某型飞机对接螺栓微动疲劳裂纹分析

吕凤军，傅国如
（北京航空工程技术研究中心，北京 100076）

摘要：通过断口形貌观察、X射线能谱检测、痕迹分析等试验方法，对某型飞机对接螺栓产生裂纹的原因进行了分析。结果表明，对接螺栓的裂纹性质为微动疲劳裂纹；表层微动疲劳裂纹产生后，进一步发生了镉脆开裂；微动疲劳裂纹在飞机末次大修前就已形成，在大修镀镉时镉渗入裂纹内部，并导致了对接螺栓在大修后的使用中裂纹发生镉脆扩展。

关键词：对接螺栓；微动疲劳裂纹；镉脆
中图分类号：V229⁺.2　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2011)05－0001－04

Fretting Fatigue Crack Analysis of Aircraft Connecting Bolt

LV Feng-jun, *FU Guo-ru*
(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: The causes of certain type aircraft connecting bolt failure were analyzed with fracture inspection, X-ray energy analysis, and trace analysis. The results showed that the causes are fretting fatigue crack, and cadmium embitterment; cadmium embitterment is further induced by fretting fatigue cracks. The fretting fatigue cracks presented before the aircraft was overhauled, and cadmium penetrated into the inner of fretting fatigue cracks during cadmium plating of complete overhaul, and then the cadmium embitterment happened in service.

Key words: connecting bolt; fretting fatigue crack; cadmium embitterment

在飞机结构中，存在多个相互接触构件，在振动影响下接触表面间往往会发生往复的微幅相对位移而产生摩擦，并导致表面间损伤。这种微动损伤的案例较多[1－5]，如在螺栓联接、铆钉联接、紧配合联接等处，而在螺栓头内端面上出现径向微动疲劳裂纹的故障从未见过。因此，文中对一起螺栓头内端面的径向裂纹进行了系统的失效分析。

故障螺栓为中央翼/中外翼对接螺栓，已飞行使用超过11 000 h，螺栓材料为40CrNiMoA，表面镀镉。裂纹为磁粉探伤检查发现。

1 外观检查

螺栓的外观如图1所示，磁粉探伤检查共发现

收稿日期：2011－03－08
作者简介：吕凤军(1979—)，男，山东邹城人，硕士，工程师，主要研究方向为航空装备失效与寿命预测。

13条裂纹,裂纹均位于螺栓头内端面上,均大致沿径向分布,其中2条裂纹有明显的分叉。螺栓其它表面完好,无明显的机械损伤、锈蚀和塑性变形。

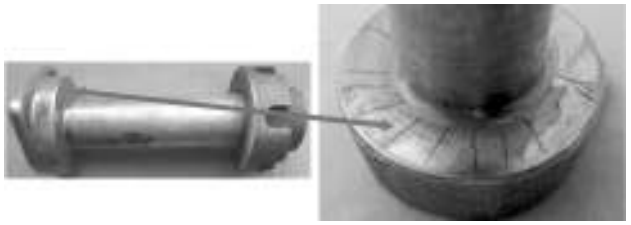


图1 对接螺栓及裂纹外观

Fig. 1 The appearance of connecting bolt

这13条裂纹的外观形貌基本相同,长度也基本相等,裂纹中部与其两端相比,开口相对较大。裂纹及其附近有多处浅层剥落,剥落表面覆盖着一层附着物,如图2所示。

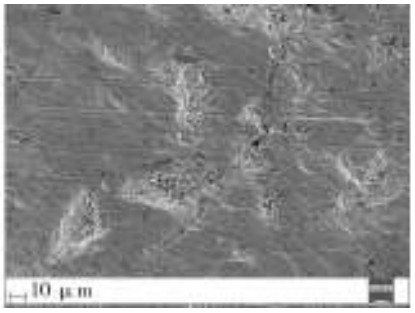


图2 裂纹外观形貌

Fig. 2 Appearance of the cracks

2 断口检查

将13条裂纹中的2条裂纹打开,打开的2条裂纹分别命名为裂纹1、裂纹2,其断口如图3所示。裂纹1、裂纹2断口具有相同的弧形宏观形貌,颜色均呈黑灰色,裂纹深度分别为0.90,0.92 mm。裂纹断口均可分为2个区域,第1个区域靠近螺栓头内端面的表面,颜色较浅,第2个区域靠近裂纹断口内部,颜色较深,2者之间有较规则的弧形分界线。人为打开断口,其颜色呈银灰色,断面上有清晰的放射棱线,与裂纹断口之间也有规则的弧线分界线。

在扫描电镜下观察,2裂纹断口也具有相同的微观形貌。宏观观察到断口上的第1个区域为穿晶形貌特征,最大深度分别为0.14,0.07 mm;第2个区域为沿晶形貌特征,沿晶面上有明显的附着物,断面上



