

# 1Cr18Ni9Ti/20G 双金属爆炸焊接界面裂纹的扩展行为\*

江峰 赵康 康伟 孙军 何家文

(西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要** 利用奥氏体不锈钢 / 低碳锅炉钢 (1Cr18Ni9Ti/20G) 爆炸焊接复合板, 通过电子束焊接得到带有界面裂纹的三点弯曲  $J$  积分裂纹扩展阻力试样和四点弯曲疲劳试样, 分别进行了带界面裂纹双材料和相应单一材料试样的裂纹扩展阻力曲线及其疲劳扩展行为的实验研究. 结果表明: 双材料界面裂纹的静态和动态扩展阻力均低于裂纹在相应单一材料中的扩展阻力.

**关键词** 爆炸层合板, 界面裂纹, 裂纹扩展

**中图法分类号** TB331

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2002)05-0463-04

## CRACK PROPAGATION ALONG THE INTERFACE OF EXPLOSIVE BONDED 1Cr18Ni9Ti/20G PLATE

JIANG Feng, ZHAO Kang, KANG Wei, SUN Jun, HE Jiawen

State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Correspondent: SUN Jun, professor, Tel: (029)2667143, E-mail: junsun@xjtu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.59871036, No.59925104, No.59731020)

Manuscript received 2001-08-27, in revised form 2001-12-20

**ABSTRACT** Bimetallic specimens were prepared through explosion clad 1Cr18Ni9Ti/20G and in order to measuring their mechanical properties the electron beam welding of bulk 1Cr18Ni9Ti and bulk 20G on the both respective sides was carried out. Cracks were introduced at the interface in the specimens by milling and spark-erosion. Both the resistance curves loaded by symmetric three-point bending and fatigue crack growth behaviors loaded by symmetric four-point bending were investigated for the bi-materials interface and the bulk materials. The results showed that the resistance to crack growth along the bi-material interface was always less than those of respective counterpart materials for both static and dynamic loadings.

**KEY WORDS** explosive clad metal, interfacial crack, crack growth

通过爆炸焊接复合而成的不锈钢 / 碳钢复合板在石油化工设备压力容器等的制造中被广泛应用. 此类复合板在制备过程中界面区不可避免带有夹杂、气孔等裂纹源. 在服役过程中, 裂纹沿界面的扩展行为是影响结构器件服役安全可靠性的关键因素之一. 因此对于沿不锈钢 / 碳钢界面裂纹的静态扩展和动态扩展的研究在工业上具有现实意义. 以往的相应研究工作, 在对金属复合板爆炸焊接界面结合区域宏观形貌、微观组织等分析的基础上<sup>[1-3]</sup>, 主要针对疲劳裂纹在界面上和离开界面一定距离时双材料的扩展阻力行为进行比较<sup>[4]</sup>, 特别是对于强度错配 (弹性模量相同、屈服强度和硬化指数不同) 的金属 / 金属焊接结构的界面问题的理论和实验研究已取得了明显的进展<sup>[5-7]</sup>. 但是常规焊接接头的界面过渡区和热影响区 (HAZ) 均有一定尺寸, 不能把界面作为理想界面来处理, 给相应的理论研究和数值模拟带来很大困难<sup>[4]</sup>. 对于裂

纹沿界面的疲劳扩展行为进行的工作主要是关于有限元的数值模拟和陶瓷 / 金属、金属 / 聚合物层合板界面裂纹的疲劳扩展行为的研究<sup>[8-14]</sup>. 少量的金属 / 金属爆炸复合界面的研究大多是关于平面应力状态下的薄板结构界面. 而对于平面应变状态下的大尺寸试样界面裂纹的扩展行为的研究尚少见报道<sup>[15,16]</sup>.

本文用奥氏体不锈钢 / 低碳锅炉钢 (1Cr18Ni9Ti/20G)<sup>[17]</sup> 爆炸焊接复合板, 通过电子束焊接得到带有界面裂纹的三点弯曲  $J$  积分裂纹扩展阻力试样和四点弯曲疲劳试样. 实验测定了带有界面裂纹的双材料和相应组成单材料的  $J$  阻力曲线. 另外在高频疲劳试验机上进行了沿界面裂纹双材料和单材料的四点弯曲疲劳裂纹扩展实验, 并对疲劳断口进行了金相显微镜和扫描电镜观察分析.

