Î¬ÆÖ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com

53-55

GH163 合金 TIG 焊焊缝"黑线"组织的研究

TG146.15
TG407

王忠平 贺 勇
(西北工业大学 710072)

摘 要 从GH163合金TIG焊(钨极氩弧焊)焊接接头的显微组织分析入手,探讨了焊缝中心"黑线"组织的形成机制,并提出了防止措施。

主题词 GH163合金 TIG焊 "黑线"组织

镍基合金 合金 焊缝

GH163合金是一种沉淀强化型镍基高温合金,用来制造工作温度在800℃左右的航空发动机零部件。对其薄壁件TIG焊缝无损探伤发现,焊缝中心有一貌似裂纹的"黑线"组织(图1),这不仅使焊接件不能顺利装配而造成了经济损失,而且给制订焊接工艺规程和检验标准带来了困难。为此,我们做了如下的试验与分析研究。

15

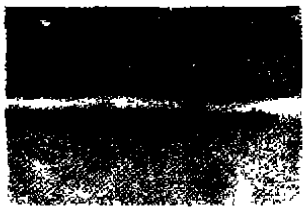


图1 3"试样X光胶片"黑线"形貌

1 实验方法

试件用1.28mm厚的GH163合金(余Ni-19Cr-19Co-5.6Mo-2.4(Al + Ti)-1.9Ti-0.3Al-0.2Mn-0.1Si-0.04C-0.007S-0.7Fe)板材制成,尺寸(单位:mm)为150×15×1.28。在英国产BODE自动氩弧焊机上按表1进行焊接实验。每次实验焊三个试样。无损探伤采用的X射线源波长为λ=0.179nm,射线管电压为150kV,属软特性。用DSS-25T拉伸压缩试验机进行室温拉伸和弯曲实验,用光学显微镜和电子探针仪进行显微组织观察和焊缝金属化学成分的EPMA半定量分析。

2 实验结果及分析

2.1 "黑线"组织性质的判断

由表2实验结果可见,在焊接线能量相近的条件下,焊缝中有无"黑线"组织对拉伸强度和弯曲角影响不大。由此可判定"黑线"组织不是裂纹之类的焊接缺陷。

对"黑线"组织的性质的进一步判断是采用图2所示的X射线偏转实验进行的。由X射线照相的基本原理可知,焊缝组织的双晶面产生的散射会导致异常图像,而且这种现象与射线束的入射角度有关[1]。按图2进行的X射线偏转实验表明,所有试件的"黑线"均不随射线束的入射方向而改变,这就说明"黑线"组织与焊缝金属的双晶面散射无关,而可能与焊缝金属化学成分的偏析有关。因为成分偏析是通过改变金属对射线的吸收能力而改变图像形态的,与射线束入射方向无关。

2.2 焊缝金属化学成分偏析与焊接接头组织之间的关系

表2 实验结果

实验序号	拉伸强度(MPa)	弯曲角(°)	"黑线"宽度(mm)
1	894	180	0.80
2	712	180	1.35
3	674	180	2.10
4	891	180	0.30
5	732	180	0.60
6	699	180	1.20
7*	331	/	/
8**	855	180	0.09
9	856	180	0.4
10*	276	/	/
11*	348	/	/
12	853	180	0

注:* ——未焊透
** ——"黑线"组织断续

表1 正交实验焊接参数表

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
焊接速度(mm/min)	100	100	100	150	150	150	300	300	300	400	400	400
焊接电流(A)	30	45	60	30	45	60	30	45	60	30	45	60
焊接线能量(kJ/cm)	0.9	1.35	1.8	0.6	0.9	1.2	0.3	0.45	0.6	0.225	0.338	0.45

