

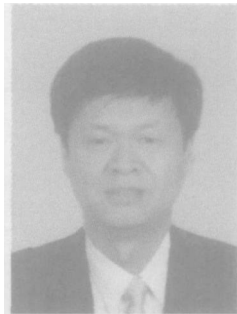
高温合金焊接接头动态拉伸变形断裂行为

罗新民¹, 陈康敏¹, 罗 刚², 范引鹤²
(1 江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013 2 南京航空
航天大学 能源与动力工程学院, 南京 210016)

摘 要: 借助扫描电子显微镜 (SEM) 的专用拉伸台, 通过取自相同焊接接头疲劳试件的原位拉伸试验和疲劳试验, 分析了高温合金焊接接头原位拉伸的动态断裂过程, 讨论了原位拉伸断裂行为与疲劳断裂的关系。结果表明, 高温合金熔化焊接接头强韧性良好, 断裂前应变可达 17.5%, 具有明显的形变强化效应; 焊缝断裂形貌与应力状态密切相关, 在平面应力状态下, 裂纹形成于熔合区晶内缺陷和晶界交汇处, 以延性剪切型断裂为主, 在应力集中的棱角处, 易诱发穿晶脆断; 焊缝熔合区的微观组织不均匀性和焊趾应力集中的联合作用将使焊接接头在疲劳试验过程中发生应变硬化, 引发疲劳裂纹。

关键词: 扫描电镜; 动态拉伸; 高温合金; 焊接接头; 疲劳强度

中图分类号: TG405 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)04-60-05



罗新民

0 序 言

在高温合金的应用场合, 焊接是重要的制造过程, 焊接质量在整个焊接结构中起着决定性的作用。在使用过程中需承受交变载荷的高温合金焊接件, 还必须进行疲劳校核。原位拉伸可对材料的微观破坏过程进行实时的动态观察, 用取自相同焊接接头疲劳试件的试样进行原位拉伸, 了解焊缝的动态断裂行为, 并和疲劳试验结果进行比较, 有助于提高对焊接接头疲劳破坏过程的认识, 从而寻求改善焊接质量的有效途径。

1 试验材料和试验方法

试验材料为国产 GH3030 与 GH150 高温合金。

焊接试样制备: 取厚度为 2 mm 的上述合金板, 采用自动对接氩弧焊焊接, 焊丝为 GH3128 直径为 1.6~2.5 mm, 钨极直径 2.0~2.5 mm, 焊接电流 70~90 A, 电弧电压 12 V, 氩气流量 12~15 L/min 焊后经 X 光探伤检验。

在未经疲劳试验的焊接试样上截取原位拉伸试样, 在垂直于焊缝的方向用线切割切取原位拉伸试样, 焊缝处在试样中部, 如图 1 所示。

试样经磨平, 单面抛光并轻度腐蚀, 以便观察组织的拉伸变形过程。

动态拉伸在 JXA-840 型扫描电子显微镜的附件 SM-TS40 专用拉伸台上进行, 其最大拉伸载荷为 2 kN, 加力传感器标定为 150 mV, 电压与载荷呈斜率为 1 的线性关系。最大拉伸距离为 20 mm, 拉伸速度可调, 最大达 50 mm/min。动态拉伸中, 可同时利用 X 射线能谱仪 (EDS) 对观测点进行元素分析。

焊接接头试样的疲劳试验在液压伺服疲劳试验机 EHF-EG250KN-40L 上进行, 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, 检查疲劳断裂的发生部位。

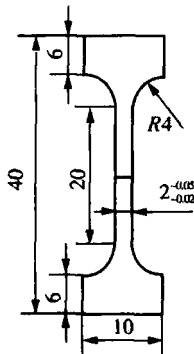


图 1 焊接接头的原位拉伸试样 (安装位置)
Fig 1 In situ tensile specimen of welded joint (at tensile direction)

