某型号发动机壳体热裂纹失效分析

袁钰坤，张鹏博，杨立合，张志正

摘要：某型号发动机铝合金壳体在工艺试验过程中出现热处理裂纹，通过对裂纹失效壳体的化学成分和力学性能进行分析，借助光学显微镜和扫描电镜观察了裂纹的宏观、微观形态及断口形貌，分析了裂纹与金相组织的关系，指出了造成热处理裂纹的主要原因是过烧和第二相粒子夹杂，并提出了预防产生裂纹的措施。

关键词：发动机；铝合金；热处理；裂纹分析

1. 前言

某型号发动机壳体（下文简称为壳体）为薄壁多孔筒型结构（见图1）。2A12铝合金因其具有密度小、比强度高、导电导热性好、耐腐蚀等特点，成为我所某型号发动机壳体的设计选材，采用该材料生产加工的壳体在热处理工艺试验过程中出现裂纹。

本文就开裂情况较严重的壳体展开分析。

2. 试验方法及结果分析

（1）热处理裂纹情况统计 失效件名称：壳体。毛坯尺寸：ϕ320mm×25mm×295mm，2件，材料为2A12-H112厚度为25mm的铝管（热轧）。壳体加工工序为：材料复验→下料→粗车→钳→热处理→半精车→稳定化处理→数控铣→高低温循环→精车→数控铣→表面处理。

裂纹发生在第一次热处理后（工艺参数：498℃，保温90min，水冷），淬水后目视检测发现2件壳体毛坯均有不同程度的裂纹。

对裂纹最严重的部位目视及着色观察，发现裂纹宏观外貌细直、非连续，两端尖细，裂纹棱边起源，裂纹长度20～30mm；深度2～4mm；裂纹扩展方向垂直于管料的轴向（见图2）

（2）失效壳体化学成分和力学性能 采用能量色散X射线荧光分析了失效壳体的化学成分，结果如表1所示。

从表1中可看出，材料的化学成分符合技术要求。但Cu含量处于技术要求上限，该情况会使得材料过烧温度线下移。

检测试样在失效壳体未开裂位置截取，检测结果见表2。可见，试样的力学性能符合设计要求，但测试结果试样轴向与弦向断后伸长率差异较大。

（3）失效壳体热处理裂纹形态与金属金相组织关系 首先沿裂纹打开失效壳体，目视可见断口断面平齐，有氧化色，整个断面无明显断裂线。其次，沿裂纹切取试样，目测裂纹位置冷加工车刀痕迹明显。在扫描电镜下观察裂纹形态，裂纹起始于表

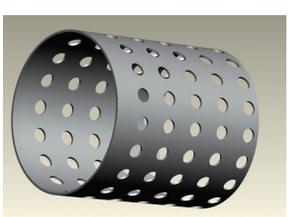
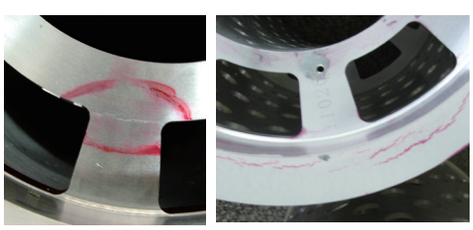


图1 壳体结构示意



（a）壳体外壁 （b）壳体端面着色

图2 宏观裂纹形貌

表1 失效壳体化学成分（质量分数） （%）

元素	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Zn	Al
含量	0.10	0.26	4.83	1.5	0.01	0.07	余量
技术要求	≤0.50	≤0.50	3.80～4.90	1.20～1.80	≤0.10	≤0.3	余量

面，由外向里呈不连续状，两侧较平齐，不具有耦合特性，尾端具有一定圆角（见图3a、3b）。再次，从裂纹上切取金相试样做腐蚀处理，失效壳体热加工流线明显，第二相粒子、晶界及夹杂物等沿管料轧制流线方向排列，连续的脆性相粒子割裂了韧性基体相的连续分布，并造成应力集中（见图3c、3d）。裂纹为典型沿晶裂纹，挛晶和晶界处有过热痕迹，裂纹附近的晶界上有液相球、三角晶界、晶界变粗、发毛等过烧的特征（见图3e、3f）。

