

# 喷丸对波音737CL飞机龙骨梁 腐蚀行为的影响

Effect of Flap Peen on Corrosion of Boeing 737CL Keel Beam

西北工业大学航空学院 黄昌龙  
广州民航职业技术学院



黄昌龙

高级工程师、副教授。研究方向为飞机结构维修理论与技术。

波音 737CL 飞机龙骨梁下缘条材料为 7150-T77511 挤压型材<sup>[1]</sup>, 该材料属于新一代高强度 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金航空耐腐蚀结构材料, 广泛应用于波音 737、747、757、767 以及波音 777 等机型的重要结构。2004 ~ 2009 年期间, 为满足中国民用航空局 (CAAC) 《航空器结构持续完整性大纲》要求<sup>[2]</sup>, 针对 14 年以上老龄飞机重要结构腐蚀状况进行了调研。结果显示: 波音 737CL 老龄飞机龙骨梁等 7150 铝合金结构腐蚀问题突出<sup>[3]</sup>。

波音 737CL 飞机龙骨梁下缘条材料为 7150-T77511 挤压型材<sup>[1]</sup>, 该材料属于新一代高强度 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金航空耐腐蚀结构材料, 广泛应用于波音 737、747、757、767 以及波音 777 等机型的重要结构。2004 ~ 2009 年期间, 为满足中国民用航空局 (CAAC) 《航空器结构持续完整性大纲》要求<sup>[2]</sup>, 针对 14 年以上老龄飞机重要结构腐蚀状况进行了调研。结果显示: 波音 737CL 老龄飞机龙骨梁等 7150 铝合金结构腐蚀问题突出<sup>[3]</sup>。

调研结果还表明: 波音 737CL 龙骨梁下缘条腐蚀经过打磨修理后, 打磨修理区域更容易产生腐蚀, 直接导致了大量龙骨梁更换修理。由此可见, 有效预防和控制波音 737CL 龙骨梁下缘条打磨修理区域的腐蚀, 对于大幅度降低航空公司维修成本、确保中国民航波音 737CL 机队安全运营具有重大意义。

本课题以运营基地位于海南岛的海南航空股份有限公司波音 737CL 机队为研究对象, 通过研究喷丸强度和覆盖率对龙骨梁下缘条打磨修理区域腐蚀行为的影响, 在明确腐蚀形成和扩展规律基础上, 确定合理的喷丸工艺。

## 试验方法

喷丸可以在结构表层 0.005 ~ 0.030 英寸 (0.127 ~ 0.762mm) 厚度范围内产生塑性变形、形成残余压应力, 广泛用于改善飞机结构表面抗疲劳和应力腐蚀性能。喷丸还能够细化结构表层晶粒、改变表层组织结构<sup>[4]</sup>。因此, 喷丸对铝合金结构点蚀、剥蚀等腐蚀行为有一定影响。

飞机维修中常用的便携式喷丸工艺为旋片喷丸。通过气钻带动旋片高速旋转、使固定在旋片上的碳钢丸粒击打并强化结构表层。喷丸强度和覆盖率是影响喷丸效果的主要

工艺参数。为了研究旋片喷丸对腐蚀行为的影响,采用不同喷丸强度和覆盖率,分别对波音 2937、波音 2990 和波音 2970 的波音 737CL 飞机龙骨梁左、右下缘条 ADF 天线固定孔腐蚀打磨修理区域进行了旋片喷丸处理。

本试验采用的旋片喷丸设备主要包括:美国 ARO 公司生产的 7871F 型直柄气钻,美国芝加哥气源公司生产的 CA-085203 型气压调节器,美国 BRANOM 公司生产的 359920 型气钻转速测量仪。旋片采用美国 3M 公司生产的 TC330 型铸钢丸粒旋片,旋片尺寸规格为 1 英寸×2 英寸(25.4mm×50.8mm)。试验中,通过气压调节器控制气钻进气量调节气钻转速,进而控制旋片喷丸的喷丸强度。气钻的实际转动速度通过转速测量仪进行测量并控制。结构表面喷丸覆盖率通过喷丸时间进行控制。

