

铰接头齿轮断裂失效分析

孙璐 万蕾 杨耀东

(北京卫星制造厂,北京 100094)

文 摘 某天线系统同步铰接头在进行展开试验时发生接头齿轮断裂。试验结果表明,其原材料的金相组织、化学成分和力学性能均满足标准要求,通过扫描电镜对断齿断口进行微观形貌观察发现,其中一断齿的裂纹源区有明显的疲劳条带,其他断齿均为塑性过载断裂形貌,结合天线系统试验过程,判断其失效机理为个别轮齿疲劳开裂引起其他齿塑性过载断裂,最终导致整体铰接头的失效。

关键词 铰接头,微观形貌,疲劳条带,疲劳断裂,失效分析

中图分类号: TG146.2+1

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.01.021

Fracture Failure Analysis for the Gear of Link Connection

SUN Lu WAN Lei YANG Yaodong

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract A gear of an aerial system broke during the unfolding test. A series of test results show that the metallurgical structure, the chemical composition, and the mechanical properties of the material all meet the demands of related standards. Via scanning electron microscope, the micro appearance of the fracture has been observed. Evident fatigue strips were found in the crack characters. Combined with test process of the aerial system, it is concluded that the failure mechanism is that the fatigue broken of individual teeth caused the plastic overload fracture of other teeth and finally lead to the failure of the whole link connection.

Key words Link connection, Micro appearance, Fatigue strips, Fatigue fracture, Failure analysis

0 引言

一种由 2A12 铝合金制成的某天线系统铰接头,在经过多级振动试验后,在展开试验中发生断裂失效。2A12 属铝-铜-镁系可热处理强化合金,经固溶处理加入人工时效或自然时效后具有较高强度,在退火或淬火状态下塑性很好,常用于制造各类飞行器的主要受力构件^[1]。该铰接头为齿轮咬合连接,通常齿根断裂的原因很多,主要有齿根弯曲疲劳折断、齿根过渡部分的截面突变、加工刀痕等引起的应力集中作用、严重磨损后齿厚过分减薄等。经有关学者研究发现轮齿重复受载后,由于齿根处弯曲应力的集中而萌生微观小裂纹并逐步扩展,致使轮齿疲劳折断的破坏形式占齿轮失效的 32.8%^[2]。

1 试验材料及方法

某天线进行展开试验时发现一处同步铰接头发生异常,经检查确定为同步铰接头齿轮发生断

裂,如图 1 所示。该天线同步铰链采用接头齿轮进行同步,接头齿轮材料牌号为 2A12T4。同步铰链的加工工艺过程为:下料→车→铣削→线切割→表面硬质阳极化处理。同步铰链齿轮在工作状态下仅承受 0.16 N·m 的涡卷弹簧扭矩,无其他外载。失效前天线共计进行了 6 次展开试验,未超过天线研制设计要求的展开次数上限。该天线曾进行过振动试验,振动试验后进行展开试验时发生失效。

失效铰链有两个接头,将其分别编号为 1、2,每个接头由两个齿轮组成,将其分别编号为 A、B。由此,可将 4 个接头齿轮编号为:1-A、1-B、2-A、2-B。将每个接头齿轮的轮齿从齿轮起始端至末端依次编号为 1~8,如图 2 所示。并通过断口的宏观和微观观察、失效件同批次材料的力学(GB/T228.1—2010)、化学(GB/T3191—1998)和金相(GB/T3247—1998,GB/T3246—1998)试验,确定失效过程、失效机

理及失效原因。

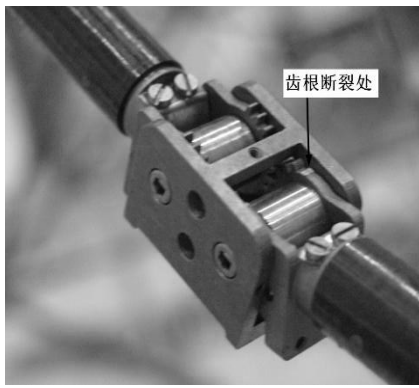


图1 某天线展开后同步铰链发生异常
Fig.1 A gear of an aerial system breaking during the unfolding test

