

文章编号: 1000-8055(2007)02-0327-05

高温合金焊接接头应力分析与 疲劳寿命预测

罗 刚¹, 范引鹤¹, 梁尤疆²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 沈阳航空发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对航空喷气发动机机匣上安装座的焊接结构, 建立了对接焊、错位对接焊、不等厚对接焊、新材料对接焊等 4 种焊接结构的有限元分析模型, 利用 ANSYS 软件进行了应力分析, 得到了 4 种焊接接头的应力集中系数; 用“成组对比实验方法”进行了上述 4 种焊接结构的应力疲劳试验验证, 预测了它们的寿命区间. 疲劳试件的扫描电镜 (SEM) 断口分析表明, 应力集中区域的焊接缺陷是影响疲劳寿命最主要的因素.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 高温合金; 焊接接头; 有限元; 应力集中系数; 疲劳

中图分类号: V231. 95

文献标识码: A

Stress analysis and fatigue life estimation of four kinds of super-alloy welded joints

LUO Gang¹, FAN Yin-he¹, LIANG You-jiang²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shenyang Aeroengine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In accordance with the welded structures on the mount-box of jet engine case, the finite element model (FEM) models of four kinds of welded joints including normal butt welding, dislocation butt welding, non-isopachous butt welding and new material butt welding are established. Stress analysis of these butt welding's is carried out by means of the finite element analysis software ANSYS, and the stress-concentration-coefficient of the four welded joints is obtained. The stress fatigue tests are implemented on the four kinds of butt welding pieces. The experimental results are analyzed and compared using the method of group comparison, and the fatigue life for the four kinds of butt welding is predicted. The result of the scanning electron microscope (SEM) fracture analysis indicated that the deflection in the stress-concentrated area is the dominant factor to affect the fatigue life of the weld-joint.

Key words: aerospace propulsion system; super-alloy; weld joint; finite element; stress-concentration-coefficient; fatigue

现代航空喷气发动机机匣表面的安装座大多通过对接氩弧焊焊接于机匣上, 在起飞、降落和机动飞行时普遍存在着低频振动, 使焊缝处承受着严重的交变载荷. 由于材料选择、焊接工艺等方面

的诸多原因, 这种焊接构件的疲劳寿命成为航空发动机重要的研究课题^[1-4]. 本文通过有限元法分析了不同结构和材料的焊接接头的应力集中系数, 进行了焊接接头的疲劳试验, 分析了焊接缺陷

收稿日期: 2005-12-23; 修订日期: 2006-05-12

作者简介: 罗刚(1980-), 男, 江苏无锡人, 南京航空航天大学能源与动力学院硕士生, 主要从事航空发动机结构强度振动研究.

对疲劳强度的影响,预测了疲劳寿命区间,为机匣表面的安装座的材料选择、改进焊接工艺和采用新的结构寻求理论依据,从而提高飞行器焊接结构的疲劳寿命提供指导.

1 试验材料和试验方法

本文的研究中试件模型涉及 4 种材料,分别为作为母材的 GH150, GH3030, GH4033 和作为焊丝的 GH3128. 它们均为性能优良的高温变形合金.

试样材料中的 GH150, 是以钨、铝等元素固溶强化和钛、铝、铌时效强化的镍-铁-铬基高温合金. GH3030 是以镍-铬为基, 加入 Al 和 Ti 的高温合金. GH4033 是以镍为基, 加入少量 Nb, 调整 Al 和 Ti 的含量, 再加入微量 Mg 和 Zr 改善综合性能, 是优良的叶片材料^[5], 本试验中将 GH4033 作为焊接构件的新材料.

试验采用 4 种不同的焊接方案, 分别为 GH150 与 GH3030 的正常焊接、2 种错位焊接及 GH150 和 GH4033 的正常焊接方案. 结合疲劳试验要求, 试件长 160 mm, 两端宽度 30 mm, 焊缝宽度 15 mm, 板厚 2 mm, 用氩弧焊对接而成. 本实验所建模型分别取焊缝高度为 0.5 mm 和 1 mm. 疲劳试样如图 1 所示.

