

定向凝固高温合金 IC10 瞬态液相 (TLP) 扩散焊接头组织研究

Research on TLP Diffusion Bonded Joint Microstructure of
Directionally Solidified Superalloy IC10

叶 雷, 毛 唯, 谢永慧, 李晓红

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

YE Lei, MAO Wei, XIE Yong-hui, LI Xiao-hong

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 对定向凝固高温合金 IC10 进行了 TLP 扩散焊, 中间层合金为在母材成分基础上加入一定量的降熔元素 B 配制而成, 研究了在 1270 °C 不同保温时间下焊缝及母材组织的变化, 并对焊缝及母材中 γ 相的形状尺寸变化进行了分析。

关键词: 定向凝固高温合金; TLP 扩散焊

中图分类号: TG146.1+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2004) 03-0042-03

Abstract: TLP diffusion bonding of the IC10 directional-solidification superalloy was studied. The interlayer was made of IC10 base metal in addition of a certain content of B. Microstructure in the bonding seam and base metal differed with bonding time was researched and the difference of the shape and size of the γ phase in the bonding seam and base metal was analyzed.

Key words: directional-solidification superalloy; TLP diffusion bonding

高温合金由于其特有的性能被广泛应用于航空发动机上, 随着航空发动机性能要求的不断提高, 对其性能要求也相应提高。晶界是高温合金的薄弱环节, 定向凝固高温合金利用定向凝固技术使合金凝固形成定向的平行柱状晶组织, 从而消除了横向晶界, 使得定向凝固高温合金的纵向力学性能比普通铸造高温合金大大提高, 同时, 热疲劳抗力明显增加。本工作对我国在研的先进定向凝固高温合金 IC10 的 TLP 扩散焊接头组织和性能进行研究分析。

范, 连接温度为 1270 °C, 并采用不同的保温时间以观察焊缝及母材内部组织的变化。

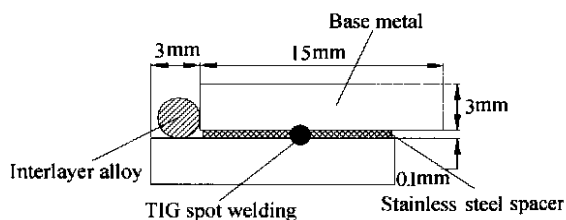


图 1 金相试样装配示意图

Fig. 1 Scheme of specimen for metallographical analysis

1 试验材料方法

试验所用母材为在研的定向凝固 Ni₃Al 基高温合金 IC10, 其主要成分有 Ni, Al, W, Ta, Mo, Cr, Co, Hf 及少量的 B 和 C。TLP 扩散焊试验用中间层合金为专为 IC10 配制的 YL 合金, 其主要成分与 IC10 基本一致, 加入了一定量的 B 作为降熔元素。中间层使用形式为真空电弧熔炼成的小锭再敲碎成小块状。所有母材经过丙酮超声波清洗去油。金相试样为尺寸 15mm × 15mm × 3mm 的 IC10 片, 装配时先把 0.1mm 厚的不锈钢垫片置于试样接合面两侧, 再用氩弧点焊定位, 然后把小块状中间层用储能点焊机点于试样上方, 并在试样两侧涂上阻流剂, 装配示意图如图 1 所示。

连接采用与母材固溶处理制度相匹配的连接规

范, 试验设备为双室气淬真空钎焊炉, 金相试样用 HNO₃ + HF + 甘油 (体积比为 1 : 2 : 3) 腐蚀, 在 MNM-7 光学显微镜及 JEOL-5600 型扫描电镜进行观察, 用 Link ISIS300 能谱仪进行物相成分分析。

2 试验结果及分析

2.1 TLP 扩散焊接头组织

图 2 为采用 YL 中间层在 1270 °C 保温不同时间的焊缝组织, 图 2 a, b, c, d 分别对应保温时间 5min, 2h, 8h 和 24h。从图 2 a 可以看出, 保温 5min 时, 焊缝明显变宽, 靠近母材的两侧为 γ + γ' 花团状共晶, 中

央黑色基体为 $\gamma + \gamma'$ 两相组织, 焊缝中还有鱼骨状化合物 1 及大块网状相 2, 以及远离焊缝的母材中的一些长条状相 3。利用能谱分析测定各相成分结果如表 1 所示。由于 B 的原子序数较小, 扫描电镜无法测定其含量, 只能根据化合物的形貌及化合物中各元素的含量来确定。分析认为 1 为 B 化物, 2 为 Ni-Hf 共晶, 3 为富 Hf, Ta 的 C 化物^[1]。经过 2h 保温可以看出, 除沿焊缝界面处的 $\gamma + \gamma'$ 共晶边缘还有一些 B 化物外, 焊缝组织已基本与母材一致, 焊缝宽度也变窄。另外母材中的 $\gamma + \gamma'$ 共晶边缘还有一些化合物。保温 8h, 焊缝宽度进一步变窄, 母材中化合物相变少。保温 24h, 焊缝与母材中化合物相及焊缝与母材界面基本消失, 近缝区母材组织也进一步扩散均匀化。

