

文章编号:1000-8055(2011)09-2054-07

DZ125 合金钎焊接头窄钎缝区高温循环 应力应变分析方法

董成利¹, 石多奇¹, 杨晓光¹, 张 蕾², 齐红宇¹, 侯金保²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘 要: 针对钎焊接头窄钎缝区(大约 $150\ \mu\text{m}$)在高温环境下的循环应力应变测量困难问题,提出一种基于反推法的新思想,依据以下两类数据进行计算和分析:第一类是采用有限元软件 ABAQUS 的用户材料子程序(UMAT)嵌入 Chaboche 热黏塑性本构模型计算得到的 DZ125 母材合金高温循环应力应变数据;第二类是经高温循环试验得到的钎焊接头的相应数据,最后经过数据处理和 MATLAB 软件编程获得窄钎缝区的应力应变。研究表明,钎焊接头在高温环境下的变形具有明显的不均匀性和局部性,并指出较之母材合金其钎缝区相对较“软”,而且它也是整个钎焊接头的薄弱环节,应给予足够的重视。推而广之,反推法的提出为研究普通焊接接头窄焊缝的力学行为提供了一条新的途径。

关 键 词: DZ125 合金; 钎焊接头; 窄钎缝区; 定向凝固; 热黏塑性; 反推法

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Research method of cyclic stress-strain analysis of narrow brazing seam zone of DZ125 alloy brazed joints at high temperature

DONG Cheng-li¹, SHI Duo-qi¹, YANG Xiao-guang¹,
ZHANG Lei², QI Hong-yu¹, HOU Jin-bao²

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Beijing Aviation Manufacturing Engineering Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100024, China)

Abstract: A back-calculating method for solving difficult measurement of cyclic stress-strain of the narrow brazing seam zone (less than $150\ \mu\text{m}$) at high temperature was presented based on following two types of data: the first one was cyclic stress-strain data of DZ125 alloy base metal at high temperature, which was obtained by the finite element software ABAQUS coupling user material subroutine (UMAT) embedded into Chaboche viscoplastic model; the second one was cyclic stress-strain data of brazed joints obtained by the high-temperature cycle test; after data processing and MATLAB programming, the cyclic stress-strain of the brazing seam zone at high temperature was obtained concisely. The results show that the deformation of the brazed joints at high temperature has obvious heterogeneous and localized properties, and as compared to the base alloy metal, the brazing seam zone

收稿日期:2010-10-13; 修订日期:2011-03-17

作者简介:董成利(1982—),男,山东郯城人,博士生,主要从事疲劳、断裂以及材料本构关系研究。

is relatively 'soft', and also a weak link in brazed joints which should be given adequate attention. By extension, the proposed back-calculating method provides a new way for studying the general mechanical behavior of narrow seam of the welded joint.

Key words: DZ125 alloy; brazed joint; narrow brazing seam zone; directionally solidification; heat visco-plastic; back-calculating method

由于镍基定向凝固高温合金 DZ125 具有良好的中、高温力学性能,同时具有良好的可铸性和小的薄壁效应,可用于制造内腔复杂的薄壁空心涡轮叶片^[1]。众所周知,现代涡轮叶片都普遍采用内腔复杂的薄壁空心叶片来实现对涡轮叶片的冷却以提高其工作效率。但是由于受到铸造技术和工艺的限制,目前常采用真空钎焊的焊接方法将冷却通道和叶身段在叶片的盖板处焊接在一起。已有的研究表明,带有焊接结构的涡轮叶片断裂大都发生在焊接区部位。原因可能是焊接工艺不完善或是焊接缺陷的存在,所以涡轮叶片的焊接部位是其强度和寿命的薄弱环节,因此研究带有焊接特征的涡轮叶片的应力应变分析和强度计算就显得非常重要。由于目前我国现行的涡轮叶片焊接工艺主要以钎焊为主,因此本文的研究也主要针对钎焊工艺的焊接接头。此外为了能够更好的模拟焊接试样或涡轮叶片钎焊部位在高温循环特征下的应力应变历程,需要有较好的本构模型,这种模型应该能够考虑温度和时间的影响,并合理的描述循环载荷下的各种材料非弹性变形,具体来说这些非弹性变形包括非线性运动硬化、循环硬/软化、平均应力松弛和蠕变等^[2-5]。