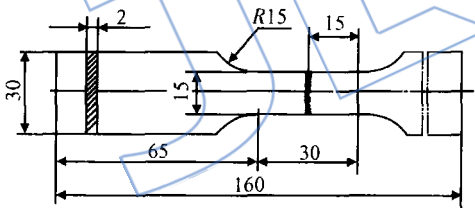


图 1 疲劳试样图

Figure 1 Illustration of the fatigue test specimen

4 种疲劳试件的材料组成分别为:

正常对接焊: GH3030 + GH3128 + GH150

错位对接焊: GH3030 + GH3128 + GH150

不等厚对接焊: GH3030 + GH3128 + GH150

新材料对接焊: GH4033 + GH3128 + GH150

焊接试样的疲劳试验寿命的获取在液压伺服低频疲劳试验机 EHF-EC250 KN-40L 上进行, 应力水平分别设定为 600 MPa 和 520 MPa, 每个应力水平下选取 6 个试件, 疲劳载荷采用轴向拉-拉应力控制, 正弦波脉动加载, $f = 4.5 \text{ Hz}$, $R = 0.1$. 记录循环次数, 宏观检查疲劳断裂的发生部位; 疲劳断口的微观分析在 JXA-840 扫描电镜上进行.

本文采用 Ansys 软件^[6], 计算了焊接接头及其缺陷产生的应力集中系数; 对后 3 种试件的疲劳寿命与正常情况下的疲劳寿命作对比分析, 验证分析结果.

2 有限元模型分析

2.1 材料基本参数

实验所用的材料属性见表 1.

表 1 试验材料的弹性模量和泊松比

Table 1 Basic data for test materials

试验材料	弹性模量/ GPa	泊松比
GH150	201	0.3
GH3030	191	0.3
GH4033	221	0.3
GH3128	208	0.3

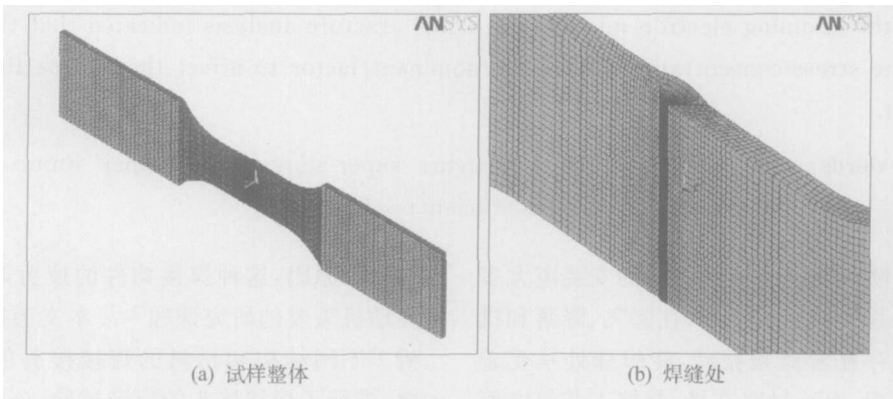


图 2 疲劳试件的网格划分

Fig. 2 Meshing division of the fatigue test specimen

2.2 有限元模型

2.2.1 单元选择

将试件模型作为实体来处理,选取体单元 SOL IDE45^[7].

2.2.2 网格划分

为使网格规则划分,采用映射划分方式,得出 一套较为合理的网格划分方案见图 2. 最终生成 具有 30 750 个单元 的模型.

2.2.3 约束及载荷的施加

在试件左边面上的所有共 186 个节点上施加 约束,限制它们在所有方向上的自由度. 载荷在焊 缝处要求为 600 MPa 的纯拉伸,因此在右边面的 186 个节点上作用纯拉力,4 个顶点为 48. 387 097 N,其余节点为 96. 774 194 N.

2.3 计算结果与分析

将焊接接头的应力集中系数定义为 K_T ,将 焊接接头处出现的最大应力值定义为 $\sigma_{\max}$,将控 制的名义应力定义为 S ,则应力集中系数 K_T 为:

$$K_T = \frac{\sigma_{\max}}{S}$$

(1)

在本实验中, $S = 600$ MPa.

(1) 焊缝高度 $h = 0.5$ mm

计算结果见表 2.

表 2 焊缝高度 $h = 0.5$ mm 时焊根/焊趾的应力集中系数
Table 2 Stress concentration coefficient of weld root/ toe
(Height of the weld seam :0. 5 mm)

焊接方式	$\sigma_{\max}$ / MPa	K_T
正常对接焊	874/ 779	1. 457/ 1. 298
错位对接焊	1860/ - 171	3. 1/
不等厚对接焊	832/ 650	1. 387/ 1. 083
新材料正常对接焊	884/ 788	1. 473/ 1. 313

每种试件焊根的应力分布图如图 3 所示.