波音 737CL 飞机龙骨梁下缘条 ADF 天线固定孔区域材料厚度为 0.20 英寸(5.08mm),允许喷丸强度范围为 0.006~0.012A,表面覆盖率不得小于 100%<sup>[5]</sup>。因此,本试验分别采用了最小允许喷丸强度 0.006A、允许喷丸强度中间值 0.009A 和最大允许喷丸强度 0.012A,以及 100% 和 200% 的覆盖率。表 1 为 3 架飞机龙骨梁下缘条打磨修理区域采用的喷丸工艺以及修理区域再次发现损伤的时间间隔。

## 试验结果

经过 5 年的调查研究,发现波音 737CL 龙骨梁下缘条打磨修理区域具有以下腐蚀规律。

(1)未经喷丸处理的打磨修理区域表面容易产生点蚀并很快出现剥蚀。龙骨梁下缘条腐蚀分为 3 个阶段:初始腐蚀形态为点蚀;随后,某些位置的点蚀很快发展成平行于结构表面的分层状腐蚀,如图 1 所示;随着

表1 波音737CL龙骨梁下缘条喷丸工艺及修理区域试验结果

飞机号	位置	喷丸强度/A	覆盖率/%	修理后时间/月	时间/飞行小时	损伤类型
波音2937	左下缘条	—	—	12	3224	点蚀+剥蚀
波音2937	右下缘条	0.012	200	12	3224	开裂+剥蚀
波音2970	左下缘条	0.006	200	60	15648	点蚀
波音2970	右下缘条	0.006	100	60	15648	点蚀+剥蚀
波音2990	左下缘条	0.009	200	48	12651	点蚀+剥蚀
波音2990	右下缘条	0.009	100	36	9381	点蚀+剥蚀

腐蚀的进一步扩展,最终转化为沿龙骨梁下缘条厚度中间层平面迅速扩展的开裂状腐蚀形态,如图 2 所示。

(2)当喷丸强度一定时,喷丸区域腐蚀的形成和扩展速度随覆盖率的升高而降低。以最小允许喷丸强度 0.006A、100% 或 200% 覆盖率喷丸后,打磨修理区域的腐蚀形成和扩展得以大大延迟。较低喷丸强度区域的腐蚀扩展,同样遵循点蚀→表面分层状腐蚀→厚度中间层开裂状腐蚀 3 个阶段。但是,喷丸表面的点蚀扩展周期比非喷丸表面的点蚀扩展

周期长得多,蚀点数量也远少于非喷丸区域表面,如图 3 所示。

(3)当覆盖率一定时,喷丸区域腐蚀的形成和扩展速度随喷丸强度的升高而加快。以最大允许喷丸强度 0.012A、200% 覆盖率喷丸后,喷丸区域 12 个月内就检查发现开裂并直接发展为分层状腐蚀,如图 4 所示。

## 结果分析

### 1 材料及腐蚀产物分析

为确认龙骨梁下缘条材料实际



图1 未喷丸表面腐蚀形貌

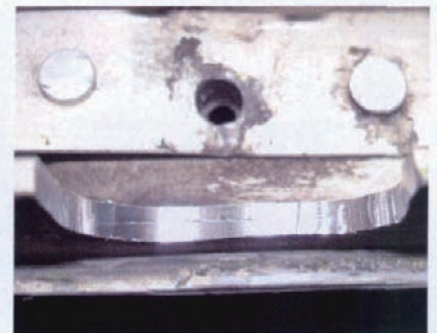


图2 缘条厚度中间层开裂腐蚀形貌

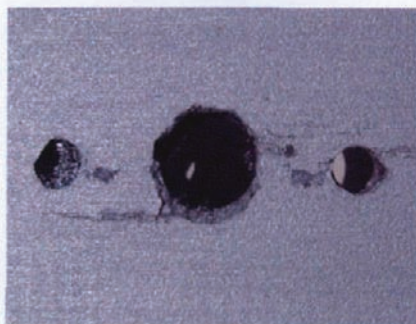


图3 喷丸表面腐蚀形貌

(修理后60个月,喷丸工艺:0.006A、200%)



图4 喷丸后表面开裂形貌

(修理后12个月,喷丸工艺:0.012A、200%)