钎焊接头分区方法不同于通常的熔焊如电子束焊或激光焊等焊接方法将接头分为母材区、焊缝区和热影响区(包括粗晶区、细晶区和临界区),钎焊接头通常分为母材区、钎缝区和扩散区。为了能模拟和分析这种各区的组织和力学性能都不均匀的焊接结构,国内外研究人员普遍采用热处理模拟焊接热循环的方法,分别制得焊接接头各区单一均匀材料来近似模拟实际的焊接接头^[6-9],然后选择合理的有限元模型,借助于各区材料的力学性能测试试验来获取模型中的材料参数,得到各区的材料模型,把模型及其参数分别嵌入到有限元软件的用户材料子程序(UMAT)和输入文件中对焊接接头进行模拟计算,通过与相应条件下的实际焊接接头试验情况作对比,来校核提取参数的准确性和模型的模拟能力,最终目的是对

实际的焊接结构进行给定条件下的应力应变计算和强度分析。

尽管这种方法有其独特的优越性,例如通过热处理模拟焊接热循环的方法可以制造各个区的多个试样,为做相应的力学性能试验提供了便利的条件。但是由于焊接区特别是热影响区或是扩散区存在组织梯度和力学性能梯度,用单一均匀的材料来模拟本质上非均匀的材料是不准确的,于是很多学者对其进行了改进,把存在组织梯度和力学性能梯度的热影响区又细化为粗晶区、细晶区和临界区等方法来进一步的模拟实际的组织形式^[10-13]。作者认为如果能把热影响区或是扩散区的组织梯度和力学性能梯度完整的表述出来并应用到有限元模型中,那么得到的模型将是准确和可靠的,借助于此模型进行的有限元计算分析应该和实际的情况相符。但这种想法是理想的,在现有的情况下是很难实现的,于是就衍生了以上的近似方法。另外钎焊接头中钎缝区非常薄,采用常规的方法在接头上切取部分钎缝材料做力学性能试验是非常困难的。尽管借助于金相学的知识,只要模拟组织的显微硬度和显微组织与实际焊接区的相同,则认为它们的力学性能相同。但是采用热处理模拟焊接热循环的方法来制做钎缝区和扩散区的工艺比较复杂,另外在辨认模拟件和焊接件之间的相似度等方面存在人为因素,必然存在误差,所以这种方法也是不准确的。

本文采用宏观连续介质力学的方法,在前人^[14-15]的基础上结合 Chaboche 黏塑性本构统一理论对 DZ125 母材合金高温循环应力应变进行有限元计算和分析,然后结合试验得到的焊接接头循环应力应变数据,采用反推法间接得到纯钎缝区的高温循环应力应变历程。由于试验中钎焊接头的疲劳断裂均发生在钎缝部位,因此它是焊接区的薄弱环节,所以把扩散区和母材区作为一个整体来考虑即采用两材料模型(仅包括母材区和钎缝区)根据反推法可以简化计算和分析,为研究窄焊缝的力学性能提供了思路。

1 母材合金和钎焊接头的高温循环应力应变计算方法

由于钎缝部位厚度较薄,直接在焊接件上切取部分纯钎缝区进行力学性能试验是比较困难的.鉴于此原因,本文采用反推方法,首先进行DZ125母材合金的高温循环应力应变计算,然后结合钎焊接头试验在相应条件下得到的应力应变反推出纯钎缝区的应力应变关系,因此本节有两部分研究内容.

1.1 DZ125 母材合金高温循环应力应变计算方法

DZ125母材合金的应力应变有限元计算采用Chaboche黏塑性本构模型,并通过有限元软件ABAQUS 6.6^[16]的用户材料子程序(UMAT)来实现.

考虑到试样的对称性,选取1/8进行有限元建模(仅考虑工作段),见图1.单元采用C3D8I类型.

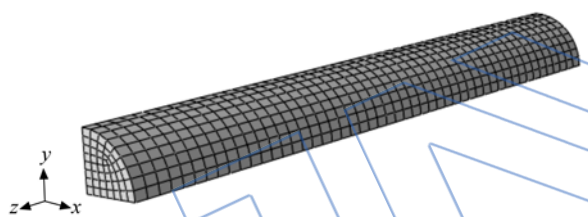


图1 计算试样的有限元网格
Fig.1 Finite element mesh of specimen

每一种载荷状况共计算10个循环($R=0$),主要考虑获得循环硬化/软化、平均应力松弛等现象,考察循环是否达到稳定状态.

