

滚筒强化对 2D70 铝合金厚板表面应力以及组织和性能的影响

The Effect of Surface Strengthening by Revolving Canister on the Microstructure and Mechanical Properties of 2D70 Aluminum Alloy

蹇西昌, 杨守杰, 黄 敏, 戴圣龙
(北京航空材料研究院, 北京 100095)

QIAN Xi-chang, YANG Shou-jie, HUANG Min, DAI Sheng-long
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 2D70 铝合金是应用广泛的中强度铝合金, 为了消除材料经机加工后在表面形成的残余拉应力, 本工作研究了滚筒强化工艺对 2D70 铝合金厚板表面残余应力、表面形貌、高低频光滑疲劳性能及疲劳裂纹源的影响。结果表明, 滚筒强化处理在 2D70 试样表面造成了残余压应力, 但是同时也对试样表面造成某种程度的损伤, 对最终材料高、低频光滑试样的疲劳性能影响不大, 滚筒强化处理改变了疲劳裂纹的起源。

关键词: 2D70 铝合金; 表面强化; 疲劳; 残余应力

中图分类号: TG 146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2004) 10-0054-03

Abstract: In order to eliminate the stretch residual stress in surface of the 2D70 aluminum alloy, which has a medium strength and been widely used, the effect of surface strengthening by revolving canister on the microstructure and mechanical properties was studied. The emphases were on the surface residual stress, surface morphology, fatigue under high or low frequency and the origins of the fatigue cracks. The results showed that although the compress residual stress was obtained, some damages were also found in the surface after the samples were treated by revolving canister strengthening. The fatigue strength and life under high or low frequency were little influenced, but the origins of fatigue cracks were obviously altered by the processing of revolving canister strengthening.

Key words: 2D70 aluminum alloy; surface strengthening; fatigue; residual stress

滚筒强化的工作原理是利用松散的工作介质(立方体铝块)产生运动并撞击零件表面,使零件表面产生塑性应变层和获得残余压应力场,从而改善零件抗疲劳断裂性能和增加抗应力腐蚀能力,提高耐久性和可靠性。

大量的研究表明,疲劳裂纹往往起源于材料表面,其原因一般归结于材料经机加工后表面存在残余拉应力^[1]。为了在材料表面引入残余压应力,对材料进行表面强化是最常用的手段^[2]。2D70 铝合金的塑性高、强度中等,耐热性好,可在 150℃ 下长期工作,在飞机上主要用于制造隔框、梁、墙、壁板及桁条等受力结构件,为了提高零件的疲劳寿命,往往进行表面强化处理。

本研究主要针对工厂的现有实际条件,研究 2D70 铝合金零件的滚筒强化工艺,以保证在现有的技术条件下满足飞机制造和生产的要求^[3,4]。

1 实验材料与实验方法

所用材料为东北轻合金有限责任公司生产的 30mm 厚板,其化学成分见表 1。

表 1 材料的化学成分 (质量分数/%)
Table 1 The composition of the 2D70 aluminum alloy
(mass fraction/%)

| Element | Cu | Mg | Fe | Si | Ni | Ti | Al |
|---------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Content | 2.20 | 1.45 | 1.00 | 0.14 | 0.98 | 0.08 | Bal |

滚筒撞击强化实验在 JB 2-5 型箱式滚筒撞击设备上按 GB 1.4.009-84 标准执行。实验参数见表 2。

高频疲劳实验按 GB 3075-82 进行。实验设备为 PLG-100C 型 10t 高频拉压疲劳实验机,加载方式为轴向加载, $R = 0.1$, 加载波形为正弦波,频率为

105Hz。实验在室温、大气环境下进行。高频疲劳实验进行一组指定应力 (330MPa) 下的成组法实验和较低应力水平下的升降法实验。成组实验数据均根据变异系数 C_v 的计算来确定 95% 置信度的子样大小, 并满足置信度 $r = 95\%$ 、误差限度 $\delta = 5\%$ 的要求。升降法应力水平控制在 3~5 级范围, 应力增量的选择为 $\Delta\sigma$ 5%。

