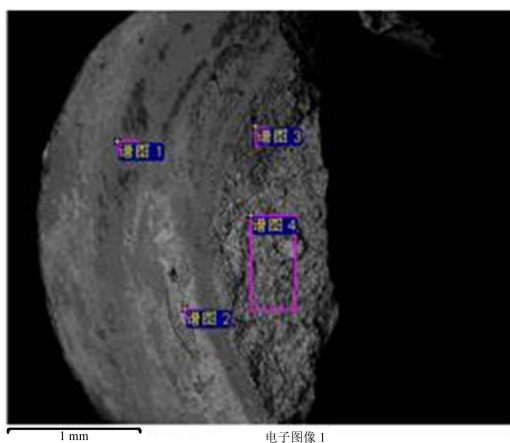
图 8. 晶面外来残留



**Figure 9.** Abnormal pattern of crystal interface  
**图 9.** 晶界面异常花样

### 2.3. 断口能谱分析

针对图 8 中的外来残留以及图 9 中的异常花样区域进行采用 X 射线能谱仪进行成分分析, 检测部位如图 10 所示, 检测发现金属流痕区有不同含量的镉元素, 判断出异常区域为镉流花样, 详细结果见表 1。



**Figure 10.** The part of the energy spectrum that can be detected  
**图 10.** 能谱检测部位

**Table 1.** Fracture energy spectrum analysis results (wt%)

**表 1.** 断口能谱分析结果(wt%)

谱图	O	Al	Fe	Cd
谱图 1	-	5.55	87.65	6.80
谱图 2	-	-	-	100.00
谱图 3	-	-	91.61	8.39
谱图 4	9.65	-	10.62	79.73

### 3. 金相分析

铆钉断口附近切取试样磨抛后检查, 裂纹分叉较多, 无氧化, 裂纹附近无金属夹杂物, 基体夹杂物评级结果为脆性夹杂 1 级, 符合 GJB 1951-1994 标准要求, 见图 11。基体组织为回火索氏体, 裂纹两侧

组织正常，无脱碳现象，见图 12。

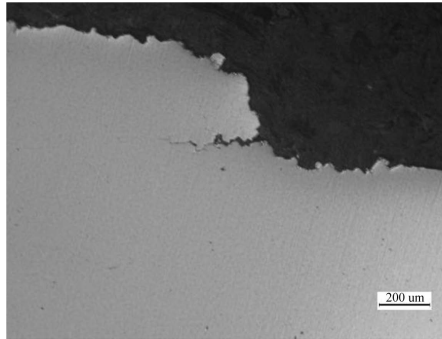


Figure 11. Rivet crack characteristics

图 11. 铆钉裂纹特征

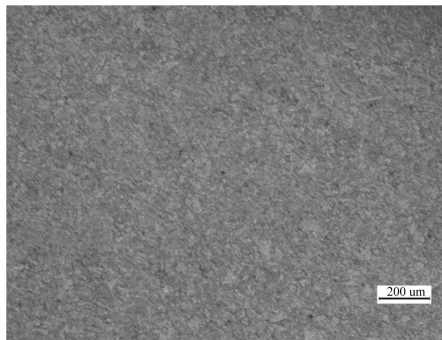


Figure 12. Matrix cordite organization

图 12. 基体索氏体组织

#### 4. 力矩试验

根据 HB 1-607-2002 航标《120°沉头高抗剪铆钉》标准要求，铆接后钉体不能转动最小力矩 0.98 N·m。使用 0.98 N·m 的力矩对图 1 中不同区域铆钉进行力矩试验，结果见表 2。

结果表明：1 区试验的 3 件铆钉头部均发生碎裂，2 区试验的 3 件铆钉中有 2 件头部碎裂，3 区试验的 3 件铆钉均完好。

Table 2. Riveting torque test results in different areas of thrust reversed door

表 2. 反推门不同区域铆钉力矩试验结果

区域	试验件数	碎裂件数
1 区	3	3
2 区	3	2
3 区	3	0

#### 5. 结果分析

上述试验可以看出，铆钉的材质及热处理工艺是正常的。铆钉断口可见镉熔化痕迹，断口上有镉元素熔化痕迹残留，镉元素的扩散导致晶界弱化[4]。断口呈沿晶断裂形貌，表明铆钉断裂是在液态金属镉的作用下发生的镉脆断裂[5]。

镉脆是镉元素、温度和应力三个要素共同作用下才能发生的一种特殊的失效形式，具有裂纹成核和

扩展两个过程[6]。其失效机制是在外力作用下,金属表面发生滑移变形,使晶粒上位错高度集中形成微裂纹[7]。环境温度较高时,处于高度活化的镉元素将沿晶界扩散进入位错塞积处,并沿该处的微裂纹进一步向内部扩散,促使晶界脆化。镉和铁之间由于晶体结构和原子半径大小的不同,不能形成固溶体和化合物,所以镉脆化金属是镉元素的扩散问题,属于延迟破坏。除应力和温度之外,镉脆和材料的强度大小呈正相关,材料强度越高,镉脆敏感性越大[8][9]。

