

热处理工艺对 GH909 板材 TIG 焊缝析出相的影响

赵志毅¹, 章小芳², 赵海涛³, 薛润东¹

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083, E-mail: zhaozhiyi@263.net;

2. 中钢集团工程设计研究院石家庄设计院, 石家庄 050021; 3. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 为改善 GH909 板材的焊接工艺及使用性能, 采用扫描电镜和 EDX 分析研究了 GH909 板材在 TIG 焊后不同热处理工艺焊缝析出相的变化规律, 对提高 GH909 板材 TIG 焊接接头质量具有重要的应用价值。研究表明: 焊缝形成的相有针片状 ϵ/ϵ'' 相、 γ /Laves 低熔点共晶相, 且都在 γ 晶间分布; 焊缝中心低熔点共晶相所占比例均比离焊缝中心不远的焊缝边部小, 经过固溶处理的焊缝低熔点共晶相所占比例加大; ϵ/ϵ'' 相大部分溶解, 且 Nb、Ti 偏析较严重, 焊缝结晶裂纹敏感性高, 影响合金的综合性能。

关键词: GH909; 焊缝; 低熔点共晶相; 析出

中图分类号: V261.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-0299(2011)03-0102-04

Effects on precipitates of GH909 plate TIG weld under different heat treatments

ZHAO Zhi-yi¹, ZHANG Xiao-fang², ZHAO Hai-tao³, XUE Run-dong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China,

E-mail: zhaozhiyi@263.net; 2. Sinosteel Engineering Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China;

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

Abstract: To improve the welding process and the performances of GH909, a study on precipitates of GH909 plate TIG weld under different heat treatments had been carried out by SEM and EDX. The study had found ϵ/ϵ'' platelets, γ /Laves low-melting eutectic phases distribute in the weld of austenite intergranular. The ratios of low-melting eutectic phases in weld center were smaller than weld edge which was near the weld center. After solution treatment, the proportions of low-melting eutectic phases were increased, most of ϵ/ϵ'' were dissolved, and the segregation of Nb and Si were more serious. This could lead to higher weld solidification cracking sensitivity and affect the comprehensive properties of GH909.

Key words: GH909; weld; low-melting eutectic phase; precipitation

GH909 是 Fe-Ni-Co 基时效硬化型低膨胀高温合金, 主要用于制造航空发动机涡轮外环、压气机和封严环等间隙控制零件^[1-4]。GH909 具有良好的焊接性, 可采用氩弧焊、电子束焊以及高温真空钎料等多种方法焊接, 但该合金焊接时存在一定的焊缝结晶裂纹和热影响区微裂纹倾向^[5-7]。焊缝金属凝固过程中的溶质再分布和凝固方式决定了凝固终了晶界和树枝状晶间低熔共晶相的数量和形态, 从而对焊缝结晶裂纹倾向产

生影响。GH909 合金由于 C 和 Nb 含量的关系, 凝固时主要形成 γ /Laves 低熔点共晶相, γ /Laves 共晶相形成温度很低, 能够扩大凝固温度范围, 因而 γ /Laves 低熔点共晶相的比例大小决定了 GH909 的结晶裂纹抗力^[8]。对于 GH909 焊接性的研究, 我国目前报道很少, 且都是关于 GH909 长期时效后组织和性能的研究^[9]、焊缝凝固行为的模拟预测^[8]等。GH909 热裂纹的产生不仅会限制新材料的应用范围, 还可能引发再热裂纹和疲劳裂纹, 造成产品的报废, 甚至给飞机安全飞行埋下隐患, 因此开展热处理工艺对 TIG 焊缝析出相的影响, 对提高 GH909 板材 TIG 焊接接头质量具有重要

收稿日期: 2010-05-11.

作者简介: 赵志毅(1962-), 男, 教授, 博士生导师.

