

奥氏体合金熔焊接头形变再结晶态的疲劳性能

南京航空航天大学 阮米庆* 范引鹤

【摘要】 焊接接头的微观组织和力学性能不均匀性影响疲劳性能, 常用焊后热处理等工艺方法来改善。但奥氏体型合金固态无同素异构转变, 焊后热处理难以明显地改善其微观组织和疲劳性能。形变再结晶工艺可以同时改善其微观组织和力学性能, 进而可以非常显著地提高该焊接接头的抗疲劳断裂能力。本文主要讨论 1Cr18Ni9Ti 熔焊接头形变再结晶态的微观组织和疲劳性能, 并以该焊接接头的低循环疲劳性能来验证。

主题词: 奥氏体不锈钢 焊接接头 再结晶 疲劳强度

分类号: V250.3

1 前言

焊接接头由焊缝、热影响区和母材组成。其中焊缝为铸造组织, 热影响区为各种不同规范的热处理组织, 因而在其中存在着严重的微观组织和力学性能不均匀性, 这对接头的宏观力学性能等是极其不利的^[1~5], 例如会降低其韧塑性, 特别是接头的疲劳性能降低幅度很大, 即便是母材为韧塑性很好(母材韧塑性好时, 焊接接头的低循环疲劳性能降低幅度要小些)的奥氏体不锈钢对接氩弧焊接头, 其低循环疲劳寿命也降低过半。另外, 这种不均匀性还会影响接头的其他力学性能和物理化学性能。人们长期致力于用工艺方法来改善这种不均匀性问题, 主要可分为如下两类措施: (1) 采用新焊接方法: 例如用超高能量密度的电子束焊或激光焊等, 这可使焊接接头的焊缝和热影响区变窄小, 从而降低组织不均匀性对接头宏观性能的影响程度。(2) 焊后热处理: 能改善大多数熔焊接头的微观组织不均匀性^[6~8], 并可消除焊接残余应力等。

航空发动机采用大量的奥氏体型合金薄板焊接构件(现役各种型号发动机都出现过焊接接头疲劳裂纹故障), 而奥氏体合金固态无同素异构转变, 难以用常规焊后热处理方法来明显地改善这种焊接接头的微观组织。形变再结晶可以用来改善奥氏体型合金的原始组织形态和提高材料的各种力学性能等^[9~11], 奥氏体合金熔焊接头的微观组织不均匀性也可以由形变再结晶来改善。

2 试验方法

2.1 试样准备

采用板厚为 4 mm 的 1Cr18Ni9Ti 对接氩弧焊接头(取样方向为板料轧制方向, 焊接规范

执行航空发动机制造标准, 经 X 光探伤检验合格), 室温条件下用 WE-30 型液压式万能试验机将焊缝加强高压压缩至约为母材板厚。焊接接头在冷塑性变形过程中贮存的晶格畸变能等作为合金再结晶的驱动力, 在 RX-14-13 型箱式电阻炉(控温精度 $\pm 10^{\circ}\text{C}$)中再结晶处理。然后加工成如图 1 所示的疲劳性能试样。

2.2 疲劳性能试验

采用 INSTRON MODE 1341 疲劳试验机测试 1Cr18Ni9Ti 板材对接氩弧焊接头形变再结晶态试样的低循环疲劳性能。疲劳载荷为轴向拉压对称循环应变控制($R = -1$), 应变幅值: $\Delta\epsilon/2 = 0.3 \sim 0.6\%$, 循环波形为三角波, 加载频率为 $f = 0.1 \sim 1.0 \text{ Hz}$ 。疲劳试验以试样的疲劳裂纹扩展到一定的尺寸后, 并结合滞回环上出现拐点为失效判据。

