

IC10/BNi2/GH3039TLP 扩散焊接头的 微观组织及力学性能分析

薛 青 李 扬 刘振波 赵军静 董建涛 张洪旭 王学刚 易 帆 李秀春

(首都航天机械公司, 北京 100076)



摘要: 以 BNi2 为中间层, 在不同的焊接参数下对 TLP 扩散焊 IC10 单晶与 GH3039 高温合金, 以及 IC10/BNi2/GH3039 接头进行了微观组织及力学性能的分析。结果表明: 焊接参数对接头界面组织的影响较为复杂, 焊接温度的升高并不一定能够促进接头实现完全等温凝固, 而保温时间的延长有助于接头实现完全等温凝固; 1200℃/2h 参数下的的接头常温拉伸强度达到 736MPa, 900℃ 高温拉伸强度达到 220MPa, 综合力学性能最好。

关键词: IC10; TLP; GH3039; 微观组织; 力学性能

Research on Microstructure and Mechanical Properties of TLP Bonded Joint of IC10/BNi2/GH3039

Xue Qing Li Yang Liu Zhenbo Zhao Junjing Dong Jiantao

Zhang Hongxu Wang Xuegang Yi Fan Li Xiuchun

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract: This paper carries out the TLP welding research between crystal alloy IC10 and GH3039 super alloy with BNi2 as interlayer. The microstructure and mechanical properties of IC10/BNi2/GH3039 joints under different welding parameters are analyzed. Results indicate that the effects of welding parameters on the joint microstructure are complex. It is found that improving the welding temperature is not necessarily helpful to achieve isothermal solidification, while improving the holding time is helpful to achieve isothermal solidification. At the parameter of 1200℃/2h, the joint has the best comprehensive performance. The room temperature tensile strength is 736MPa and the 900℃ high-temperature tensile strength is 220MPa.

Key words: IC10; TLP; GH3039; microstructure; mechanical properties

1 引言

涡轮发动机的关键部件广泛使用金属间化合物 (Ni_3Al 、 Ti_3Al 等) 为基体的高温结构材料^[1]。 Ni_3Al 单晶的优良特性为熔点高、高温强度高、抗氧化性好、抗蠕变能力好^[2]。IC10单晶是一种新型 Ni_3Al 基高温合金, 被用于制造高性能发动机导向叶片^[3]。GH3039高温合金的主要成分为Ni-Cr-Mo, 具有良好的抗氧化性及焊接性, 被用于制造发动机的零部件^[4]。实现二

者的可靠连接对高性能发动机制造意义重大。

瞬时液相 (TLP) 扩散焊将钎焊和固相扩散焊的优点融于一体, 被广泛用于连接新型材料^[5], 目前已成为连接高温合金的主要方法。采用TLP扩散焊方法, 以BNi2为中间层, 对IC10与GH3039进行焊接, 并分析接头的组织和力学性能。

2 实验材料与方法

IC10由北京航空制造工程研究所提供，GH3039及BNi2中间层为商业材料，以上三种试验材料的成分分别见表1~表3。

表1 IC10主要成分wt. %

C	Co	Cr	Al	W
0.07~0.12	11.5~12.5	6.5~7.5	5.6~6.2	4.8~5.2
Mo	Ta	Hf	B	Ni
1.0~2.0	6.5~7.5	1.3~1.7	0.01~0.02	余量

表2 GH3039主要成分wt. %

Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Fe
19.84	2.12	1.02	0.62	0.58	0.32
Si	Mn	P	S	C	Ni
0.263	0.105	0.006	0.003	0.044	余量

表3 BNi2主要成分wt. %

Fe	Si	B	Cr	C	Ni
3	4.5	3.2	7	0.06	余量

试验中IC10使用线切割制出尺寸为15mm×13mm×5mm的试片，GH3039使用线切割制出尺寸为20mm×15mm×7mm的试片，对接形式施焊，焊接温度1050℃、1100℃、1150℃和1200℃，保温时间0.5h、1h、1.5h和2h。

本实验使用的焊接设备为VAF-30真空钎焊炉。试验后分别使用电子万能试验机进行常温及高温拉伸试验，使用扫描电镜（SEM）观察试样的显微组织，并利用其附带的能谱装置（EDS）对试样进行成分分析，使用X-射线衍射分析仪（XRD）对试样进行XRD分析，使用透射电镜（TEM）观察分析接头反应物。