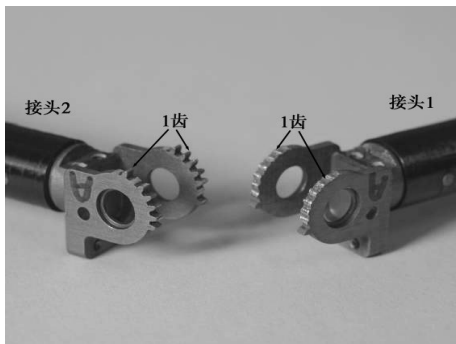


图2 失效铰链接头
Fig.2. Failure link connection

2 结果及分析

2.1 宏观观察

将失效接头齿轮在体式显微镜下放大18倍进行低倍观察,发现齿轮表面较粗糙,有明显的加工痕迹,每个齿轮均有断齿现象,且大部分断口及未断裂轮齿顶端磨损严重,有的轮齿发生了明显的塑性变形。具体统计结果见表1。

表1 失效接头齿轮低倍放大观察结果

Tab.1 Observation results of failure link connection

齿轮编号	断齿编号	情况描述
1-A	1~7	1齿断口未磨损,2~7齿断口均有不同程度磨损,8齿无磨损
1-B	1~7	1齿断口未磨损,2~7齿断口均有不同程度磨损,8齿无磨损
2-A	1,3	1,3齿断口严重磨损,4,6,7齿发生明显塑性变形
2-B	1,7	1,7齿断口严重磨损,4,6齿发生明显塑性变形

磨损程度相对较轻,因此对这两个接头齿轮,尤其是1-A及1-B的1齿进行断口微观形貌观察。

2.2 微观观察

对失效接头进行切割取样,并通过 SUPRA55VP 场发射扫描电子显微镜对1-A、1-B各齿断口进行断口观察。

经观察发现,1-A中1齿断口表面平坦,断裂源区受到磨损,未磨损区域呈韧窝特征形貌(图3)。

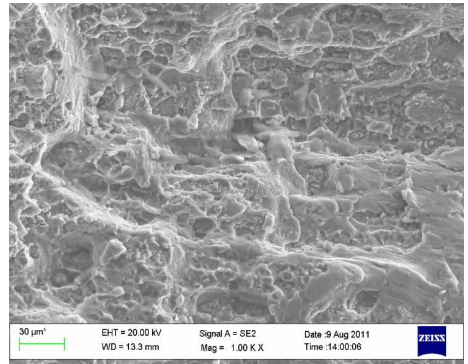


图3 1-A中1齿断口未磨损区域高倍韧窝形貌
Fig.3 Fracture morphology of tooth 1 of gear 1-A —dimple pattern

经观察,齿轮1-A的2齿断口约1/3的面积呈突起状,且磨损严重,未磨损区域呈韧窝特征形貌,可以判断2齿发生了韧性过载断裂,突起部分为剪切唇,断裂源区位于未磨损一侧边缘处。而齿轮1-A的3~7齿断口均磨损严重,无法进行断口分析。

对1-B齿轮各齿断口形貌进行观察发现,1齿断口表面平整(图4),根据断口棱线走向,可判断出裂纹源区位于1齿接近2齿一侧的断口边缘次表面处,为线源特征,与裂纹源区相邻为扩展区。观察发现,1-B齿轮1齿断口扩展区为韧窝形貌特征(图5)。在1-B齿轮1齿断口裂纹源区发现有大量明显的塑性疲劳条带(图6),证明1-B齿轮1齿的断裂机理为疲劳断裂。