根据试验条件和建立模型的具体要求,采用下面的约束方式和加载方法,详见图2.

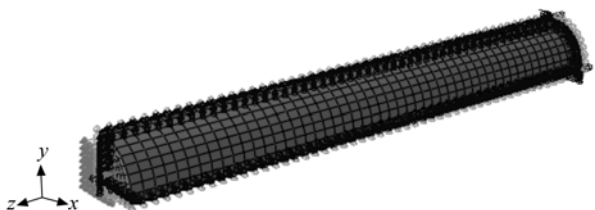


图2 载荷及边界条件
Fig.2 Load and boundary condition

1) 在试件一端面上添加 z 方向位移为0,防止产生绕 x 方向和 y 方向刚体位移的约束条件(即施加对称约束 ZSYMM($U_3=UR1=UR2=0$));

2) 在试件一对称面上添加 x 方向位移为0,防止产生绕 y 方向和 z 方向刚体位移的约束条件(即施加对称约束 XSYMM($U1=UR2=UR3=0$));

3) 在试件另一对称面上添加 y 方向位移为0,防止产生绕 x 方向和 z 方向刚体位移的约束条件(即施加对称约束 YSYMM($U2=UR1=UR3=0$)).

图3给出了850℃高温时DZ125母材合金试样在720 MPa应力下其轴向应力应变关系.

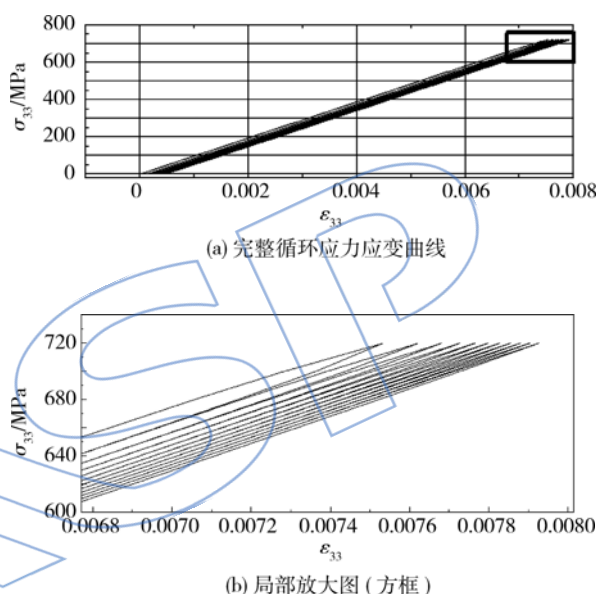


图3 720 MPa,850℃,母材合金循环应力应变曲线
Fig.3 720 MPa,850℃,cyclic stress-strain curves of parent metal

另外,由计算结果可知,在850℃条件下,除720 MPa,DZ125母材合金进入了非线性,存在明显的迟滞环现象以外,其他三种应力水平主要为线弹性(图略).可以看出,720 MPa应力下,随着循环的进行和塑性应变的累积,10个循环后,迟滞环基本趋于稳定.

1.2 钎焊接头高温循环应力应变试验

1.2.1 材料和钎焊接头

DZ125合金是我国目前性能水平最高的定向凝固镍基铸造高温合金之一,具有良好的中、高温综合性能及优异的热疲劳性能^[1].用于试样的DZ125定向凝固合金材料,热处理为1180℃,2h+1230℃,3h,空冷+1100℃,4h,空冷+870℃,20h,空冷;其化学成分及含量列于表1.真空钎焊接头焊接温度1180℃,极限真空度

表 1 DZ125 合金化学组成及含量
Table 1 DZ125 alloy chemical composition and content

DZ125 合金材料											
元素	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	B	Ni
元素含量/%	0.100	8.900	10.000	7.000	2.000	5.200	0.900	3.800	1.500	0.015	60.585

2.1×10^{-2} Pa,炉温均匀性 $\pm3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,钎焊接头的焊后热处理制度与 DZ125 母材合金的热处理制度相同. 试验用焊接接头中化学元素在母材的基础上添加 Si 和 B 等降熔元素,改善了钎焊工艺性能和接头的组织结构,提高了钎焊接头的力学性能.