3 试验结果与分析

3.1 接头界面组织分析

图1为1150℃/2h参数下得到的接头的界面组织，

是一种典型的TLP扩散焊接头，主要由等温凝固区（ISZ）、共晶区（EZ）、扩散区（DZ）和基体金属区（BM）组成。

由图1可知，GH3039一侧无化合物析出，IC10一侧DZ区有化合物析出，对接头除GH3039基体金属区外的其他区域进行扫描电镜及透射电镜分析，见图2、图3，对接头内的反应物进行EDS分析，见表4，并对焊缝处进行微区XRD分析，见图4。

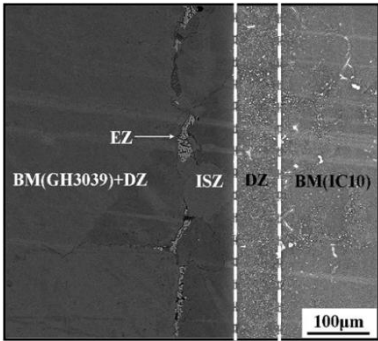


图1 1150℃/2h参数下IC10/BNi2/IC10接头界面组织

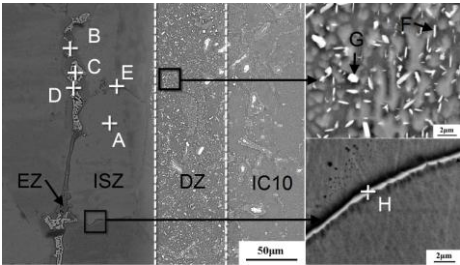


图2 1150℃/2h参数下接头界面组织

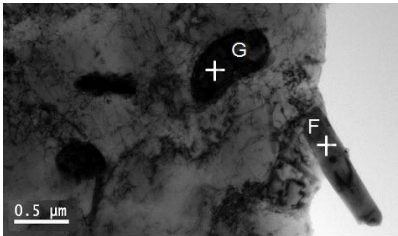


图3 1150℃/2h参数下接头IC10一侧DZ区界面组织

表4 各物质化学成分at. %

	Ni	Cr	Mo	Si	Co	Ti	W	Ta	可能相
A	71.9	12.4	0.3	3.3	2.6	/	/	/	镍基固溶体
B	15.2	67.9	11.0	1.0	/	0.5	/	/	硼化物
C	81.0	6.8	1.7	1.8	/	1.9	/	/	镍基固溶体
D	10.5	71.2	3.5	1.6	/	0.7	/	/	CrB
E	9.0	6.5	39.1	3.2	/	22.2	/	11.5	硼化物+碳化物
F	6.1	22.7	10.9	32.5	4.2	/	19.0	/	硅化物
G	5.9	47.9	23.7	/	3.2	/	16.8	/	硼化物
H	60.5	24.0	1.8	4.6	2.6	/	/	/	镍基固溶体

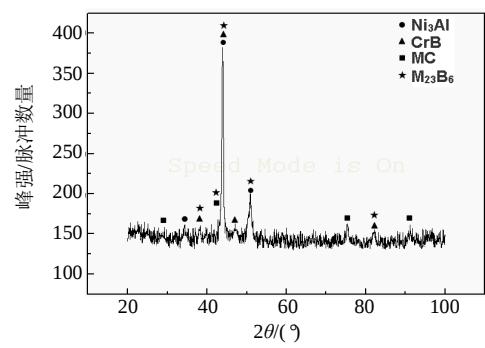


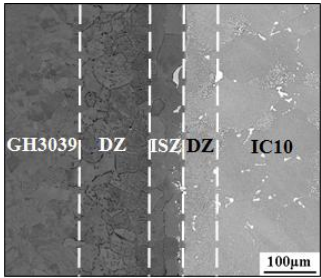
图4 1150℃/2h参数下接头微区XRD分析

这说明在此参数下接头可以实现良好的等温凝固。在ISZ区靠近IC10一侧存在白色块状组织（标记为D），结合EDS分析及XRD分析认为此组织为包覆着HfC的Al₄Ni₁₅Ta。GH3039一侧DZ区存在棒状及颗粒状化合物（标记为A、B和C），分析认为这些析出相均为富Cr的硼化物。

