

索道吊架失效原因分析

Failure Analysis of Hanger of Ropeway

张 崢, 陈赤囡, 钟群鹏 (北京航空航天大学材料科学与工程系, 北京 100083)
ZHANG Zheng, CHEN Chi-nan, ZHONG Qun-peng
(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 通过材料性能检测、金相组织检验和断口形貌分析, 确定了索道吊架失效是疲劳破坏。用有限元的方法计算了整个吊架的应力分布, 在此基础上用第二类疲劳图验证了索道吊架的失效模式。通过综合分析可以看出结构设计不合理导致了索道吊架的失效。
关键词: 吊架; 疲劳; 失效分析;
中图分类号: TG115.5⁺⁷ **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2001) 01-0045-02

Abstract: The analysis of materials and fracture appearance shows that the cracks on the hanger of ropeway are caused by fatigue failure. The stress state of the whole hanger is calculated by the finite element method. Then, the failure of the hanger of ropeway is also determined by the second fatigue chart. The conclusion is the improper design caused the failure of hanger of ropeway.
Key words: hanger; fatigue; failure analysis

某索道使用的进口吊架, 投入使用不到两个月, 发现有裂纹产生, 而且相同的四个位置中有三处发现了裂纹, 最长的一条裂纹有 30mm 长。为了减轻吊架重量, 提高索道的运力, 该吊架是由 3mm 的钢板和 4mm 的铝板制造而成的, 钢板与钢板之间焊接连接, 铝板与铝板之间和铝板与钢板之间采用铆钉连接。为了查明吊架裂纹产生的原因, 进行了材料性能检测、金相组织检验、断口分析和整个吊架的受力分析, 以确定其失效原因。

1 吊架材料检查

对吊架使用的钢材和铝材进行了检验, 重点对产生裂纹的铝材进行了检验, 主要进行了化学成分分析、拉伸性能测试和硬度测试。

1.1 化学成分分析结果

通过测试和与材料手册比较发现, 吊架使用的钢板为低合金钢 (16Mn), 铝板化学成分分析结果如表 1 所示。该铝材为 Al-Zn-Mg 系铝合金。

表 1 铝材化学成分分析结果

Table 1 Chemical composition of the Al alloy

元素	Zn	Mg	Mn	Cu	Cr
含量/ wt%	4. 40	1. 27	0. 29	0. 090	0. 090

2.2 拉伸试验结果

吊架使用的铝材厚度为 4mm, 外表面有油漆、内

表面有防腐涂层, 因此采用标准的 2.5mm 厚的板形拉伸试样进行测试, 试验结果如表 2 所示。

表 2 拉伸试验结果

Table 2 Test tension results

试样号	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ %	ψ %
T-1	306. 67	349. 34	9. 76	30. 32
T-2	317. 14	357. 72	10. 96	33. 62
T-3	303. 81	350. 96	12. 14	34. 55
均值	309. 21	352. 67	10. 95	32. 83

1.3 金相检查结果

金相检查显示, 材料组织比较均匀, 夹杂物含量和大小可以接受。通过对材料的检查, 没有发现钢材和铝材中有严重的冶金缺陷。

2 吊架断口宏微观形貌

去除表面油漆并清洗后, 其中一条裂纹的形貌如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 裂纹是由铝板的边缘起始的, 并沿着铝板弯折线向前扩展, 整条裂纹没有分叉, 并且没有发现明显的塑性变形痕迹。

断口表面用超声波清洗机进行清洗并用 AC 纸反复粘贴, 清洗干净后在 JSM-5800 扫描电镜中进行断口形貌的宏微观观察。通过观察发现, 整个断口表面由源区和扩展区组成, 裂纹起源于靠近铝板边缘涂

有防腐层的表面, 裂纹是多点起源的, 并且起源的位置没有发现冶金缺陷。放大倍数比较低时, 扩展区中可以看到明显的呈放射状的疲劳弧线和疲劳台阶, 如图2所示。当放大倍数比较高时, 扩展区中的疲劳条带清晰可见, 如图3所示。