(2) 焊缝高度 $h = 1.0$ mm

计算结果见表 3.

试件焊根的应力分布图如图 4 所示.

从表 2、表 3 和图 3、图 4 中可看出,所有试件 的应力集中情况均发生在焊缝两侧,尤其是在焊 根部位,圆弧过渡段也存在一定程度的应力集中, 但出于本试验要求暂不考虑该段的应力集中. 从 表 2、表 3 的数据可看出,不论焊缝高低,其应力 集中程度均为焊根处高于焊趾处;错位对接焊与

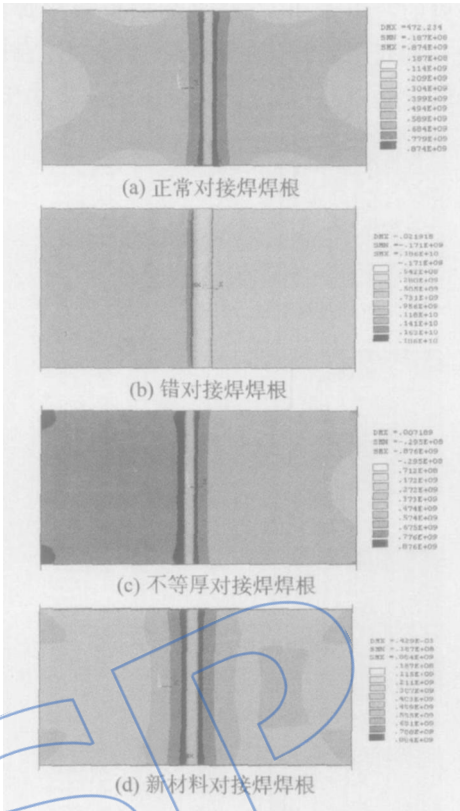


图 3 焊缝高度 $h = 0.5$ mm 时焊根的应力分布图
Fig. 3 Calculated stress distribution of butt weld specimen (Height of the weld seam:0. 5 mm)

表 3 焊缝高度 $h = 1$ mm 时焊根/焊趾的应力集中系数
Table 3 Stress concentration coefficient of weld root/ toe (Height of the weld seam :1. 0 mm)

焊接方式	$\sigma_{\max}$ / MPa	K_T
正常对接焊	907/ 805	1. 512/ 1. 342
错位对接焊	1 830/ - 204	3. 05/ -
不等厚对接焊	898/ 795	1. 497/ 1. 325
新材料正常对接焊	934/ 830	1. 557/ 1. 383

新材料对接焊试件接头的应力集中系数大于正常 情况下的应力集中系数;而不等厚对接焊接头的 应力集中系数比正常对接焊小. 由此可推测不等 厚对接焊试件的寿命将高于正常对接焊,错位对 接焊试件的寿命低于正常对接焊. 新材料对接焊 试件的应力集中系数虽大,但由于材料性能优异, 其寿命需通过进一步的疲劳试验来验证. 另外,从 两种不同高度焊缝的对比情况来看,焊缝高度较 低的一组试件的应力集中系数也相应较低. 需要 说明的是错位对接焊试件与不等厚对接焊试件由 于两侧载荷不完全在同一平面内,因此还受到向

焊缝一侧的弯矩作用,其结果为错位对接焊试件在焊缝一侧完全受压,不等厚对接焊试件在固定支座一端受压,在加载一侧有轻微的应力集中.

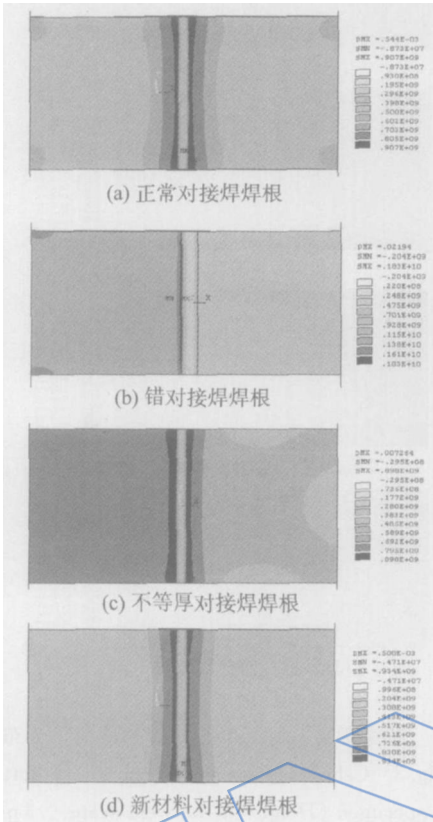


图 4 焊缝高度 $h=1\text{ mm}$ 时焊根的应力分布图
Fig.4 Stress distribution of butt weld root (Height of the weld seam:1.0 mm)