2 试验结果分析

2.1 焊接接头原位拉伸的宏观形貌

图 2 为焊接接头原位拉伸后期的宏观形貌。

焊缝是在非平衡状态下凝固的铸态组织, 随匹配焊接材料的比例、与母材混合后的化学成分和冷却条件的差异, 组织十分复杂^[1]。如图 2 所示, 原位拉伸过程中, 在出现颈缩时, 焊缝处呈现明显的变形不均匀性。这是由焊接接头微观组织不均匀性和复杂性造成的。说明试样在加载后, 焊缝处微观组织在变形过程中, 不同位向的晶粒组织及其内部位错运动导致试样对应部位组织继续变形所要施加的局部应力不尽一致, 所以焊接接头呈现焊缝中央膨大, 形成两段式颈缩的现象, 符合板试样颈缩遵循的最小应变能路径原理^[2]。

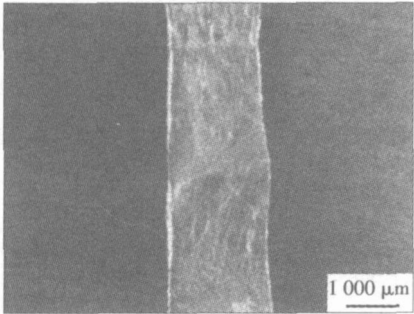


图 2 $\epsilon=16.2\%$ 后的焊缝宏观形貌, 上颈缩部位 (与 GH3030 连接处) 为最后断裂处
Fig. 2 Macro appearance of weld upon $\epsilon=16.2\%$; upper necking (GH3030) developing into final fracture site

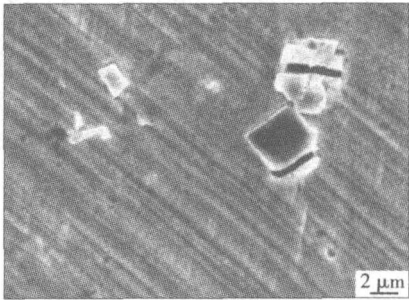
金相检查发现试件焊缝主要为树枝晶组织。有研究表明结晶前沿具有细树枝凝固界面的合金, 其持久性能最佳^[3], 这种组织促使加工硬化, 推迟了颈缩时间。母材是细等轴晶组织。熔合区组织比较复杂, 与 GH150 材交界处以大小不等的等轴晶为主, 与 GH3030 材交界处以柱状晶为主。热影响区有局部晶粒粗化, 因高温合金无同素异构转变。在焊接过程中, 除焊缝凝固组织外, 与母材的过渡区因过热而呈不规则长大。这样, 焊接接头的整体微观组织存在着 3 种取向各异的组织。因而接头存在着比较严重的微观组织不均匀性, 它们必然影响接头的变形行为^[4]。多晶体各晶粒变形时的相互配合是材料抵抗塑性变形的形式, 否则极易在局部过早开裂。上述组织不均匀性易使焊接接头在疲劳性能试验过程中导致内部微观应力集中和各晶粒应变率的差异, 最终将在较弱部位萌生疲劳裂纹。

2.2 原位拉伸中试样的微观变形过程

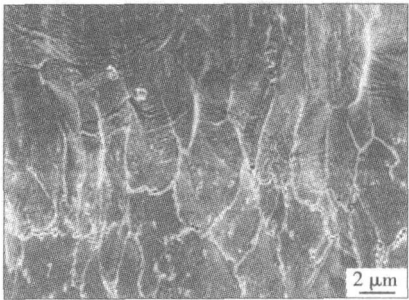
图 3 显示了在拉伸过程中试样表面的微观变形情况。

随拉伸进行, 受力晶粒内存在的大量位错、层错

等在应力的作用下, 位错将开动, 形成相互平行的滑移线, 如图 3a 所示。塑性变形必须考虑加载速度, 由于原位拉伸应变速率较低, 晶粒形变比较均匀, 滑移带平直、间距大小基本一致。但该图只显示了一个方向的滑移带, 说明在均匀形变阶段, 只有一个方向的滑移系占主导地位, 此阶段合金将出现初始硬化^[5]。随着拉伸进行, 在其它晶粒中可以看到不同方向的滑移带出现, 形成尖峰状或三角形。根据晶体学理论, $\langle 111 \rangle$ 晶面是奥氏体的滑移面, 也是层错形成面。该晶面有 4 个基本取向, 每个晶面间的夹角理论计算为 $70^\circ 32'$ 。如果某一晶粒截面和 $\langle 111 \rangle$ 平行或近似平行, 由于 $\langle 111 \rangle$ 面上 3 个滑移方向的基准矢量间夹角为 60° , 是正三角形, 所以拉伸时奥氏体晶内滑移线特征符合晶体学的位向关系^[6]。随着变形量加大, 滑移带将逐渐变宽, 并出现弯曲。