### 1 实验方法

采用爆炸焊接工艺制得的 1Cr18Ni9Ti/20G 复合板具有非常薄的界面过渡层, 可作为理想界面来处理<sup>[4]</sup>. 图 1 是爆炸复合板界面形貌以及界面两侧的金相组织. 由于爆炸焊接的特点, 波纹状界面的形貌是其特有的现象, 复

\* 国家自然科学基金项目 59871036, 59925104, 59731020 资助  
收到初稿日期: 2001-08-27, 收到修改稿日期: 2001-12-20  
作者简介: 江峰, 1973 年生, 男, 博士生

合板的结合界面形貌有方向性,如图 1a 为沿爆炸焊接起爆方向的界面结合形貌,具有明显的波纹形状,波纹形状的波峰波谷的大小与所采用的材料性能有关,图 1b 为与波纹状界面垂直方向的形貌,外观比较平直。

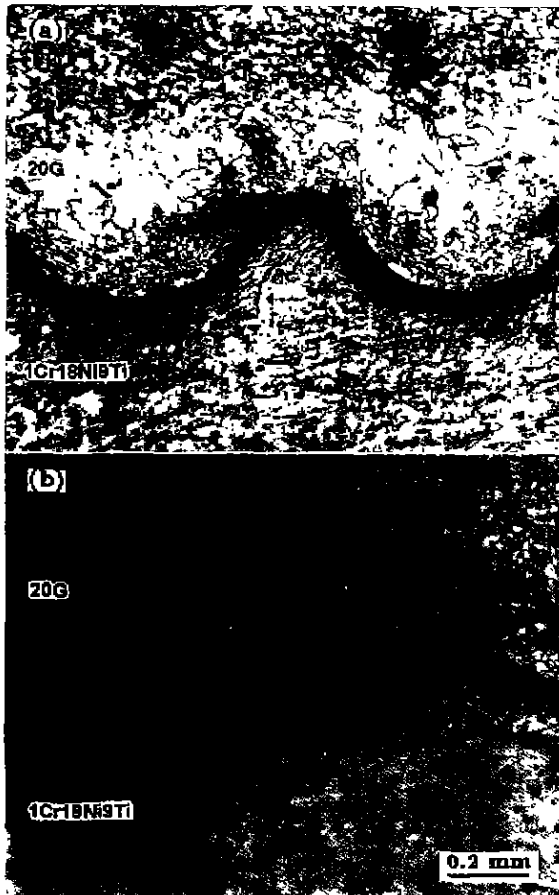


图 1 界面形貌及界面两边金相组织

Fig.1 Interface morphologies of 1Cr18Ni9Ti/20G and microstructures of both sides of interface  
(a) wavy interface (b) straight interface viewed along the direction vertical to the wavy interface

从爆炸复合板上切割下复合板条时,应使以后实验中裂纹能够沿图 1b 所示平直的界面扩展,尽可能地消除界面不平直给裂纹长度测量带来的影响,经机械加工成  $150\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times 11\text{ mm}$  的复合板条,其中 1Cr18Ni9Ti 和 20G 两侧外表面距爆炸焊接界面均为 8 mm,再在两侧外表面采用电子束焊接的方式分别焊接上尺寸为  $150\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 11\text{ mm}$  的 1Cr18Ni9Ti 和 20G 单材料。由于电子束焊接的过渡区宽度仅为 0.5 mm,所以可认为加长试板的焊接区离 1Cr18Ni9Ti/20G 界面足够远,且电子束焊接过程不会对界面的性能产生影响。随后对焊接加长试板进行  $860\text{ }^\circ\text{C}$  保温 2 h 退火热处理、随炉冷却,去除爆炸焊接和电子束焊接过程中导致的热应力。继而利用加长试板分别加工  $J$  积分裂纹扩展阻力试样和四

