

发动机压气机铝合金叶片的喷丸防护

马晓峰

(海军驻西安地区航空代表室, 西安 710021)

摘 要: 通过对发动机压气机铝合金叶片断裂故障进行分析, 提出采取喷丸强化 + 涂漆工艺提高叶片应力腐蚀防护能力。研究了喷丸工艺和涂漆工艺对残余压应力的分布、松弛以及叶片的耐腐蚀性能和耐风砂性能的影响规律。结果表明, 叶片经喷丸和涂漆处理后, 耐腐蚀性能和耐风砂性能显著提高, 同时叶片的应力状态得到了有效改善。对防护工艺优化后的叶片进行装机试车考核, 考核通过后在叶片上未发现裂纹。

关键词: 压气机; 铝合金叶片; 应力腐蚀; 喷丸处理; 涂漆防护

中图分类号: TG175.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)03-093-04

Shot Peening-paint Process of Aluminum Alloy Compressor Blades of Certain Engine

MA Xiao-feng

(Navy Aviation Commissary Office Stationed in Xi'an Area, Xi'an 710021)

Abstract: Analyzing the rupture failure of compressor aluminum alloy blades of certain engine, a process of shot peening-paint has been brought forward to improve the stress corrosion resistance of the blades. The distribution and relaxation of residual stress influenced by the shot peening treatment and paint process have been studied. The corrosion and blast resistance of the blades treated with shot peening and paint process have also been investigated. The results show that the corrosion resistance and blast resistance of the blades is obviously improved. The stress state of the blades are also improved by treated with shot peening and paint process. The blades treated with optimum shot peening-paint routine are fitted in a trial run engine. After the trial running, there is no crack found on the blades.

Key words: compressor; aluminum alloy blades; stress corrosion; shot peening treatment; paint protection

0 引 言

发动机铝合金叶片的断裂是发动机在外场服役期间的主要故障之一。断裂造成发动机提前返厂, 严重地影响了部队的正常训练, 同时增加了发动机的维修成本。经过大量的失效分析和试验验证, 判定铝合金叶片的失效原因主要为应力腐蚀断裂。应力腐蚀通常都是在低于屈服极限的应力水平和腐蚀介质共同作用下产生的^[1], 为减少此类故障, 最直接、最经济的改进措施为改变叶片应力状态, 使叶片服役前承受一定的压应力, 同时对叶片进行腐蚀防护处理。

通过表面强化技术提高零件寿命早在 20 世纪 30 年代已经开始, 使用最多的是喷丸强化技术。喷丸强化是利用高速运动的弹丸流喷射材料表面并使其发生塑性变形的过程, 通过这一工艺处理, 合理地引入表面塑性变形层内的残余压

应力场, 从而有效地改善工件的疲劳性能和抗应力腐蚀等性能^[2-4]。如前苏联某型 1500 h 发动机 4、5、6 级铝合金 (LY2) 叶片均进行了喷丸处理; 英国罗·罗公司喷丸工艺说明书 RPS428 叙述了铝合金压气机叶片采用干喷或湿喷玻璃丸工艺方法。防止铝合金发生腐蚀的表面处理方法有很多, 其中油漆涂装因具有施工简便、适应性强、成本低廉等优点, 被广泛采用^[5], 如斯贝发动机铝合金叶片全部利用涂漆的方式进行腐蚀防护。文中针对某型发动机铝合金叶片, 研究了喷丸工艺对叶片应力状态的影响规律, 以及涂漆工艺对喷丸叶片应力松弛的影响, 以期确定优化的叶片应力腐蚀防护工艺。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

文中发动机 4、5、6 级铝合金叶片材料为 LY2 (化学成分见表 1), 其制造态的热处理工艺为:

(505 ± 5) $^{\circ}\text{C}$, 2 h/WC (水冷); (180 ± 5) $^{\circ}\text{C}$, 16 h/AC (空冷)。叶片在工作时承受振动应力、离心拉伸应力和气动弯曲应力,其服役状态如表 2 所示。

表 1 铝合金叶片材料的化学成分 (质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of aluminum alloy blades (w/%)

元素	Cu	Mg	Mn	Al	Fe
含量	2.6 ~ 3.2	2.0 ~ 2.4	0.45 ~ 0.7		≤ 0.3
元素	Si	Zn	Ti	其它	
含量	≤ 0.3	0.1	0.15	≤ 0.15	

表 2 铝合金叶片的工作状态
Table 2 Service status of the aluminum alloy blades

叶片等级	4 级	5 级	6 级
工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	70 ~ 96	110 ~ 144	147 ~ 182
承受压强/($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$)	1.71 ~ 2.24	2.41 ~ 3.14	3.24 ~ 4.07