镉脆属于液态金属致脆的范畴。液态金属是指低熔点金属,如锌、镉、钠、锂元素等,在一定的温度下,既能熔化成液态或气化金属气体。当金属构件暴露在熔化了金属中时,因为浸透效果,这些低熔点金属即可向金属构件内部沿晶界扩散,因此弱化了晶界,在拉应力作用下,从零件表面起裂,而裂纹尖端吸附低熔点液态金属原子,进一步降低金属零件的晶体结合键强度,使裂纹沿晶界向零件内部扩散,引起材料脆化并导致零件断裂的现象,一般称为液态金属致脆。在没有拉应力和一定的温度共同作用下是不会产生低熔点金属接触脆化失效的,拉应力可以是外加拉应力,也可以是零件在工艺过程中形成的残余应力。发生液态金属致脆的温度也是一个重要因素,低熔点金属与钢制合金材料相接触,当温度达到低熔点金属的熔点温度时,甚至仅到一半以上时就会发生开裂[10]。结合断口、金相和能谱分析,该失效断裂特征符合液态金属致脆特征。

铆钉属于镀镉件,工作温度超过正常工作温度时,镉层液化,沿晶界深入铆钉基体,使铆钉脆性倾向增大,晶界强度弱化,铆钉强度明显降低。铆钉材质为30CrMnSi,属高强度钢,经热处理后,强度大于1000 MPa,镉脆的敏感性较大。

根据铆钉的工作条件分析铆钉的断裂故障,铆钉工作部位处于尾喷部位,工作过程中正常温度大约在240℃以下,正常工作温度不会造成镉脆[11]。镉熔化温度约为320℃,镉脆产生温度约在270℃以上[12]。本次发动机工作过程中部分区域反推板外壳颜色变为黄色,漆层起泡,温度最高约为500℃,远超镉的熔化温度,为镉脆的发生创造了温度条件。

铆钉连接反推门蒙皮,属紧固件,受到拉伸应力,工作时还受到尾喷温度场的作用,反推受到热胀冷缩的载荷作用,铆钉断裂部位头部与杆部转接R处属于应力集中部位,由于紧固程度的差异和各区域温度的不同,各区域铆钉受力不同,铆钉中镉元素的扩散进入基体的量有所不同,导致铆钉的强度降低的程度不同,有的铆钉在轻载力作用下碎断,有的在较大的力作用下断裂,银亮色区域的铆钉在规定的力矩作用下,保持完好。

## 6. 结论及建议

- 1) 发动机反推门铆钉的断裂模式为镉元素导致的液态金属致脆断裂。
- 2) 发动机工作尾喷口超温,反推门铆钉镀镉层熔化,是导致铆钉镉脆断裂的原因。
- 3) 建议后续修理、使用时应关注反推门壳体的颜色,对于发生颜色变化部位的铆钉应予以更换,以确保航空装备的使用性能。

## 7. 总结

本文通过断口分析、能谱分析、组织检查、力矩试验等方法研究铆钉的开裂原因,并结合铆钉的使用情况、加工工艺和性能要求,综合分析得出工作温度太高是导致铆钉镉脆断裂的原因。同时,从故障批次铆钉处理办法和后续修理、使用情况的监控等方面提供了有效的预防措施,解决了发动机修理瓶颈问题,极大保证了航空装备飞行安全和提高了发动机服役的可靠性。

## 参考文献

- [1] 颜鸣皋. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 156-170.

- [2] 赵凯, 何怀玉, 刘新灵. 刹车装置承压杯开裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2014, 9(5): 289-294.
- [3] 田浩, 傅国如, 陈荣. 某航空发动机镀铬螺栓断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 182-185.
- [4] 张权明, 迟淳, 张勇. 液态金属致脆失效案例分析[J]. 物理测试, 2008, 26(6): 51-53.
- [5] 曾甲牙. 发动机镀镉螺栓连接件的失效分析[J]. 固体火箭技术, 1999, 22(3): 71-73.
- [6] 全琼蕊, 谢善. 某型发动机 38CrA 铆钉断裂机理分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47(8): 245-248.
- [7] 李涛. 降低钢铁零件在镀隔过程中的氢脆性[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(8): 34-36.
- [8] 钱国强, 陈昕, 张韶佳. 螺旋压缩弹簧断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2018, 13(4): 238-242.
- [9] 佟文伟. 某燃气涡轮发动机螺栓断裂失效分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(4): 67-71.
- [10] 刘华东, 薛喜才. 钢制螺栓液态金属致脆分析[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(4): 277-280.
- [11] 习年生, 许廷军, 张卫方. 飞机起落架轮轴修理后的镉脆可能性[J]. 理化检验-物理分册, 2002, 38(12): 537-550.
- [12] 于高奇, 郭飞毅. 某钢制零件断裂分析及改进建议[J]. 热加工工艺, 2018, 47(6): 250-256.