点弯曲疲劳试样。其中对于  $J$  积分裂纹扩展阻力试样,由于受到尺寸大小的限制,达不到平面应变所要求的厚度,因此采用带侧槽的积分裂纹扩展阻力试样,在试样界面处切割缺口,在界面预制疲劳裂纹以后在界面两侧开侧槽,侧槽夹角为  $60^\circ$ ,其深度为试样厚度的 10%,得到带侧槽的  $J$  积分裂纹扩展阻力试样。相应地加工了 1Cr18Ni9Ti 和 20G 的单材料  $J$  积分裂纹扩展阻力试样,尺寸大小和对应双材料试样相同。对于四点弯曲疲劳试验也加工了相同尺寸大小的单材料试样。带界面和不带界面的试样的形状、尺寸和加载方式见图 2。图 2a, b 是  $J$  积分测试试样,分别为单材料和双材料试样。图 2c, d 分别是单材料和双材料试样的四点弯曲疲劳试样。采用 100 g 金刚石探头对层合板进行 Vickers 硬度测量。 $J$  阻力曲线测试在 MTS880 型试验机上进行,试验参照 ASTM-E83 标准。疲劳试验在 AmslerHFP5100 高频疲劳试验机上进行,采用四点弯曲加载方式。正弦波加载,频率为 100 Hz 左右,应力比为 0.1。利用贴片间接直流电位法测量瞬时裂纹长度,测试精度为 0.01 mm。

## 2 实验结果与讨论

平直界面 Vickers 硬度测量结果(图 3)表明,1Cr18Ni9Ti 和 20G 的硬度值均在 HV120 左右,靠近界面处稍高。可能与爆炸焊接导致的基体材料强化和焊接结合区的组织有关<sup>[3]</sup>,本实验中也是相似的情况。在界面处硬度梯度很大,也说明界面层很薄。而采用烧结和普通焊接方法得到的双材料,有很大的界面过渡区和热影响区(HAZ),过渡区的存在不能忽略。

### 2.1 $J$ 阻力曲线

对于 1Cr18Ni9Ti/20G 双材料试样和 1Cr18Ni9Ti, 20G 单材料试样均采用三点弯曲加载方式,加载速率  $0.05\text{ mm/min}$ 。记录得到施力点载荷位移曲线( $P-\Delta$  曲线)和相应的裂纹扩展量,通过  $P-\Delta$  曲线计算和  $\Delta a_i$  对应的  $J_i$ ,由此得到的  $J$  阻力曲线如图 4。

由图可见,1Cr18Ni9Ti 的扩展阻力最高,20G 次之,而双材料界面的扩展阻力最低。这和文献[4]的结果是一致的。扩展阻力的降低可能与如下因素有关:界面的结合强度以及爆炸焊接过程中存在的夹杂孔洞等缺陷,由界面处形貌和两边的组织状态(图 1),可以看出有孔洞存在,并且两边的组织是不均匀的。文献[2]对界面结合区进行了研究,发现在界面处有薄层细晶区,以及界面附近的晶粒大多经过强烈的塑性变形,并且有孔洞等缺陷存在。界面处的缺陷使得界面的性能弱化。另外界面两侧基体材料强韧性的差异也会引入应力、应变集中,导致形变的不均匀,从而促使裂纹萌生与扩展,降低扩展阻力。