的应用价值,也为飞机的安全飞行提供了保障。

本文研究了 TIG 焊后不同热处理工艺对焊缝各相的形貌、分布、成分以及 γ /Laves 低熔点共晶相比例大小的影响,这些是影响 GH909 产生是否裂纹的重要因素。

1 实验

实验材料为 GH909 薄板材,其主要化学成分见表 1. 标准热处理工艺如下:980 $^{\circ}\text{C}$ /1 h,空冷 +

980 $^{\circ}\text{C}$ /1 h,空冷 + 720 $^{\circ}\text{C}$ /1 h,55 $^{\circ}\text{C}$ /1 h 冷却至 620 $^{\circ}\text{C}$ /8 h,空冷. 将标准热处理后的试样采用 TIG 焊,焊后分别采用不同的热处理方式,其工艺参数为:焊接电流 70 A,焊接电压 9.4 V,焊接速度 11.2 $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$,填充焊丝 HGH909,具体的热处理状态见表 2. 焊接之后沿焊缝切取试样,将试样截面在金相砂纸上磨至 2000#,机械抛光之后用 CuCl_2 + 王水溶液侵蚀,采用扫描电镜和 EDX 对 GH909 焊缝进行形貌观察和成分分析。

表 1 GH909 主要化学成分(质量分数/%)

C	Ni	Co	Ti	Al	Si	Nb	Fe
≤ 0.06	35.00 ~ 40.00	12.00 ~ 16.00	1.30 ~ 1.80	≤ 0.15	0.25 ~ 0.50	4.30 ~ 5.20	Bal

表 2 GH909 热处理工艺及焊后热处理状态

焊接工艺	焊后热处理方式
TIG 焊 + 双时效	745 $^{\circ}\text{C}$ 保温 4 h,以 55 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 炉冷至 620 $^{\circ}\text{C}$,保温 4 h,空冷
TIG 焊 + 固溶 + 双时效	980 $^{\circ}\text{C}$ 保温 1 h,空冷;745 $^{\circ}\text{C}$ 保温 4 h,以 55 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 炉冷至 620 $^{\circ}\text{C}$,保温 4 h,空冷

2 结果分析与讨论

2.1 不同热处理工艺时的焊缝截面组织

TIG 焊 + 双时效(TIG + D)、TIG 焊 + 固溶 + 双时效(TIG + S + D)得到的 GH909 焊缝组织形

貌分别如图 1(a)和(b)所示. 焊缝中心和焊缝边部的部位见图 1 中所标,其中焊缝边部是指焊缝中心之外距离焊缝中心不远的部位(离焊缝中心 200 ~ 300 μm). 从图 1 可看出,2 种热处理工艺焊缝区都形成了方向性很强的树枝晶。

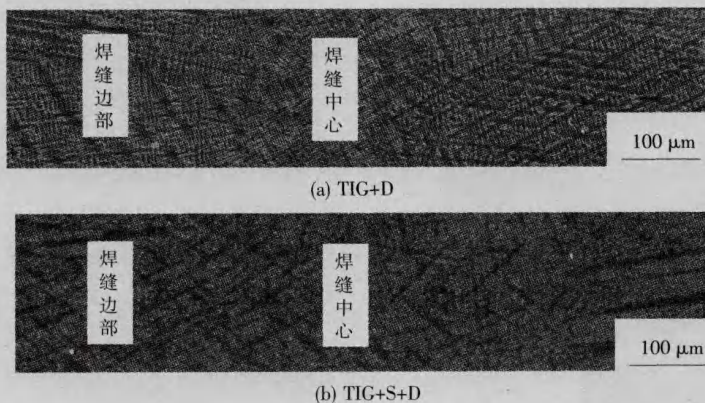


图 1 不同热处理工艺焊缝的形貌

2.2 GH909 母材与焊缝析出相分析

GH909 的主要强化相为 γ' ,影响其性能的主要析出相有 γ' 、 ϵ/ϵ'' 和 Laves 相等. 经标准热处理后的析出相为 γ' 析出,形态为方形颗粒,在 γ 晶内弥散共格析出. 由于图 2 分辨率有限,看不到弥散分布的 γ' . 根据参考文献[6,9]及 EDX 分析,判断晶界析出的颗粒状相为 Laves/G 相,有些 Laves/G 相呈点链颗粒状穿晶分布,从晶界向晶内析出的针片状相为 ϵ/ϵ'' ,此外还有少量的块状 NbC 相,如图 2 所示。