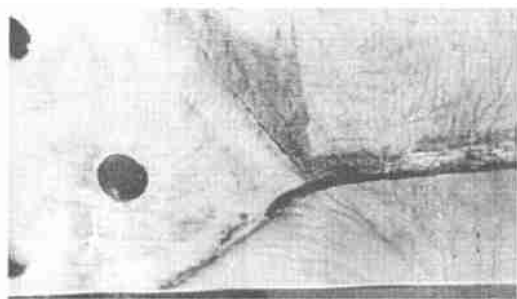


图1 裂纹的宏观形貌

Fig. 1 Macrograph of the crack

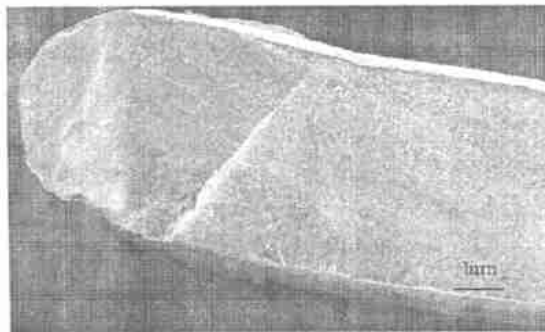


图2 断口宏观形貌

Fig. 2 Fracture appearance



图3 扩展区中的疲劳条带

Fig. 3 Fatigue striation in the propagation region

3 吊架应力计算

采用ABAQUS有限元计算软件进行吊架应力计算。应力计算时依据GB12352-90和GB/T 13676-92

的有关规定, 吊架和车厢主要承受主要载荷和次要载荷两种载荷。

根据实测的吊架尺寸, 分别计算了①只承受主要载荷和②客车摆动最大时, 同时考虑主要载荷、次要载荷和过载的影响这两种情况吊架各处受力情况。

最大应力分别为322MPa和412.7MPa。从两种情况的应力计算结果可以看出, 应力最大处就是吊架在运行中裂纹产生的部位。

4 吊架裂纹产生原因分析

两个吊架上相同的四处位置中有三处发现了长度不等的裂纹, 从此现象推测裂纹产生可能与设计或选材有关。在前面已经对材料和断口进行了分析, 以及用有限元计算整个吊架的应力分布的基础上, 查找裂纹产生的根本原因。

从材料的化学成分分析, 吊架主要使用16Mn和Al-Zn-Mg系铝合金制造而成, 从选材来看, 这两种材料都可以用来做承载结构。但是吊架上裂纹产生在铝板上具有弯折的地方, 并且起源于铝板的边缘(图1)。从吊架的结构分析, 此处可能是受力比较大的位置。

通过裂纹宏观分析和断口宏观分析发现, 裂纹源区比较平整, 没有腐蚀产物和冶金缺陷, 裂纹起源是多源的(源区呈一条线分布); 断口上扩展区中有疲劳弧线和疲劳条带存在, 断口上的这些特征可以说明吊架的失效模式是疲劳失效, 而且是在比较大的应力作用下产生的, 即吊架的破坏是大应力疲劳破坏。

吊架有限元计算显示, 无论是只考虑主要载荷, 还是承载最危险的情况下, 裂纹产生的位置都是吊架应力最大的位置, 而且应力值高达322MPa和412.7MPa。从力学性能测试、硬度测试和金相检查的结果看, 铝材的屈服强度平均为309.21MPa, 抗拉强度平均为352.67MPa, 显然在承受如此高的载荷的情况下, 选用这种铝合金, 是不能满足吊架的使用要求, 更不能满足安全系数要达到5的要求^[1]。

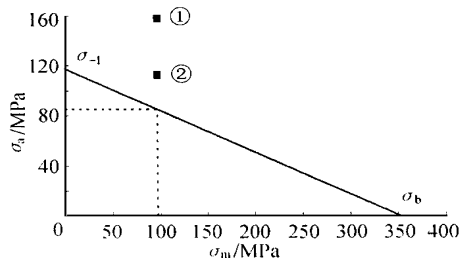


图4 吊架第二疲劳线图

Fig. 4 The second fatigue chart of the hanger

基体中发现大量弥散分布的 Heusler 相 (如图 2b 所示), 也有助于合金性能的提高。

一般说来, 定向凝固共晶合金的强度是由第二相控制的^[6], Cr (Mo) 相存在的形貌和共晶间距都能影响合金的强度, NiAl 和 Cr (Mo) 半共格界面上存在的位错网也能提高强度, 如图 4 所示。

界面位错网对合金的强化效应可用下式来估算:

$$f = \frac{G\Delta b}{2\pi b} \quad (3)$$

其中 G 是剪切模量, b 是界面位错的 Burgers 矢量, Δb 是 NiAl 和 Cr (Mo) 两相的晶格常数差。因为 NiAl 中 $\langle 001 \rangle$ 型位错是最稳定的位错, 所以界面位错的柏氏矢量 b 大小为 0.2887nm , G 取 NiAl 的 $\langle 111 \rangle$ 取向的剪切模量 44.5 , Δb 为 0.0055nm , 代入以上数据得出, 界面位错网的强化效应 = 0.135GPa , 说明界面位错网可在一定程度上提高合金的强度。

