

# 718合金TIG焊热影响区组织变化

叶 欣<sup>1,2</sup>, 华学明<sup>1,2</sup>, 吴毅雄<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院焊接工程技术研究所, 上海 200240;  
2. 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

**摘要:**以不同热输入对轧制、铸态、铸后均匀化热处理3种2.8 mm厚Inconel-718薄板进行TIG焊试验。观察各接头母材与HAZ(焊接热影响区)组织,分析热输入对3种母材接头HAZ晶粒结构、大小的影响。发现随热输入增大,轧制母材焊接接头HAZ沉淀相大量溶解,等轴晶晶粒长大明显,速度为铸态或均匀化接头4.6倍。铸态或均匀化母材呈树枝晶,晶粒较大;HAZ偏析区扩散消失,奥氏体成分趋于均匀,树枝晶结构痕迹减弱;沉淀相残留于原枝晶间位置,在抑制HAZ晶粒长大的同时,保留部分树枝晶结构痕迹;铸态母材焊接接头HAZ沉淀相多于均匀化接头,更接近树枝晶结构。

**关键词:**镍基718合金;热输入;热影响区;晶粒;偏析

**中图分类号:** TG 401    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0253-360X(2015)08-0097-04

## 0 序 言

镍基718合金以 $\gamma''$ -Ni<sub>3</sub>Nb为沉淀强化相<sup>[1,2]</sup>,650 °C下力学性能良好、抗应变时效裂纹。不同原始状态的镍基718合金具有不同的原始组织,轧制合金奥氏体无偏析,铸造合金在凝固中于晶界、枝晶间产生铌的富集区<sup>[3-5]</sup>,有 $M_{23}C_6$ 、MC与低熔点的Laves等沉淀相析出<sup>[6]</sup>,经均匀化热处理合金偏析下降。不同原始状态材料在焊接快速加热冷却过程中,热影响区(HAZ)微观组织也存在差异。这将导致焊接接头高温性能的变化。其中HAZ的晶粒粗化、沉淀相变化等与焊接过程中的应力应变、材料均匀性、裂纹敏感性等材料焊接性紧密相关。

Huang等人<sup>[7]</sup>进行了晶粒为90~3 000 μm的铸造718合金母材的电子束焊试验中,认为母材晶界富集的高铌相是HAZ晶界液化的重要原因。张海泉等人<sup>[8]</sup>利用金相、扫描电镜等分析了镍基高温合金电子束焊热影响区,发现热影响区液化裂纹起源于MC相组分液化后,形成连续或半连续的低熔点晶界液膜,通过调整焊接工艺参数,有助于减小裂纹

倾向。韦志锋等人<sup>[9]</sup>认为718合金HAZ的 $\gamma$ 相基体中存在大量针状和片状的 $\delta$ 相析出物,是由多次焊接修复、焊后热处理循环所引起的显微结构变化,采用954 °C×100 h等温热处理,由于 $\delta$ 相对晶界的钉扎作用晶粒大小不会发生明显的改变,热处理中 $\delta$ 相溶解、碳化物在晶界析出。

文中以轧制、铸态、铸后均匀化热处理(1 090 °C, 1 h)3种镍基718合金薄板TIG焊接头为对象,采用OM(光学显微分析)、SEM(扫描电子显微分析)、EDS(能谱分析)等分析手段,分析在相同热输入时,不同母材焊接接头HAZ的微观组织差异;与相同母材时,不同热输入对HAZ微观组织的影响规律。为优化焊接工艺、进一步分析焊接接头热裂敏感性和高温力学性能提供理论依据。

## 1 试验方法

文中针对2.8 mm厚,轧制、铸态、铸后均匀化热处理3种Inconel-718薄板进行焊接试验。Inconel-718化学成分(质量分数,%)见表1。

表1 Inconel-718基础化学成分(质量分数,%)