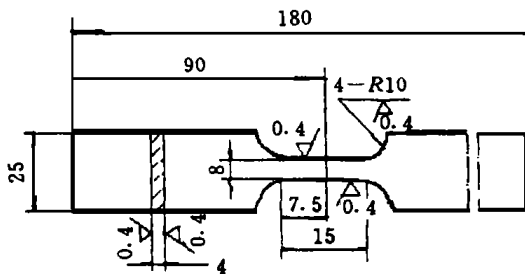


图 1 1Cr18Ni9Ti 对接氩弧焊接头疲劳性能试样

3 试验结果和分析

3.1 显微组织

图 2 所示为 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢熔焊接头各种状态下的显微组织。

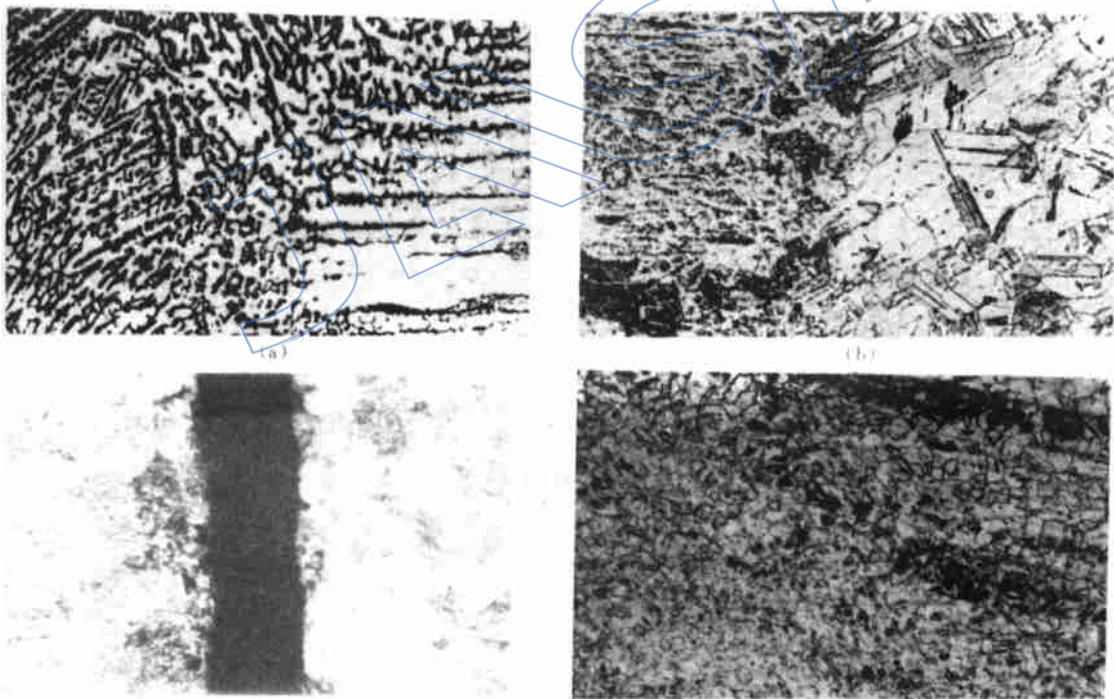


图 2 1Cr18Ni9Ti 板材对接氩弧焊接头显微组织(王水浸蚀)

图 2(a) 为该焊接接头的焊态组织, 其焊缝为粗大的柱状树枝晶, 而母材显微组织仍存在轧制纤维状, 其中存在着严重的显微组织不均匀性, 特别是在熔合区附近。由于 1Cr18Ni9Ti 合金固态无同素异构转变, 焊接热循环过程不会明显地改变母材的原始组织, 因而其中的热影响区组织不明显。

图 2(b) 为该焊接接头的固溶热处理态($1050 \pm 10^\circ\text{C} \times 30 \text{ min}$, 空冷) 组织。由图可见, 母材为较粗的等轴晶, 而焊缝仍为柱状晶组织形态, 即固溶热处理态的微观组织仍然很不均匀。熔合区附近是这两种显微组织的过渡区, 其微观组织的不均匀性最为严重, 加上可能存在的冶金缺陷等, 所以熔合区是该焊接接头力学性能最薄弱的部位^[1-4], 疲劳裂纹往往就产生在熔合区附近, 如图 2(c) 所示。

形变再结晶可以改变奥氏体合金的微观组织, 故也能改变其熔焊接头的显微组织不均匀性。图 2(d) 为 1Cr18Ni9Ti 合金熔焊接头形变再结晶态的显微组织, 从中可见, 原为粗大柱状树枝晶的焊缝组织经形变再结晶转变为精细的等轴晶, 母材仍为等轴晶组织, 只是晶粒较焊缝稍粗些, 这两种等轴晶的过渡区为熔合区。微观组织不均匀性因为形变再结晶而得到很大程度的改善, 根据“组织决定性能”的原则, 可以预计该焊接接头形变再结晶态的宏观力学性能也将得到很大的改善。

