

# 电子束焊接热冲击对 GH4133A 的微裂纹损伤研究

Study on Microfissuring Damage of Ni-base Superalloy under Thermal Shock of Electron-beam Welding

张海泉<sup>1</sup>, 张彦华<sup>1</sup>, 李刘合<sup>1</sup>, 张行安<sup>2</sup>, 马翔生<sup>3</sup> (1 北京航空航天大学, 北京 100083; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095; 3 北京航空工艺研究所, 北京 100024)

ZHANG Hai-quan<sup>1</sup>, ZHANG Yan-hua<sup>1</sup>, Li Liu-he<sup>1</sup>, ZHANG Xing-an<sup>2</sup>, MA Xiang-sheng<sup>3</sup>

(1 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2 Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

3 Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**摘要:** 电子束焊接是一个复杂的强瞬态的热冲击过程, 包括发生在表层的热过程和发生在一定深度的应力波与材料的交互作用。本文基于电子束焊接热冲击效应分析了高温合金电子束焊接接头热影响区的微裂纹形成原因, 研究了微裂纹损伤对 GH4133A 电子束接头高温力学性能的影响。结果表明, 热冲击是高温合金电子束焊接热影响区的微裂纹损伤的主要原因, 热冲击损伤效应导致接头力学性能的劣化。

**关键词:** 电子束焊; 热冲击; 热影响区微裂纹; 损伤效应

中图分类号: TG402; O346.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 02-0036-04

**Abstract:** Electron beam welding (EBW) process is a complicated and violent instantaneous thermal shock process that consists of a thermal process occurred on the weldment surface and interactional mechanical process existed between the stress wave and base metal in certain depth. The reason of heat-affected zone (HAZ) microfissuring presented in superalloy EBW joints was analyzed based on thermal shock effect. The influence of microfissuring damage on high temperature mechanical properties of EBW joints were also discussed. The results show that the HAZ microfissuring damage of superalloy EBW joints induces mechanical properties deterioration which is attributed to the EBW thermal shock.

**Key words:** electron-beam welding; thermal shock; HAZ microfissuring; damage effect

电子束焊接是一种具有很好柔性的工艺方法, 已在航空宇航设备制造领域得到了广泛的应用, 在燃气涡轮发动机涡轮叶片及热端部件的焊接修复中也有其广阔的应用市场。但是, 电子束焊接过程中, 快速的加热和冷却导致电子束焊接接头的焊缝成形、焊接力的作用和焊缝金属熔析状态不同于常规的熔焊方法。高速电子束流轰击到工件上, 急剧的加热以及随后快速的冷却使被焊工件上产生剧烈的温度变化, 并相应地产生非正常热应力。在轰击点产生热扰动, 而在工件的其它部位的温度分布滞后于热扰动, 这是一个复杂的强瞬态的热冲击过程<sup>[1]</sup>。热冲击的出现在焊接接头中产生数值很高并以一定速度运动的尖峰应力, 容易导致材料内部形成微观缺陷 (主要是热影响区微裂纹)<sup>[2]</sup>。在服役过程中, 微缺陷的形核、扩展、汇合将造成材料高温力学性能的逐渐劣化甚至导致

焊接件破坏, 对航空电子束焊接结构的运行可靠性和发动机热端部件电子束焊接修复接头的剩余寿命极为不利。

电子束焊接是一个具有热力学耦合效应、热弹塑性变形以及伴随相变与潜热发生的复杂的热力学过程<sup>[3]</sup>。本工作从工程实用的角度上考虑电子束热冲击造成的接头材料损伤, 为在严酷条件下运行的电子束焊接结构和焊接修复构件的接头强度性能和构件寿命评定提供了理论依据。

## 1 电子束焊接热冲击效应

### 1.1 电子束焊接机理

电子束焊接的热源是一个强聚焦束流, 在高速电子束流轰击到金属过程中, 入射电子束的辐照能转换

为热能,引起被焊母材受热并瞬时熔化,电子束焊接正是这一微观过程的不断重复,其宏观描述如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

