

Fatigue Characterization of Comeld Joints

Panpan Bao, Wei Li, Wanchao Sun

China Aircraft Strength Research Instruction, Xi'an Shaanxi
Email: 511128133@qq.com

Received: Feb. 27th, 2019; accepted: Mar. 13th, 2019; published: Mar. 21st, 2019

Abstract

Aiming at the fatigue problem of Comeld joints, the fatigue characteristics of Comeld joints were studied, and the fatigue characteristics and failure modes of Comeld joints under different fatigue load levels were analyzed. The results show that the fatigue life of Comeld joints is mainly limited by the fatigue life of metal burrs. For the selected materials and configurations, the number of fatigue loads reaches 1×10^6 times, and the corresponding load level is 25% of the strength limit.

Keywords

Comeld Joints, Fatigue Life, Nondestructive Examination, Fatigue Stiffness

电子束毛化连接件疲劳特性分析

鲍盘盘, 李 巍, 孙万超

中国飞机强度研究所, 十三室, 陕西 西安
Email: 511128133@qq.com

收稿日期: 2019年2月27日; 录用日期: 2019年3月13日; 发布日期: 2019年3月21日

摘 要

针对金属/复合材料电子束毛化连接的疲劳问题, 本文进行了金属/复合材料电子束毛化连接试验件的疲劳特性研究, 分析了不同疲劳载荷水平下毛化接头的疲劳特性和破坏模式。研究结果表明毛化连接件的疲劳寿命主要受限于金属毛刺的疲劳寿命, 对所选的材料及构型, 其疲劳载荷次数达到 1×10^6 次, 对应的载荷水平为强度极限的25%。

关键词

毛化连接, 疲劳寿命, 无损检测, 疲劳刚度

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

复合材料的构件无论在重量以及成本上, 都在飞机制造中占有较大的分量; 同时复合材料的连接区常常是容易发生问题的部位, 这些位置只要发生故障或者破损, 很有可能会造成严重的后果, 因此复合材料的连接方式非常重要[1] [2] [3]。新型的预埋连接技术——Comeld 连接技术, 它的技术关键是将复合材料与经电子束毛化表面处理后的金属接头通过复合材料固化连接在一起。阳灿、胡孝才、王西昌等[4]-[9]在毛化接头的制造技术及接头性能方面做了很多研究, 研究表明电子束“毛化”预埋接头与传统的连接方式相比, 不仅能够承受更高的载荷, 而且可以在破坏前吸收一定的能量, 具有较好的韧性。陈普会、刘湘云等[10] [11]通过有限元建立了毛化接头的宏细观分析模型, 结果表明, 毛刺分布密度越大毛化区域弹性模量越大, 毛刺高度较小时毛化区域面内弹性模量较大、剪切模量较小、90°铺层比例对毛化区域弹性力学性能影响较大。

然而工程应用中除了静强度特征, 结构的耐久性损伤容限性能也是一个重点考核指标, 但是目前国内关于金属毛化接头疲劳特性研究的公开资料很少, 本文旨在针对不同疲劳载荷水平下金属/复合材料电子束毛化连接接头的疲劳特性和破坏模式进行分析, 为实际工程应用提供一些有益的技术探索与支持。

2. 研究对象分析

金属/复合材料电子束毛化连接试验件结构形式为单台阶双搭接, 金属部分材料为 TC4 钛合金, 复合材料部分为 HexPly®8552 (环氧)/IM7 单向带, 单层厚度为 0.25 mm。带毛刺的金属件与复合材料铺层压实后共固化成型, 试验件几何形状及典型尺寸如图 1 所示。采用电磁场对电子束进行复杂扫描技术在金属件的搭接面上制造毛刺, 如图 2 所示。