(a) $\epsilon=7.65\%$



(b) $\epsilon=16.2\%$

图 3 焊缝内晶粒的滑移线和晶内第二相颗粒和焊缝熔合区晶粒

Fig. 3 Slip lines and secondary phase particles in a grain of weld (a) and elongated grains in fuse zone of weld (b)

由于每个晶粒位向不同, 并不是每个晶粒的滑移系的方向都与最有利于变形的方向一致, 则造成各晶粒变形程度有差异。随着应变量增加, 晶粒开始服从应力条件下的协同扭转, 变形加剧, 出现浮凸。从最初的只有少数区域的个别晶粒发生扭转, 到最后几乎每个晶粒均都发生了扭曲, 表面浮凸愈

加明显,如图 3b所示,在拉伸应力的作用下,焊缝熔合区的晶粒被明显拉长,出现择优取向。而其上方热影响区晶粒已出现滑移线粗化、弯曲。这种微观形貌变化可在一定程度解释宏观形变的不均匀性。同时发现在拉伸应力作用下,晶内脆性第二相颗粒(图中颗粒为氮化钛)与基体脱开,并碎裂,见图 3a。这类第二相颗粒的滑移系少,在外加应力下易脆裂或沿边界断裂成为裂纹源^[7],但有时也有利于提高材料的形变强化能力^[8]。

不均匀组织如晶界、夹杂物等,也将对焊接接头的破断产生影响。从图 4可见晶界和夹杂物在拉伸应力作用下对微观断裂机制的影响。由图 4a可见,焊缝晶界在不大的应力水平下,就先于夹杂物发生开裂,但尚不能判断晶界析出物的影响。

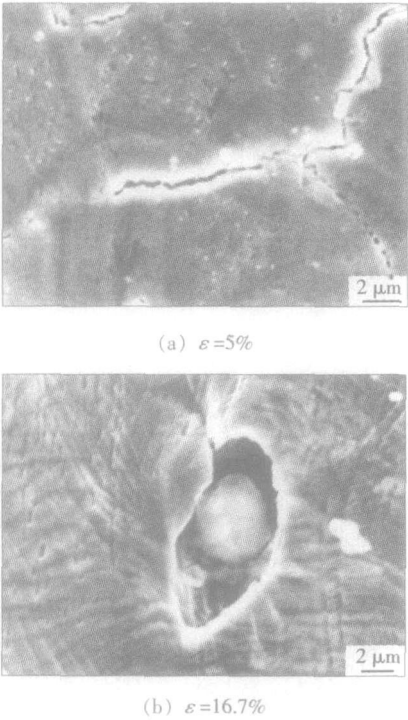


图 4 焊缝晶界 (a) 和夹杂物 (b) 的断裂形貌
Fig 4 Fracture of grain boundary in weld (a) and fracture along inclusion (b)

图 4b显示的是夹杂物引起的裂纹源, X 射线能谱分析显示, 此类夹杂物主要是铝、钛或铌的化合物。原位拉伸显示出夹杂物从晶界或基体中脱落。由于夹杂物所致的应力集中, 在孔洞的周围, 将形成垂直于拉伸方向的显微裂纹。由此看出, 在拉应力作用下, 夹杂物及其周围组织是焊缝的薄弱环节。