表2 波音737CL龙骨梁下缘条样本主要元素能谱分析结果

元素	Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Si	Mn	Ti	Cr	其他	Al
样本	7.2	1.8	2.7	—	—	—	—	—	—	—	—
7150	5.9 ~ 6.9	2.0 ~ 2.7	1.9 ~ 2.5	0.08 ~ 0.15	0.15	0.12	0.10	0.06	0.04	0.15	余量

具有沿平行于结构表面的拉长晶粒平面层状分离形貌特征(见图10)。SEM观察结果表明龙骨梁下缘条表面分层状腐蚀为剥蚀。

SEM观察沿龙骨梁下

缘条厚度中间层开裂状腐蚀样本,发现开裂沿晶粒纵厚比最大拉长晶粒平面扩展。沿开裂平面打开样本后,发现开裂表面覆盖着大量泥纹花样腐蚀产物,如图11所示。开裂表面

类型并分析腐蚀形成原因,分别选取龙骨梁下缘条表面分层状腐蚀和厚度中间层开裂状腐蚀样本,采用X射线能谱仪对样本材料及其剥蚀产物的化学成分进行了采谱分析。

龙骨梁下缘条样本材料能谱分析结果如图5所示。表2为样本材料各主要元素质量百分比与7150铝合金材料各元素质量百分比数据<sup>[6]</sup>。对比结果显示:龙骨梁下缘条样本中主要合金元素Zn、Mg、Cu含量与7150近似,但存在Zn、Cu略高、Mg略低现象。这应该是由于铝合金材料中化学元素分布不可避免地存在不均匀性,而X射线能谱仪分析结果只能反映所测样本微区成分含量。由于X射线能谱仪不易准确测量出含量低于1%的元素,因此X射线能谱分析结果,证实波音737CL机队龙骨梁下缘条样本材料为7150铝合金。

图6为采用X射线能谱仪对龙骨梁下缘条样本腐蚀产物的能谱分析结果。对比图5龙骨梁下缘条样本材料能谱曲线,结果显示:龙骨梁下缘条剥蚀产物中存在较高的Cl、Na和O元素能量峰,此外还有S、K、Ca等其他元素能量峰。Cl、Na、O、S、K、Ca等非7150铝合金添加元素来源于飞机运营环境。腐蚀产物样本为运营基地位于海南岛的波音737CL机队龙骨梁下缘条。剥蚀产物Cl和Na元素能量峰较高,与海南岛海洋性盐雾环境相符,表明Cl<sup>-</sup>与龙骨梁下缘条腐蚀的形成和扩展关系密切。

## 2 组织结构分析

采用SEM手段,分别观察龙骨梁下缘条打磨修理区域未经喷丸处理和喷丸处理样本纵剖面组织结构。

图7为未喷丸区域截面图像。图8为采用0.012A喷丸强度、200%覆盖率喷丸区域截面图像。

图7和图8对比显示:打磨修理后,未经喷丸处理的龙骨梁下缘条表层晶粒呈平行于结构表面拉长状分布、纵厚比较大,大量晶界直接暴露于结构表面。喷丸处理后,龙骨梁下缘条结构表面一定厚度范围内的拉长晶粒被大大细化,接近等轴晶粒。此外,2种龙骨梁下缘条样本厚度中间层拉长晶粒的纵厚比在整个截面中均为最大。

## 3 腐蚀断口分析

SEM观察表面分层状腐蚀样本纵截面抛光且未经化学浸蚀的金相样本,发现龙骨梁下缘条表面一定厚度范围内,存在许多相互平行、开口大小不均的开裂。距离表面越近,裂纹开口越大,如图9所示。开裂表面覆盖着大量泥纹花样腐蚀产物。腐蚀样本纵截面经混合酸浸蚀后,可清楚地观察到开裂