（4）失效壳体裂纹断口微观形态 用扫描电镜观察失效壳体热处理裂纹的断口形态，对断面上的氧化物和第二相粒子进行能谱分析。研究发现：热处理裂纹扩展面积大，其上存在水平线状痕迹，附着层状氧化物，局部氧化物有脱落迹象（见图4）；断口金相试验和能谱分析发现铝合金中存在片状Al_2O_3（见表3）。

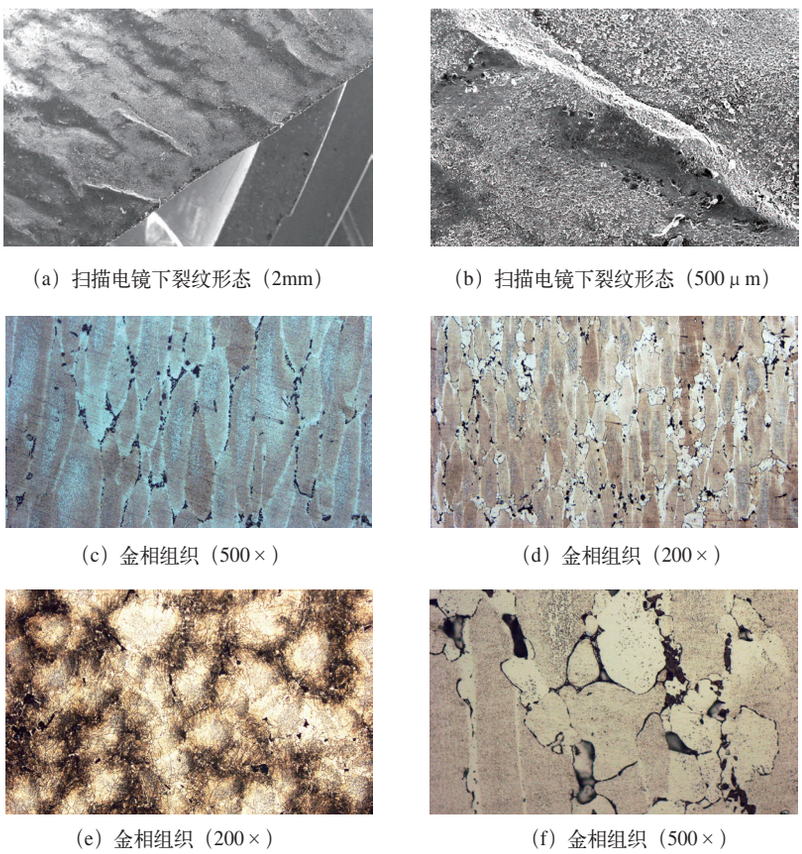
3. 结论及预防措施

（1）失效壳体热加工流线明显，连续的脆性相粒子割裂了韧性基体相的连续分布，并造成应力集中。失效壳体沿厚度方向的棱边发生过热，晶界发黑变粗，出现类三角晶界和液相球。

（2）热处理裂纹沿管材的扁平晶粒的边界扩展。裂纹断口清晰，互相平行呈线状痕迹。在高倍显微镜下可见热处理裂纹沿晶界扩展，其上有清晰的氧化层痕迹；氧化层皱裂沿变形晶粒边界出现二次裂纹。

（3）失效壳体存在局部过热点、第二相粒子脱落点、冷加工的车刀痕迹等，都是壳体毛坯在淬火处理时热应力集中点，当热应力数值达到或超过2A12管料的强度极限时，就会萌生裂纹。

（4）在淬水过程中，壳体毛坯迅速冷却过程产生的热应力，促进了热处理裂纹的扩展，并在新裸露的金属断面上不断形成Al_2O_3层，氧化层厚度的增加，产生了促进裂纹延伸的附加