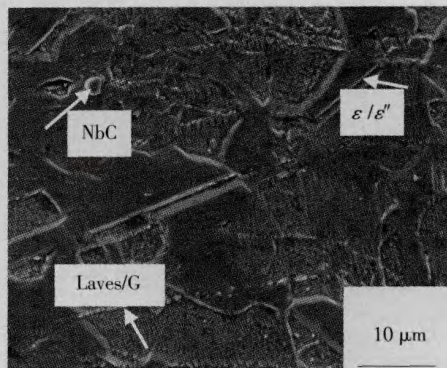


图 2 GH909 母材组织 (SEM)

GH909 合金经焊接热处理后焊缝析出了 $\gamma + \text{Laves}$ 低熔点共晶相,大量相互交织呈典型“魏氏体”形态的针片状 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相^[11]. GH909 凝固路径如下:首先发生 $L \rightarrow \gamma$, 然后随着凝固过程的进行, Nb 和 C 含量在凝固过程中达到 $L \rightarrow (\gamma + \text{Laves})$ 成分要求,形成 γ/Laves 低熔点共晶相^[8]. 由此可知, GH909 TIG 焊工艺焊缝形成了 γ 基体、 γ/Laves 共晶相,在随后的固溶或时效过程中析出了针片状的 $\varepsilon/\varepsilon''$,不同的热处理工艺形成的 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相和低熔点共晶相的数量不同.

不同热处理工艺条件下焊缝中心和焊缝边部的形貌如图 3、4 所示. 对比这 2 个图可以发现: TIG + D 条件下,试样焊缝中心的针片状 $\varepsilon/\varepsilon''$ 较多,且尺寸较大,几乎所有的奥氏体基体都被 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相覆盖,在少数较大尺寸的 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相旁分布有低熔点共晶相;焊缝边部 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相所占的比例不及焊缝中心大,但是低熔点共晶相的尺寸明显比焊缝中心要大. TIG + S + D 条件下,试样焊缝的针片状 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相大部分溶解,溶解的 $\varepsilon/\varepsilon''$ 释放出一些 Nb 等强偏析元素,使一部分低熔点共晶相有聚集长大的趋势. 由图 3 和 4 还可以看出:在 TIG + D 和 TIG + S + D 这 2 种工艺条件下,试样中的低熔点共晶相都分布在 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相旁,且 $\varepsilon/\varepsilon''$ 和共晶相均在树枝晶间分布,这说明 GH909 高温合金焊接后焊缝晶间和晶内的偏析都非常严重.