表 2 疲劳试片滚筒强化工艺参数

Table 2 The process parameters of surface strengthening by revolving canister

| No. | Rotating speed / (r · min ⁻¹) | Formal rotating time/min | Reverse rotating time/min | Intermittent time/min | Total time / h |
|-----|---|--------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | 16.4 | 15 | 15 | 2 | 2 |
| 2 | 16.4 | 15 | 15 | 2 | 3 |
| 3 | 16.4 | 15 | 15 | 2 | 4 |

低频疲劳实验按 GB6399-86 进行实验, 设备为 AG-250KNE 型实验机, 轴向加载, 应力比 $R = 0.1$, 实验频率为 0.167Hz。实验在室温、大气环境下进行。

滚筒强化前后试样的表面状态和疲劳断口均在 JSM-5600LV 型扫描电镜上观察。试片的表面残余应力在 MSF-2M 型 X 射线应力仪上测定, 采用 $\text{Cr K}\alpha$ 辐射。由于试片太薄, 只测得了试片的表面残余应

力。

2 实验结果与分析

2.1 表面应力

2D70 铝合金板材经滚筒强化后的表面残余应力分析结果如表 3 所示。从该实验结果看, 滚筒撞击强化在试样表面造成了表面压应力, 达到了滚筒撞击强化的目的。滚筒撞击时间为 2~4h, 表面压应力变化不大。

表 3 试样的表面残余应力分析结果

Table 3 The results of the surface residual stress

| | No strengthened | Strengthened for 2 hours | Strengthened for 3 hours | Strengthened for 4 hours |
|-----------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Residual stress / MPa | + 50 | - 144 | - 119 | - 149 |

Note: “-” compress residual stress; “+” stretch residual stress

2.2 组织分析

未经强化和经 4h 强化后试样的表面状态如图 1a、b 所示。图 1a 之所以显示出一些腐蚀后的特征, 是由于试样经过了化铣处理。从图 1b 可见, 滚筒撞击强化后, 试样表面粗糙度增加, 出现因表面塑性变形而形成的“挤压棱”。图 2 是图 1b 放大后的照片。从图 2 中可以更清楚的看出, 这些挤压棱多是由一些氧化

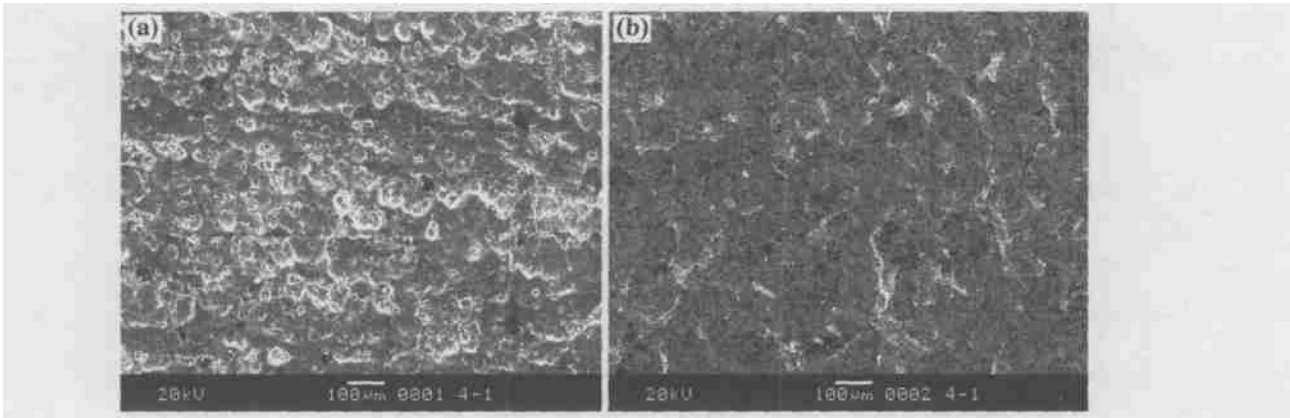


图 1 未强化 (a) 和 4h 强化 (b) 后试样的表面状态

Fig. 1 The morphology of the samples with no strengthened (a) and strengthened for 4 hours (b)