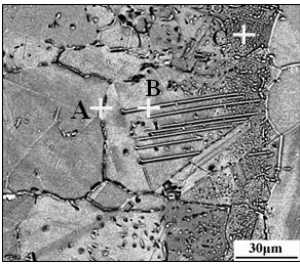
由表4及图4分析可知，接头中EZ区中灰色相（标记为B）为硼化物相（CrB和M₂₃B₆），灰白色相（标记为C）为Ni基固溶体，黑色相（标记为D）为CrB相，白色相（标记为E）为硼化物（M₂₃B₆）与碳化物（MC）的复合相。ISZ区内的组织（标记为A和H）均为Ni基固溶体。IC10一侧DZ区棒状化合物（标记为F）为硅化物，颗粒状化合物（标记为G）为硼化物（M₂₃B₆）。

图5为1050℃/2h参数下得到的接头的界面组织，对接头界面组织进行了EDS分析和XRD分析，分析结果分别见表5与图6。

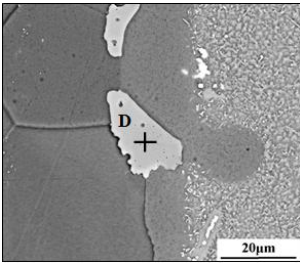
将图5与图1进行对比可以看出，两者接头界面组织差异较大。在1050℃/2h参数下，接头中没有EZ区，



a 整体界面



b GH3039一侧界面



c IC10一侧界面

图5 1050℃/2h参数下接头界面组织

表5 接头各组织化学成分

at.%

	Ni	Si	Mo	Cr	Al	Ta	Hf	可能相
A	67.8	1.7	2.1	24.4	/	/	/	富Cr的硼化物
B	71.5	2.2	1.6	20.3	/	/	/	
C	71.2	1.1	1.5	22.4	/	/	/	
D	70.3	3.1	0.7	4.3	8.8	4.6	3.6	HfC+Al ₄ Ni ₁₅ Ta

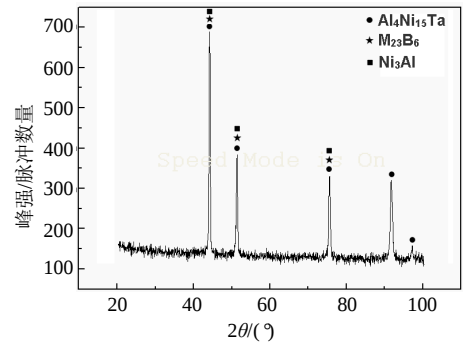
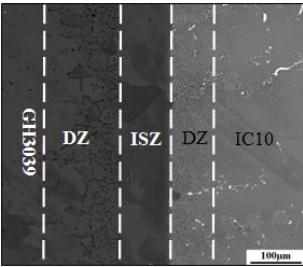
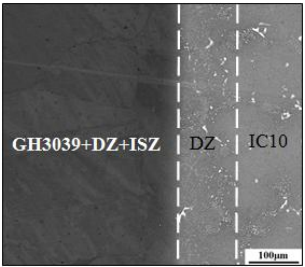


图6 1050℃/2h参数下接头微区XRD分析

保温时间设定为2h，分别在1050℃、1100℃、1150℃和1200℃四组焊接温度下施焊进行对比试验。图7为1100℃/2h和1200℃/2h参数下的接头照片。



a 1100℃/2h



b 1200℃/2h

图7 接头界面组织

3.2 焊接参数对接头界面组织的影响

3.2.1 焊接温度的影响

由图1、图5和图7对比可以看出，除1150℃/2h参数下的接头未实现等温凝固外（存在EZ区），其他三组参数的接头均实现了等温凝固（无EZ区），但接头组织形貌存在较大差异，通过对比可得出以下结论：

- a. 升高焊接温度在某些情况下会对接头实现等温凝固起到反作用。
- b. 由于Al₄Ni₁₅Ta的熔点在1050~1100℃之间，升高焊接温度可以有效避免IC10一侧该化合物的产生。
- c. 升高焊接温度对IC10一侧DZ区化合物的析出抑制作用不明显，但对GH3039一侧的抑制作用明显。