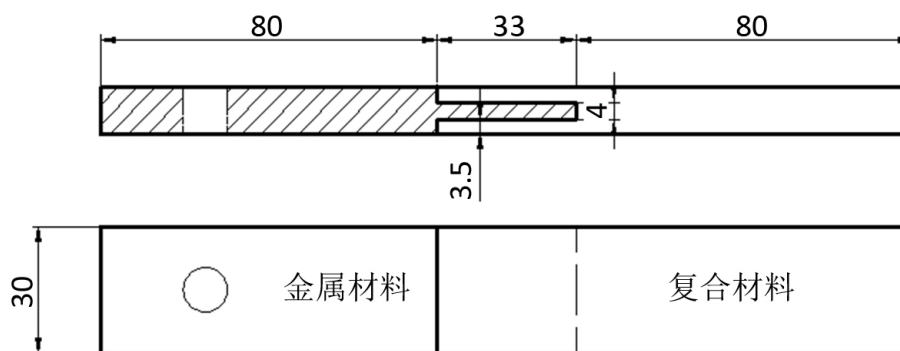


Figure 1. Shape and typical dimensions of sample

图 1. 试验件外形及典型尺寸

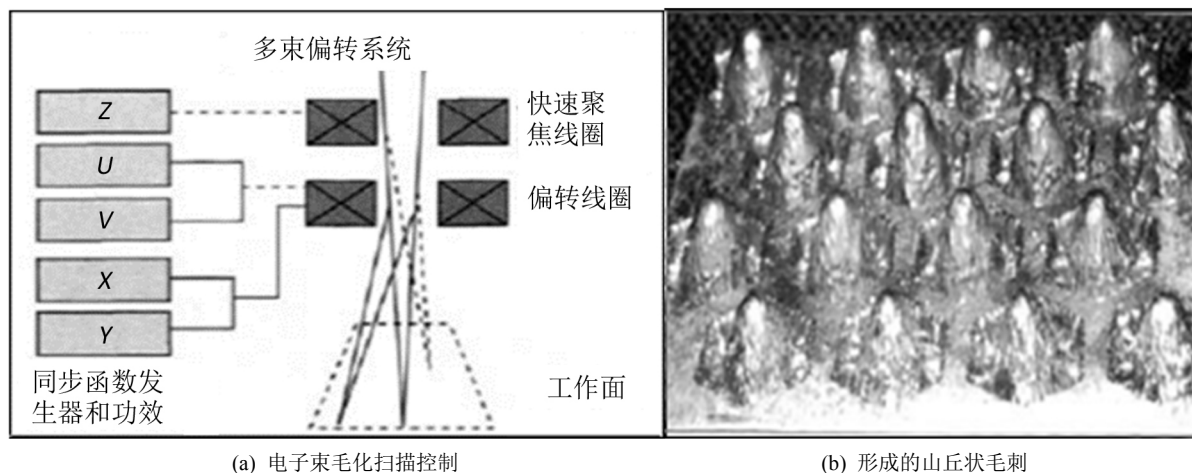


Figure 2. Sketch map of surface texturing on metal surface
图 2. 金属表面毛化示意图

3. 试验方案设计

试验载荷采用等幅正弦谱，应力比 $R = 0.1$ ，加载频率为 5 Hz。拉-拉疲劳试验状态如图 3 所示。



Figure 3. Test status
图 3. 试验加状态

通过静力试验获得连接件的强度极限为 70 kN，为了研究不同载荷水平下毛化接头的疲劳特性，选取十级应力水平进行分析，疲劳载荷水平为：60.0 kN (强度极限的 85%)、49.0 kN (强度极限的 70%)、42.0 kN (强度极限的 60%)、35.0 kN (强度极限的 50%)、31.5 kN (强度极限的 45%)、28.0 kN (强度极限的 40%)、24.5 kN (强度极限的 35%)、21.0 kN (强度极限的 30%)、17.5 kN (强度极限的 25%)、14.0 kN (强度极限的 20%)。

疲劳过程中每完成一定加载循环后，通过无损检测方法获得试验件的损伤变化情况，探究毛化连接的损伤演化过程。

如图 4 所示，在连接区域的外表面背对背的粘贴两个应变计，疲劳过程中持续监测连接区的应变变化。

疲劳过程中每完成一定加载循环后，通过红外温度计检测连接区域的温度变化情况，探究连接区域内金属毛刺与复材之间摩擦产生的温度变化，以探索疲劳寿命是否受该结构形式产生的温度影响。