1.2 喷丸工艺参数选择

喷丸工艺参数,包括喷丸介质、喷丸强度和喷丸覆盖率。压气机 4、5、6 级铝合金叶片表面粗糙度很小,排气边缘 R 最小为 0.15 mm,对于有色金属且型面较小的零件通常采用非金属丸,而不宜采用金属丸,因此研究选用喷丸介质为 BZ15-BZ25。依据《喷丸强化手册》^[6],选用 S-N (交变应力-断裂循环数)曲线比较法确定喷丸强度为 0.06 ~ 0.08A (0.18 ~ 0.24 N)。喷丸覆盖率即为在零件规定的喷丸部位上,弹痕占据的面积与要求喷丸强化的面积之间的比值,此试验覆盖率确定为 100%。

1.3 涂漆防护工艺参数选择

根据叶片的工作环境及叶片故障分析原因,在改变叶片应力状态的同时,还应提高叶片的耐腐蚀性能。在叶片原防护工艺的基础上,提出了以下两种防护系列:

(1) 喷丸 + 铬酸阳极化 + 涂敷 ES205。ES205 是环氧有机硅烘漆,该漆是斯贝发动机引进时的新漆种,现已被成功应用于某型发动机上。该漆多用于叶片,工作温度为 250 $^{\circ}\text{C}$,具有良好的耐风砂性能。但 ES205 涂敷时需在 (190 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 2 h,对经喷丸处理铝合金叶片有松弛应力的作用。

(2) 喷丸 + 铬酸阳极化 + 涂敷 H04-1。H04-1 (绿色)是环氧磁漆,适用于化工设备,国内厂家也将此漆用于压气机叶片。该漆可在常温下固化,或加温到 (120 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ 固化 2 h,在油漆涂敷过程中,对叶片的喷丸效果几乎没有影响。

1.4 试验测试方法

考虑到 6 级铝合金叶片断裂情况最多,工作温度最高,工作环境最差,因而整个试验中选取的都是 6 级叶片,其前处理过程为:铬酸阳极化 $\rightarrow$ 喷丸 $\rightarrow$ 铬酸阳极化 $\rightarrow$ 涂膜处理。利用 $\sin 2\psi$ 法测量不同喷丸及喷丸 + 热处理状态下叶片的残余应力的 大小。利用盐雾试验方法测量两种防护系列铝合金叶片的耐腐蚀性能。盐雾试验的试验条件为温度 35 $^{\circ}\text{C}$,5% NaCl 气雾。耐风砂测试的试验条件为温度 80 $^{\circ}\text{C}$,压力 0.3 kg/cm^2 ,砂重 30 g。

2 试验结果与分析

2.1 喷丸处理后叶片表面的残余应力

根据叶片的使用状态,将叶片分为 4 组,即未经喷丸处理 (空白)、喷丸、喷丸 + 190 $^{\circ}\text{C}/2$ h、喷丸 + 190 $^{\circ}\text{C}/2$ h + 180 $^{\circ}\text{C}/2$ h,采用 X 射线应力分析仪分别对每一组叶片进行残余应力测试,每个叶片在其表面不同的部位测试,共取 10 点,并取平均值,测试结果见表 3。

表 3 6 级铝合金叶片喷丸处理前后的残余应力
Table 3 Residual stress of the sixth grade aluminum alloy blades

叶片状态	未经处理	喷丸	喷丸 + 190 $^{\circ}\text{C}/2$ h	喷丸 + 190 $^{\circ}\text{C}/2$ h + 180 $^{\circ}\text{C}/2$ h
应力平均值/ MPa	-108	-250	-95	-74

空白叶片为机加抛光后的状态,测试结果表明:由于叶片表面经过了抛光处理,其表面具有一定的残余压应力。按前述工艺参数喷丸后的叶片,其表面残余压应力明显高于空白叶片。模拟经过涂漆处理 (烤漆温度/时间) 后的叶片,即喷丸 + 190 $^{\circ}\text{C}/2$ h,其表面残余应力较仅喷丸工艺下降了约 60%。喷丸 + 190 $^{\circ}\text{C}/2$ h + 180 $^{\circ}\text{C}/2$ h 的叶片是进一步模拟涂漆后叶片的使用状态,此状