3.2.2 保温时间的影响

焊接温度设定为1200℃，分别在0.5h、1h、1.5h和2h四组保温时间下施焊进行对比试验，图8为四组参数下的接头照片。

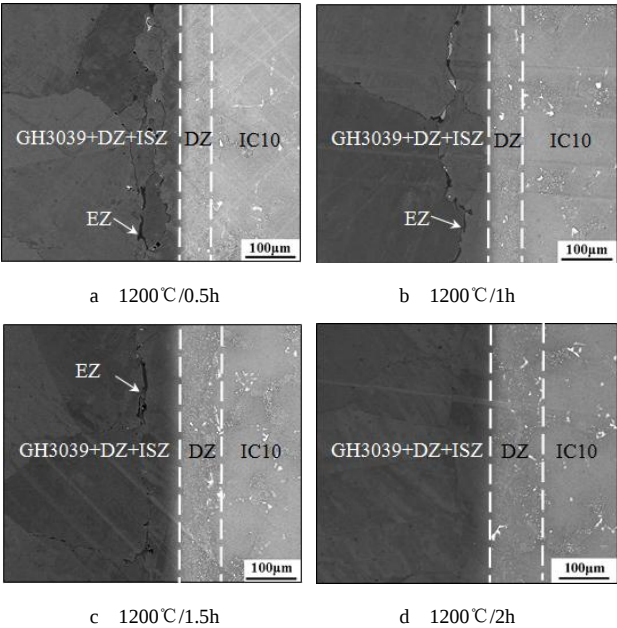


图8 接头界面组织

由图8可知，随着保温时间的延长，EZ区逐渐缩小，区域内化合物数量逐渐变少且连续性逐渐变差，当保温时间达到2h时，接头中EZ区消失，实现了完全等温凝固。

3.3 焊接参数对接头力学性能的影响

3.3.1 焊接温度的影响

图9为1050℃/2h、1100℃/2h、1150℃/2h和1200℃/2h四组参数下所得接头的常温拉伸强度。由图可知，1050℃/2h参数下接头的拉伸强度最低，为395MPa，而其他三组参数下的接头拉伸强度均在730MPa以上，且随着焊接温度的升高拉伸强度

略有下降。观察接头断裂位置（图10）发现，焊接温度为1150℃的接头在焊缝处断裂几乎无塑性变形，其他三组参数下的接头均在GH3039母材处断裂且塑性变形明显，说明焊缝强度已高于GH3039母材。结合接头的界面组织可以得知，接头中EZ区的存在会大大弱化接头性能。

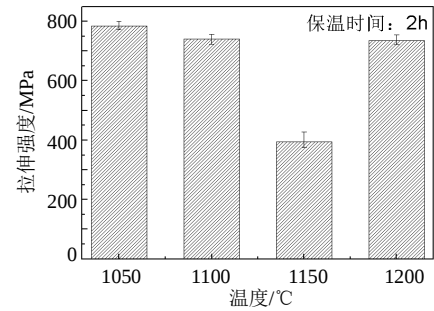


图9 接头常温拉伸强度

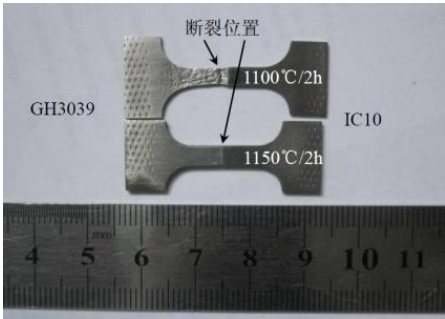


图10 接头宏观断裂形貌

对以上四组参数的接头进行了900℃高温性能试验。图11为得到的高温拉伸曲线图，可以看出，接头的高温拉伸强度均在200MPa以上且差异较小，但接头的高温塑性差异较大。通过观察接头断裂位置可以发现，只有1200℃/2h参数下的接头断裂于GH3039母材，其他三组参数下的接头均断裂于焊缝处。由此可知，接头高温拉伸强度受焊接温度的影响较小，但高温塑性受焊接温度影响较大。焊接温度越高，高温塑性越好，但是EZ区会使接头高温塑性急剧下降。

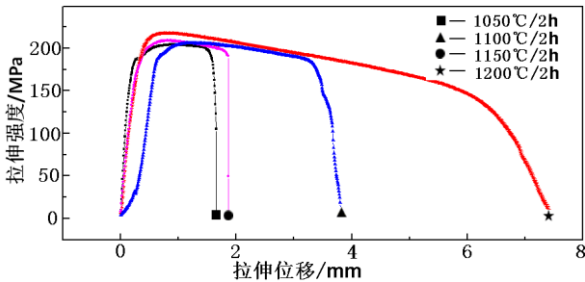


图11 拉伸曲线图（900℃）

通过以上力学性能试验结果分析可知:

a. 1200℃/2h参数下接头的综合力学性能最好;