钎焊接头试样和相应的 DZ125 母材试样(如图 4 所示)均来源于焊接后的厚宽板,且都经历了相同的热处理制度,钎焊接头采用对接接头形式,其最终的结构尺寸和实物图分别如图 5 和图 6 所示.

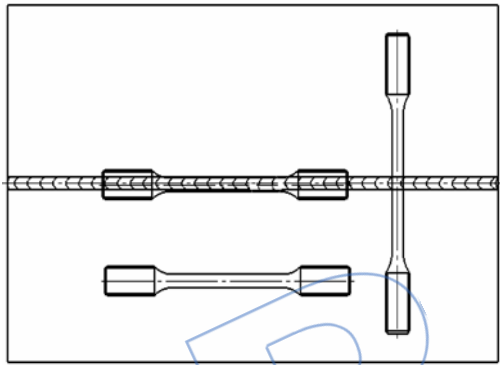


图 4 焊接宽板和钎焊接头取样方法图
Fig. 4 Welded wide plate and sampling method of brazed joints

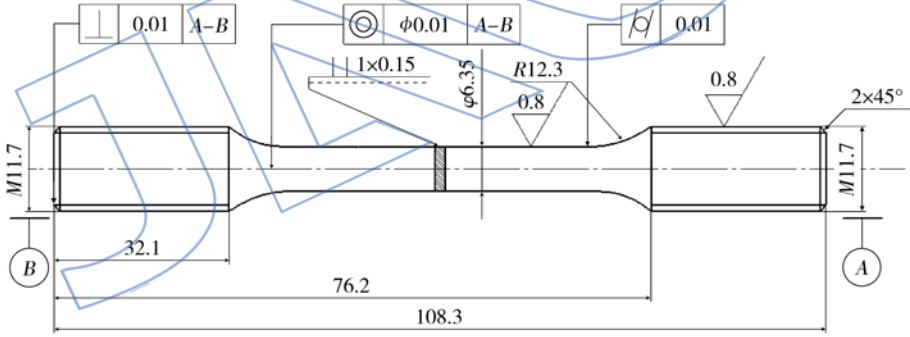


图 5 钎焊接头结构尺寸图(单位:mm)
Fig. 5 Structural dimensions of brazed joint (unit:mm)

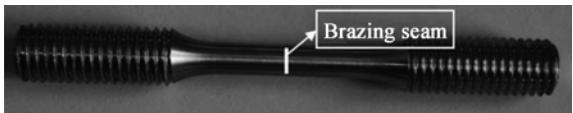


图 6 钎焊接头试样图
Fig. 6 Structure of brazed joint

1. 2. 2 低周疲劳(LCF)试验

钎焊试样的低周疲劳试验在 MTS-810 材料试验机上进行. DZ125 合金钎焊接头被置于试验机的高温加热三段辐射电炉中,采用单轴拉伸载

荷在应力控制试验条件下进行高温循环应力应变试验,标距段试验有效应力选取为 560,600,640,720 MPa 四种载荷水平. 试验中温度控制为 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度误差控制在 $\pm3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右. 用于测量试样变形量的高温引伸计对称的黏结在接头试样的两端,标距范围为 25 mm. 钎焊接头采用有效段尺寸为 32 mm,钎缝位于接头试样的中间位置. 本文仅对钎焊接头试样进行了低周疲劳试验. 表 2 给出了 DZ125 合金钎焊接头在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$,四种载荷水平下的低周疲劳试验情况.

表2 DZ125 合金钎焊接头低周疲劳试验信息表
Table 2 LCF test information of DZ125 alloy brazed joints

试样编号	试样直径/mm	频率/Hz	最大应力/MPa	应力比	循环周次	断裂位置
1	6.360	0.2778	720	0	939	钎缝
2	6.360	0.3125	640	0	5217	钎缝
3	6.350	0.3125	640	0	2118	钎缝
4	6.360	0.3333	600	0	7225	钎缝
5	6.355	0.3333	600	0	13210	钎缝
6	6.350	0.3571	560	0	22635	钎缝
7	6.355	0.3571	560	0	33316	钎缝

2 基于反推法的窄钎缝区高温循环应力应变

2.1 反推法公式推导及应用

反推法的基本原理是先通过有限元计算出 DZ125 母材的高温循环应变数据,然后由试验得到钎焊接头的相应数据,最后经过数据处理和公式推导得到纯钎缝区的应力应变数据结果。