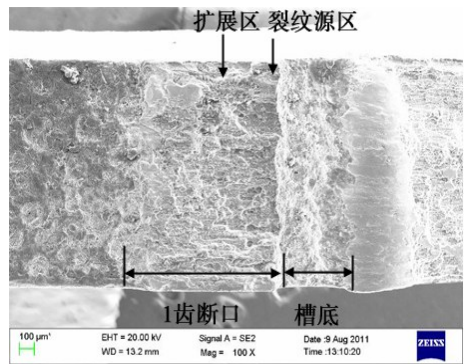


图4 1-B齿轮1齿断口低倍形貌
Fig.4 Fracture macrograph of tooth 1 of gear 1-B

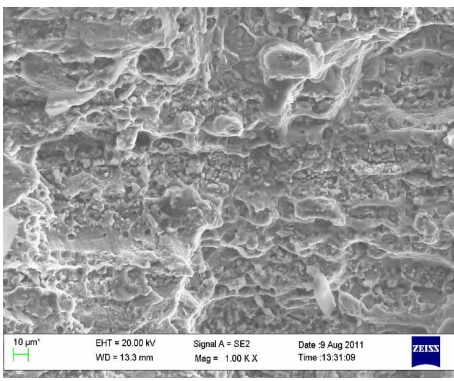
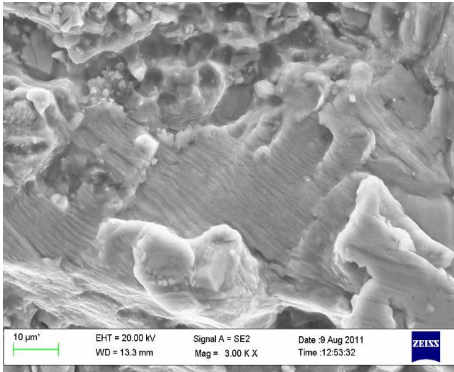
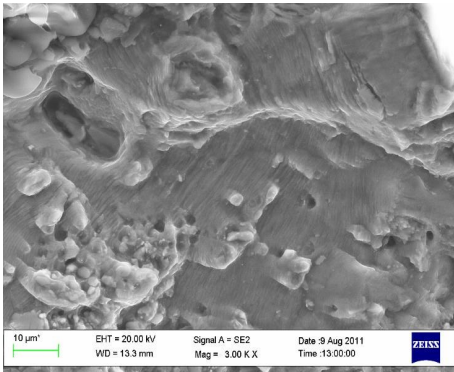


图5 1-B 齿轮1 齿断口扩展区韧窝特征形貌
Fig.5 Fracture macrograph of tooth 1 of gear 1-B
in crack propagation extent —dimple pattern



(a)



(b)

图6 1-B 齿轮1 齿断口裂纹源区疲劳条带特征形貌
Fig.6 Fracture macrograph of tooth 1 of gear 1-B
in fracture source region —fatigue strips pattern

齿轮1-B 的2、3 齿断口表面有明显的突起,其面积约占断口面积的1/2,且磨损严重,未磨损区域呈韧窝特征形貌,说明2、3 齿的断裂机理为韧性过载断裂。

2.3 力学性能测试

对失效接头齿轮同批次原材料进行力学性能测试,结果满足 GB/T 3191—1998 中相关要求,判定该批次 2A12T4 铝棒力学性能复验合格。检测结果如表2 所示。

表2 失效接头齿轮同批次原材料力学性能测试结果

Tab.2 Mechanical property of failure link connection

试样编号	σ_b /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	δ /%
1#	560	400	14.5
2#	560	400	14.0
3#	560	400	14.0
标准要求	≥ 345	-	≥ 4

2.4 化学成分测试

采用 X 射线荧光发射光谱仪对失效接头齿轮同批次原材料进行化学成分测试,结果满足 GB/T 3191—1998 中相关要求,判定该批次 2A12T4 铝棒化学成分复验合格。检测结果如表3 所示。

表3 失效接头齿轮同批次原材料化学成分测试结果

Tab.3 Chemical composition of failure link connection

	Mn	Mg	Si	Zn	Cu	Fe	Ni	Ti
数据来源								
检测值	0.56	1.47	0.062	0.031	4.21	0.16	<0.01	0.025
标准要求	0.30 ~0.9	1.2 ~1.8	<0.50	<0.30	3.8 ~4.9	<0.50	<0.10	<0.15

2.5 金相组织检查

2.5.1 低倍组织

对失效接头齿轮同批次原材料进行低倍组织测试,结果检测试样未见有裂纹、缩尾、化合物偏析聚集或非金属夹杂物,判定该批次 2A12T4 铝棒低倍组织复验合格。

2.5.2 显微组织

对失效接头齿轮同批次原材料进行显微组织测试,结果检测试样未见过烧,判定该批次 2A12T4 铝棒显微组织复验合格。

3 讨论

同批次产品原材料进行的力学性能、化学成分及金相组织检测结果均满足标准 GB/T 3191—1998 中的相关要求,说明该同步铰链接头的失效不是由于产品原材料质量不符合标准要求造成的。

根据宏观观察结果,接头齿轮原有齿共 32 个,失效后断齿共 18 个,余齿共 14 个,断齿数超过总齿数的 50%;断齿断口大多受到严重磨损,说明随着失效断裂的发生,接头齿轮的相互咬合的齿间发生了相对滑动。