态下叶片的表面残余应力又下降了约 20%, 残余压应力约为 74 MPa。

2.2 叶片表面残余应力的松弛

众多资料表明^[7-9], 喷丸的良好效果主要归因于在表面上或表面层中存在着残余压应力。因此零件在喷丸处理之后, 除特殊规定以外, 在一般情况下, 铝合金和镁合金不应超过 100 ℃, 以防止表面残余压应力发生大幅度松弛, 影响强化效果。某型发动机 6 级铝合金叶片最高工作温度达到 180 ℃, 因此只要喷丸叶片进行工作, 就会发生应力松弛。为此, 模拟叶片的工作状态, 对其喷丸后的应力松弛规律进行研究。

对已经过喷丸处理和涂漆防护处理(即喷丸 + 190 ℃/2 h)的 6 级铝合金叶片在 180 ℃下保温不同时间(4 h、8 h、16 h、30 h、62 h、98 h、152 h、190 h)后的表面残余应力如图 1 所示。从图中可以看出, 叶片在 180 ℃工作时 8 h 之后表面残余应力趋于稳定, 即 8 h 后残余应力的松弛幅度趋于平缓。喷丸处理后, 叶片表面发生了大量的塑性变形, 导致表铝合金叶片表面产生了大量的点缺陷及高密度位错, 使其处于热力学不稳定状态。根据回复理论, 180 ℃的温度相当于铝合金的中温回复过程。因此, 在升温初期, 通过点缺陷的运动, 释放部分应力, 随着温度的升高和保温时间的延长, 大量的位错被热激活而发生滑移, 导致喷丸产生的残余应力迅速释放。但由于该温度下, 位错不足以发生攀移, 因此当保温一定时间后, 位错的滑移基本完成, 残余应力值也便趋于稳定, 即残余应力的松弛幅度趋于平缓。

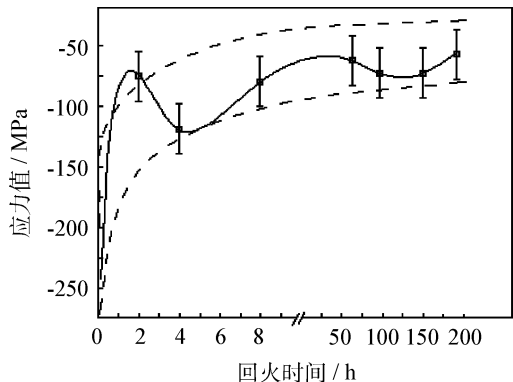


图 1 喷丸涂漆处理后的残余应力松弛试验结果

Fig. 1 Residual stress relaxation results of the sixth grade aluminum alloy blades with shot peening and paint

2.3 叶片深度方向上残余应力的分布

为优化叶片的防护工艺参数, 在研究其喷丸处理前后表面应力状态的基础上, 还需进一步分析其深度方向的应力状态。采用剥层法对空白、喷丸、喷丸 + 190 ℃/2 h 三种叶片(依次定为 1 号、2 号、3 号)残余应力在深度方向上的分布进行了测试, 结果如图 2 所示。

从图中可以看到, 1 号叶片(即未经处理叶片)表面残余应力达到约 -100 MPa, 随着深度增加, 残余压应力呈减小趋势, 到深度约 0.048 mm 时略有降低, 但整个曲线仍在喷丸叶片应力曲线上方。2 号叶片(即经喷丸处理叶片)在深度达到 0.014 mm 时, 应力为 -300 MPa, 随后的走向趋于向正值方向, 但仍在 1 号的下方, 即残余应力层深度大于 1 号, 残余应力值远大于 1 号。3 号(即经喷丸 + 涂漆处理叶片)介于两者之间。所以从整体残余压应力场状态看, 2 号优于 3 号, 3 号优于 1 号。这就验证了喷丸叶片在工作状态下虽有一定应力释放, 但总体残余压应力场状态优于未喷丸叶片。

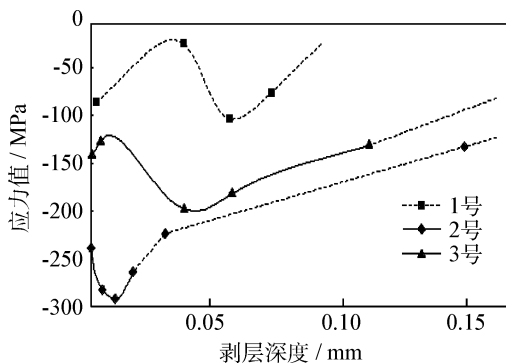


图 2 6 级铝合金叶片的残余应力在深度方向上的分布

Fig. 2 Residual stress distribution in depth direction of the sixth grade aluminum alloy blades