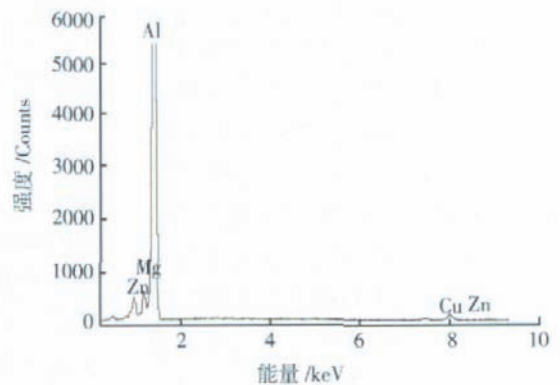


图5 样本材料能谱曲线

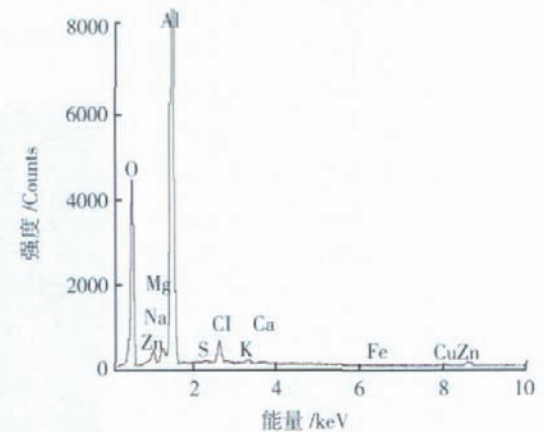


图6 样本腐蚀产物能谱曲线



图7 未喷丸处理截面形貌

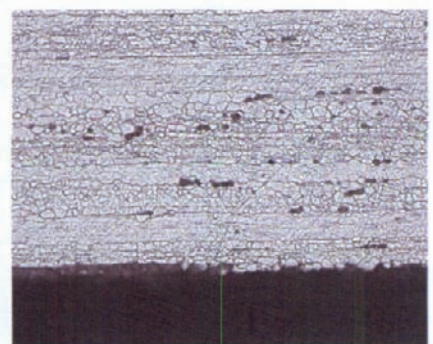


图8 喷丸处理后截面形貌

经过处理后观察,证实开裂具有典型沿晶特征,如图12所示。SEM观察结果显示,龙骨梁下缘条厚度中间层开裂状腐蚀为沿晶应力腐蚀。

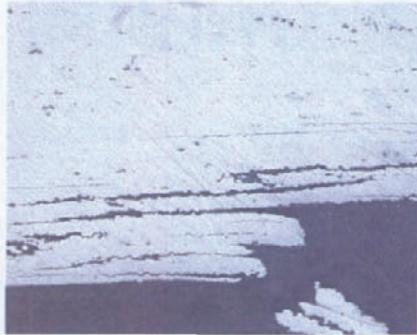


图9 抛光未浸蚀断口特征

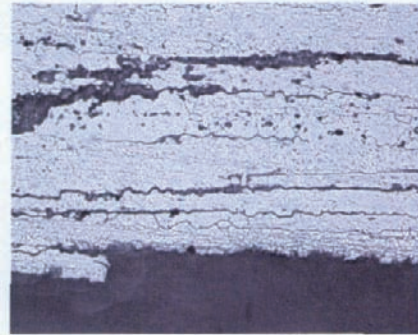


图10 浸蚀后断口特征

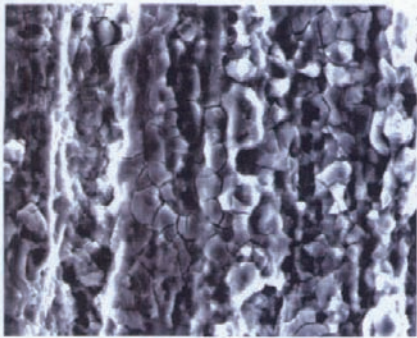


图11 开裂平面腐蚀产物形态

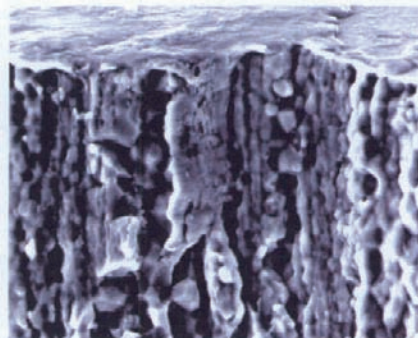


图12 开裂平面沿晶形态

## 结果与讨论

喷丸强度表征材料表面塑性变形程度及其变形厚度。喷丸强度越高,材料表层塑性变形越大、厚度越深,残余压应力越大。在喷丸工艺一定的前提下,喷丸强度随喷丸时间的增加逐渐增加;当喷丸时间达到一定值之后,喷丸强度增量将逐渐减小直至为0。