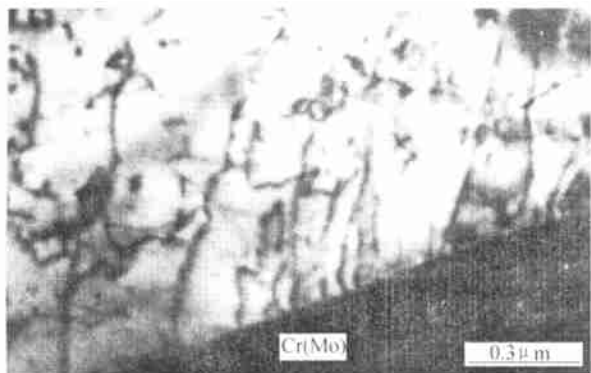


图 4 NiAl 中的位错被钉扎在 NiAl/Cr (Mo) 相界面上

Fig. 4 The dislocation pinned at NiAl/Cr (Mo) interface in NiAl phase

3 结论

(1) 定向凝固态 NiAl-28Cr-5.5Mo-0.5Hf 合金的组织是由 NiAl (β) 相, 层片状 Cr (Mo) 相和不连续分布的 Heusler 相组成, 在 NiAl/Cr (Mo) 相界附近区域存在 Heusler 相和方型 G 相。

(2) HIP 处理后, 合金在 NiAl/Cr (Mo) 相界上的 Heusler 相减少, G 相消失。

(3) 定向凝固 NiAl-28Cr-5.5Mo-0.5Hf 合金具有优异的高温力学性能, 弥散强化和固溶强化是其高温力学性能提高的主要原因。

参考文献

- [1] Bowman P R, et al. Metall Trans, 1995, 26A: 615.
- [2] Liu C Y, et al. Mater Sci Eng, 1995, A191: 49.
- [3] Chiu H P, et al. Mater Sci Eng, 1995, A203: 81.
- [4] Cline H E, et al. Metall Trans, 1971, 2 (1): 189.
- [5] Cline H E, et al. Metall Trans, 1970, 1 (10): 2907.

- [6] Johnson D R, et al. Intermetallic, 1995, 3 (1): 99.
- [7] Darolia R. JOM, 1991, 43 (3): 44.
- [8] Darolia R, et al. In: Nathal M V, et al ed, Structural Intermetallics 1997. The Minerals, Metals and Materials Society, 1997: 585.
- [9] 崔传勇, 郭建亭. 金属学报, 1999, 35 (5): 477.
- [10] Locci I E, et al. J Mater Res, 1996, 11: 3024.
- [11] Grag A, et al. Acta Metall Mater, 1996, 44 (7): 2809.
- [12] Jiang D T, Guo J. T Mater Lett, 1998, 36 (7): 33.
- [13] Takeyama M, Liu C T. J Mater Res, 1990, 5: 1189.
- [14] Xing Z P, et al. Metall Trans, 1997, 28A, 1079.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59895152) 和国家 863 (715-005-0030) 资助项目

收稿日期: 2000-03-20; 修订日期: 2000-07-17

作者简介: 崔传勇 (1972-), 男, 博士研究生。联系地址: 中国科学院金属研究所六室 (110015)。

本文编辑: 孙常青

(上接第 46 页)

简化了的第二疲劳图比较直观地显示了吊架再承受这样高的载荷疲劳失效的可能性^[2] (图 4)。对于铝合金来说, 其疲劳极限 σ_{-1} 大约为强度 σ_b 的三分之一, 即 117.56MPa 。吊架工作时所承受的平均应力大约为 97.2MPa , 这时所能承受的最大应力幅为 85.2MPa , 因此, 无论是只考虑主要载荷①时, 还是同时考虑主要载荷、次要载荷和过载的影响②时, 吊架所承受的交变应力半幅都很大, 即使是安全系数取 1 的情况下, 也落在了疲劳失效区中, 发生疲劳失效。

从吊架应力计算和强度测试结果可以看出, 在应力最大的位置, 选择强度水平比较低的铝合金, 显然不合适; 另外吊架使用的铝合金的疲劳极限也比较低, 正常工作时承受较大的交变应力半幅, 必然会产生疲劳裂纹。

5 结论

- (1) 吊架失效位置应力较大。
- (2) 吊架失效模式为大应力疲劳破坏。
- (3) 吊架上的裂纹是由于设计不合理导致的。

参考文献

- [1] 周新年. 架空索道理论与实践 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1996
- [2] 钟群鹏, 田永江. 失效分析基础知识 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990

收稿日期: 2000-10-10

作者简介: 张峥 (1965-), 男, 副教授。联系地址: 北京航空航天大学材料系 (100083)

本文编辑: 孙常青