2.4 叶片涂漆防护后耐腐蚀性能和耐风砂性能

对两种防护系列(喷丸 + 铬酸阳极化 + 涂敷 ES205; 喷丸 + 铬酸阳极化 + 涂敷 H04-1)的铝合金叶片进行盐雾试验。试验结果(见表 4)显示盐雾试验约 1 000 h 开始出现腐蚀。两种防护系列耐腐蚀性能无差别。

表 5 所示为两种防护系列铝合金叶片的耐风砂性试验结果。从表 5 中可以看出, 涂敷 ES205 漆后涂层失重量非常小, 而涂敷 H04-1 漆

时经吹砂试验后涂敷层完全脱落以致露出基底,表明 ES205 漆的耐风砂性优于 H04-1 漆。

表 4 两种防护系列铝合金叶片的盐雾试验结果
Table 4 Salt mirage results of aluminum alloy blades treated by two kinds of protection series

防护方法	试验方法	试验结果
铬酸阳极化 + ES205	盐雾 (ASTM B117)	1000 h 内无腐蚀
铬酸阳极化 + H04-1	盐雾 (ASTM B117)	1000 h 内无腐蚀

表 5 两种防护系列铝合金叶片的吹砂试验结果
Table 5 Blast results of aluminum alloy blades treated by two kinds of protection series

防护方法	耐蚀涂敷层失重质量/g
铬酸阳极化 + ES205	测 3 次得平均值为 1.01×10^{-4}
铬酸阳极化 + H04-1	4 次试验涂层完全脱落,露出基底

综合考虑耐腐蚀性能和耐风砂性能试验结果,确定最佳防护系统为:铬酸阳极化 + 喷丸 + 铬酸阳极化 + 涂敷 ES205。

按上述工艺生产的 4、5、6 级压气机叶片装入某型发动机进行加速模拟长期试车考核,通过 216 小时 10 分 30 秒试车考核后,性能合格,分解荧光检查未发现叶片有裂纹。

3 结 论

(1) 叶片经喷丸和涂漆处理后能显著提高耐腐蚀性能和耐风砂性能,同时有效改变叶片应力状态为压应力。

(2) 经过喷丸的叶片在工艺过程中和使用过程中虽然残余压应力有一定的释放,但仍优于未喷丸的叶片。

(3) 采用优化的防护工艺后叶片装机试车考核,考核通过后在叶片上未发现裂纹。

参考文献

[1] 崔约贤,王长利. 金属断口分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.

[2] Sidhom N, Fathallah R, Braham C, et al. Lieurade fatigue strength improvement of 5083 H11 Al-alloy T-welded joints by shot peening experimental characterization and predictive approach [J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27: 729-745.

[3] AlObaid Y F. Effect of shot peening on stress corrosion cracking behaviour of 2205-duplex stainless steel [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 51: 19-25.

[4] 徐滨士, 韩文政, 姜厚温. 立竿见影的喷丸强化技术 [J]. 中国表面工程, 2000, 48(3): 46-48.

[5] 李长虹, 李 狄. 涂漆铝合金体系的腐蚀电化学研究方法 [J]. 航空工程与维修, 2001 (5): 21-23.

[6] 王仁智. 航空材料部 AFFD 系统工程. 喷丸强化手册 [M]. 北京: 航空航天, 1988.

[7] 王东道. 浅谈喷丸强化工艺 [J]. 铁道机车车辆工人, 2001(6): 1-3.

[8] 徐滨士. 表面工程的理论与维修 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[9] 航空工业部航空工艺研究所喷丸课题组. 喷丸技术国外标准资料汇编 [M]. 北京: 航空工业部第三〇一研究所, 1983.

作者地址: 海军驻西安地区航空代表室 710021
Tel: 136 0920 8372
E-mail: phdcjj@yahoo.com.cn

• 学术动态 •

《再制造技术与工艺》出版

由朱胜和姚巨坤编著的《再制造技术与工艺》介绍了再制造技术与工艺的概念内涵、技术特点、工程应用及发展方向,系统地构建了再制造技术与工艺体系,阐述了再制造技术与工艺的典型工程应用方法。具体内容包括再制造性设计与评价技术、再制造拆装技术与工艺、再制造清洗技术及工艺与检测技术、表面再制造加工技术与工艺、再制造机械加工技术与工艺、再制造产品试验和涂装技术与工艺、先进再制造工程管理与方法、智能化再制造技术等,对生产实践具有较强的指导意义。

《再制造技术与工艺》可供从事机械产品设计、制造、使用、维修、再制造、资源化的工程技术人员、管理人员、研究人员参考,也可作为机械维修、再制造、资源化等专业的教材。现已于 2011 年 1 月 1 日由机械工业出版社出版,定价 38 元。

(王文字 供稿)