鳞片组成。

2.3 疲劳实验

2D70 铝合金的高频疲劳实验结果如表 4 和表 5 所示。从表中可以看出: 滚筒撞击强化后其疲劳寿命 N_{50} 和疲劳强度 σ_{50} 都比未强化的试样稍有降低; 滚筒撞击强化对 2D70 高频疲劳性能的影响与强化时间的长短关系不明显。这说明滚筒撞击强化对 2D70 合金高频光滑疲劳性能影响不大。

2D70 铝合金的低频疲劳实验结果见表 6。低频疲劳实验结果显示了与高频疲劳实验结果相同的趋势。这说明滚筒撞击强化对材料低频光滑疲劳性能影响不大。

从 2D70 铝合金的高频、低频光滑疲劳实验结果看, 滚筒撞击强化对 2D70 合金高、低频光滑疲劳性能影响不大。

2.4 疲劳断口分析

表 4 成组法确定的材料的疲劳寿命

Table 4 The fatigue life of 2D70 alloy

| State of the samples | No strengthened | Strengthened for 2 hours | Strengthened for 3 hours | Strengthened for 4 hours |
|---|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Fatigue life under 330MPa, $N_{50} / (10^3 \text{ cycles})$ | 132. 862 | 90. 678 | 80. 316 | 92. 704 |

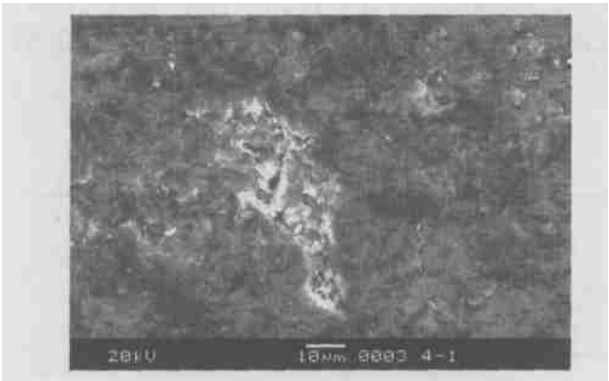


图 2 经 4h 强化试样表面状态的放大照片
Fig.2 The magnified photo of the sample that strengthened for 4 hours

疲劳断口分析的结果见图 3 和图 4。从图 3 可以看出, 未强化试样的疲劳源或出现于试样侧面的皮下裂纹, 或起源于内部裂纹。从图 4 可以看出, 强化试样的疲劳裂纹源都是起源于表面裂纹, 而且都是在试样的棱尖角处萌生。这说明, 经滚筒撞击强化后, 试样的表面会形成表面微裂纹, 而且在试样的尖角处裂纹更容易萌生, 这样, 在疲劳加载时, 强化后的试样因已存在微裂纹, 因此疲劳寿命或疲劳强度都稍有减低。

3 结论

(1) 滚筒撞击强化在 2D70 合金板材表面形成了

表 5 升降法确定的材料的疲劳强度

Table 5 The fatigue strength of 2D70 alloy

| State of the samples | No strengthened | Strengthened for 2 hours | Strengthened for 3 hours | Strengthened for 4 hours |
|--|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Fatigue strength under 10^7 cycles, σ_{50} / MPa | 235. 77 | 215. 79 | 212. 66 | 209. 79 |

表 6 材料的低频疲劳实验结果

Table 6 The low frequency fatigue life of 2D70 alloy

| State of the samples | No strengthened | Strengthened for 2 hours | Strengthened for 3 hours | Strengthened for 4 hours |
|---|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Fatigue life under 380MPa, $N_{50} / 10^3 \text{ cycles}$ | 33. 081 | 24. 242 | 25. 939 | 22. 888 |