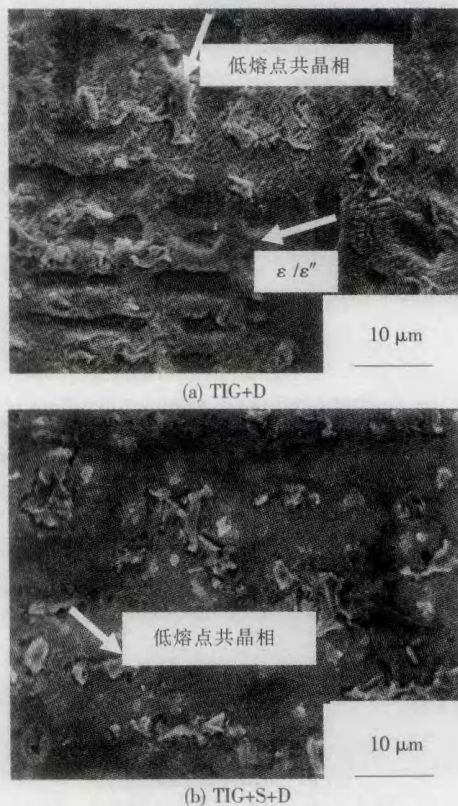


图 3 不同热处理工艺下焊缝中心的形貌

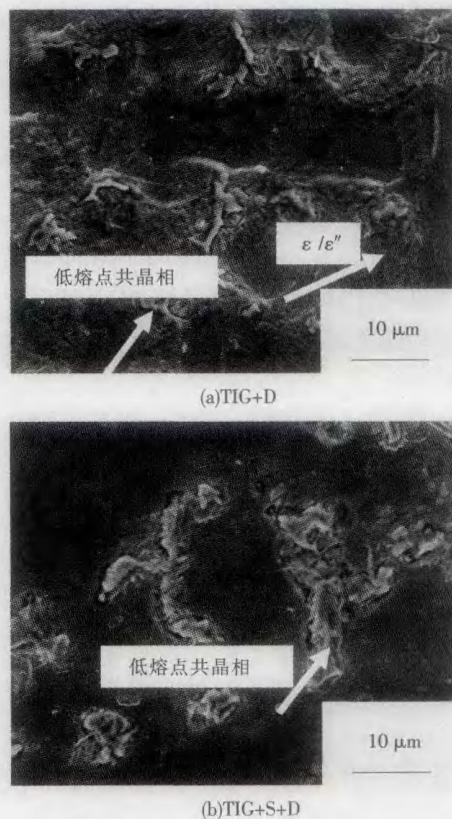


图 4 不同热处理工艺下焊缝边部的形貌

2.3 不同热处理工艺焊缝低熔点共晶相的比例

GH909 焊接的主要问题之一是容易产生焊缝结晶裂纹,结晶裂纹的产生主要是因为该合金在焊缝金属凝固后期,低熔点共晶被排斥到柱状晶体或树枝晶交遇的中心部位形成液态薄膜,一方面扩大了结晶温度区间,另一方面降低了液固两相的界面能,因而形成了沿晶界和亚晶界连续的液态薄膜,削弱晶粒之间结合力,当焊接时产生的热应力超过晶粒之间的结合力时就会产生结晶裂纹. 对于一个单独焊缝,焊缝中心偏上部分是液相结晶较晚的部位,在这些部位的晶间区域中,低熔组分富集的程度更高些,因而也是结晶裂纹最易发生的部位^[12],因此,低熔点共晶相在焊缝组织中所占比例大小在一定程度上代表着结晶裂纹敏感性的大小.

2 种工艺焊缝中心和焊缝边部的低熔点共晶相的微观形貌如图 3、4 所示,采用金相分析软件对各区的低熔点共晶相所占的面积百分比进行统计,结果如图 5 所示. 焊缝边部低熔点共晶相的尺寸和数量都比焊缝中心多. 经过固溶处理的试样,低熔点共晶相所占的比例比未经固溶处理的要大,因此焊缝结晶裂纹敏感性较未固溶处理的焊件高. 固溶处理后的试样随着 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相的溶解,低熔点共晶相的聚集长大,横向枝晶很短,主轴很长

的枝状晶形状遭到破坏。

图6给出了TIG+D工艺下的焊缝低熔点共晶相、 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相、 γ 基体的EDX分析图谱。TIG+D、TIG+S+D工艺条件下焊缝各相的元素含量分析见表3,与表1对比可以看出, $\varepsilon/\varepsilon''$ 相和低熔点共晶相都为富Nb、Ti的偏析相,尤其是低熔点共晶相的Nb偏析非常严重,而焊缝的 γ 基体则贫Nb和Ti。由前面可知, $\varepsilon/\varepsilon''$ 相和低熔点共晶相都分布在焊缝的枝晶间,这种溶质原子在晶界的析集为析集毛细现象^[10];到了凝固后期,残存液相中会富集许多合金元素,低熔点共晶相在焊缝是最后凝固的,所以富集了Nb、Ti等合金元素。对比分析2种工艺下的各析出相成分,可知经过固溶处理的焊缝Nb、Ti合金元素的偏析比较严重,固溶处理使低熔点共晶相部分熔化,一些合金元素再次发生析集现象,而分布在低熔点共晶相旁的 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相的溶解为析集现象提供了条件。低熔点共晶相