2 3 裂纹的萌生

高温合金焊缝具有良好的强韧性配合, 当试样发生颈缩现象后, 由于板状薄试样在厚度方向不能造成变形约束, 故不能形成平面应变状态, 起始裂纹

可在试样抛光表面直接观察到。表面一旦形成裂纹, 则裂纹前端附近区域的变形亦基本不受约束, 可以自由变形, 呈完全屈服状态。在外力的作用下, 裂纹前端由于塑性变形而沿试样厚度斜向和两侧呈张开状撕裂, 与平面应力条件下薄板拉伸试样的宏观断裂行为一致。

图 5 显示试样不同部位在原位拉伸中发生断裂的微观形貌和机制。

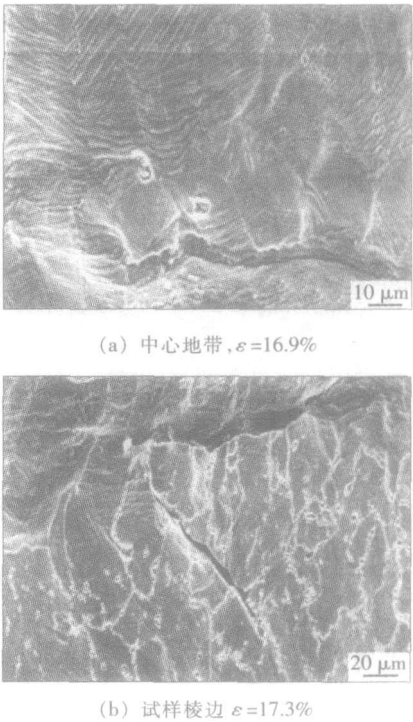


图 5 试样不同部位的变形和开裂
Fig 5 Deformation and fracture of specimen at different positions

如图 5a所示, 在板状试样中心地带, 滑移线粗化、弯曲; 晶粒倾侧, 呈现表面浮凸; 因是平面应力状态, 裂纹呈滑开型。而试样锐利棱角处应力状态复杂, 易造成应力集中, 少量塑变即发生形变强化, 使进一步的塑性变形受阻, 结果在试样边缘形成明显的脆性穿晶断裂, 从其拉长的晶粒和表面滑移线可见其前期曾经历过塑性变形。

2 4 主裂纹扩展的原位观测

图 6a~f为主裂纹萌生和扩展的原位观测结果。不同取向晶粒的变形能力和变形抗力是不同的, 在拉伸载荷下, 必然在取向最有利于滑移和微观内应力最易集中的晶粒先开始, 组织愈不均匀, 这种起始塑性变形的选择性就愈突出。当先变形的晶粒变形量超过一定值, 就会萌生起始裂纹。如图 6a所示, 在一滑移三角形的尖端和孪晶界扭折底部, 由于形变强化, 材料变脆, 产生一空洞, 形成主裂纹源; 空

洞的产生,使应力状态软化如图 6b 所示,空洞在受力方向被拉长,并沿晶界向左撕裂,穿过孪晶界后,又产生一次生裂纹源;图 6c 表明孪晶被拉断,裂纹垂直于拉伸方向的部分更易滑开,主裂纹内侧又产生一次生裂纹;图 6d 表明新裂纹源不断出现,主裂纹已连结;图 6e 表明原观察点带出一第二相颗粒;主裂纹面局部有韧窝形成,同时出现新空洞,主裂纹

的左侧前沿,向左侧快速撕开,进入全面溃退;图 6f 为试样最后断裂前的裂纹形貌。整个过程:裂纹源形成,相互连结,形成主裂纹;主裂纹向斜上方滑移张开,撕裂面上可见蛇行滑移纹和小韧窝;随裂纹张开,不同性质第二相带出,脱离基体或碎裂;裂纹横向扩展以致最后断裂,其断口呈全剪切状,无放射区,为典型的平面应力条件下造成的切断型断口。