3.2 临界变形度问题

形变再结晶工艺中最重要的两参数是: 变形度和再结晶温度(与保温时间有关系)。当材料原始组织一定时, 它们将决定形变再结晶后晶粒的大小。一般来说, 试样冷塑性变形度对再结晶后晶粒大小影响很大, 并且存在着一个临界变形度问题, 它与材料性质和再结晶温度有关。在临界变形度下, 再结晶后的晶粒特别粗大, 会严重恶化材料的常温力学性能。

临界变形度常发生在小变形率范围内。利用焊接接头的圆弧形加强高作冷塑性变形, 在焊缝附近的变形率很小, 理论上来说必然存在临界变形度问题。而由图 2(d) 显微组织可见, 其中不存在异常粗大的晶粒。

3.3 疲劳裂纹部位

1Cr18Ni9Ti 板材对接氩弧焊接头的焊态和固溶热处理态中, 微观组织存在着严重的不均匀性, 特别是熔合区附近, 加上可能存在的冶金缺陷等影响, 因而熔合区附近为该焊接接头最薄弱部位。低循环疲劳裂纹全部产生于熔合区附近, 如图 2(c) 所示。

形变再结晶态的 1Cr18Ni9Ti 对接氩弧焊接头, 由于微观组织的不均匀性已经得到了明显的改善, 焊接接头 3 个区域(母材、热影响区和焊缝)的性能比较接近, 试样的疲劳裂纹产生于熔合区或焊缝中, 个别试样甚至产生于母材之中。这就是说, 1Cr18Ni9Ti 对接氩弧焊接头形变再结晶态组织中, 熔合区不再是该接头力学性能最薄弱的部位, 其抗疲劳性能已经得到了很大的改善, 接近于焊缝形变再结晶态组织。由于疲劳裂纹产生于母材中仍然很少, 因而我们认为形变再结晶态组织中焊缝和熔合区的疲劳性能仍然要低于母材。至于超细等轴晶焊缝组织的疲劳性能为什么仍然要低于稍粗等轴晶的母材组织, 可能是因为焊缝组织多少仍遗传有铸造组织的性能所致, 包括可能存在的冶金缺陷等。故我们认为 1Cr18Ni9Ti 对接氩弧焊接头形变再结晶态组织已经比较接近于“等疲劳性能”, 这在该试样的低循环疲劳寿命中得到了体现。

3.4 疲劳特性曲线

1Cr18Ni9Ti 板材对接氩弧焊接头形变再结晶态的应变疲劳试验数据从略。经数据处理后得到如图 3 所示的应变疲劳特性曲线。为便于比较, 将 1Cr18Ni9Ti 板材光滑试样和对接氩弧焊接头固溶热处理态试样的应变疲劳特性曲线^[2]添加在图 3 中。

由图 3(a) 曲线可见, 1Cr18Ni9Ti 合金是循环应变硬化材料, 其板材对接氩弧焊接头形变再结晶态试样的循环应变硬化速率大致介于光滑试样和焊接接头的固溶热处理态试样之间。

对接氩弧焊接头形变再结晶态试样的循环应变硬化速率略高于光滑试样,而低于该焊接接头固溶热处理态试样较多。这是因为焊接接头的微观组织不均匀,特别是熔合区附近的组织不均匀性造成的。由于试样在循环应变加载过程中,显微缺陷处变形不协调和位错等缺陷容易在这些微观组织不连续处堆积和缠结所致;试样继续变形时所施加的局部应力相应增大,而使固溶热处理态试样的循环应变硬化速率为最大。该焊接接头形变再结晶态试样的循环应变硬化速率很接近于光滑试样,这也表明其微观组织不均匀性已经得到了较大的改善。