b. EZ区会使接头的常温拉伸强度及高温塑性显著降低。

3.3.2 保温时间的影响

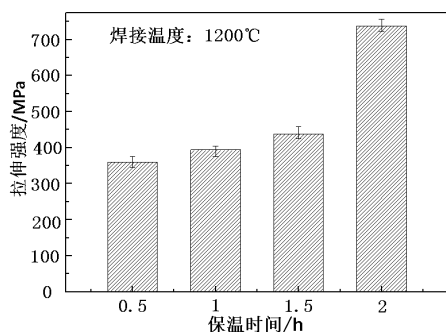


图12 接头常温拉伸强度

图12为1200℃/0.5h、1200℃/1h、1200℃/1.5h和1200℃/2h四组参数下所得接头的常温拉伸强度。可以看出, 延长保温时间促进接头的拉伸强度不断升高, 保温时间从0.5h到1.5h的过程中, 接头的拉伸强度升高缓慢, 而保温时间达到2h时, 拉伸强度显著提高。结合接头界面组织可知, 前三组参数下的接头中均存在EZ区, EZ区会降低接头的力学性能, 故接头拉伸强度均较低。EZ区化合物随着保温时间的延长而减少, 对接头的不良影响减弱, 接头拉伸强度随之提高。

4 结束语

(上接第4页)

的贮存期为:

$$t=2^n \cdot t'=1024 \times 24 \times 10=245760\text{h}=245760/365/24 \approx 28\text{a}$$

如果 T_0 取 25℃, T 为 100℃, 计算出 $n \approx 9.4$, 则 $2^n = 2^{9.4} = 675.6$ 。计算出 HG 隔热涂层的常温下 (25℃) 的贮存期为:

$$t=2^n \cdot t'=675.6 \times 24 \times 10=162144\text{h}=162144/365/24 \approx 18\text{a}$$

因为在 100℃下热老化 240h, 强度没有下降, 上面的经验估算只能是保守计算, 实际贮存期会更长。

4 结束语

研究了 HG 系列隔热涂层的基本配方, 对涂

使用 SEM、EDS、XRD 及 TEM 手段分析了 IC10/BNi2/GH3039接头的微观组织, 并使用万能试验机等设备测试了接头的力学性能, 结果表明:

a. 接头主要由ISZ、EZ、DZ及BM区组成, ISZ区组织为镍基固溶体; EZ区组织含有镍基固溶体、硼化物及碳化物; GH3039一侧DZ区组织为富Cr的硼化物, IC10一侧DZ区组织为硅化物和硼化物。

b. 焊接温度的升高并不一定能够促进接头实现完全等温凝固, 而保温时间的延长有助于接头实现完全等温凝固。

c. 1200℃/2h参数下的接头综合力学性能最好。

d. 接头中EZ区的形成会使接头的常温拉伸强度及高温塑性显著降低。

参考文献

- 1 Ding R G, Ojo O A, Chaturvedi M C. Laser beam weld-metal microstructure in a yttrium modified directionally solidified Ni₃Al-base alloy[J]. Intermetallics, 2007, 15(12): 1504~1510
- 2 罗晓娜, 刘金合, 康文军, 等. 新型高温合金 IC10 的焊接研究进展[J]. 热加工工艺, 2008, 37(3): 101~103
- 3 陈荣章. 北京航空材料研究院铸造高温合金及工艺发展40年[J]. 材料工程, 1998(10): 3~10
- 4 刘丰刚. GH3039 激光焊接工艺及接头组织性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010
- 5 Li W, Jin T, Sun X F. Transient liquid phase bonding of Ni-base single crystal superalloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2002, 18(1): 54~56

料的使用性、涂层的耐烧蚀性、隔热性、耐热性、涂层的高低温粘接性、涂层的三防性 (湿热、盐雾、霉菌)、涂层高低温循环、涂层的内聚强度以及涂层热老化性进行了全面的研究和试验, 涂料工艺性和涂层的各项性能优良, 证明 HG 系列隔热涂层涂料是一种实用性较强的功能涂料。

参考文献

- 1 战凤昌. 专用涂料[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998. 323~337
- 2 高南, 华家栋. 特种涂料[M]. 上海科技出版社, 1984. 1~50
- 3 赵英明, 刘瑾. 高效隔热涂层应用研究[J]. 宇航材料工艺, 2001(3): 42~44
- 4 马宏, 马永强. 耐烧蚀隔热涂层的研制[J]. 宇航材料工艺, 2008(6): 68~72