### 2.2 疲劳性能

采用和单一材料类似的试验方法进行带界面裂纹双材料的疲劳扩展试验的合理性的工作见文献[16]。图 5

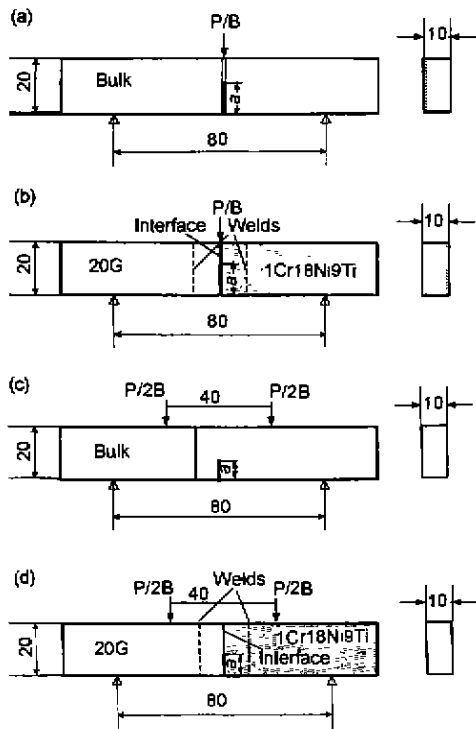


图 2 试样几何和加载方式

Fig.2 Schematic representation of specimens used in measuring integral crack propagation (a, b) and four points bending fatigue (c, d)

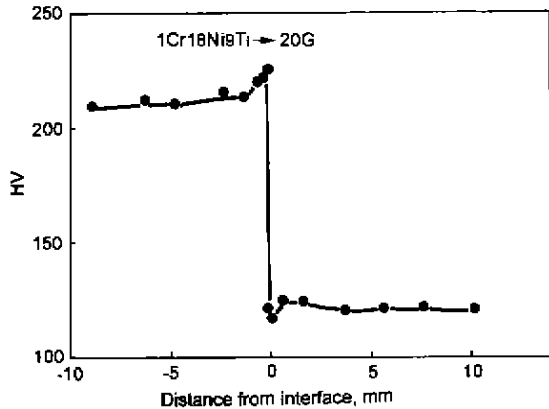


图 3 1Cr18Ni9Ti/20G 层合板界面附近 Vickers 硬度

Fig.3 Distribution of hardness of laminate 1Cr18Ni9Ti/20G

是具有界面的 1Cr18Ni9Ti/20G 双材料和 1Cr18Ni9Ti, 20G 单材料的疲劳裂纹扩展速率  $da/dN-\Delta K$  曲线。

由图 5 可以看出, 界面裂纹开始扩展的应力强度因子幅  $\Delta K$  值 (门槛值) 小于相应的两种单材料的门槛值  $\Delta K$ , 在相同的  $\Delta K$  作用下, 界面裂纹的扩展速率也高于相应的两种单材料的扩展速率。由此可以说明界面是个薄弱的环节, 与图 1 显示的界面处的杂质、孔洞等缺陷存在一致, 这些缺陷对于界面疲劳性能的弱化有很大的影响。另外裂纹更容易在界面处萌生扩展。数值计算也证明较低的应力三轴性状况就可使界面发生延性损伤和裂纹萌生<sup>[16]</sup>。

疲劳曲线显示沿界面裂纹的扩展有波动现象, 这可能是与如下情况有关: 当疲劳主裂纹扩展时, 前端也有支裂纹的萌生 (或者界面处的夹杂孔洞本身就是裂纹源), 连接长大, 某一时刻, 主裂纹和支裂纹汇集贯通连接, 此时裂纹长度突然长大, 反映到记录的数据上就是扩展速率的突然提高, 然后主裂纹继续扩展, 前端的支裂纹同样长大, 然后重复主裂纹和前面支裂纹的连接扩展, 相应地疲劳扩展速率出现波动。其次, 双材料的界面并不是非常平直的, 多少有些弯曲波折, 这也会导致疲劳曲线的波动。这种波动情况在单一材料的疲劳扩展过程中即使会发生也是不明显的。