按照以上机制,在电子束辐照区,内侧金属迅速熔化,金属表面温度迅速上升到沸点,强烈的蒸发作用在金属表面产生一个蒸汽充满式小孔。随后高能电子束流连续冲击小孔底部,使小孔爆破沸腾,从而导致熔化金属向外喷涌,最终形成一个深而窄的匙孔和一个薄层熔合区,这一过程也称为匙孔效应或深穿入效应。随着电子束的移动,熔化金属向后沿着周围的匙孔壁运动,形成熔池,促使焊接的进行。

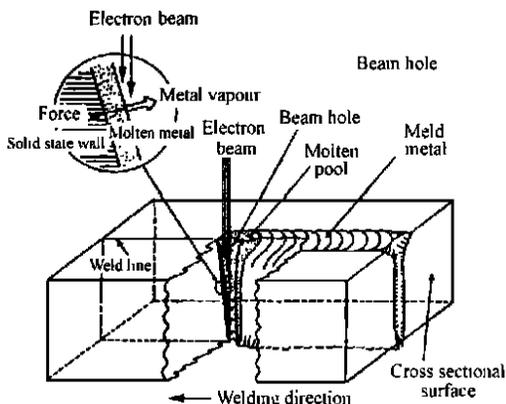
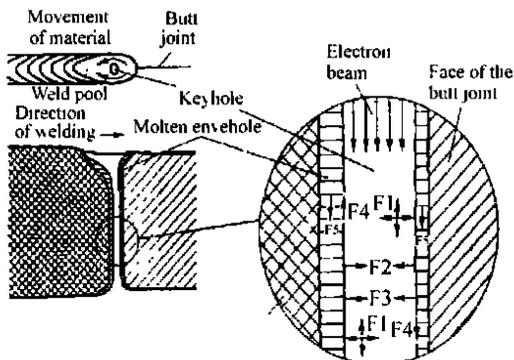


图 1 电子束焊接熔化机制

Fig. 1 Fusion mechanism of electron beam welding

深穿入效应是一个复杂的物理过程,通过形成蒸汽匙孔和熔化材料,电子束可以穿透材料,远远超过电子所能穿透的微小的材料厚度。保持连续开放的匙孔有利于焊接所需的能量转换,匙孔中的各种力发生交互作用(图 2)。来自内层的蒸汽压力向外作用在匙



F1 = Vapour pressure, F2 = Force resulting from surface tension, F3 = Hydrostatic pressure, F4 = Friction force from the escaping metal vapour, F5 = Weight of the molten mantle

图 2 电子束深穿入焊匙孔中主要的力和熔化液层

Fig. 2 The major forces acting within the keyhole and molten envelope in deep penetration welding

孔壁上,其反作用力是静水压力和熔化液层的表面张力,金属蒸发的汽化反作用力推动熔化金属向后运动。蒸汽上下流动的结果施加一个熔化对液层内部的摩擦力,它是熔化材料重力的反作用力,支持熔化材料的重量。此外,一旦电子束开始在工件中沿焊接方向移动,匙孔内就产生大量的熔化液体。从实际电子束焊缝的直观观察中,可以推断该过程中发生的力和运动是准平衡态的<sup>[5]</sup>。

## 1.2 电子束焊接热冲击分析

高速电子束流轰击到工件上,急剧的加热以及随后快速的冷却使被焊工件上产生剧烈的温度变化,焊件的受热具有明显的突发性。瞬态温度场所引起的变形,随时间的变化也带有突发的性质,热变形速度成为时间的函数。随着电子束能量密度的提高,热变形加速度随之增大,从而使得热惯性力的影响变大,产生非正常热应力。结果导致应力和温度都是以一个比较高的速度作用于物体内各点,现出很强的冲击性,即相当明显的动态效应,电子束焊接的这一瞬态热强度问题就是电子束焊接热冲击效应。