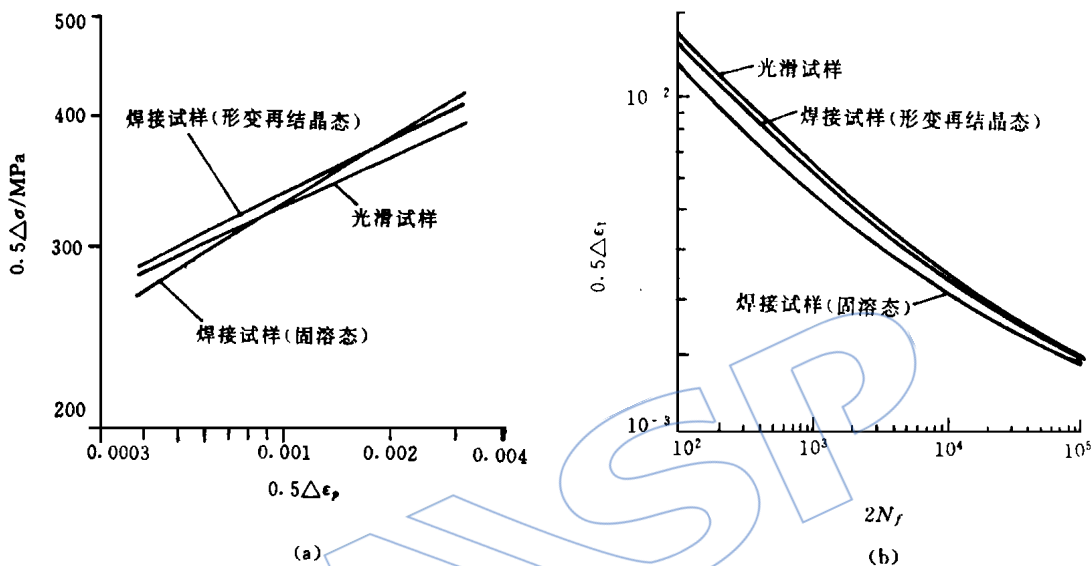


图 3 1Cr18Ni9Ti 板材光滑试样和焊接试样(固溶态、形变再结晶态)应变疲劳特性曲线

由图 3(b) 可见, 1Cr18Ni9Ti 板材对接氩弧焊接头形变再结晶态试样的应变—寿命曲线也夹于光滑试样和焊接接头固溶热处理态试样之间。形变再结晶态的焊接接头试样的疲劳寿命在低应变(即高循环寿命)区已经很接近于光滑试样,而在高应变(即低循环寿命)区与光滑试样还有些差距,但它们都比该焊接接头固溶热处理态试样的疲劳寿命高很多,提高应变疲劳寿命达 50~70%。因而 1Cr18Ni9Ti 板材对接氩弧焊接头形变再结晶热处理可以显著地改善其微观组织的不均匀性,进而大幅度提高其低循环疲劳寿命。

3.5 奥氏体型合金熔焊接头形变再结晶

对于航空发动机中大量采用的奥氏体型合金薄板焊接结构,其焊接接头的焊态或固溶热处理态都存在着严重的微观组织不均匀性。图 4 所示为



图 4 GH150 对接氩弧焊接头显微组织
(固溶+时效态, 50×, 氯化高铁溶液浸蚀)

GH150 氩弧焊接头热处理态($1040\pm 10^{\circ}\text{C}$, 空冷+ $750\pm 10^{\circ}\text{C}\times 16\text{ h}$, 空冷)的显微组织; 母材为等轴晶组织, 焊缝为粗大的柱状树枝晶组织, 热影响区组织也不很明显。这种熔焊接头的微观组织不均匀性也可望利用形变再结晶的方法来改善, 进而提高其宏观力学性能, 特别是韧塑性和疲劳性能。

4 结 论

(1) 1Cr18Ni9Ti 合金是一种循环应变硬化材料。其熔焊接头形变再结晶态组织的循环应变硬化速率稍大于母材的光滑试样, 而比固溶热处理态组织低较多。这是因为这三种试样的微观组织不均匀性程度不同造成的。

(2) 1Cr18Ni9Ti 合金熔焊接头存在着严重的微观组织不均匀性, 它严重地恶化焊接接头的疲劳性能。熔合区附近因为微观组织不均匀性最为严重和可能存在冶金缺陷等, 是该焊接接头最薄弱的部位。低循环疲劳试验结果表明: 疲劳裂纹都产生于熔合区附近, 疲劳寿命比之于母材降低过半。

(3) 形变再结晶工艺可以改善 1Cr18Ni9Ti 合金熔焊接头微观组织的不均匀性, 进而能大幅度提高该焊接接头的低循环疲劳性能, 其应变疲劳寿命提高达 50~70%。