Table 1 Base compositions of Inconel-718

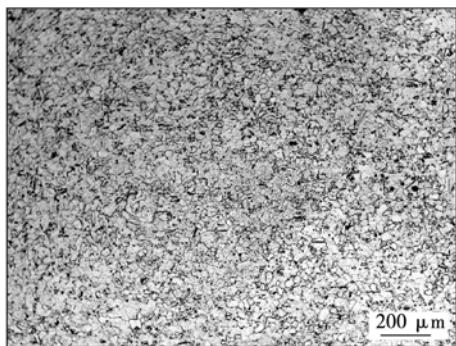
Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	C	Fe
50.0~55.0	17.0~21.0	5.0~5.5	2.8~3.3	0.90~1.15	0.4~0.6	≤0.08	余量

接热输入分别为 2.4, 3.6 及 4.8 kJ/cm。制取焊前原始母材与焊后接头横截面和上表面金相，并腐蚀 ( $1\text{g CuCl}_2 + 20\text{ mL HCl} + 20\text{ mL CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ )。用 Axio Imager A1m 金相显微镜、JSM7600F 场发射扫描电子显微镜观察微观组织，EDS 分析各沉淀相和偏析区的合金元素含量，根据微观组织形貌与化学成分判别各相。借助 ImageJ 图像软件与金相照片 6 视域测量、统计 HAZ 宽度、晶粒大小和沉淀相的面积分数等。

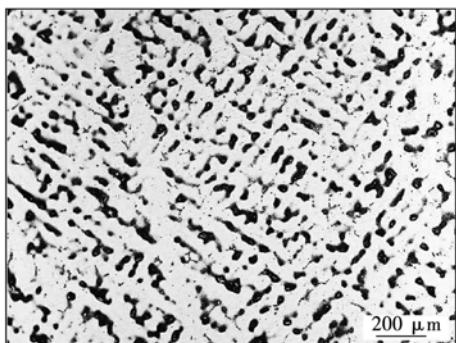
## 2 试验结果

### 2.1 母材微观组织

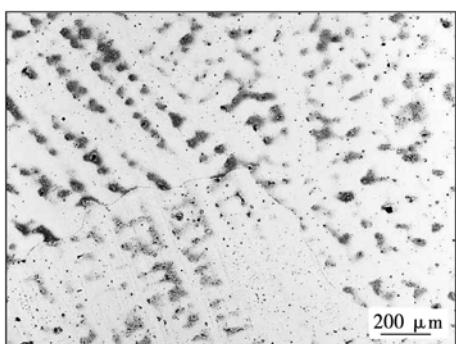
图 1 为轧制、铸态和均匀化母材晶粒微观组织金相。



(a) 轧制母材等轴晶



(b) 铸态母材树枝晶与偏析区(黑色)



(c) 均匀化母材树枝晶与偏析区(灰色)

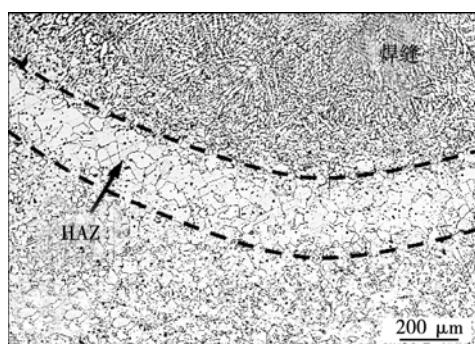
图 1 母材晶粒微观组织

Fig. 1 Microstructure of base metal

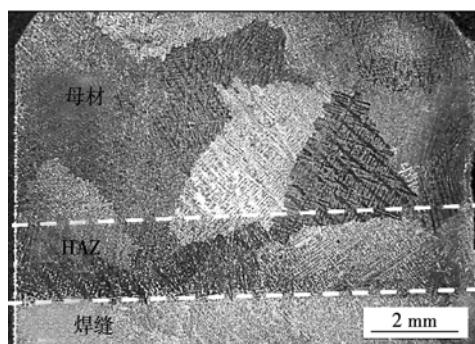
如图 1a 所示，轧制母材呈等轴晶，无偏析区，晶间均匀分布细小的沉淀相；见图 1b，铸态母材呈树枝晶，微观偏析严重，枝晶间形成合金元素高浓度偏析区，腐蚀后光镜下为黑色。经 SEM 和 EDS 检测偏析区中 Nb 元素含量较高，且含有富铌的沉淀相；见图 1c，均匀化母材呈树枝晶，枝晶间偏析减弱，腐蚀后颜色变淡呈灰色。