通常情况下,电子束焊接的电子束流在 25 ~ 200kV 的加速电压作用下被加速到 0.3 ~ 0.7 倍光速,典型的高真空焊接电子束匙孔直径在 0.25 ~ 1.25mm 之间,其功率密度高达  $10^6 \text{W/cm}^2$ 。高能量密度再加上电子束在固体中极小的固有穿透性,将在焊件的表面层内产生高斯分布的能量沉积,表面层内的能量沉积产生瞬间高温高压,致使焊件材料几乎在电子束冲击到工件的瞬时局部熔化和汽化,因而母材金属的熔化率基本不受热传导的限制。而表层材料的熔化和汽化,造成在接缝表层会出现物质(如金属熔体或等离子体)喷射现象,由此给焊件施加一个反冲的喷射冲量。喷射冲量的产生一方面会在焊件内形成一个热冲击波并向里传递,这种热冲击波的形成和喷射质量损失称为材料响应,一般发生在微秒时间。另一方面,喷射冲量施加到整个焊接工件上,可使其产生应力、应变以及弹塑性变形等,称为结构响应,一般发生在毫秒时间内。因此根据材料响应和结构响应,高能电子束对材料的热冲击作用可以归结为两个过程:其一是发生在表层的热过程;另一个是发生在一定深度的应力波与材料的相互作用。

迄今为止,对电子束焊接的物理及热现象的研究或者是将电子束焊接热过程视为准稳态的,通过一定的假设并基于热传导的 Fourier 定律分析温度场及其热效应,或者在焊接物理过程分析中认为热传导的份额相对于总能量传递非常小而忽略热传导的作用。这样的处理,对于分析焊缝形成、熔池作用及匙孔效应等现象时可以得到满意的结果。但对于具有高强度、

高突发性特征电子束焊接加热和冷却过程而言,采用 Fourier 定律分析电子束与材料的交互作用,特别是电子束热冲击作用显然是不合适的。

对于快速高强度的瞬态热传导过程,热扰动的改变速度快、幅度大,以至于内部温度场的重新建立总是跟不上热扰动的变化。从力学的角度来看,可把热扰动在热传导介质中的传播所形成的波称为“热波”,而把“热波”的传播速度称为“热量传播速度”。在电子束焊接中快速加热的情况下,温度具有动态变化的特性,热量传播速度是一个必须考虑的因素。快速的加热或冷却是产生热冲击的前提,热冲击问题更进一步的动态处理应该是在考虑到热变形加速度的同时还必须计及动态的温度效应。此外,从现象上看,热冲击问题属于典型的高瞬态物理过程,因此物体内的热量传递过程按强瞬态热传导处理更为合适。因此,对于高能密度电子束焊接热传导过程,热量传递规律必须用考虑到热量传播速度影响的通用 Fourier 定律来描述,对其作非 Fourier 分析,则常物性不计内热源强瞬态热传导方程可表示为:

$$a \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \tau_0 \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} \quad (1)$$

式中右边第二项为热量传播项。在热冲击条件下温度场  $\theta = \theta(x, t)$  为非定常的,相应的位移  $u_i$  也将是非定常的。电子束焊接热弹性方程式写成<sup>[6]</sup>:

$$\Delta u_i + \frac{1}{1-2\nu} e_{,i} - \frac{\rho}{\mu} \dot{u}_i = \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha \dot{\theta}_i \quad (2)$$

( $i = 1, 2, 3$ )

式中左边第三项为动力项,  $e$  为体积应变,即  $e = u_{i,i}$ 。  $\nu$  为泊松比,  $\mu$  为 Lam 常数,  $\alpha$  为热膨胀系数,由此得到的非定常热应力  $\sigma_{ij}$  称为动态热应力。

## 2 电子束焊接热冲击损伤分析

电子束焊接是一个强瞬态的热冲击过程,采用简化的准稳态移动热源温度场模型分析其热循环和应力应变能反映这一非定常的焊接热物理过程,图3给出了高能电子束焊接均匀移动圆柱热源的非稳态场示意。由于热冲击的热量传播具有波动性,波动性和扩散对应的数学表述分别为双曲线和抛物线。在准稳态场中以抛物线最大温度曲线来反映热扩散特性<sup>[7]</sup>。图3中用虚线表示的双曲线状曲线代表局部最大温度,曲线前的局部温度升高,曲线后的局部温度下降。由于热膨胀的结果,曲线前产生压缩塑性区,曲线后因冷却热收缩形成拉伸塑性区,由压缩状态进入拉伸状态为弹性卸载带所分离。场中各点相应的局部应力状态由示意的应力应变循环曲线表示,但没有标出其