对接头齿轮的断口形貌观察表明,1-A、1-B 的齿 1 断口均较平整,其中 1-A 的齿 1 断口边缘受到

了磨损,无法判断其裂纹源区的特征形貌,其未磨损区域呈韧窝特征形貌。1-B 的齿 1 断口磨损程度较轻,可以清楚地观察到断口接近齿 2 的一侧,其次表面裂纹源区有大量的塑性疲劳条带和少量的二次裂纹,疲劳条带的方向与裂纹局部扩展方向相垂直,而另外一侧及中部为裂纹扩展区,呈韧窝特征形貌,说明该齿的断裂机理为单向弯曲疲劳断裂。已有文献证明,2A12 合金室温大气条件下的疲劳断口均由疲劳源、疲劳裂纹扩展区、瞬断区三个区域组成,疲劳源靠近试样表面,低循环应力下呈现点疲劳源特征,高循环应力下呈现多疲劳源特征^[3]。因此可判断出,该失效件的疲劳断裂为高循环应力疲劳断裂。在硬质增强颗粒处疲劳条带发生了扭曲变形,说明材料中的增强相对疲劳裂纹的扩展起到了一定的阻碍作用;齿 2~7 断口有大于 1/3 的截面突起,突起部分表面被严重磨损,且偏于齿轮起始端,未磨损断口区域呈韧窝特征形貌,说明这些齿的断裂机理为韧性过载断裂,裂纹从相对平坦的未磨损区一侧的齿根表面起源,并向突起的磨损区扩展,最终发生剪切断裂,形成剪切唇,即突起部分。

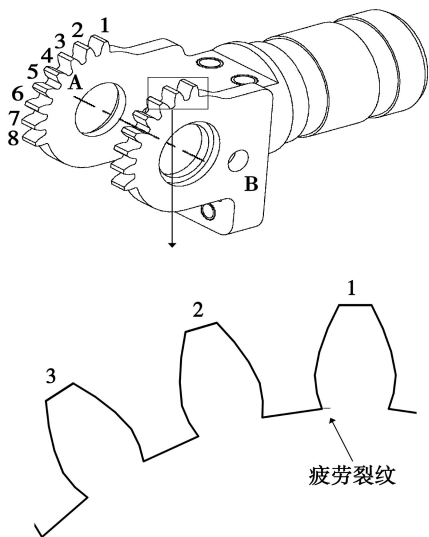


图 7 齿轮 B 齿 1 的疲劳裂纹位置示意图

Fig. 7 Illustration of fatigue crack on tooth 1 of gear B

结合实际的工况,失效铰链接头在失效前的展开次数为 6 次,且在 1-B 齿轮上,除齿 1 为疲劳断裂外,其他断齿均为韧性过载断裂,1-A 齿轮除齿 1 由

于源区断口磨损,无法确定其断裂机理外,其他断齿也均为韧性过载断裂,由此可以判定,该失效铰链接头的失效原因并非是因反复展开而引起的疲劳断裂。在最后一次展开试验前,失效铰链随天线进行了力学振动试验,包括 X、Y、Z 三个方向的正弦和随机振动,在进行振动试验过程中,天线处于收拢状态,失效铰链接头齿轮只有齿 1 相互啮合,其他各齿均处于分离状态。在这一阶段,啮合的齿 1 之间相互接触,产生了交变应力,并在齿根处形成了疲劳裂纹。在之后的展开过程中,由于展开速度很快,齿轮受到沿转轴轴向的扭矩冲击,齿 1 由于存在疲劳裂纹,承载能力大大下降,在冲击载荷的作用下发生断裂。齿 1 断裂后,两个接头齿轮发生相对滑动错位,造成其他齿的不正确啮合,引起各齿相继发生过载断裂或齿顶的挤压、刮削以及断齿断口的磨损。

4 结论与建议

(1) 失效同步铰链的失效原因是由于振动试验过程中,天线保持收拢状态,接头齿轮起始端齿 1 因相互啮合引起交变应力,从而产生了疲劳裂纹,导致该齿的承载能力下降,并在随后的展开试验中,在冲击载荷的作用下发生了断裂,而该齿的断裂引起两个相互啮合接头齿轮的滑动错位,造成其他轮齿相继发生韧性过载断裂。

(2) 该产品原材料各项复验结果符合 GB/T3191—98 的相关要求。

(3) 建议改进结构设计,避免在振动试验过程中,同步铰链接头齿轮之间相互啮合,以防止轮齿因受到交变应力而发生疲劳断裂,或通过更换铰链接头齿轮材料或齿轮设计尺寸以增强齿轮的抗疲劳断裂性能。

参考文献

- [1] 张士林,任颂赞. 简明铝合金手册[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,2006: 436-437
- [2] 于世光. 渐开线齿轮齿根疲劳断裂特性分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2009:1-5
- [3] 金晓鸥,金晓男,赵慧杰,等. 室温大气环境下不同时效态 2A12 合金的疲劳行为[J]. 材料工程, 2009(12): 67-71

(编辑 任涛)