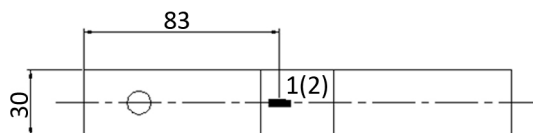


Figure 4. Patch map of sample

图 4. 试验件贴片图

4. 疲劳试验结果与分析

4.1. S-N 曲线

通过 10 级载荷水平，14 个试验件的疲劳试验获得了毛化连接接头的疲劳 S-N 曲线，见图 5。

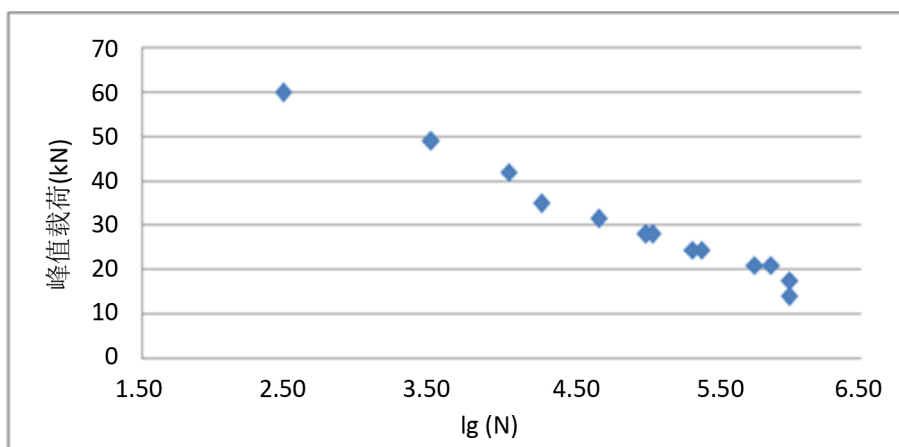


Figure 5. S-N curve

图 5. S-N 曲线

疲劳的破坏模式主要有四种，载荷水平 60 kN 时，典型破坏模式见图 6，主要为复材层间破坏；载荷水平在 31~49 kN 时，破坏模式见图 7，为复材层间破坏及毛刺根部剪切破坏的混合模式；载荷水平在 21~28 kN 时，典型破坏模式见图 8，为毛刺根部剪切破坏。



Figure 6. Typical failure state at 60 kN fatigue peak load

图 6. 疲劳峰值载荷 60 kN 时破坏典型状态



Figure 7. Typical failure state under fatigue peak load of 31 - 49 kN

图 7. 疲劳峰值载荷 31~49 kN 时典型破坏状态

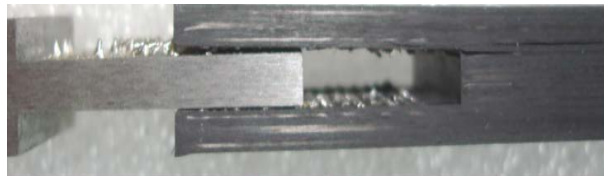


Figure 8. Typical failure state under fatigue peak load of 21 - 28 kN

图 8. 疲劳峰值载荷 21~28 kN 时典型破坏状态

4.2. 无损检测结果

试验前，所有试验件进行无损检测，均未发现损伤。

试验中对试验件进行无损检测，所有试验件均未检测到金属与复合材料毛刺连接面的脱粘情况，连接试验件中复合材料部分在与金属连接的界面处检测到分层损伤，典型的损伤演化过程见图 9~图 11。

