

某型飞机 ZL114A 铝合金支架断裂失效分析

李召华¹, 许永春²

(1. 空军工程大学航空机务士官学校, 河南信阳 464000; 2. 河南航天精工制造有限公司, 河南信阳 464000)

摘要: 针对某型飞机ZL114A铝合金支架开裂的现象, 主要采用了化学成分分析、断口分析、组织分析、力学性能测试等方法, 分析了其开裂原因。结果表明: 铝合金支架的化学成分符合HB962—2001要求, 强度、硬度均符合标准, 而塑性不达标。经过分析, 认为开裂是由于铸造过程中未进行有效变质处理, 导致在铸造过程中生成了粗大的针状相, 从而降低了材料的塑性, 在拆卸时受到一次性较大冲击载荷时, 在轴孔受力部位形成裂纹。

关键词: ZL114A; 断裂; 显微组织; 失效分析

ZL114A合金是一种含镁元素的亚共晶Al-Si合金, 具有较高的强度、良好的韧性、铸造性能、抗疲劳性能和耐腐蚀性能^[1-4], 被广泛应用于航空领域中, 如支架、尾减机匣等零件。

某型飞机支架外观尺寸长约为680 mm、宽约为300 mm, 采用ZL114A金属型铸件制作, 其生产制造过程为: 铸造—热处理(T6状态)—机械加工—阳极化—喷漆—装配。该支架自2016年装机服役, 2021年在外场改装时, 拆卸后发现支架安装旋转轴孔部位出现开裂现象。本文通过对支架进行宏观观察、成分分析、断口形貌、性能测试进行系统的分析, 找出失效的原因, 为该零件的工艺改进奠定基础, 也为其他零件失效分析提供了思路^[5]。

1 分析过程及结果

1.1 宏观形貌观察

支架宏观形貌及具体碰撞和开裂位置如图1所示。

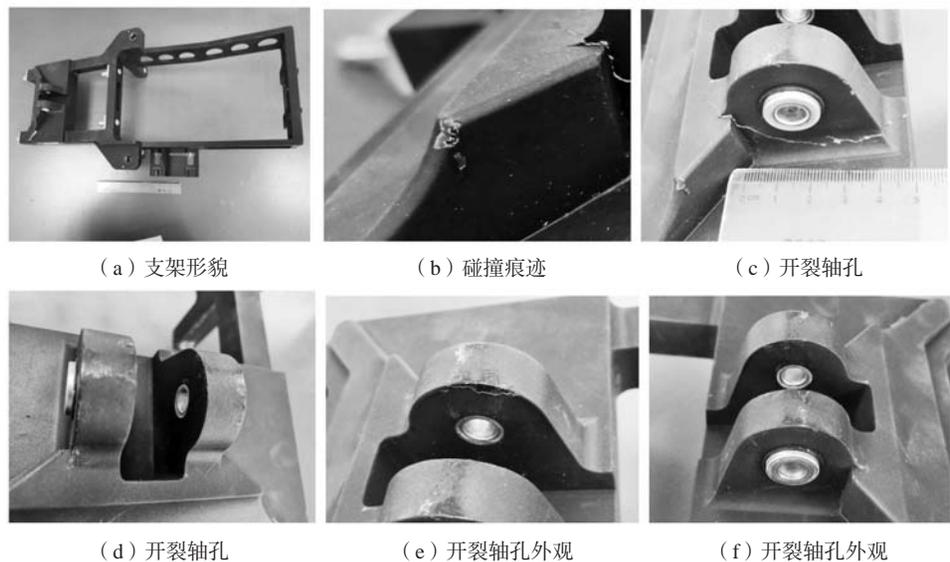


图1 开裂支架
Fig. 1 Cracked support

作者简介:

李召华(1983-), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为材料学。
电话: 15937681883

中图分类号: TG146.21
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2023)04-0443-04

收稿日期:

2022-06-10 收到初稿,
2022-08-26 收到修订稿。

经观察,发现开裂支架外观漆膜保存较为完好,轴孔附近上有一条非常明显的裂纹,开裂部位接近轴孔与基体连接处,裂纹扩展深度约占整个轴孔厚度的1/2,碰撞处漆膜破损较为严重,可见铝合金基体呈金属光泽;未开裂轴孔圆弧处存在漆膜破损现象,圆弧顶部有挤压变形痕迹。