3 疲劳试验结果分析与寿命预测

3.1 试验结果与数据处理

获取各种试件在某一应力水平下的对数寿命平均值和子样标准差,运用这两个参数及疲劳统计学中的“成组对比实验方法”^[8,9]对比各种试件的疲劳寿命,比较它们之间的优劣.计算结果见表 4.

3.2 疲劳寿命预测

以应力水平为 600 MPa,错位对接焊为例.

$$\overline{X}_1 = 4.426 \quad S_1^2 = 0.0462$$
$$\overline{X}_2 = 4.205 \quad S_2^2 = 0.0488$$

$$F = 1.056 \quad f_1 = 9, f_2 = 5, F_{\alpha/2}^* = 3.32 \quad F \leq F_{\alpha/2}^*$$
$$S^* =$$

$$\sqrt{\frac{16}{\sqrt{10} \cdot 6 \cdot 14}} [9 \cdot 0.0462 + 5 \cdot 0.0488] = 0.112$$

$$f = n_1 + n_2 - 2 = 14$$

$$1 - \alpha = 0.95 \quad t_{\alpha} = 2.145$$

$$-0.46 \leq \mu_{x2} - \mu_{x1} \leq 0.019$$

$$-0.46 \leq \lg \frac{\mu_{x2}}{\mu_{x1}} \leq 0.019$$

$$\text{即 } 0.346 \leq \frac{\mu_{x2}}{\mu_{x1}} \leq 1.04$$

从而可以得到,以正常对接焊的疲劳寿命为 1,三种不同情况的疲劳寿命预测^[10],将结果归纳于表 5.

表 4 疲劳试验的对数寿命平均值和子样标准差

Table 4 Logarithmic mean life in the fatigue test X and standard variance of sample S

应力水平	焊接状况	X	S
600 MPa	正常	4.426	0.221
	错位	4.205	0.215
	不等厚	4.645	0.201
	新材料	4.771	0.151
520 MPa	正常	4.729 9	0.094 5
	错位	4.305	0.157
	不等厚	4.933	0.112
	新材料	5.172	0.092

表 5 与正常对接焊相比较的疲劳寿命预测
(置信度 95 %)

Table 5 Estimation of fatigue life in comparison with normal butt welding(Confidence :95 %)

应力水平	焊接状况	疲劳寿命域
600 MPa	错位对接焊	0.346~1.04
	不等厚对接焊	0.97~2.82
	新材料对接焊	1.352~3.631
520 MPa	错位对接焊	0.27~0.53
	不等厚对接焊	1.202~2.113
	新材料对接焊	2.143~3.573

从数据处理结果可以看出,在两个不同应力水平下存在相似结论:错位对接焊试件由于焊接面积小,应力集中严重,疲劳寿命显然不如正常对接焊;不等厚对接焊试件由于焊接面积较大,焊缝圆角半径相对较小,应力集中不如错位情况严重,疲劳寿命略高于正常情况.新材料对接焊由于其性能的优越,在具有相近应力集中系数的条件下疲劳寿命应比正常对接焊显著增加.上述表明所得试验结果与有限元建模时提出的假设相一致.

4 疲劳断口分析

SEM 断口分析结果表明,试件在疲劳载荷下,焊根应力集中处及焊接缺陷处首先出现裂纹,形成疲劳源^[11]。图 5(a)是疲劳断口表层照片,能谱分析为金属氧化物和氮化物。同时焊接热影响区在次表层形成了大片的脆性组织甚至裂纹,见图 5(b),使焊接处在不大的应力下就发生脆断,加快了疲劳破坏的速度。随后内部 TiN 和 Al_2O_3 等微粒发生脆裂,形成次表层或深层疲劳源,如图 5(c)所示。与早先疲劳裂纹交互作用,将加大疲劳裂纹的扩展速度。