Î¬ÆÖ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com

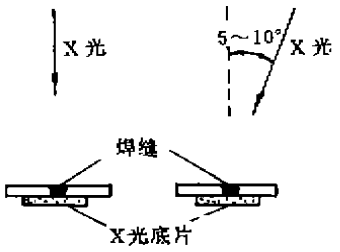


图 2 X射线偏转实验示意图

由镍基高温合金的沉淀强化机制可知，GH163 合金的强化效果与金属间化合物 γ′ 相[$Ni_3(Al,Ti)$]的数量及固溶强化水平有关。当合金中的 Ti/Al 比提高时，Ti 可置换 Ni_3Al 中的部分 Al，形成 $Ni_3(Al,Ti)$。此时 Ti 既有减小 Al 的溶解度从而促进 γ′ 相析出的作用，也有溶入 γ′ 相，提高 γ′ 相固溶强化水平的作用。Al、Ti 在 γ′ 和 γ 基体中的分配比例大致是：

Al γ′ : γ = 1 : 0.3

Ti γ′ : γ = 1 : 0.17

可见，γ′ 相比 γ 基体中 Al、Ti 浓度要高，因为 Al 的熔点远低于 Ni，而 Ti 易与 Ni 形成熔点为 1287℃的 Ni-Ti 二元共晶，所以 γ′ 相形成元素 Al、Ti 会导致 γ-γ′ 共晶（T_m = 1200℃）出现，使有效结晶区扩大[2]，最终使 γ′ 相容易在焊接熔池最后结晶处——焊缝中心偏聚。

由焊接熔池结晶的基本理论可知，一次结晶形态对上述化学成分偏析有较大影响，而一次结晶形态又受制于溶质浓度、温度梯度和熔池结晶速度的变化及其交互作用。在本文实验条件下，母材所含合金元素的重量百分比高达 49.247%，这一溶质浓度特征决定了焊缝中心一次结晶组织应以柱状树枝晶和等轴树枝晶为主。其次，由于 GH163 合金试样的厚度仅 1.28mm，TIG 焊时，相当于线状热源加热，因此熔深方向的差异可忽略不计。这样，焊接线能量（焊接规范参数的综合体现）就成为影响一次结晶形态的又一因素。因为焊接线能量改变时，熔池等温线的形状也将改变；晶粒主轴与焊接方向的夹角 θ（见图 3）也会改变。根据 $R = V \cdot \cos\theta$ 的关系可知，结晶速度 R 必然会改变，从而就决定了焊缝中心是以柱状树枝晶还是以等轴树枝晶为主，亦即最终决定了焊缝中心的偏析程度，因为柱状树枝晶比等轴树枝晶容易形成焊缝中心偏析。

当焊接线能量很高时（如 3# 试样），测量得图 3 所示的 θ 角为 $\theta_3 = 78°$，以此计算得结晶速度 R 值为 R_3 = 20.8mm/min。这些结晶条件使联生结晶的奥氏体晶粒几乎沿着与焊缝轴线相垂直的方向向熔池中心生长（见图 4a），在焊缝中心最后交错的是柱状树枝晶（见图 4b），其结果必然导致 γ-γ′ 共晶在熔池中心凝固，使焊缝中心 Al、Ti 偏析加重。

当焊接线能量很低时（如 12# 试样），对熔池的冷却作用相对增强，此时仅借助温热过冷就会将体积很小的熔池液态金属过冷到接近固相线的温度。采用与 3# 试样相同的测量和计算可得，$\theta_{12} = 30°$，R_{12} = 346.4mm/min，这一结晶速度是 3# 试样的十几倍，不仅使结晶核心增多，枝晶方向性变差（见图 5b），而且在焊缝中心生成大量等轴树枝晶（见图 5a），焊缝中心就很接近 GH163 合金的平均成分，因而 Al、Ti 的偏析程度反而小了[3]。以上偏析规律，在表 3 所示的 EPMA 半定量成分分析结果中得到了进一步实验验证。