### 2.2 HAZ 组织变化

热输入同为 2.4 kJ/cm 时，轧制与铸造母材焊接接头 HAZ 中出现明显的粗晶区，如图 2 所示。轧制母材原有等轴晶长大，沉淀相减少，见图 2a。因板厚为 2.8 mm，铸态和均匀化母材晶粒较大(约 2 mm)，故取焊接接头上表面金相观察，以便于统计晶粒大小，HAZ 晶粒长大不明显，见图 2b。



(a) 轧制母材焊接接头横截面金相 (2.4 kJ/cm)



(b) 铸态母材焊接接头上表面金相 (2.4 kJ/cm)

图 2 轧制与铸造母材焊接接头 HAZ 晶粒差异

Fig. 2 Grain size difference in HAZ between wrought and cast base metal

图 3 为热输入 2.4 kJ/cm 时，铸态与均匀化母材焊接接头 HAZ 沉淀相分布金相组织。见图 3a，铸态母材焊接接头 HAZ 中，枝晶间偏析区消失，沉淀相减少但残留于原枝晶间位置，HAZ 保持部分树枝晶结构痕迹。见图 3b，均匀化母材焊接接头 HAZ 枝晶间偏析区亦消失，沉淀相减少且相同热输入下残余沉淀相少于铸态 HAZ，残留的树枝晶结构痕迹更少。

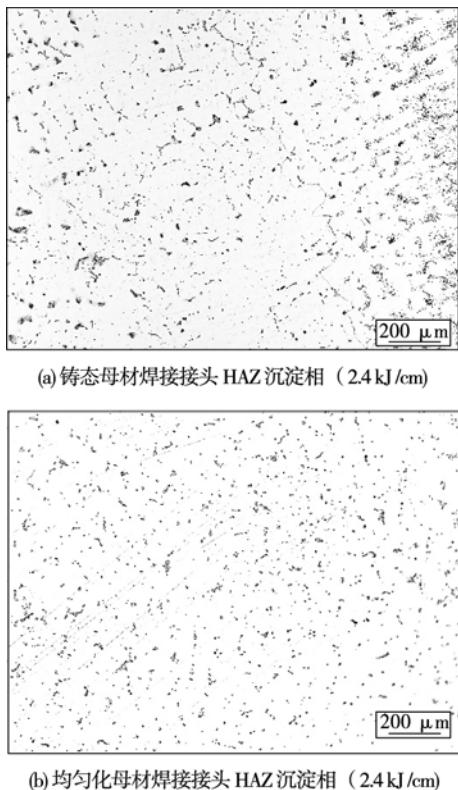


图3 铸态与均匀化母材焊接接头 HAZ 微观组织差异

Fig. 3 Microstructure difference in HAZ between as-cast and homogenized base metal

### 3 试验分析

#### 3.1 HAZ 宽度与晶粒大小

由试验结果可知,轧制接头 HAZ 中主要变化为等轴晶晶粒长大,由高温下沉淀相减少、晶界迁移形成;铸态或均匀化 HAZ 中主要变化为树枝晶中枝晶间偏析区消失,由高温下合金元素固态扩散、沉淀相部分溶解于奥氏体形成。

不同热输入下各母材焊接接头 HAZ 宽度见图 4。如图 4 所示,当母材相同时,HAZ 宽度随着焊接热输入的增大而增大。当焊接热输入相同时,轧制母材焊接接头 HAZ 中晶界碳化物溶解、晶界迁移的温度范围高于铸态或均匀化母材焊接接头 HAZ 偏析区扩散的温度范围,而离熔合线越远接头温度越低,因此轧制母材 HAZ 宽度远小于铸态和均匀化母材。铸态母材偏析区合金元素含量大于均匀化母材,需要更长的高温停留时间进行扩散,离熔合线较远处高温停留时间较短,差异更加明显,因此铸态母材 HAZ 宽度略小于均匀化母材。