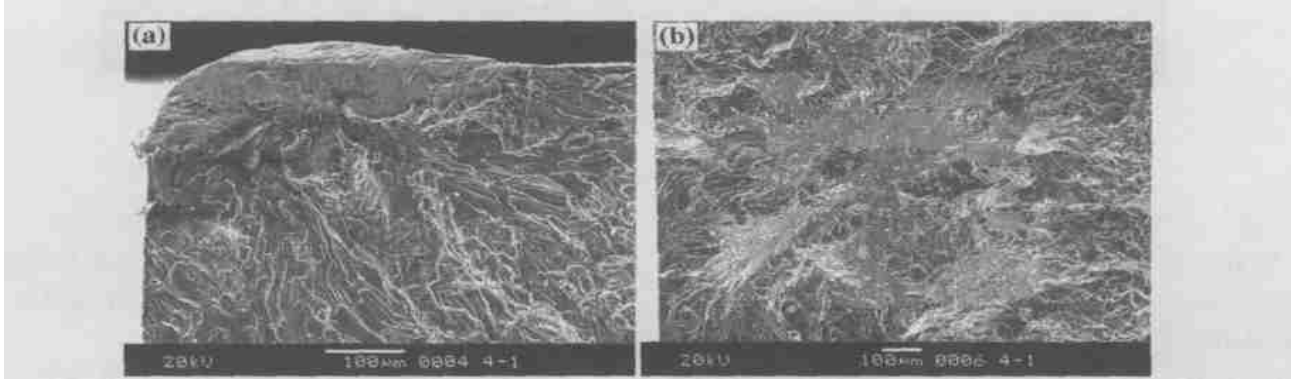


图 3 未强化试样的疲劳断口 (a) 边缘; (b) 内部
Fig.3 The fracture morphology of the samples with no strengthened (a) border; (b) internal

Metal and carbide coatings of ceramics particles using chemical plating techniques[J]. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1993, 40 (12): 1185-1189.

- [14] LEE Y F, et al. Effects of SiC reinforcement by electroless copper plating on properties of Cu / SiC composites [J]. Powder Metallurgy, 1999, 42 (2): 147-152.
- [15] LEONCA H E, DREWAL J M. Preparation of nickel coated powders as precursors to reinforce M C s [J]. J Mater Sci, 2000, (35): 4763-4768.
- [16] DELANNAY F, FROYEN L, DERUYTTEE A. Review the wetting of solids by molten metals and its relation to the preparation of metal matrix composites [J]. J Mater Sci, 1987, (22): 1111-1115.
- [17] KINDL B, et al. The control of interface and microstructure of SiC/Al composites by solgel techniques [J]. Composites Science and Technology, 1992, (43): 85-93.
- [18] CHEN Yu-jin, CAO Mao-sheng, XU Qiang, et al. Electroless nickel plating on silicon carbide nanoparticles [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 172: 90-94.
- [19] 邹正军, 刘君武. 化学镀法制备 SiC_p-Ni 复合粉体 [J]. 表面技术, 2002, 31 (5): 19-21.
- [20] 丁厚福, 等. 合金元素及 SiC_p 镀覆对铁基复合材料组织性能的影响 [J]. 矿冶工程, 2001, 21 (4): 73-76.
- [21] 李云平, 于澍, 李溪滨. 新型置换法制备 Ni 涂 SiC 颗粒 [J]. 中南工业大学学报, 2001, 32 (2): 161-164.
- [22] 李云平, 李溪滨. 涂覆颗粒增强耐热铝基复合材料 [J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31 (3): 184-186.
- [23] 张锐, 高濂, 虞玲, 等. 颗粒包覆纳米粉体的相分散性能分析 [J]. 无机材料学报, 2002, 17 (5): 1058-1062.
- [24] 张锐, 高濂, 虞玲, 等. 粒度分布对包覆颗粒相分散均匀性的影响 [J]. 无机材料学报, 2002, 17 (6): 1311-1314.
- [25] 余正国, 缪世群, 葛存旺. SiC 晶须的分散与涂覆工艺的研究 [J]. 江苏理工大学学报, 2000, 21 (2): 52-56.
- [26] SWINDLEHURST S J. Thermal treatment effects in SiC/Al metal matrix composites [J]. Journal of Materials Sci, 1994, 29 (4): 1075-1078.
- [27] QIN S. Temperature dependent Young's modulus of an SiC_w/Al₂O₃ composite [J]. Journal of Materials Sci, 1995, 30 (20): 5223-5226.
- [28] 黄新民, 吴玉程, 郑玉春, 等. 分散方法对纳米颗粒复合镀层组织及性能的影响 [J]. 电镀与精饰, 1999, 21 (5): 12-14.
- [29] 阳范文. 表面活性剂对化学复合镀层性能的影响 [J]. 材料保护, 2000, 33 (9): 12-13.
- [30] 李卫清, 董人瑞, 傅雅林, 等. 稀土元素化学镀镍工艺研究 [J]. 材料保护, 1998, 31 (7): 12-13.