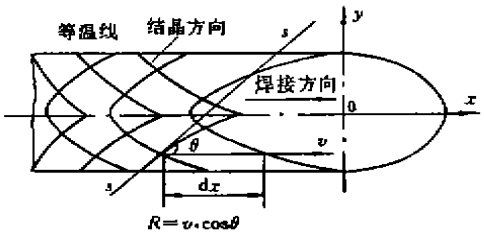


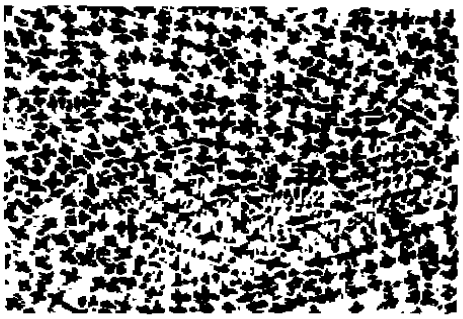
图 3 结晶速度与焊接速度之间关系示意图

(a) 熔合区两侧

(b) 焊缝中心

图 4 3# 试样焊接接头金相组织 125×
蒸馏水 20ml＋硝酸（比重 1.40）20ml＋
盐酸（比重 1.19）20ml＋过氧化氢 10ml 溶液侵蚀

Î¬ÆÖ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com



(a) 焊缝中心

(b) 熔合区两侧

图 5　12#试样焊接接头金相组织　125×

蒸馏水 20ml＋硝酸(比重 1.40)20ml＋

盐酸(比重 1.19)20ml＋过氧化氢 10ml 溶液侵蚀

表 3　焊缝主要成分 EPMA 半定量分析(Wt%)

	Ni	Cr	Co	Al	Ti
1#焊缝中心	55.83	19.60	20.94	9.67	14.71
3#焊缝边缘	55.11	20.02	20.12	0.57	1.11
12#焊缝中心	54.91	19.66	21.52	2.01	3.21
12#焊缝边缘	55.17	19.82	21.72	1.87	3.11

2.3　焊缝金属化学成分偏析对"黑线"组织的影响

由 X 射线检验的基本原理可知，化学成分偏析其所以对 X 射线图像有影响，主要是由于轻金属元素对 X 射线吸收较少，使透射射线的强度较大，从而在 X 光胶片上形成了与偏析区域基本对应的深色影像。表 4 给出了近似的 X 射线等效系数值。由表 4 可见，在试验采用的 150kV 电压下，Al、Ti 对 X 射线的相对吸收作用比标准金属钢要小，而 Inconel X 合金(相当于国产 GH163 合金)比钢的要大。由此可知，Al、Ti 等轻金属元素对 X 射线的相对吸收作用比 GH163 合金的要小得多。这样，当焊缝中心产生了 Al、Ti 等轻金属元素的偏析时，沿焊缝中心就会透过较强的射线束，从而在 X 光胶片上形成了黑度较其它区域要大的线性图像——"黑线"组织。

表 4　X 射线照相的等效系数近似值[1]

材 料	50kV	100kV	150kV	220kV
铝	1.0	1.0	0.12	0.18
钛			0.45	0.35
钢		12	1.0	1.0
Inconel X 合金		16	1.4	1.3

3　防止"黑线"组织的措施

综上所述，焊缝中心轻金属元素的偏析是产生"黑线"组织的内在原因，而焊接线能量是产生"黑线"组织的外部条件。当焊接线能量增大时，由于促进了焊接熔池中柱状树枝晶的发展，使焊缝中心 Al、Ti 偏析严重，因而出现了表 2 所示的焊接线能量越大、"黑线"组织越宽的现象。由此可见，采用小线能量的焊接规范参数组合是防止"黑线"组织的最有效方法。当采用小线能量焊接与保证焊透有矛盾时，可利用钢垫板散热；在可能的条件下，使用脉冲电源进行焊接，都有助于在保证焊透的焊接线能量下防治"黑线"组织。

4　结　论

(1) GH163 合金 TIG 焊缝中心的"黑线"组织不是焊接裂纹之类的冶金缺陷。焊缝中心 Al、Ti 等轻金属元素的偏析是产生"黑线"组织的根源。

(2) 增大焊接线能量会使"黑线"组织加宽。这是由于此时焊接熔池的有效结晶区间变宽，柱状树枝晶得以发展，偏析严重之故。

(3) 采用小线能量的焊接规范，有利于防治"黑线"组织。

参 考 文 献

1　奎　因 R A，西格尔 C C. 现代工业中的射线照相法. 国防工业出版社，1988：38～41

2　贺运佳. 金属材料熔焊工艺. 西北工业大学出版社，1988：120～134

3　刘国勋. 金属学原理. 冶金工业出版社，1979：41～58

收稿日期：1994.3.25。