图 5 为不同焊接热输入时各母材焊接接头 HAZ 晶粒大小及晶粒长大倍数。见图 5a,以金相截线法测量 HAZ 晶粒直径,发现各原始状态母材 HAZ

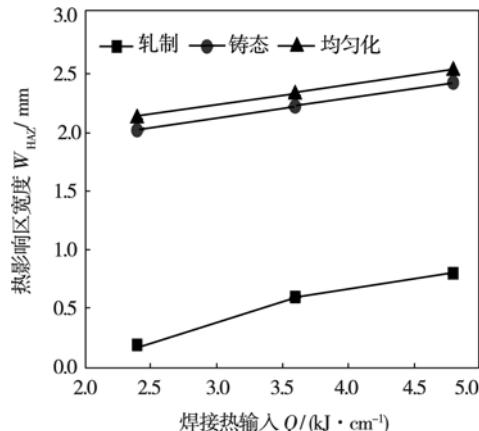
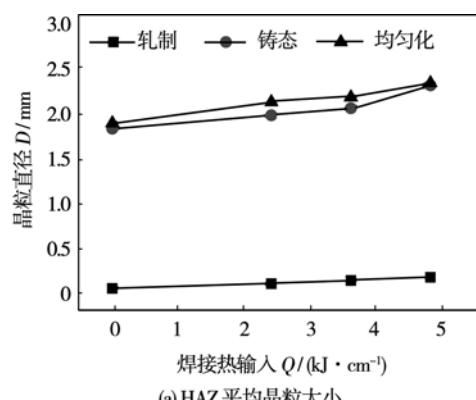


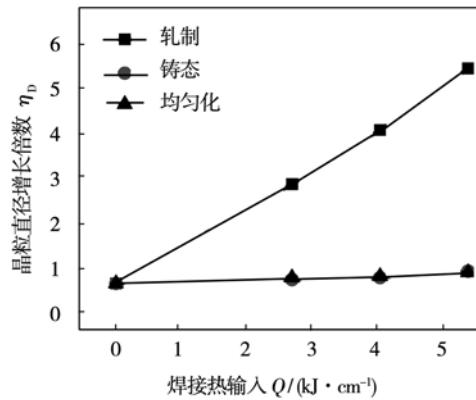
图4 不同焊接热输入下各母材焊接接头 HAZ 宽度

Fig. 4 Width of HAZ in different base metal welding joint using different heat input

晶粒随着热输入的增大而增大。轧制母材晶粒较小,HAZ 晶粒亦远小于铸态和均匀化母材。铸态母材微观偏析较大,枝晶间沉淀相数量大于均匀化母材,在相同热输入下,铸态母材 HAZ 略小于均匀化母材 HAZ.



(a) HAZ 平均晶粒大小



(b) HAZ 晶粒长大倍数

图5 不同焊接热输入下各母材焊接接头晶粒大小及晶粒长大倍数

Fig. 5 Grain size and multiple grain growth of different base metal welding joint using different heat input

计算各接头在不同焊接热输入下 HAZ 晶粒直径与其母材晶粒的比值,即

$$\eta_D = D_{HAZ}/D_0 \quad (1)$$

式中: $\eta_D$  为 HAZ 晶粒直径增长倍数; $D_{HAZ}$  为该接头 HAZ 晶粒直径; $D_0$  为相应母材晶粒直径,结果如图 5b。可见随着热输入的增大,轧制母材 HAZ 晶粒增大速度约为铸态和均匀化母材 HAZ 的 4.6 倍。

### 3.2 HAZ 沉淀相溶解

如图 6 各接头 HAZ 沉淀相面积分数所示,随着焊接热输入的增大,轧制母材焊接接头 HAZ 沉淀相面积分数下降较快,与其沉淀相多位于晶界,合金元素扩散激活能较低有关,因此其 HAZ 宽度较小,晶粒长大速度较快。铸态和均匀化母材焊接接头 HAZ 沉淀相面积分数变化不大,与其沉淀相多位于晶内枝晶间,扩散激活能较高相差,因此其 HAZ 晶粒长大速度较慢。铸态母材及其 HAZ 沉淀相面积分数大于均匀化母材及其 HAZ,说明铸态母材在经过均匀化热处理后沉淀相部分溶解,并直接影响其焊后 HAZ 沉淀相含量,因此铸态母材 HAZ 晶粒略小于均匀化母材 HAZ。