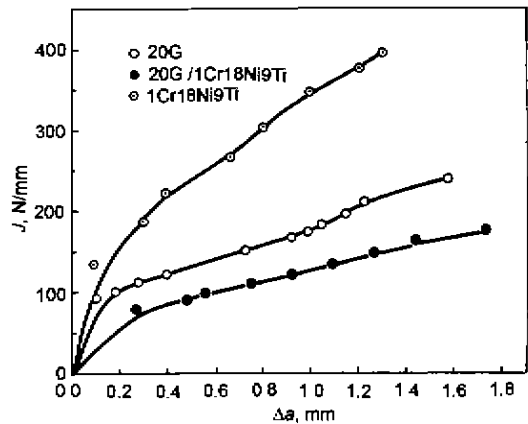


图 4 J 阻力曲线

Fig.4 Crack resistance curves of bi-material and bulks

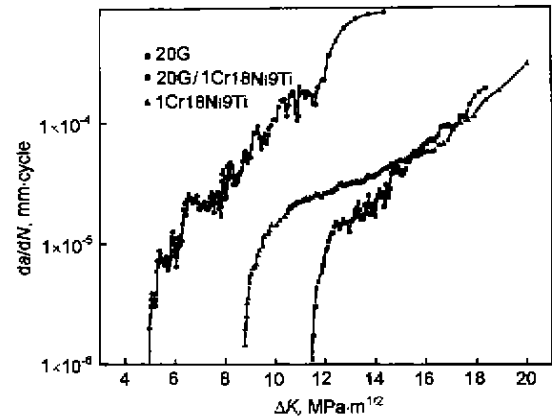


图 5 双材料和单材料  $da/dN-\Delta K$  曲线对比

Fig.5 Crack propagation curves ( $da/dN-\Delta K$ ) of bi-material and bulks

### 2.3 断口分析

对于 J 积分测试实验的试样断口详见文献 [4], 图 6 是 1Cr18Ni9Ti/20G 沿界面疲劳断裂试样 20G 一侧的断口宏观形貌, 断口显示有三个区域, M 表示线切割区, F 疲劳扩展区, R 最后断裂区。

疲劳扩展区 F 以疲劳条纹为主, 可以看出明显的磨损形貌存在 (图 7a)。这是由于沿界面裂纹扩展是复合型加载的缘故。双材料界面的存在也使得裂纹的扩展不同于

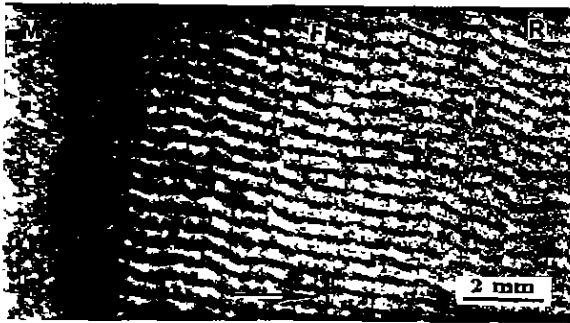


图6 疲劳界面断面形貌

Fig.6 Morphology of fatigue fracture surface of 1Cr18Ni-9Ti/20G (M indicating spark-eroded zone, F fatigue crack propagation zone, R final rupture zone)

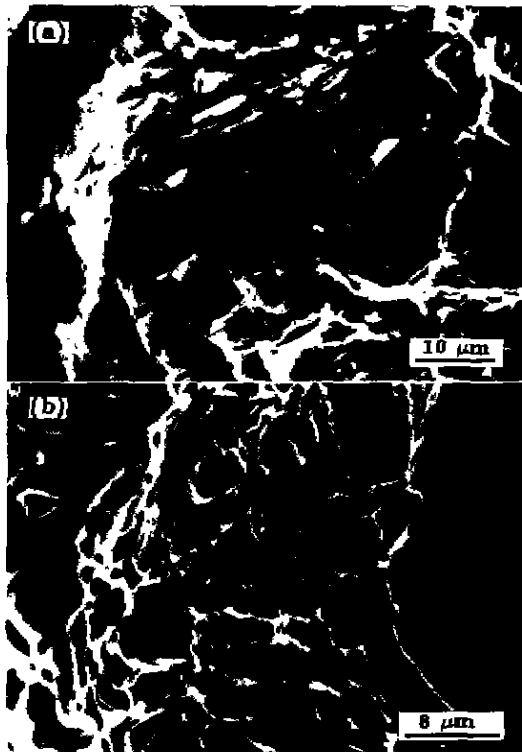


图7 断面扫描电镜观察

Fig.7 SEM images of fracture surface showing fatigue stripes in fatigue zone (a) and slip lines and voids in rupture zone (b)