100%覆盖率要求喷丸时间超过100%覆盖率所需时间1倍后,喷丸强度增量不得超过15%。覆盖率决定了材料表层晶粒纵厚比,覆盖率越高,表层晶粒越小、越接近等轴晶粒<sup>[7]</sup>。

喷丸形成的表层塑性变形层,可以延缓点蚀的产生。材料表层无塑性变形层时,基体内部位错一旦到达结构表面,便在此形成尖锐的台阶(即滑移带)并产生应力集中;若表

面存在塑性变形层,基体内部的位错要么受到塑性变形层阻止而停止,要么只能在结构表面形成缓慢过渡的台阶<sup>[8]</sup>。因此,无喷丸表面容易产生

点蚀,喷丸表面不容易产生点蚀。

剥蚀指辊压轧制的板材或挤压成型的型材,沿晶粒拉长平面产生的分层状腐蚀<sup>[9-10]</sup>。剥蚀是一个电化学和力学共同作用的过程,本质上属于晶界析出相与相邻基体之间电偶腐蚀导致的晶间腐蚀<sup>[11-12]</sup>。相关研究表明:剥蚀扩展机理类似于应力腐蚀,扩展动力为腐蚀产物的楔力<sup>[13]</sup>。拉长晶粒以及沿晶界连续分布、优先腐蚀溶解的阳极通道,是剥蚀形成和扩展的必要条件<sup>[14-15]</sup>。沿基体边缘连续分布的贫溶质区(PFZ)作为阳极腐蚀溶解是T77时效态7150合金剥蚀的根源<sup>[16-17]</sup>。

无喷丸区域大量拉长晶粒的晶界直接暴露于打磨区域结构表面,因此容易产生剥蚀。喷丸处理后,材料表层拉长晶粒被打碎、细化并挤压混合,作为剥蚀必要条件的拉长晶粒以及晶粒表面连续分布的PFZ不复存

在。只有当点蚀穿透晶粒喷丸细化层之后,才可能产生剥蚀。因此,喷丸处理后龙骨梁下表面打磨区域剥蚀的形成速度被大大延缓。覆盖率越大,晶粒越细小、越接近等轴晶粒,就越不容易产生剥蚀。反之,由于龙骨梁下缘条厚度中间层晶粒纵厚比最大,剥蚀就可以转化成为扩展速度更快的晶间应力腐蚀。

波音737CL龙骨梁下缘条存在机身总体弯矩导致的晶粒纵向较高压应力。材料表层残余压应力随喷丸强度的升高而升高。在覆盖率一定的前提下,剥蚀的形成和扩展速度随喷丸强度的升高而加快,说明压应力加速了剥蚀的形成和扩展。这应该是由纵向压应力将导致垂直于拉长晶粒平面方向的正应变,使得晶粒拉长平面之间相互挤压,增加了晶粒之间剥蚀产物的楔力。当表层喷丸残余压应力与机身总体弯矩导致的压应力幅值之和超过材料屈服强度之后,将出现“静载松弛”导致材料表面开裂问题<sup>[18]</sup>。这就是采用0.012A喷丸强度、200%覆盖率喷丸之后,波音737CL龙骨梁下缘条表面12个月内出现开裂的原因。

## 结论

(1)拉长晶粒的纵厚比是影响剥蚀形成和扩展的重要因素。喷丸覆盖率越高,结构表层越接近等轴晶粒,剥蚀形成和扩展越缓慢。

(2)压应力可加速剥蚀的形成和扩展。喷丸强度越大,压应力越高,剥蚀形成和扩展越快。

(3)在允许喷丸强度范围内,喷丸强度越低、覆盖率越高,波音737CL龙骨梁下缘条打磨修理区域越不容易产生腐蚀。

本文共有参考文献18篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 小颖)