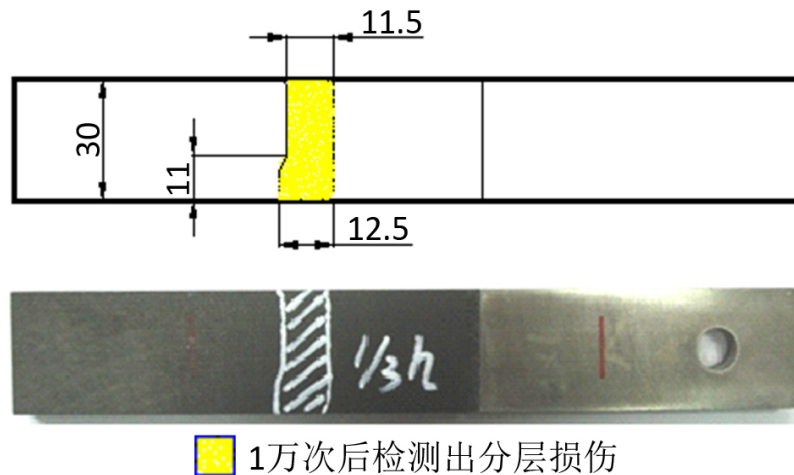


Figure 9. 42 kN NDT results

图 9. 42 kN 无损检测结果

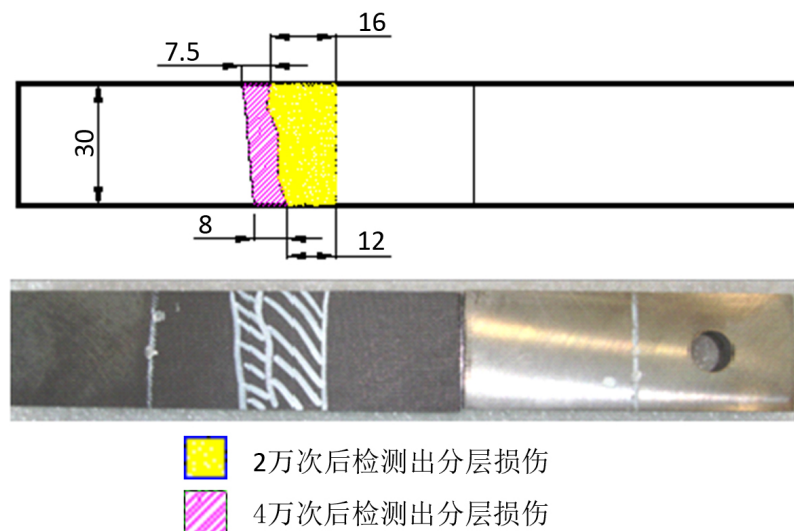


Figure 10. 31.5 kN NDT results

图 10. 31.5 kN 无损检测结果

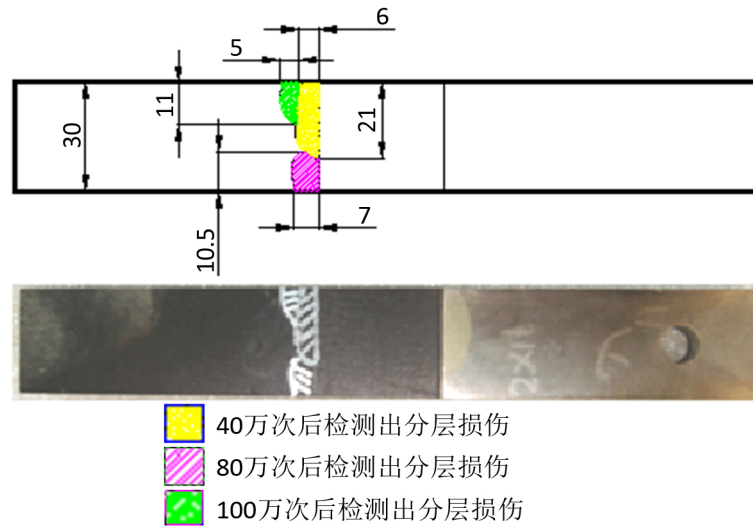


Figure 11. 17.5 kN NDT result
图 11. 17.5 kN 无损检测结果

4.3. 刚度监测结果

疲劳过程 1×10^6 未破坏的载荷水平 17.5 kN，应变监测结果见图 12，整个过程中刚度未发生变化。

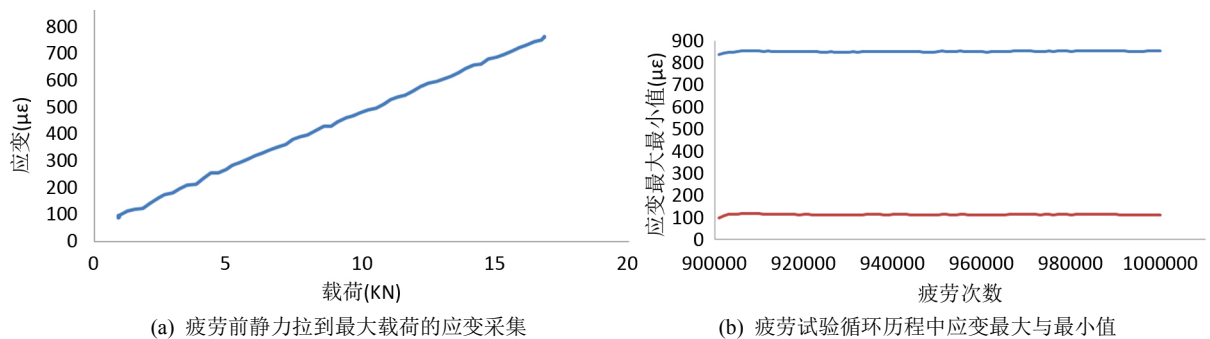