单一材料中疲劳裂纹的扩展情况。疲劳区域不是非常清晰的条纹，并且有明显的韧窝存在，韧窝一般是在静载情况下因强烈滑移位错堆积，在变形大的区域产生许多显微孔洞或因夹杂物破碎，夹杂物和基体金属界面的分离而形成许多微小孔洞，这说明在疲劳扩展区也有静断发生。记录的疲劳曲线出现波动的原因可能与此有关，并且可能在疲劳主裂纹扩展时，裂纹前端一定区域也有了微裂纹的萌生与累积长大，随着疲劳加载的进行，主裂纹和前端的微裂

纹连接起来，裂纹继续扩展。最后断裂区 R(图 7b) 显示出该区域以滑移线和韧窝为主。虽然是对称的正四点弯曲加载，但两边材料力学性能不同，导致有正应力和切应力的共同作用存在，相应地韧窝呈现出被拉长变形的形状。爆炸焊接时高温快冷可能产生脆性相以及非晶态和准晶态组织<sup>[1]</sup>，这些组织的存在自然会对界面的疲劳性能产生不良影响，使得疲劳扩展阻力降低。还有必要对于爆炸焊接界面的显微组织结构作进一步研究。

### 3 结论

通过爆炸焊接、电子束焊接和机械加工制备了带有界面裂纹的 1Cr18Ni9Ti/20G 双金属材料三点弯曲  $J$  积分裂纹扩展和四点弯曲疲劳试样。同时加工了 1Cr18Ni9Ti 和 20G 单一材料的两种试样。分别进行带界面裂纹双材料和相应单一材料试样的裂纹扩展  $J$  阻力曲线及其疲劳扩展行为实验研究。结果表明 1Cr18Ni9Ti/20G 双材料界面裂纹的静态和动态扩展阻力均低于裂纹在相应单一材料中的扩展阻力。

### 参考文献

- [1] Wang Y H, Hu L Q, Wang Y N, Xu B S, Huang Y. *J Iron Steel Res*, 1999; 4: 57  
(王英慧, 胡兰青, 王云宇, 许井社, 黄源. 钢铁研究学报, 1999; 4: 57)
- [2] Zheng Y M, Zhang S J. *Res Iron steel*, 1998; 1: 30  
(郑远谋, 张胜军. 钢铁研究, 1998; 1: 30)
- [3] Zheng Y M, Huang R G, Chen S H. *Eng Blast*, 2000; 16: 25  
(郑远谋, 黄荣光, 陈世红. 工程爆破, 2000; 16: 25)
- [4] Tschegg E, Kirchner H O K, Kocak M. *Acta Metall Mater*, 1990; 38: 469
- [5] Kim Y J, Schwalbe K H. *Eng Fract Mech*, 2001; 68: 1137
- [6] Lee, Hyungyil, Kim Y J. *Eng Fract Mech*, 2001; 68: 1013
- [7] Kim Y J, Schwalbe K H, Ainsworth R A. *Eng Fract Mech*, 2001; 68: 9
- [8] XU L M, Tippur H V. *Int J Fract*, 1996; 71: 345
- [9] XU X P, Needleman A. *Int J Fract*, 1995; 74: 253
- [10] Sham T L, Li J, Hancock J W. *J Mech Phys Solids*, 1999; 47: 1963
- [11] Lee H, Kim Y J. *Eng Fract Mech*, 2001; 68: 1013
- [12] Evans A G, Dalgleish B J. *Acta Metall Mater*, 1992; 40: 295
- [13] Shu J Y, Blume J A, Shih C F. *Acta Metall Mater*, 1995; 43: 4301
- [14] Zhang Z, Shang J K. *Mater Trans*, 1996; 27(A): 221
- [15] Ohji K, Nakai Y, Hashimoto S. *J Soc Mater Sci Jpn*, 1990; 39: 375
- [16] Jiang F, Zhao K, Kang W, Sun J, He J W. *Chin J Nonfer Metal*, 2001; 11: 764  
(江峰, 赵康, 康伟, 孙军, 何家文. 中国有色金属学报, 2001; 11: 764)
- [17] Jiang F, Kang W, Zhao K, Sun J, He J W. *Acta Metall Sin*, 2001; 37: 1053  
(江峰, 康伟, 赵康, 孙军, 何家文. 金属学报, 2001; 37: 1053)