的形成夺走了基体中大量的强化元素,而这些合金元素正是GH909的主要强化相 γ' 的重要构成元素,导致基体中弥散分布的 γ' 相的数量减少,影响合金的综合性能。

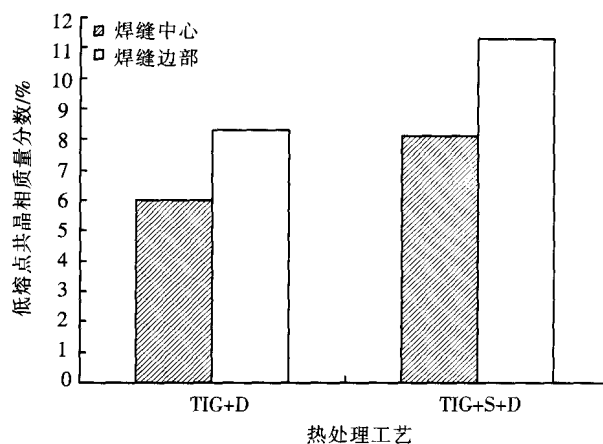


图5 焊缝低熔点共晶相统计结果

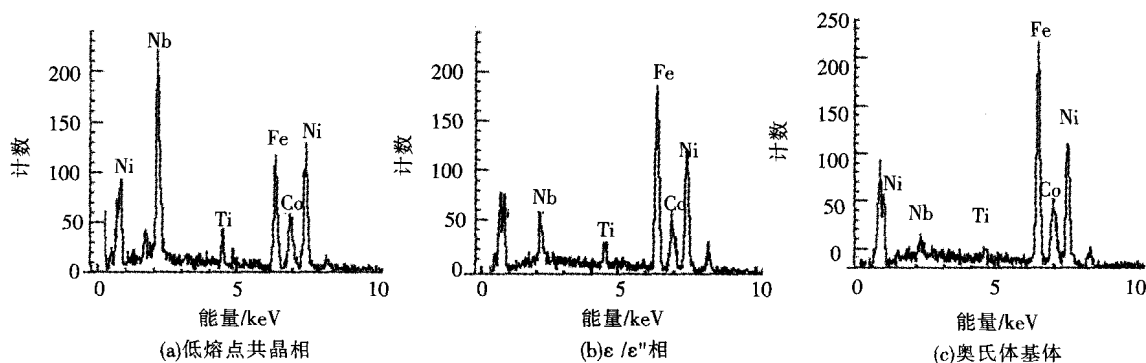


图6 TIG焊+D工艺下焊缝各相的EDX分析图谱

表3 2种热处理工艺下焊缝各析出相成分含量

相	热处理工艺	析出相的质量分数/%				
		Ti	Co	Ni	Nb	Fe
低熔点共晶相	TIG+D	3.34	13.80	33.35	29.49	Bal
	TIG+S+D	3.59	11.87	30.69	30.73	Bal
$\varepsilon/\varepsilon''$ 相	TIG+D	2.64	13.12	38.68	7.95	Bal
	TIG+S+D	2.66	12.54	36.43	9.89	Bal
奥氏体基体	TIG+D	1.18	14.68	36.50	2.47	Bal
	TIG+S+D	0.63	16.05	35.17	1.86	Bal

3 结 论

1) GH909合金TIG焊缝形成了 γ +Laves低熔点共晶相、 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相,它们都分布在焊缝枝晶间,且低熔点共晶相依附 $\varepsilon/\varepsilon''$ 相生长。

2) TIG焊焊缝形成了方向性很强的树枝晶。

3) TIG+固溶+双时效试样与TIG+双时效试样相比, $\varepsilon/\varepsilon''$ 相大部分溶解;2种工艺焊缝中心低熔点共晶相所占比例均比焊缝边缘部要小,固溶

处理之后焊缝低熔点共晶相比比例增大,焊缝结晶裂纹敏感性高。

4) 焊缝低熔点共晶相Nb、Ti等合金元素的偏析严重,固溶处理后偏析更加严重。

参考文献:

- [1] 邓波,冯涤,王旭东,等. 稀土元素钕对低膨胀合金GH909组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2003,15(7):111-114.

(下转第112页)

880 ℃时,组织中易出现尺寸较大的 M/A 岛,这都大大降低了钢板的延伸性能.当冷却速度为 20 ℃/s、终轧温度为 830 ℃时,组织为细小的板条贝氏体和 M/A 薄膜,钢板具有最好的综合力学性能.

3)在实验钢的内锈层中存在 Cu、Cr 元素的富集,Cr 部分取代 α -FeOOH 中 Fe 的位置生成保护性锈层 α -Cr_xFe_{1-x}OOH,Cu 固溶到基体提高了基体的电极电位,因此该钢的平均腐蚀速率远低于普碳钢,具有良好的耐蚀性能.