Figure 12. Stiffness monitoring at peak fatigue load of 17.5 kN
图 12. 疲劳峰值载荷 17.5 kN 时的刚度监测

疲劳峰值载荷 21 kN (对应的疲劳破坏次数为 750,333 次)的刚度监测结果见图 13。试验件刚度下降发生在疲劳破坏前很短的区域内，表面毛刺疲劳最后阶段的断裂过程很快。

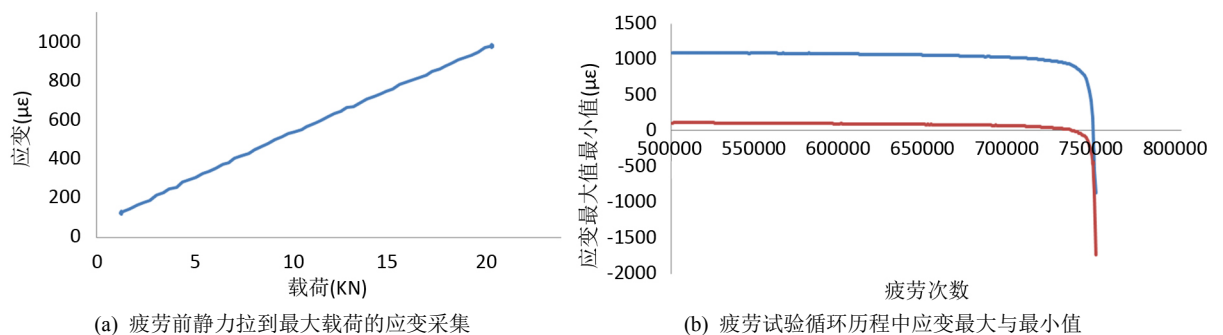


Figure 13. Stiffness monitoring at 21 kN fatigue peak load
图 13. 疲劳峰值载荷 21 kN 时的刚度监测

4.4. 温度监测结果

用红外电子温度计对试验件进行温度记录，典型结果见表 1。所有试验件在疲劳试验过程中连接区域为发生温度变化，表明毛刺和复合材料的界面粘接性能很好(图 14)，疲劳过程中不会产生摩擦生热的情况。