图3 裂纹断口

Fig. 3 Fracture of the crack

也有明显的附着物,其典型的形貌特征及韧窝形貌特征(人为打开断口)如图4所示。

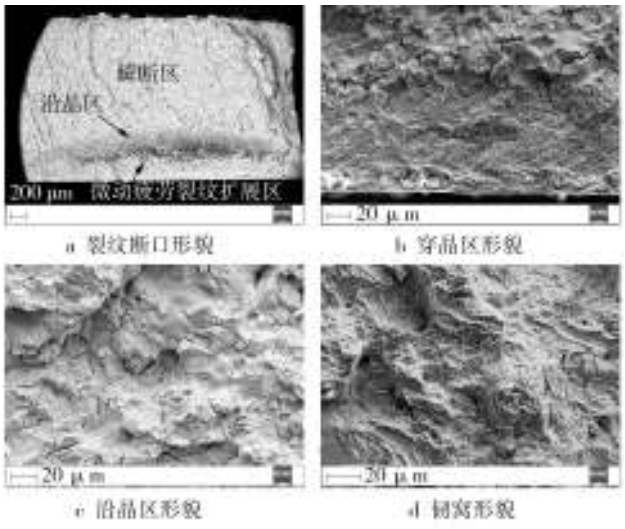


图4 形貌特征

Fig. 4 Appearance characters of the cracks

3 能谱成分

能谱分析表明,穿晶区断口除了含有基体成分Si,Cr,Mn,Ni,Mo和Fe外,还含有Cd元素,随着断口由外向内方向,Cd含量呈明显的减小趋势。沿晶区断口也含有Cd元素,随着断口由外向内方向,Cd含量也呈明显的减小趋势。人为打开断口表面中未发现Cd元素。图5为Cd在断口不同部位的质量分数分布。

4 分析讨论

裂纹1、裂纹2断口具有相同的宏观和微观特征,均存在于2个不同形貌特征的区域,2个区域之间有明显的弧形分界线,人为打开断口与裂纹断口之间也有规则的弧线分界线,这些特征表明螺栓头

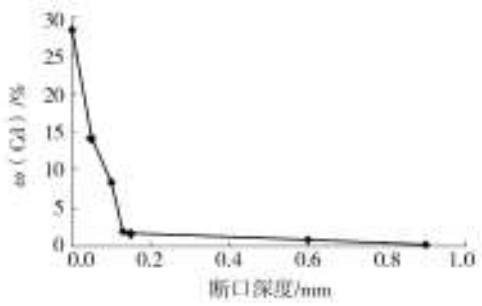


图5 ω(Cd)分布

Fig. 5 Cd content distribution

内端面裂纹性质及其产生原因相同,均存在2个不同的裂纹扩展过程。

根据螺栓裂纹及其断口特征,裂纹沿螺栓头径向分布,裂纹表面及其附近有多处浅层剥落,表层裂纹断口扩展末端有规则的弧形分界线,这些特征表明靠近螺栓头内端面的表层裂纹为微动疲劳裂纹,接触表面摩擦力引起的切向应力是微动疲劳裂纹萌生和扩展的主要原因。表层裂纹断口上除含有正常的基体成分外,还含有Cd元素,含量较高,说明这部分裂纹在飞机大修时、螺栓镀Cd前就已形成。

裂纹内部的断口与靠近螺栓头内端面的表层断口特征明显不同,为沿晶裂纹断口特征,说明裂纹在扩展时状态发生了改变。结合螺栓工作环境考虑,螺栓头内端面作为接触面,主要承受辗压和微动摩擦力,不可避免地会产生热量,导致Cd沿晶界渗入、扩展,具备了镉脆的产生条件;能谱成分也证实了沿晶面上含有Cd元素,且随着断口由外向内方向,Cd含量有明显的减小趋势。这些特征说明该部分裂纹断口具有镉脆特征,在螺栓使用中,镉已经沿裂纹尖端渗入基体,导致了裂纹的镉脆扩展。

据相关部门介绍,类似该裂纹故障从未发生过,对接螺栓已飞行使用超过11 000 h,与同型号其它飞机的对接螺栓相比,未发现明显差异,说明该对接螺栓裂纹的产生原因具有特殊性,属于个性案件。后续对对接螺栓的安装部位进行检查,发现该对接螺栓的安装槽内比较干燥,没有润滑脂,而其它安装槽内有明显的润滑脂。安装槽内未涂润滑脂,在一定程度上增加摩擦因数,促进了微动疲劳裂纹的萌生。

5 结论

1) 对接螺栓头内端面上的13条裂纹性质和原因相同,每条裂纹都是先在表层产生微动疲劳裂纹后,进一步镉脆开裂的。

2) 每条裂纹的表层微动疲劳裂纹在本次飞机大修前就已存在。

3) 螺栓在大修镀镉时,镉沿已产生的裂纹进入裂纹内部,在使用中,镉沿裂纹尖端渗入基体,导致了裂纹的镉脆扩展。

4) 对接螺栓的安装槽内未涂润滑脂,对微动疲劳裂纹的萌生有一定的促进作用。

参考文献:

[1] 胡殿印,王荣桥,王晓雪,等. 镍钛合金榫接结构微动疲劳研究及数值模拟[J]. 航空动力学报,2010(10): 2188—2193.

[2] 沈明学,彭金方,郑健峰. 微动疲劳研究进展[J]. 材料工程,2010(12):86—90.

[3] HILLS D A. Mechanics of Fretting Fatigue[J]. Wear, 1994, 175(3):107—113.

[4] IYER I, MALL S. Analysis of Contact Pressure and Stress Amplitude Effects on Fretting Fatigue Life[J]. Journal of Engineering Material and Technology, 2001, 123(2): 85—93.

[5] NIX J, LINDLEY T C. The Influence of Relative Slip Range and Contact Material on the Fretting Fatigue Properties of 3.5 NiCrMoV Rotor Steel[J]. Wear, 1988, 125(4): 147—162.

(上接第61页)

了垂直/短距起落飞机和常规起落飞机的环境差异(温度、振动),给出了可靠性试验中振动量级的确定方法,以期对垂直/短距起落飞机的任务剖面和可靠性试验剖面的设计有所借鉴和帮助。

参考文献:

[1] MIL-HDBK-781A,工程、研制、鉴定和生产可靠性试验方法、方案和环境[S].

[2] ADA099744, Development of Environment Profiles for Testing Equipment Installed in Naval V/STOL Aircraft[R]. Naval Research Laboratory, 1979.

[3] GJB 899,可靠性鉴定与验收试验[S].