参考文献:

- [1] 文新理. 700MPa 级薄规格集装箱板成分设计和组织性能控制[D]. 北京: 北京科技大学, 2010: 8.
- [2] SUCHIRO M, LIU Z K, AGREN J. Effect of Niobium on massive transformation in ultra low carbon steels, a solute drag treatment [J]. Acta Metallurgica, 1995, 44: 4241-4244.
- [3] 贺信来, 尚成嘉, 杨善武, 等. 高性能低碳贝氏体钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 52.
- [4] PRASAD S N, MEDIRATTA S R, SARMA D S. Influence of austenitisation temperature on the structure and properties of weather resistant steel [J]. Mater Sci Eng, 2003, A385: 288-297.
- [5] 宋仁伯, 张永坤, 文新理, 等. Nb-B 复合高强度集装箱用钢的高温变形行为[J]. 金属学报, 2011, 47(1): 34-40.
- [6] 尚成嘉, 杨善武, 王学敏, 等. 低碳贝氏体钢的组织类型及其对性能的影响[J]. 钢铁, 2005, 40(4): 57-60.
- [7] 潘洪波, 唐狄, 胡水平, 等. 利用热模拟技术优化 DH36 船板钢轧制工艺[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(3): 333-334.
- [8] 陈麒麟, 李春艳, 高吉祥, 等. 珠钢 EAF-CSP 流程 700 MPa 级钛微合金化高强钢的开发[J]. 钢铁, 2009, 37(5): 1-3.
- [9] 刘宗昌. 材料组织结构转变原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 184.
- [10] ZHAO Y T, YANG S W, SHANG C J, et al. The mechanical properties and corrosion behavior of ultra-low carbon microalloying steel [J]. Materials Science and Engineering, 2007, 454-455(25): 695-700.
- [11] ZHAO Y T, YANG S W, GUO H, et al. Rust layer structure and corrosion resistance of high strength microalloyed Steels[J]. Materials Science forum, 2007, 539-543: 4774-4779.
- [12] YAMASHITA M, KONISHI H, MIZUKI J, et al. Nano-structure of protective rust layer on weathering steel exposed in nation-wide environments in Japan [C]//First International Conference on Advanced Structural Steels, Tsukuba: The Iron and Steel Institute of Japan, 2002: 287-288.
- [13] 张全成, 王建军, 吴建生, 等. 锈层离子选择性对耐候钢抗海洋性大气腐蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2001, 37: 193-196.

(编辑 程利冬)

(上接第 105 页)

- [2] WANG R M, LI C Z, PING D H, et al. Microanalytical study of the hexagonal phase in an yttrium-containing low expansion superalloy[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 241(1/2): 83-89.
- [3] WANG R M, SONG Y G, HAN Y F. Effect of rare earth on the microstructures and properties of a low expansion superalloy [J]. Micron, 2002, 33(6): 575-580.
- [4] CIESLAK M J, HEADLEY T J, KNORO-VSKY G A, et al. A comparison of the solidification behavior of incoloy 909 and inconel 718[J]. Metallurgical Transaction A, 1990, 21A(2): 479-486.
- [5] 李晓红, 毛唯, 熊华平. 先进航空材料和复杂构件的焊接技术[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 276-282.
- [6] ERNST S C, BAESLACK III W A, LIPPOLD J C. Weldability of high-strength, low-expansion superalloys [J]. Welding Journal, 1989, 68(10): 418-430.
- [7] 郭绍庆, 李晓红, 毛唯, 等. 低膨胀高温合金焊接性的研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2000(6): 5-8.
- [8] 郭绍庆, 李晓红, 袁鸿, 等. 低膨胀高温合金焊缝金属凝固行为的模拟预测[J]. 航空材料学报, 2004, 24(6): 1-5.
- [9] 赵宇新, 张绍维. GH909 合金长期时效后组织和性能的研究[J]. 航空材料学报, 2000, 20(3): 6-10.
- [10] 陈伯鑫. 金属焊接性基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [11] GUO Xi-ping, KUSABIRAKI K, SAJI S. Intragranular precipitates in Incoloy alloy 909[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(1): 55-60.
- [12] 第一机械工业部哈尔滨焊接研究所. 焊接裂纹金相分析图谱[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1981.

(编辑 程利冬)