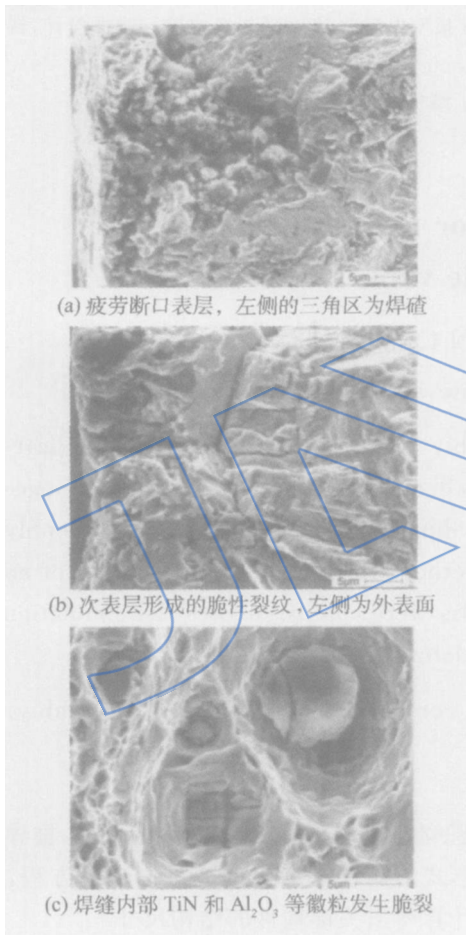


图5 疲劳断口形貌

Fig. 5 Microscopic defects at the very surface of the weld seam

5 结论

(1) 板状焊接试件的应力集中主要出现在焊根及焊缝两侧,任何情况下,焊根两侧的应力集中系数为最大,且焊缝高度越高,应力集中系数越大。

(2) 对于同种材料的焊接结构,不等厚对接焊的应力集中系数最小,错位对接焊接结构的应力集

中系数最大,理论预测不等厚对接焊的疲劳寿命最长,错位对接焊疲劳寿命最短。对于新材料 GH4033 焊接结构,应力集中系数略大于正常对接焊,但由于材料的性能优异,其疲劳寿命较高。

(3) 疲劳试验结果表明,在正常载荷水平下,不等厚对接焊的疲劳寿命是正常对接焊的 1.2 - 2.1 倍,新材料 GH4033 对接焊结构的疲劳寿命是原先正常对接焊的 2.1 - 3.6 倍;错位对接焊结构的疲劳寿命明显低于正常对接焊。

(4) 焊接过程中产生的气孔,夹渣和裂纹,以及金属氮化物、氧化物等脆性相是疲劳破坏的主要裂纹源,在应力集中区域,需要特别防止焊接缺陷。

参考文献:

- [1] 范引鹤,丁磊,阮米庆,等. GH150 合金钢缝焊接头的疲劳寿命研究[J]. 南京航空航天大学学报,1996,28(5):638-643.
FAN Yinhe, DING Lei, RUAN Miqing, et al. Study on fatigue life of seam welded joints in alloy GH150[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 28(5): 638-643.
- [2] 阮米庆,范引鹤. 高温合金 GH150 氩弧焊接接头的组织和力学性能[J]. 特殊钢,1996,17(4):19-22.
RUAN Miqing, FAN Yinhe. Microstructure and mechanical properties of argon arc welding joint of superalloy GH150[J]. Special Steels, 1996, 17(4): 19-22.
- [3] [英]格内 T R 著. 焊接结构的疲劳[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [4] 吴富民. 结构疲劳强度[M]. 西安:西北工业大学出版社,1985.
- [5] 师昌绪. 中国高温合金四十年[J]. 金属学报,1997,33(1):1-8.
SHI Changxu. Forty years of superalloy R & D in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(1): 1-8.
- [6] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,1999.
- [7] 高德平. 机械工程中的有限元法基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,1995.
- [8] 赵少汴,王忠保. 抗疲劳设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [9] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,1979.
- [10] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社,1986.
- [11] 罗新民,陈康敏,罗刚,等. 高温合金焊接接头动态拉伸变形断裂行为[J]. 焊接学报,2005,26(4):60-64.
LUO Xinmin, CHEN Kangmin, LUO Gang, et al. Deformation and fracture behaviors of superalloy welded joint upon scanning electron microscope in situ tension[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(4): 60-64.