基金项目: 科技部 863 专项课题 (2002AA305509)

收稿日期: 2004-04-25; 修订日期: 2004-08-25

作者简介: 宿辉 (1971—), 女, 讲师, 硕士, 现从事纳米材料技术的研究. 联系地址: 东北农业大学应用化学系 (150030)。

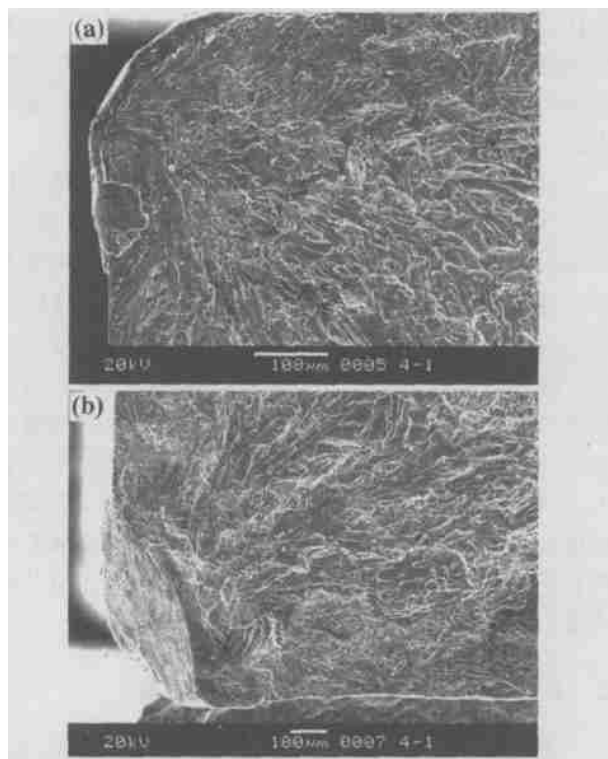


图 4 强化后试样的疲劳断口 (a) 强化 3h; (b) 强化 4h

Fig. 4 The fracture morphology of the samples with surface strengthened
(a) strengthened for 3 hours; (b) strengthened for 4 hours

表面压应力, 达到了滚筒撞击强化的目的。滚筒撞击时间为 2~4h, 表面压应力变化不大。

(2) 本实验条件下, 滚筒撞击强化处理对 2D70 铝合金厚板的高频和低频光滑疲劳寿命和疲劳强度影响不大。

(3) 未强化 2D70 铝合金试样的疲劳源或起源于皮下裂纹, 或起源于内部裂纹。滚筒强化后, 试样表面形成的“挤压棱”, 疲劳裂纹源都起源于这些棱尖角处。

参考文献

- [1] 张宝昌. 有色金属及其热处理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1993.
- [2] HIRSCH J, KARHAUSEN K F, LOCHTE L. Advances in industrial aluminum research and development [J]. Materials Science and Forum, 2002, 396-402: 1721-1730.
- [3] 金相图谱编写组. 变形铝合金金相图谱 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1975.
- [4] 中国航空材料手册编写组. 中国航空材料手册第三卷: 铝合金镁合金 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

收稿日期: 2004-03-02; 修订日期: 2004-07-15

作者简介: 蹇西昌 (1965—), 男, 高级工程师, 学士, 联系地址: 北京 81 信箱 71 分箱 (100095)。

* * * * *