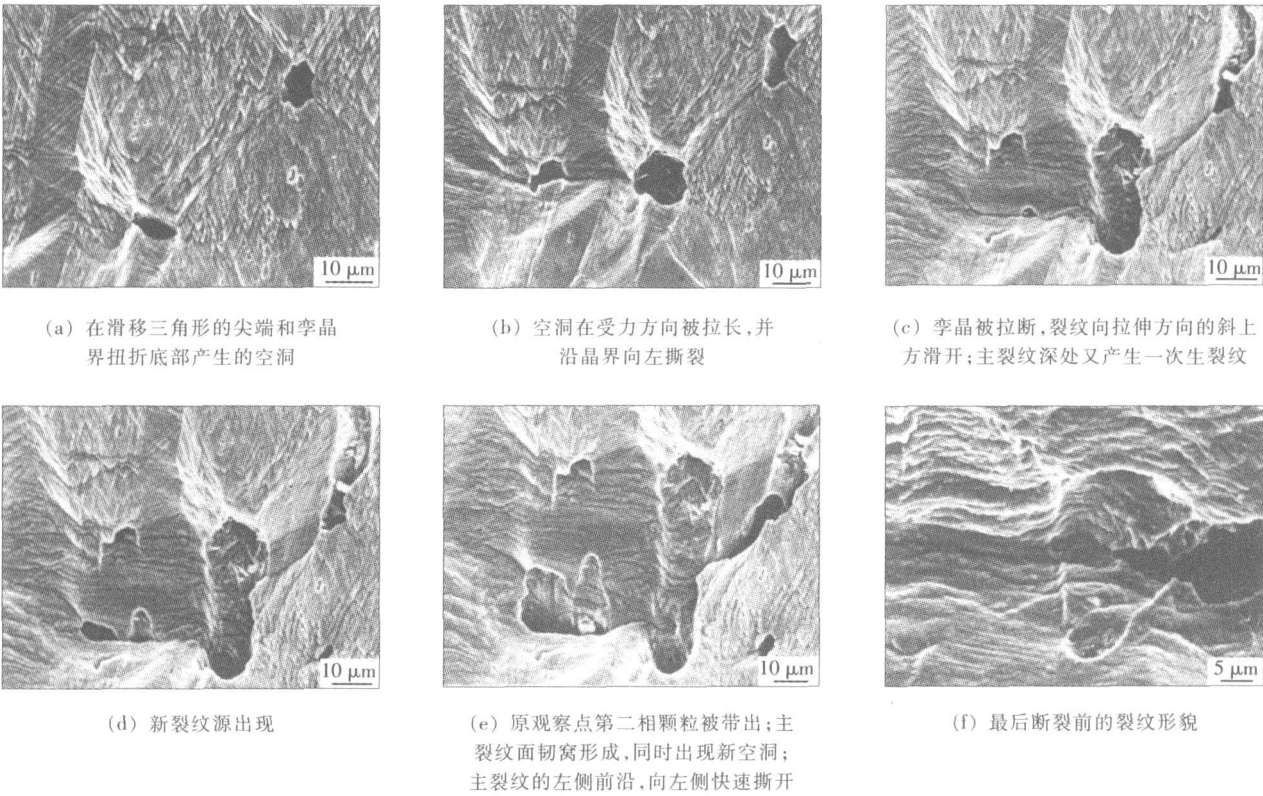


图 6 焊缝主裂纹萌生和扩展的原位观测
Fig 6 In situ observation of initiation and propagation of main crack in weld

2 5 疲劳试验结果

表 1 所示为两组焊接接头疲劳试验结果,每组含 6 个数据, S 为子样标准差。试验结果表明,自动对接氩弧焊接高温合金的疲劳性能良好,低应力水平下的数据均匀性较优。疲劳断口检查发现,疲劳裂纹源始于焊趾或焊根处,同时发现疲劳源首先与焊缝表面微观质量有关,其次才是焊缝微观组织形态与结构。

表 1 疲劳试验结果

Table 1 Experimental results of fatigue test			
材料	应力	$\lg N_{\text{均}}$	S
3030+150	520 MPa	4.818	0.05
3030+150	600 MPa	4.49	0.103