温度循环。

上述分析表明,电子束焊接在焊接接头中产生非定常的温度场和应力应变场,导致动态热应力的产生;并且在经历集中加热和快速施焊的焊接热循环后,接头区组织和成分的不均匀也会导致接头中产生热应力和残余应力。这一复杂的热物理过程对于过热敏感的高温合金而言,由于晶内晶界偏析和低熔点共晶在晶界聚集等问题较为严重,晶界结合力和变形协调能力差,在热影响区的晶粒晶界处容易产生集中的热应力,在这些热应力集中的部位,点缺陷的累计就可能造成微裂纹的产生<sup>[8]</sup>。由于电子束焊接热冲击效应的作用,在焊接热循环过程中产生大量的沿晶微裂纹,随后热冲击的波动性促进了微裂纹的扩展。

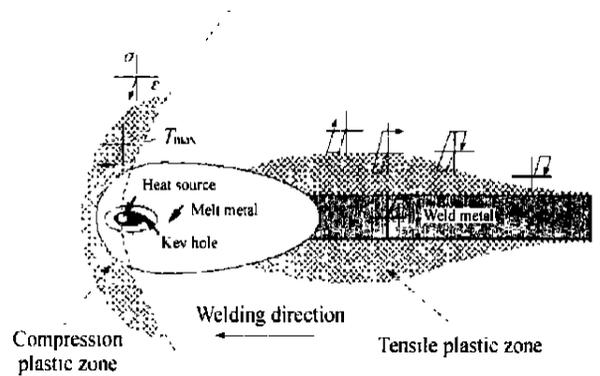


图3 电子束焊接瞬态温度场的塑性区和局部应力应变循环  
Fig.3 Diagrammatic sketch of plastic zone and local stress-strain recycle for EBW transient temperature field

本研究对航空燃气涡轮发动机涡轮盘常用的高温合金材料GH4133A的电子束焊接热冲击损伤进行了试验分析。所采用的电子束焊接的主要工艺参数:加速电压为140kV,聚焦电流为434mA,工作距离为350mm。

图4为试样的焊缝轮廓(图4a)和典型的热影响区微裂纹金相照片。焊接接头的焊缝核心均为枝晶组织,有的晶粒与热影响区的晶粒联为一体。在焊接热影响区中存在大量的沿晶微裂纹(图4b),在钉形焊缝的头部裂纹的分布密集,并且焊缝试样都存在裂纹相互连接及裂纹透入焊缝现象,在热影响区的微裂纹中可以发现颗粒状“填充物”(图4c)。

航空发动机叶片和热端部件均采用高温合金制造,高温合金对过热敏感,特别是修复部件在经历长期服役以后,母材化学成分和组织不均匀,组织粗大,晶内晶界偏析和低熔点共晶在晶界聚集等问题较为严重。由于受热冲击的热-力学效应的作用,高温合金的晶界结合力和变形协调能力极差,使得在焊接热循

环过程中产生大量的沿晶微裂纹。图 4d~f 显示了高温合金热影响区微裂纹的分布, 最长的微裂纹达到了 0.2mm。

本研究还对试样的热影响区晶粒尺寸和接头显微硬度进行了研究, 结果表明其热影响区晶粒尺寸与基体没有明显差别, 显微硬度分布表明, 在热影响区出现显微硬度低谷, 这是由于接头热影响区存在大量的微裂纹造成的, 进一步的研究表明该区域的高温冲击韧性和蠕变裂纹扩展性能相对于母材和焊缝都有不同程度的下降, 接头各区域抗蠕变断裂性能的强弱依次是: 母材> 焊缝金属> 热影响区。对高温疲劳裂纹扩展速率和蠕变裂纹扩展速率试件的断口分析发现, 始于焊缝区和热影响区的预制裂纹扩展不稳定, 均发生了不同程度的裂纹偏转, 优先选择同侧或异侧 HAZ 区发展<sup>[9]</sup>。