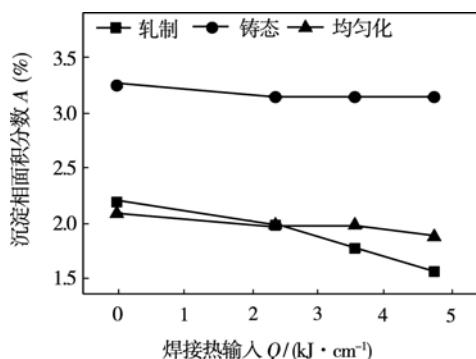


图 6 不同热输入下各接头 HAZ 沉淀相面积分数

Fig. 6 Precipitates area fraction of HAZ in different base metal welding using different heat input

## 4 结 论

(1) 随着热输入的增大,轧制母材 HAZ,沉淀相大量溶解,等轴晶粒长大明显,速度为铸态和均匀化母材接头 4.6 倍。

(2) 铸态和均匀化母材呈树枝晶,晶粒较大; HAZ 偏析区扩散消失,树枝晶结构痕迹减少;但沉淀相大量残留于原枝晶间位置,保留部分树枝晶结

构痕迹,并抑制晶粒长大;随着热输入增大,HAZ 沉淀相含量减少,树枝晶结构痕迹减少。

(3) 相同热输入下,铸态母材 HAZ 沉淀相含量少于均匀化母材 HAZ,晶粒尺寸较小,母材对 HAZ 有组织遗传作用。

## 参考文献:

- [1] Li R B, Yao M, Liu W C, et al. Isolation and determination for  $\delta$ ,  $\gamma'$  and  $\gamma''$  phases in Inconel 718 alloy[J]. Scripta Materialia, 2002, 46(9): 635–638.
- [2] Chang S H. In situ TEM observation of  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  and  $\delta$  precipitations on Inconel 718 superalloy through HIP treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1/2): 716–721.
- [3] Wang L, Li C Q, Dong J X, et al. An investigation of microsegregation and liquid density redistribution during solidification of Inconel 718[J]. Chemical Engineering Communications, 2009, 196(6): 754–765.
- [4] Wang L, Yijun Y, Dong J X, et al. Effect of cooling rates on segregation and density variation in the mushy zone during solidification of superalloy Inconel 718[J]. Chemical Engineering Communications, 2010, 197(12): 1571–1589.
- [5] Wang L, Gong H, Zhao H F, et al. Phase transformation and liquid density redistribution during solidification of Ni-based superalloy Inconel 718[J]. China Foundry, 2012, 9(3): 263–268.
- [6] Antonsson T, Fredriksson H. The effect of cooling rate on the solidification of Inconel 718[J]. Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2005, 36(1): 85–96.
- [7] Huang X, Richards N L, Chaturvedi M C. Effect of grain size on the weldability of cast alloy 718[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2004, 19(2): 285–311.
- [8] 张海泉, 赵海燕, 张彦华, 等. 镍基高温合金电子束焊接热影响区微裂纹特征分析[J]. 材料工程, 2005(3): 22–25.  
Zhang Haiquan, Zhao Haiyan, Zhang Yanhua, et al. Analysis on the microfissuring behavior in the heat-affected zone of electron-beam welded nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2005(3): 22–25.
- [9] 韦志锋, 罗肖邦. 回复热处理对恢复锻造 718 合金焊接性能的影响[J]. 国外金属热处理, 2004, 25(2): 17–22.  
Wei Zhifeng, Luo Xiaobang. The heat treatment effect on wrought 718 superalloy weldability[J]. Heat Treatment of Metals Abroad, 2004, 25(2): 17–22.

**作者简介:**叶欣,男,1984 年出生,博士研究生。主要从事金属材料焊接方面的工作。发表论文 3 篇。Email: xyyell@126.com

**通讯作者:**华学明,男,教授。Email: xmhua@sjsu.edu.cn