图 7 示出了用于钎焊件焊缝应力应变反推法示意图。图 7(a)是焊接后未进行 LCF 的钎焊接头;图 7(b)是进行 LCF 试验中瞬态的钎焊接头。

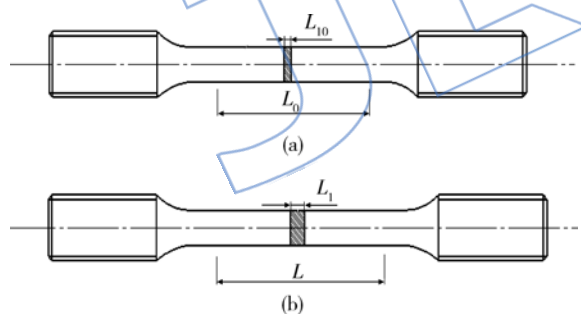


图7 钎缝区应力应变反推法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of back-calculating method for brazing seam zone stress-strain

结合图 7,反推法具体的推导过程是把低周疲劳试验中钎焊接头的瞬态应变代入式(5)中,得到高温引伸计瞬态的标距长度 L ,然后把 DZ125 母材合金有限元计算得到的应变值 ϵ_{pm} 和瞬态值 L 代入式(6)中获得钎缝区瞬态的长度 L_1 ,最后把 L_1 代入式(2)中可以计算纯钎缝区瞬态的应变,整个计算实现过程是在 MATLAB 软件中进行的。

基于反推法的公式推导过程如下:

$$\epsilon_{total} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1)$$

$$\epsilon_{bm} = \frac{L_1 - L_{10}}{L_{10}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{pm} = \frac{(L - L_1) - (L_0 - L_{10})}{L_0 - L_{10}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{pm} = f(\sigma, T, \dots) \quad (4)$$

其中 ϵ_{total} 为钎焊接头试样标距段总应变(已知量); ϵ_{pm} 为母材合金应变(已知量); ϵ_{bm} 为钎缝区应变(待求量); L_0 为钎焊接头试样原始标距(已知量); L_{10} 为钎缝区原始长度(已知量); L_1 为钎缝区瞬态长度(未知量); L 为钎焊接头瞬态长度(未知量)。下标 pm 代表母材合金;total 代表钎焊接头;bm 代表钎缝金属。

式(4)代表母材合金在一定的温度和应力作用下 Chaboche 本构模型的形式,本文把它嵌到 ABAQUS 用户材料子程序 UMAT 中对 DZ125 母材合金进行应力应变计算分析。

由式(1)和(3)可以推导出以下各式成立:

$$L = L_0 \times (1 + \epsilon_{total}) \quad (5)$$

$$L_1 = L - (1 + \epsilon_{pm}) \times (L_0 - L_{10}) \quad (6)$$

联立式(2),(5)和(6),即可求出钎缝区的应力应变关系,最终的方程如下:

$$L = L_0 \times (1 + \epsilon_{total}) = 25 \times (1 + \epsilon_{total}) \quad (7)$$

$$L_1 = L - (1 + \epsilon_{pm}) \times (25 - 0.15) = L - (1 + \epsilon_{pm}) \times 24.85 \quad (8)$$

$$\epsilon_{bm} = \frac{L_1 - L_{10}}{L_{10}} = \frac{L - 0.15}{0.15} \quad (9)$$

2.2 窄钎缝区高温循环应力应变计算和分析

采用上述反推法得到的计算结果如图 8~图 11 所示。图中 PM 代表母材合金;BJ 代表钎焊接头;BM 代表钎缝金属。

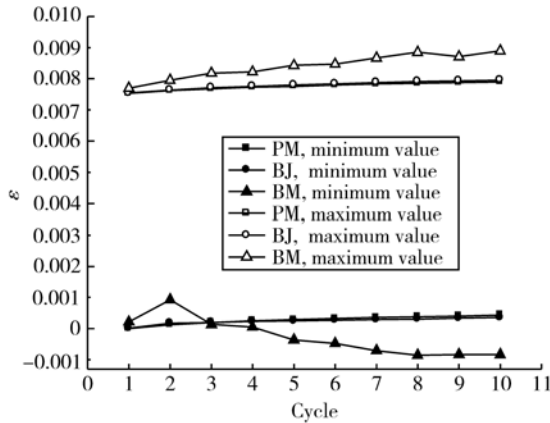


图8 850 °C, 720 MPa 条件下钎缝区应力应变
Fig. 8 850 °C, 720 MPa, cyclic stress-strain curves
of brazing seam zone