将开裂轴孔部位人工打开裂纹,观察宏观断口,具体断口宏观形貌如图2所示。

由图2可知:断口整个断面呈灰色特征,断面上存

在少量裂纹,打开时呈白色的机械损伤,小白点为闪光小刻面;断口较为粗糙,未见明显塑性变形痕迹;断面未见明显陈旧性形貌,人工打开断面与原始断面未存在明显界限。

1.2 微观断口分析

对断口用超声波+无水酒精清洗后,在ZEISS EVO18型扫描电镜下观察其微观断口形貌,断口具体形貌如图3所示。

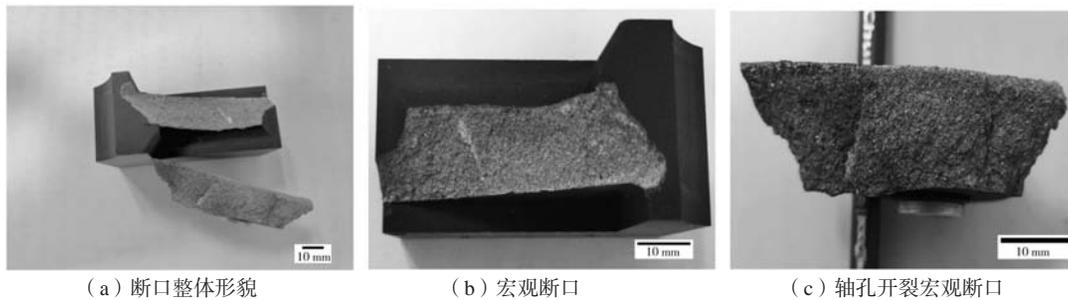


图2 轴孔开裂部位宏观断口

Fig. 2 Macro fractures of the shaft mounting hole

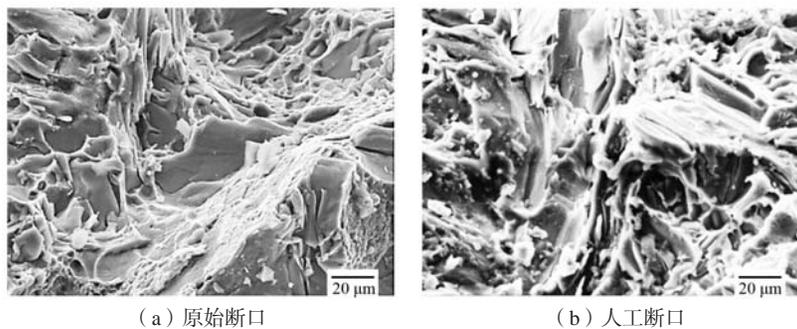


图3 微观断口分析

Fig. 3 Analysis of the micro fracture

从图中可以看出:原始断口和人工断口的微观形貌未见明显区别,均为准解理断口+撕裂棱+极少量韧窝;断面干净,未见腐蚀产物。

1.3 化学成分分析

ZL114A属于铸造铝合金,其化学成分参照航空行业标准HB 962—2001《铸造铝合金》。在开裂轴孔附近取样,使用OPTIMA7000DV光谱仪对其进行化学成分分析,具体分析结果见表1。将实测值与标准值进行对比,发现其主要元素含量符合HB 962—2001中ZL114A的要求。

1.4 显微组织分析

在开裂轴孔附近取样2个,对其中1个试样进行抛光,腐蚀剂选用2 mL氢氟酸+5 mL硝酸+3 mL盐酸+190 mL水,进行浸蚀处理,试样制备依据GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》进行,然后使用Imager.A2m金相显微镜观察,将未腐蚀抛光的试样和浸蚀后试样的显微组织形貌进行观察对比,显微组织如图4所示。其中图4a、b表示使用相同放大倍数观测试样1不同位置的显微组织图,图4c、d表示使用不同放大倍数观测试样1不同位置的显微组织图。

由图可见,在未腐蚀抛光状态下,共晶硅呈长针

表1 ZL114A化学成分
Table 1 Chemical compositions of the ZL114A

项目	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Be	Al
标准值	6.5~7.5	≤0.20	≤0.10	≤0.10	0.45~0.750	≤0.10	0.08~0.25	≤0.07	余量
实测值	7.49	0.10	0.006	0.007	0.65	0.001	0.11	0.002	91.62