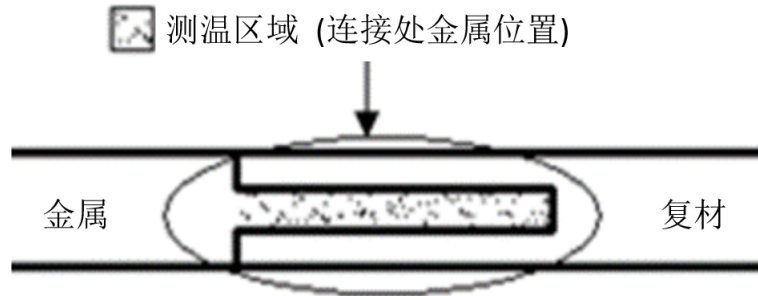


Figure 14. Temperature measurement area
图 14. 测温区域

Table 1. Temperature monitoring of test pieces
表 1. 试验件温度监测

载荷水平	温度记录
49 KN 疲劳次数 3224	试验开始: 24.1℃~24.5℃; 破坏时: 24.3℃~24.8℃。
31.5 KN 疲劳次数 47,366	试验开始: 20.1℃~20.6℃; 1 万次: 20.9℃~21.0℃; 2 万次: 20.6℃~20.9℃; 破坏时: 20.8℃~21.2℃
24.5 K 疲劳次数 245,728	试验开始: 24.1℃~24.5℃; 2 万次: 23.9℃~24.5℃; 破坏时: 24.1℃~24.9℃;

5. 结论

通过本次研究，得到电子束毛化连接件疲劳特性方面的结论如下：

- 1) 破坏模式会随载荷水平不同发生转变。疲劳载荷较大时，达到 60 kN，试验破坏模式为复合材料层间破坏；疲劳载荷较低时，降到 21 kN，试验破坏模式为毛刺根部剪切疲劳断裂。位于中间应力水平的疲劳试验件，一般能同时观测到复合材料层间破坏与毛刺根部疲劳断裂破坏模式。
- 2) 毛化连接件的疲劳寿命主要限制于金属毛刺的疲劳寿命，对所选的材料及构型，其疲劳载荷次数达到 1×10^6 次，对应的载荷水平为静强度的 25%。
- 3) 从无损检测结果看，对于任何试验件，复合材料沿与金属连接毛刺的连接区域界面的界面处都出现分层现象，分层的面积与疲劳载荷水平相关，分层面积随着疲劳寿命的增加而扩展。
- 4) 从疲劳过程中的刚度监测情况看，试验件刚度下降发生在疲劳破坏前很短的区域内，表面毛刺疲劳最后阶段的断裂过程很快。
- 5) 从疲劳过程中的温度监测情况看，试验件在疲劳试验过程中连接区域未发生温度变化，表明毛刺和复合材料的界面粘接性能很好，疲劳过程中不会产生摩擦生热的情况。

基金项目

民机科研项目:复合材料集中受载接头设计, 制造与验证技术。编号: MJ-2014-F-07。

参考文献

- [1] 黄领才, 刘秀芝. 现代大飞机复合材料应用与制造技术浅析[J]. 航空制造技术, 2008(10): 46-48.
- [2] Smith, F.C., Buxton, A.L. and Dance, B.G.I. (2007) Developments in Manufacture and Characterization of Comeld Joints. UN, TIVI.
- [3] Buxton, A.L. and Dance, B.G.I. (2005) Surf-Sculpt, Revolutionary Surface Processing with an Electron Beam Proceedings. *4th International Surface Engineering Congress*, St Paul, Minnesota, USA, 1-3 August 2005.
- [4] 胡孝才, 王文贵, 余伟. 表面处理工艺对复合材料与金属连接性能的影响[J]. 高性能复合材料结构制造技术, 2007(增刊): 34-36.
- [5] 杨明江, 彭林华, 李正阳. YAG 激光毛化技术进展[J]. 应用激光, 2002, 22(3): 323-326.
- [6] 吴长春, 张杰, 陈先霖, 等. EDT 毛化轧辊表面凹坑形成过程[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(1): 59-62.
- [7] 曹同辉, 赵万生, 王振龙, 等. 冷轧辊毛化技术的对比研究[J]. 电加工与模具, 2002(4): 1-5.
- [8] Wang, X.C.J. (2016) Characterization of Composite-Titanium Alloy Hybrid Joints Using Digital Image Correlation. *Composite Structures*, **140**, 702-711. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.023>
- [9] 阳灿, 曹正华, 胡孝才. 表面处理工艺对复合材料与金属连接性能的影响[J]. 航空制造工程, 2009(增): 136-138.
- [10] Li, N. and Chen, P.H. (2015) A Micro-Macro Finite Element Model for Failure Prediction of Comeld TM Joints. *Composites Science and Technology*, **117**, 334e341.
- [11] 刘湘云, 陈普会, 马维. 复合材料-金属毛化接头的失效预测模型[J]. 2015, 36(1): 55-62.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org