在测试高温合金对接氩弧焊接接头疲劳性能时发现,其疲劳寿命远低于对应合金的光滑试样^[9],并

且疲劳源全部产生在焊接接头的熔合区,进而疲劳裂纹扩展导致接头疲劳失效。由原位拉伸观察得出焊接接头微观组织的复杂性和接头各区域组织分布特点,表明疲劳破坏过程不同于静拉伸,材料在交变负荷下,与静负荷相比,内部的滑移不均匀性将更大。研究表明即使是同一金属组织,在不同的塑性变形基础上,也会导致不同程度的形变强化^[8]。高温合金焊接接头的熔合区内明显的组织不均匀状态将加剧疲劳裂纹的萌生,这样,这个区域将成为该类接头疲劳性能较为薄弱的部位。

应用中发现高温合金焊接结构的破坏常以低周疲劳为主。目前一般报告裂纹常发生于焊接接头的焊趾部位,其主要原因是焊接接头的宏观残余拉伸应力和应力集中的影响。但在磨去焊趾的原位拉伸试验中发现,试样也往往断于焊缝内靠较弱一方合金的熔合区内。在不同焊接状态下的疲劳断口检查

中发现,疲劳源常见于熔渣夹杂、表面缺陷和熔合区的早期形变硬化处^[10],这与焊接接头原位拉伸中观测到的结果一致。高温合金焊接过程中,在多元金属扩散不够充分的一般条件下,在焊缝熔合区部位易于形成金属间化合物的脆性相,而导致焊缝弱化^[11]。因此改善焊接质量,尤其是表面质量非常重要,有利于减轻焊趾的不利影响。

3 结 论

(1) 板状试样原位拉伸表明高温合金熔化焊接接头焊缝处静拉伸强塑性良好,应变达 17.5%,焊缝中部具有明显的形变强化效应。试样断裂形貌与应力状态密切相关,在平面应力状态下,裂纹形成于晶内缺陷和晶界交汇处,以延性破坏为主,在试样棱角处,由应力集中造成的复杂应力状态和加工硬化共同作用导致脆性断裂。

(2) 不同高温合金母材的熔化焊接接头中,存在两个不同的熔合区,在原位拉伸试验中发现焊缝有不均匀颈缩现象,其中与 GH3030 熔合区的抗拉强度较弱,是接头力学性能较薄弱的部位。

(3) 高温合金熔化焊接接头内部存在的微观组织不均匀性,尤其是在熔合区,其微观组织不均匀及其中的晶界夹杂物是使该类接头疲劳性能弱化的部位,将使接头在疲劳试验过程中与焊趾共同作用易致应力集中和应变硬化,从而诱发疲劳裂纹。

参考文献:

[1] 孙晓峰 殷凤仕 李金国. 等. 一种铸造镍基高温合金的凝固行为[J]. 金属学报, 2003 39(1): 27-29.

[2] Zhou W eixian Mechanisms of localized necking deformation of sheetmetal[J]. Trans NonferrousMet Soc China 1997 7 (2): 71-75.

[3] 师昌绪, 仲增墉. 中国高温合金四十年[J]. 金属学报, 1997 33(1): 1-8.

[4] 阮米庆, 范引鹤, 顾海锋. 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影响的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 1999 28(1): 30-33.

[5] 刘毅, 陈立佳, 王中光. 高温 4049 镍基高温合金疲劳-蠕变行为及形变结构研究[J]. 金属学报, 1999 35(9): 955-959.

[6] 陈康敏, 戴起勋. 高氮奥氏体钢形变组织的晶体学特征[J]. 钢铁研究学报, 1998 10(2): 38-42.

[7] 凌树森. 金属材料在拉伸条件下不同屈服形态的原因探讨[J]. 理化检验——物理分册, 1997 33(4): 72-75.

[8] WangW enxian Huo Lixing Zhang Yufeng Effect of transformation temperature on improving the fatigue strength of welded joints[J]. Transactions of the ChinaW elding Institution 2002 23(3): 15-18.

王文先, 霍立兴, 张玉凤. 相变温度对焊接接头疲劳强度的影响[J]. 焊接学报, 2002 23(3): 15-18.

[9] 应慧筠, 施成根, 郝传勇. 高温 150 合金焊接热影响区液化与液化裂纹[J]. 金属学报, 1997 33(9): 995-1001.