$w_B / \%$

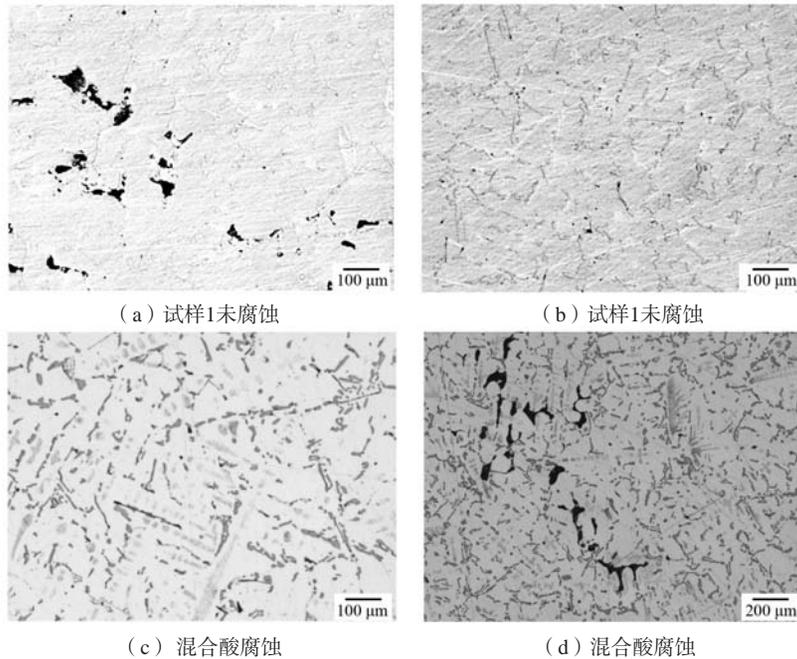


图4 裂纹附近显微组织

Fig. 4 Microstructures near the cracks

状及短棒状，分布无明显规律，显微疏松呈局部聚集形貌；经混合酸腐蚀后，显微组织呈树枝状结晶，局部存在少量的黑色短针状的 Al_3Fe 和 $Al-Fe-Si$ 金属间化合物，依据QJ 3290—2007《ZL114A铸造铝合金金相典型图谱》，该开裂铸件未进行变质处理。

1.5 性能验证

在开裂轴孔附近以及远离开裂区域分别取样，采用HBS-3000型布氏硬度计对2个试样进行硬度测试，硬度试验依据HB 5168—1996进行，测试结果如表2所示。由结果可见，轴孔附近试样的硬度和远离开裂区域试样的硬度未见明显差别，均满足HB963—2005《铸造铝合金》中ZL114A的要求，符合标准值。

表2 布氏硬度
Table 2 Brinell hardness data

试样	实测硬度值HB				标准 硬度值
	第一点	第二点	第三点	平均值	
试样1(开裂轴孔附近)	120	118	116	118	≥80HB
试样2(远离开裂区域)	116	119	117	117.3	

在开裂支架本体取样进行拉伸试验，试样制备和试验方法依据HB 5143—1996，在CMT5504型5微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验，具体试验结果如表3所示。

依据HB 962—2001中规定，铸件本体取样力学性能指标按HB 963的相关条款规定。由表3试验结果可知，开裂支架的抗拉强度、屈服强度均满足HB963—

表3 力学性能试验结果

Table 3 Test results of the mechanical properties

试验项目	实测数据	标准值
抗拉强度/MPa	324	≥210
屈服强度/MPa	322	≥220
伸长率/%	0.5	≥2.0

2005《铸造铝合金》中ZL114A要求，而伸长率仅为0.5%，远小于标准要求，表明材料脆性倾向较大。

2 分析与讨论

对ZL114A进行化学成分分析发现，开裂支架成分中Si含量偏高，达到标准值的上限，但主要化学成分均满足HB 962—2001《铸造铝合金》要求，Be含量较低，仅为0.002%，从宏观断口上看，开裂耳片断口较为粗糙，未发现明显塑性变形，未见明显陈旧性裂纹；从微观断口分析，断口为准解理+撕裂棱+少量韧窝，原始断口和人工断口未有明显区别；从显微组织来看，共晶硅呈长针状和短棒状，分布无明显规律，存在少量的针状的 Al_3Fe ；力学性能除伸长率外，其余满足标准值要求。

由化学成分分析可知，该铸件Mg元素含量较高，ZL114A中Mg元素主要起强化作用，在热处理过程中生成 Mg_2Si ^[6]，能在 $\alpha-Al$ 相界面起到阻碍晶粒的相对滑动，从而提升抗拉强度，随着Mg元素含量的增加，使 Mg_2Si 相时效时粗化，反而会降低材料的塑性；Be元素在ZL114A熔炼过程中起到保护Mg的作用，可减少Mg