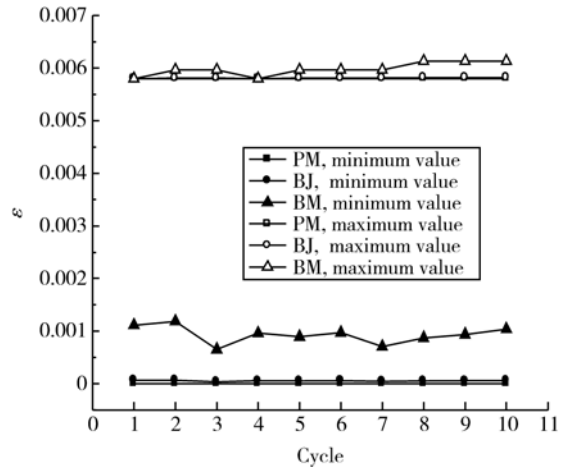


图11 850 °C, 560 MPa 条件下钎缝区应力应变图
Fig. 11 850 °C, 560 MPa, cyclic stress-strain curves
of brazing seam zone

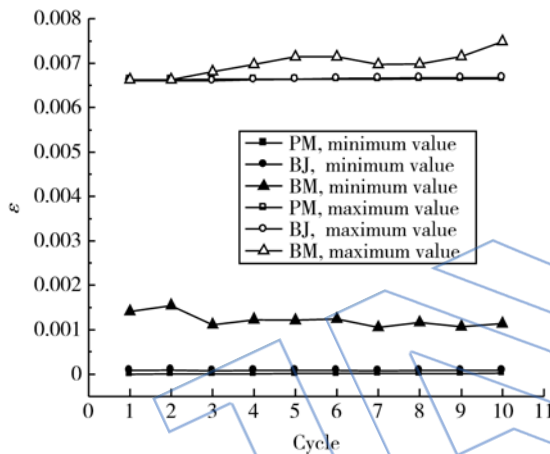


图9 850 °C, 640 MPa 条件下钎缝区应力应变
Fig. 9 850 °C, 640 MPa, cyclic stress-strain curves
of brazing seam zone

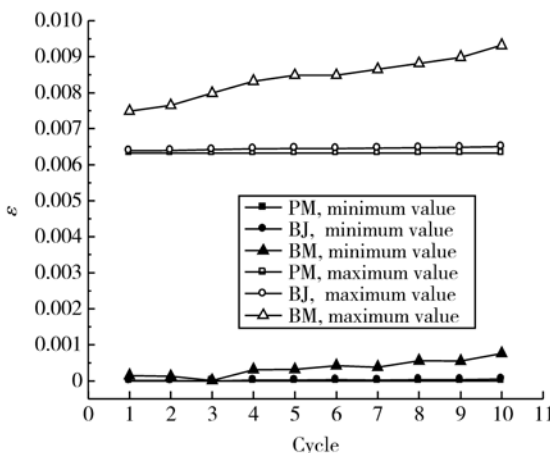


图10 850 °C, 600 MPa 条件下钎缝区应力应变
Fig. 10 850 °C, 600 MPa, cyclic stress-strain curves
of brazing seam zone

由图8~图11可以看出,在相同的温度和应力水平下,随着循环数的增加,钎缝金属的应变呈现出比母材合金和钎焊接头的应变逐步增大的规律,说明钎缝金属是一种相对较“软”的材料;钎焊接头的应变比母材合金的应变稍大,但两者很是接近。以上现象说明焊接接头的变形具有明显的不均匀性和局部性。虽然整体钎焊接头试样的应变较小,但局部的钎缝金属应变很大,说明钎焊接头的变形具有局部性;纵观三种金属体的应变又各不相同,说明钎焊接头的变形具有不均匀性。从宏观上可以看出钎焊接头与母材合金段的应力应变相似,原因应该是钎缝区厚度太小,钎缝区的变形相对于整个接头试样的变形可以忽略不计。但这并不等于说钎缝区不重要,在进行钎焊接头力学性能分析时可以忽略钎缝区。恰恰相反,研究分析中一定要把钎缝区放在非常重要的位置,因为它自身的应变较大,况且断裂失效大都发生在钎缝区。