[10] 吕铮, 周惠华, 徐永波. 定向凝固钴基高温合金的低周疲劳行为[J]. 金属学报, 1997 33(12): 1239-1245.

[11] 李金山, 张万明, 寇宏超. 原始组织对高温合金热处理组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002 12(2): 290-293.

[1] 孙晓峰 殷凤仕 李金国. 等. 一种铸造镍基高温合金的凝固行为[J]. 金属学报, 2003 39(1): 27-29.

[2] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤. 提高焊接接头疲劳强度超声波冲击法[J]. 焊接学报, 1999 20(4): 158-164.

[3] Bertini L, Fontanari V, Straffellini G. Influence of postweld treatments on the fatigue behavior of Al alloy welded joints[J]. International Journal of Fatigue 1998 20 (10): 749-755.

[4] Statnikov E S, Muktepavel V O, Troufakov V J *et al* Comparison of ultrasonic impact treatment and other fatigue life improvement methods[J]. Welding in the World 2002 46 (3 4): 20-32.

[5] Xiaohua Cheng John W, Fisher *et al* Residual stress modification by postweld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures[J]. International Journal of Fatigue 2003 25 1259-1269.

[6] 王东坡, 张玉凤, 霍立兴. 超声冲击处理焊接接头焊趾区材料的疲劳性能[J]. 天津大学学报, 2001 34(1): 13-17.

[7] Sougata Roy John W, Fisher *et al* Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT)[J]. International Journal of Fatigue 2003 25 1239-1247.

作者简介: 罗新民, 男, 1951 年出生, 工学硕士, 教授。研究方向为金属材料及金属工艺性能优化。曾获机械部科技进步三等奖 1 项, 国家发明专利 2 项, 在国内外学术刊物和学术会议上发表论文 60 余篇。

Email luoxm@uj.sjtu.edu.cn

作者简介: 饶德林, 男, 1965 年出生, 讲师, 博士研究生。主要从事机械振动消除焊接结构残余应力研究, 发表论文 10 余篇。

Email raodelin@sjtu.edu.cn

[上接第 50 页]

method to improve fatigue strength of welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution 1999 20(4): 158-164.

王东坡, 霍立兴, 张玉凤. 提高焊接接头疲劳强度超声波冲击法[J]. 焊接学报, 1999 20(4): 158-164.

[2] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤. 等. 超声冲击法提高低碳钢焊接接头疲劳强度的研究[J]. 机械强度, 1999 21(4): 289-306.

[3] Bertini L, Fontanari V, Straffellini G. Influence of postweld treatments on the fatigue behavior of Al alloy welded joints[J]. International Journal of Fatigue 1998 20 (10): 749-755.

[4] Statnikov E S, Muktepavel V O, Troufakov V J *et al* Comparison of ultrasonic impact treatment and other fatigue life improvement methods[J]. Welding in the World 2002 46 (3 4): 20-32.

[5] Xiaohua Cheng John W, Fisher *et al* Residual stress modification by postweld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures[J]. International Journal of Fatigue 2003 25 1259-1269.

[6] 王东坡, 张玉凤, 霍立兴. 超声冲击处理焊接接头焊趾区材料的疲劳性能[J]. 天津大学学报, 2001 34(1): 13-17.

[7] Sougata Roy John W, Fisher *et al* Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT)[J]. International Journal of Fatigue 2003 25 1239-1247.

and adjusting its posture to the desired status for welding. The experiment of auto searching track shows that the robot has high tracing accuracy and can meet the requirement of practical welding.