(4) 形变再结晶工艺可望用于改善其他奥氏体型合金熔焊接头微观组织的不均匀性, 进而提高其宏观力学性能, 特别是焊接接头的韧塑性和疲劳性能。

参 考 文 献

- 1 范引鹤等. 焊接接头力学性能不均匀性的研究. 航空学报, 1996, 5: 638- 640
- 2 阮米庆等. 奥氏体型合金熔化焊接头微观组织不均匀性及对疲劳性能的影响研究. 航空发动机第 8 届结构强度振动年会论文, 307- 311
- 3 阮米庆等. GH150 氩弧焊接头组织和力学不均匀性研究. 南京航空航天大学学报, 1996, 4: 534- 539
- 4 阮米庆. 1Cr18Ni9Ti 对接氩弧焊接头组织对疲劳性能的影响. 水利电力机械, 1996, 21(5): 14- 15, 21
- 5 程光旭等. 焊接接头材质和力学非均匀体低周疲劳特性研究. 应用力学学报, 1992, 9(2): 1- 8
- 6 Okada Hitoshi etc. Toughness Recovery for Weld HAZ by Post Weld Heat- Treatment. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1994, 12(4): 521- 527
- 7 Kim H J etc. Microstructural Refinement Through Multi- Pass GTAW Process. ASM INTERNATIONAL, Metals Park, 1986: 273- 278
- 8 杨世柏等. 焊后热处理对奥氏体/ 珠光体钢接头熔合区断裂形态的影响. 材料科学与工艺, 1996, 4(3): 71- 75
- 9 张东峰编译. 形变热处理奥氏体系不锈钢获得晶粒超微细化. 国外金属热处理, 1994, 48(2): 27- 30, 48
- 10 Anon. Thermomechanical Control Process for High Strength Austenitic Stainless Steel Plates. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1987, 27(9): 757
- 11 Polak etc. Properties of Welded Joints of Thermomechanically Treated Super High Strength Steel. Zvaranie, 1987, 36(1): 13- 16

(责任编辑 王震华)

points). An experimental rotor of the 1st turbine disk had been designed to model the stress spectrum on the check points. The high temperature LCF (low cycle fatigue) test of an old disk was also conducted at SB804 – the disk LCF tester in GTE (Gas Turbine Establishment). The test indicated that cracks emerged on the check points of 5 from all of 16 pin holes on the old disk as the 6047th cycle was completed and the crack extended life is 2886 cycles. The comparative analysis of the test results of the old and new disks indicates that LCF crack growth life and fault life with reliability 99.87% and degree of confidence 95% for the 1st turbine disk are 1132 cycles and 2072 cycles respectively.

Key Words Turbines Discs Fatigue life Experiments

A STUDY ON FATIGUE PROPERTY OF AUSTENITIC WELDED JOINTS IN STATE OF DEFORMING RECRYSTALLIZATION

Ruan Miqing and Fan Yinhe

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT The post weld heat-treatment cannot obviously improve the heterogeneity of microstructure and mechanical property in 1Cr18Ni9Ti welded joints, in particular for increasing their fatigue property, because there is no allotropic modification in 1Cr18Ni9Ti alloy, an austenitic stainless steel. Deforming recrystallization can be used to better the microstructure and mechanical properties of austenitic welded joints, and then to enhance their fatigue resistance remarkably. This paper mainly discusses the improvement of the microstructure and fatigue property in 1Cr18Ni9Ti welded joints, and verifies it by the low-cycle fatigue tests.

Key Words Austenitic stainless alloy Welded joint Recrystallization
Fatigue property

DYNAMIC BEHAVIOUR INVESTIGATION OF TAPER BEAM WITH SIDEWISE CRACK

Xing Deshun

(Gas Turbine Institute, Chendu 610500)

ABSTRACT Emergence of crack causes local flexibility variation of the component. A linear elasticity theory of fracture mechanics is applied to deriving the strain energy released by the crack. According to Castigliano theorem, elements of local flexibility matrix are obtained, which can correct the stiffness matrix of the taper beam. The dynamic behaviour of the taper beam has been found out by means of finite element method. The effects of relative depth of crack, crack location, ratios of length to width and width to taper thickness on natural frequency have been numerically investigated and the relevant experiments have been conducted to testify the calculation results.

Key Words Beams Vibration Crack Flexibility