需要指出的是,在应力为720 MPa时经反推法计算出的钎缝区在最小应力时的应变值较后三种情况有很大的不同,原因可能是试验过程由于施加应力较大(相比于其它三种载荷)而导致高温引伸计测量不准确或是其他人为因素造成的。

3 结 论

1) 采用传统上焊接热模拟得到钎缝金属的方法来研究窄钎缝金属的力学性能是非常困难的,本文提出的反推法基本原理是利用有限元模型计算出DZ125母材的高温循环应力应变数据,

然后由试验得到钎焊接头的相应数据,最后经过数据处理和公式推导得到纯钎缝区的高温循环应力应变数据。

2) 由计算结果可知钎焊接头的变形具有明显的不均匀性和局部性。尽管钎焊接头试样的应变较小,但钎缝区本身的应变较大,说明钎焊接头的变形具有局部性;纵观接头不同区域的应变又各不相同,说明钎焊接头的变形具有不均匀性。

3) 本文的后续工作应该进一步研究反推法的研究范围,而不仅仅局限于两材料模型。另外反推法的计算精度也要靠实际钎缝材料的试验来校核。

参考文献:

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 第2卷: 变形高温合金、铸造高温合金[M]. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] Koo G H, Lee J H. Investigation of ratcheting characteristics of modified 9Cr-1Mo steel by using the Chaboche constitutive model[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, 84(5): 284-292.
- [3] Lu F, Xu J Q. Evaluation of cyclic inelastic response in fretting based on unified Chaboche model[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(9): 1062-1075.
- [4] Tong J, Zhan Z L, Vermeulen B. Modelling of cyclic plasticity and viscoplasticity of a nickel-based alloy using Chaboche constitutive equations[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(8): 829-837.
- [5] Mohamad R P, Sina S. On the calibration of the Chaboche hardening model and a modified hardening rule for uniaxial ratcheting prediction[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(16): 3009-3017.
- [6] Besson J, Leclercq S, Gaffard V, et al. Analysis of creep lifetime of an ASME Grade 91 welded pipe[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(10): 1460-1473.
- [7] Vivier F, Gourgues-Lorenzon A F, Besson J. Creep rupture of a 9Cr1Mo-NbV steel at 500 °C: base metal and welded joint[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(10): 2704-2709.
- [8] Tu S T, Segle P, Gong J M. Creep damage and fracture of weldments at high temperature[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81(2): 199-209.
- [9] Watanabe T, Tabuchi, Yamazaki M, et al. Creep damage evaluation of 9Cr-1Mo-VNb steel welded joints showing Type IV fracture[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(1): 63-71.
- [10] Hayhurst R J, Vakili-Tahami F, Hayhurst D R. Verification of 3-D parallel CDM software for the analysis of creep failure in the HAZ region of Cr-Mo-V crosswelds[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86(8): 475-485.
- [11] Tabuchi M, Watanabe T, Kubo K, et al. Creep crack growth behavior in the HAZ of weldments of W containing high Cr steel[J]. International Journal of Press Vessels and Piping, 2001, 78(11-12): 779-784.
- [12] Li Y K, Hongo H, Tabuchi M, et al. Evaluation of creep damage in heat affected zone of thick welded joint for Mod. 9Cr-1Mo steel[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86(9): 585-592.
- [13] Matsui M, Tabuchi M, Watanabe T, et al. Effect of heat treatment on creep properties and microstructures of HAZ for 9% Cr ferritic steel[J]. Society of Materials Science, 2003, 52(2): 119-123.
- [14] 石多奇. 热端部件材料先进黏塑性本构理论与高温多轴疲劳理论研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
SHI Duoqi. Viscoplastic constitutive modeling and multiaxial fatigue life prediction of nickel-based superalloy at elevated temperature[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [15] 周天朋. 定向凝固涡轮叶片先进应力应变分析方法及低循环疲劳寿命研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
ZHOU Tianpeng. Research of advanced stress-strain analysis and low cycle fatigue life for directionally solidified turbine blade[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [16] 刘展. ABAQUS 6.6 基础教程与实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.