元素的烧损,加速 Mg_2Si 相的形成,促进热处理强化相的细化,而该开裂铸件中Be元素含量仅为0.002%,表明ZL114合金在熔炼过程中Be元素添加量很少甚至没有,从而未起到细化强化相作用;化学元素分析中未见Na、Sr及Re元素等常用铝合金铸件变质剂^[7],而金相检查表明,该开裂铸件未进行有效变质处理。该开裂铸件金相组织主要由 α -Al相和长针状及短棒状的共晶硅相组成,未变质的共晶硅为粗大的长针状,严重割裂了 α -Al基体,显著影响合金的力学性能^[8],使材料的塑性降低,在外加载荷的作用下,容易发生断裂或与基体分离而形成微裂纹^[9],使裂纹扩展变得容易。从拉伸试样力学性能中可以看出,此铸件的塑性较差。而铸件中显微疏松的局部聚集,减少受力时的承载面积,同时也容易产生应力集中^[10]。因此,在改装过程

中,该铸件在外部较大的冲击载荷作用下,轴孔处为受力部位,且此处厚度较薄,造成裂纹在粗大的长针状共晶硅处形成和扩展,显微疏松对开裂也起了促进作用。

3 结束语

(1) ZL114A铝合金支架的开裂形式为脆性过载开裂,拆卸过程中可能受一次性较大冲击载荷作用,在粗大的长针状共晶硅处形成微裂纹并扩展。

(2) 建议后期应从以下几个方面改进:一是严格控制原材料化学成分含量及夹杂物,适当增加Be或者Al-Be中间合金的含量;二是增加变质处理,细化共晶硅相和晶粒尺寸,提高材料的塑性;三是改进铸造工艺,减少和杜绝显微疏松。

参考文献:

- [1] 刘敬伟,毛红奎,徐宏. ZL114A铝合金疲劳性能影响因素概述[J]. 铸造技术, 2014, 35(2): 267-270.
- [2] 王龙,李志强. 铝硅合金高周疲劳损伤的微观机理[J]. 机械工程师, 2018(1): 129-132.
- [3] 周永江,熊艳才,洪润洲,等. ZL114A合金疲劳行为研究[J]. 航空材料学报, 2007(4): 10-13.
- [4] JIANG L T, WU G H, YANG W S, et al. Effect of heat treatment on microstructure and dimensional stability of ZL114A aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 21-28.
- [5] 黄粒,高艳丽,王海龙,等. ZL114A 铝合金舱体铸件裂纹形成原因分析[J]. 铸造, 2021(10): 1223-1226.
- [6] KENO S, MATSUDA K. Precipitation sequence of Al-Mg-Si alloy [J]. Materials Science Forum, 2003(6): 426-432.
- [7] 康福伟,刘洪汇,刘凯,等. 精炼工艺对ZL114A合金组织及性能的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(6): 9-13.
- [8] 付原料,杜义涵,段红阳,等. 变质温度对ZL114合金铸态显微组织和力学性能的影响[J]. 机械工程师, 2022(11): 30-33.
- [9] 刘斌,蒋业华,潘亮星,等. 共晶硅形貌对ZL114A合金拉伸断裂机制的影响[J]. 铸造技术, 2010(5): 612-615.
- [10] 王保华. 汽车铝合金直推杆的断裂失效分析[J]. 材料保护, 2019(8): 182-185.

Fracture Failure Analysis of ZL114A Aluminum Alloy Bracket of an Aircraft

LI Zhao-hua¹, XU Yong-chun²

(1. Aviation Maintenance NCO Academy, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, Henan, China; 2. Henan Aerospace Precision Manufacturing Co., Ltd., Xinyang 464000, Henan, China)

Abstract:

In this paper, in view of the cracking phenomenon of a certain aircraft ZL114A aluminum alloy bracket, the cracking cause was analyzed mainly using chemical composition analysis, fracture analysis, microstructure analysis, mechanical properties test and other methods. The results showed that the chemical composition of the aluminum alloy bracket met the requirements of HB962—2001, the strength and hardness met the standards, but the plasticity was not up to the standard. After analysis, it is considered that the cracking was due to the fact that there was no effective modification treatment in the casting process, which led to the formation of coarse acicular phase in the casting process, thus reducing the plasticity of the material. When being subjected to a one-time large impact load during disassembly, the cracks were formed in the bearing part of the shaft hole.

Key words:

ZL114A; fracture; microstructure; failure analysis