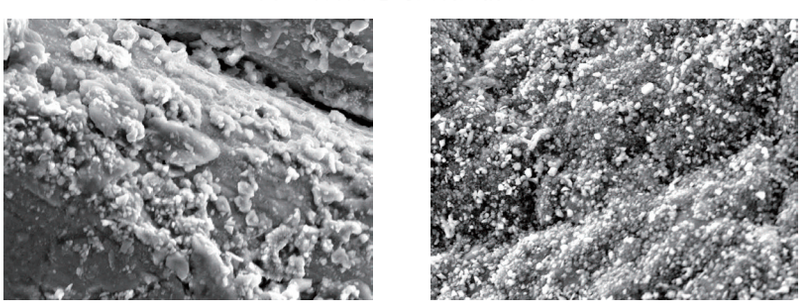


（a）扫描电镜下裂纹形态（2mm）　（b）扫描电镜下裂纹形态（500μm）

（c）金相组织（500×）　（d）金相组织（200×）

（e）金相组织（200×）　（f）金相组织（500×）

图3　裂纹形态与金属金相组织

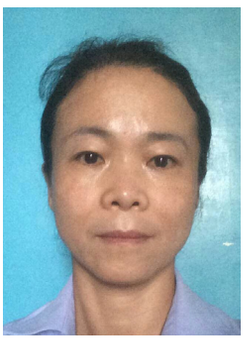


（a）　（b）

图4　扫描电镜裂纹的断口状态（50μm）

表2　失效壳体力学性能测定

测定指标	σ_b/MPa	σ_s/MPa	A（%）	HBW
01（轴向）	480	345	12.4	132
02（轴向）	475	365	11.8	128
03（弦向）	458	345	3.2（非指标项）	126
04（弦向）	474	375	2.8（非指标项）	130
技术要求	≥390	≥255	10.0（轴向）	≥120



薄壁铝合金零件的断裂分析

董芳

摘要：对薄壁铝合金成品零件在模拟直升机起飞—降落疲劳试验中早期疲劳失效的性质与原因进行了分析研究，表明该零件早期断裂非材质原因而是由于机械加工因素引起。

关键词：薄壁件；铝合金；断裂；直升机

我公司生产的一批薄壁铝合金零件按试验大纲要求，在成品中抽取一定比例的零件进行直升机起飞→降落的模拟疲劳试验。

在疲劳试验中，共进行了四级加载，每级载荷循环15000次，每次循环薄壁铝合金零件的转速变化为0→4000→0r/min（模拟飞机一个起降过程），试验结束后，根据载荷和循环次数给出该批薄壁铝合金零件的疲劳寿命，该批零件在第一级载荷下进行了9081次循环即发现裂纹，为找出提前断裂原因特做此试验。

1. 试验过程

该零件采用材料为2024UT351PL，板厚3.2mm，零件号为J_2-5。该零件经机加工、300℃退火、冲压成形、300℃退火、机加工、495℃±5℃固溶处理+自然时效。

该零件破坏做物理性能试验，其结果见表1。

在零件的裂纹处截取一块试样，从裂纹处压断，在扫描电镜下进行断口分析，其内容和结果见表2。

补充试验：取合格零件I_2-2薄壁铝合金零件相同部位比较，应力，热应力和Al_2O_3层产生的附加应力，致使裂纹不断扩展。

（5）在确保Al_2Cu和Al_2CuMg相充分溶解的条件下，降低固溶保温温度，适当延长保温时间，可有效减小裂纹产生。

（6）提高壳体毛坯热处理前表面质量，改进设计结构，适当增大棱边过渡圆角的曲率半径，以尽可能减小应力集中，可有效减小裂纹产生。

（7）机加工前增加锻造工序，以使热加工流线合理分布，减少材料各向异性，并提高材料韧性，有效减少裂纹产生。

表3 层状氧化物化学成分能谱分析结果 （%）

元素	质量分数	原子分数
O	31.54	44.20
Mg	2.10	1.94
Al	63.58	52.93
Cu	2.78	0.93

参考文献

[1] 刘瑞堂.机械零件时效分析[M].哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2003.

[2] 郭艳红.壁筒形零件加工中应用[J].机械工程师，2010.

[3] 阎承沛.零件热处理缺陷分析及对策[M].北京：机械工业出版社.

[4] 陈惠民.热处理温度和时间对LC4和LY12变形铝合金机械性能的影响[J].金属热处理，1981，(6)：16-20.

[5] 陈绍康.LY12合金低熔点共晶相组成及相变温度研究[J].理化检验，物理分册，1984，(2)：2-5.

作者简介：袁钰坤、张鹏博、杨立合、张志正，航天科工集团第六研究院210所。

MW 20160704