Key words welding mobile robot; auto searching; weld line; seam tracking; ship deck

Deformation and fracture behaviors of superalloy welded joint upon scanning electron microscope in situ tension LUO Xinmin¹, CHEN Kangmin¹, LUO Gang², FAN Yirhe² (1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2. University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China). p60-64

Abstract The fracture process of the GH series superalloy welded joints with argon tungsten arc welding was observed upon scanning electron microscope in situ tension using the samples obtained from the same fatigue test pieces. The relations between the fracture features of in situ tension and tension fatigue behaviors was discussed. The results reveal that the GH alloys welded joint had excellent strength and the fracture strain reaches up to 17.5%, which shows remarkable strain strengthening effect. It has also discovered that the fracture morphology of the welded joints is closely related to the stress state. The cracks initiated at the crystal defects and the grain boundaries and shown the ductile shear fracture under the plane stress state. Those formed at corners of the sample with stress concentration were liable to be failure with brittle transgranular fracture. The results reveal that the co effect of stress concentration of welding root/toe and the non uniformity of microstructures in the welded joints would result in strain hardening of fatigue test pieces, and therefore to induce initial cracks during fatigue.

Key words scanning electron microscope; in situ tensile; GH superalloy welded joint; fatigue strength

Full bridge zero voltage switch pulse width modulation spot welding inverter power with double bop control BAI Zhihua, XUAN Zhaozhi, TANG Hua, KONG Xiangtian (Jilin University, Changchun 130025, China). p65-68

Abstract A spot welding inverter power have been introduced according to the characteristic of spot welding. The ordinary full bridge zero voltage switch pulse width modulation direct current/direct current convert using auxiliary network has been modified in order to minimize the primary duty ratio loss. The parameters of the leg bridge and the auxiliary network have been optimized by programme. The transfer function of main circuit was constructed completely. A double bop control method has been used so the output current can accurately follow the programmable reference and the magnetic flux imbalance is avoided.

Key words spot welding power; soft switching; double bop control

Transient liquid phase diffusion bonding with two step heating process CHEN Sijie^{1,2}, JING Xiaotian¹, LIX Jing³ (1. School of Materials Science & Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Henan

Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 3. Shandong Electric Power Institute, Jinan 250002, China). p69-72

Abstract This paper describes a novel transient liquid phase (TLP) diffusion bonding model recently developed for bonding T91 steel pipes. The method is based on imposing a short time high heating temperature before the isothermal solidification of the liquid layer. The method reliably produces bond which tensile strengths as high as those of the parent material. Consequently, bonding strength is increased possibly due to the higher metal to metal contact along the non planar bond lines as compared to the planar bond lines associated with conventional TLP diffusion bonding. The testing results showed that the solidified bond should consist of a primary solid solution with a composition similar to that of the parent metal and free from precipitates. Bonding parameter of new process are at 1270 °C for 0.5 min and 1230 °C for 3 min. Conventional bonding parameter is 1250 °C for 3 min.

Key words T91 steel; transient liquid phase diffusion bonding; interlayer microstructures model; two step heating temperature process

Capillary electron beam brazing of stainless steel tube to plate joint LI Shaoqing, ZHANG Yuxia, LIU Fenggui, YAO Shun (Welding Engineering Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p73-75

Abstract Stainless steel capillary tube to plate brazed joint by electron beam has been achieved using electron beam brazing system based on Virtual Instruments. Effects of electron beam brazing parameters including beam current, heating time, focus current and scanning amplitude on the quality of brazing joints are discussed. Experimental results show that fillet height and diffusion depth of BNi2 filler metal to capillary tube wall both increase with electron beam input power density increasing. Penetration rate of the stainless steel tube to plate joint is up to 100% and erosion phenomena of capillary tube are not found when optimized processing parameters of electron beam brazing are adopted. Chemical composition of phases at brazed joint is also investigated by an electron probe microanalyser. Brazed joint consists of nickel boride, nickel silicide, chromium boride and solid solution.

Key words electron beam brazing; tube to plate joint; microstructure; nickel based filler metal

Application of dynamic network plan to welding production LÜ Rongsheng, CHEN Jianguo (School of Economy and Management, Tianjing University of Science and Engineering, Tianjing 300191, China). p76-80

Abstract Aiming at welding production of dissimilar steel, the optimum plan was determined adopting dynamic network plan with stage division and resource distribution. The results showed that technical problem was solved, resource distribution was balanced, time limit for a project was optimized. And productive period was shortened and cost was reduced.

Key words dynamic network plan; welding production; improve efficiency method; technology and management