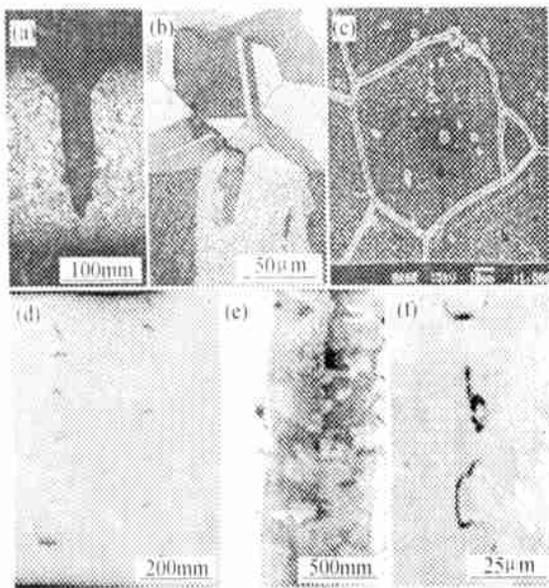


图 4 GH4133A 电子束焊接接头组织及微裂纹分布

Fig. 4 Microstructure and HAZ microfissuring in superalloy GH4133A EBW joints

- (a) welded joint profile; (b) weld metal and HAZ;  
 (c) base metal far away from weld metal;  
 (d) surface microfissuring in the longitudinal section;  
 (e) submerged microfissuring in the longitudinal section;  
 (f) intergranular microfissuring of HAZ

### 3 结论

(1) 电子束焊接过程中, 快速的加热和冷却导致电子束焊接的焊缝成形、焊接力的作用和焊缝金属熔析状态不同于常规的熔焊方法, 它是一个复杂的强瞬态的热冲击过程, 热冲击的出现容易导致材料内部形成微观缺陷, 主要是热影响区微裂纹。

(2) 电子束焊接热冲击过程是一个具有热力学耦合效应和热弹塑性变形的复杂的热力学过程, 可以忽略温度场与应力场的双向耦合, 假定热冲击只导致温度场的冲击效应而不引起应力场的冲击效应, 其温度场单值决定应力场。

(3) 分析电子束焊接温度场的冲击效应时, 需要引进非 Fourier 分析对传统的热冲击分析进行动态处理, 考虑热变形加速度的同时计及动态的温度效应, 在温度方程中加上热量传播项, 并在运动微分方程中加入动力项。

(4) 高温合金电子束焊接热影响区存在大量的沿晶微裂纹, 这些微裂纹是在焊接熔池形成之前由于电子束流热冲击的热-力学效应引起的, 随后的焊接加热促进了微裂纹的演化。

(5) 焊接接头中热影响区的微裂纹损伤导致接头整体性能的下降, 微裂纹的损伤程度可以通过宏观力学性能度量, 在焊接结构的合于使用评定中应该计及微裂纹损伤因素。

### 参考文献

- [1] 姜任秋. 热传导、质扩散与动量传递中的瞬态冲击效应 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] B Steverding, H P Duel. Laser-induced shocks and their capability to produce fracture [J]. Journal of applied physics, 1976, 47 (5): 1940-1945.
- [3] G M Maldenov and P I Petrov. Physical and Thermal Processes during Electron Beam Welding [J]. Materials and Manufacturing Processes, 1999, 14 (3): 331-345.
- [4] S Tomida, A Sasaki and H. Kanayama. Electron Beam Welding for Thick Aluminum Alloys [J]. Welding International, 1999, 13 (2): 102-107.
- [5] H Schultz. Electron Beam Welding [M]. Abington Publishing, Cambridge, 1993.
- [6] 王洪纲. 热弹塑性形力学概论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [7] D. 拉达伊. 焊接热效应 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [8] H Ehrhardt, et al. The Strength of Electron Beam Welded Joints [J]. Welding International, 1991, 5 (6): 475-479.
- [9] 张海泉, 张彦华等. 力学失配对电子束焊接接头疲劳裂纹扩展行为的影响 [J]. 焊接学报, 2000, 21 (3): 40-43.

收稿日期: 2000-10-20

作者简介: 张海泉 (1970-), 男, 博士研究生。从事焊接生产与结构完整性、焊接力学及焊接过程仿真分析等方面的研究工作, 主要参与的科研项目有 UTC-容阀资助项目、高能束流加工技术国防重点实验室基金项目、航空连接技术重点实验室预研项目以及航空基金项目, 已发表论文 7 篇。联系地址: 北京航空航天大学 702 教研室 (100083)

本文编辑: 孙常青