连接过程大致如下: 首先是中间层合金熔化进入

接头区, 由于熔化的中间层中含 Al, Ta 等 γ 形成元素, 且 Hf, B 等降熔元素促进共晶形成, 所以在母材的两侧界面向焊缝中形成了大量连续的 $\gamma + \gamma'$ 花团状共晶。随着 $\gamma + \gamma'$ 共晶的形成, Cr, Mo, W 等元素排出, 在共晶的周围形成了富 Cr, Ta 的 B 化物。由图 2 a 可知, 在连接温度下, 虽然保温时间很短, 但焊缝宽度已大于 0.1mm, 证明有部分母材已被溶解。同时母材与中间层合金元素之间发生扩散, 中间层合金中的 B 向近缝区扩散使得近缝区的局部熔点降低, 在连接温度下熔化, 冷却过程中形成大量的 B 化物 (图 2 a)。随着保温时间的继续增加, 由于 B 元素原子半径小, 在母材中扩散速度很快, 其逐渐向远离焊缝的母材区域扩散, 近缝区的 B 化物逐渐变少, 整个焊缝组织随着保温时间增加趋于均匀。

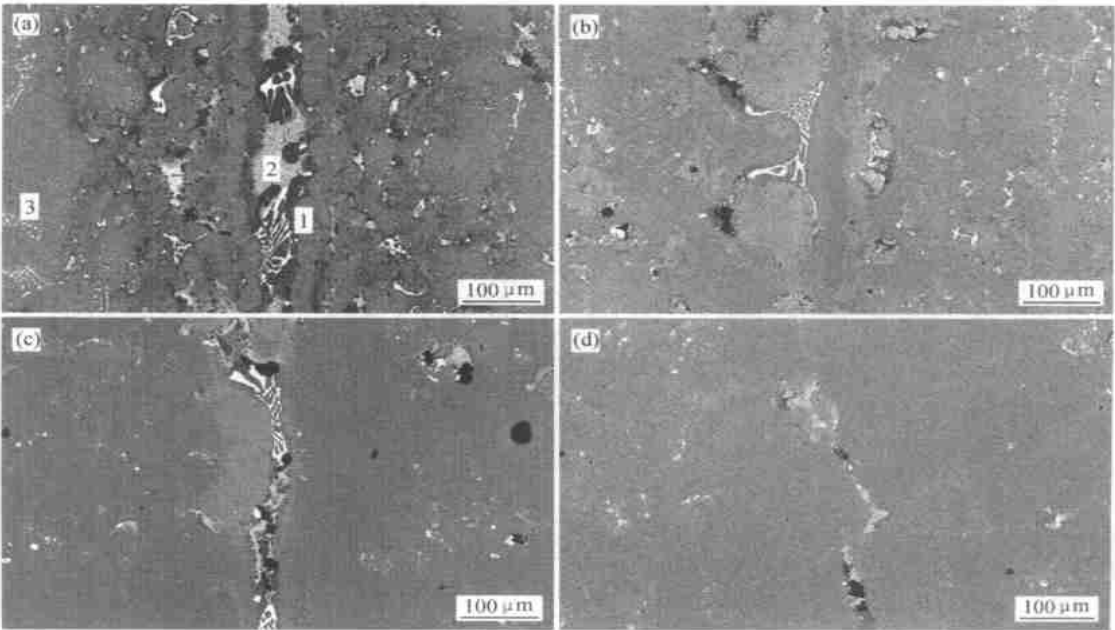


图 2 YL 中间层合金扩散焊接头组织
Fig. 2 Microstructure of diffusion bonded joint with YL interlayer
(a) 1270 /5min; (b) 1270 /2h; (c) 1270 /8h; (d) 1270 /24h

表 1 YL 中间层扩散焊接头各相成分 (EDS)

Analysis location	Composition (mass fraction) / %							
	Ni	Al	Cr	Co	Hf	Mo	Ta	W
1	7.21	—	23.16	4.78	—	20.07	9.48	35.30
2	64.04	0.57	5.40	22.32	4.37	—	3.31	—
3	4.37	—	0.68	1.64	64.28	—	28.66	—

2.2 焊缝及母材中 γ 相形貌随保温时间的变化

图 3 所示为接头在 1270 °C 保温 5min 和 24h 焊缝及母材中的 γ 相。可以看出, 在保温时间较短时, 焊

缝中的 γ 相近似为球状, 保温时间增加时, 逐渐变为四方形, 还有一些呈田字形状, 尺寸也有所增大。而母材中的 γ 相在保温时间较短时为四方形, 保温时间

增加时, 形状变的不规则, 尺寸也明显增大。

γ 相的析出过程受界面能和共格应变能的控制, 焊缝中的 γ 相优先在界面处非均匀形核, 保温时间较短时, γ 相来不及长大, 细小的 γ 相易成球状^[2]。随着保温时间的增加, γ 相长大, 会破坏共格而形成部分共格界面, 形状趋于方形而增大表面积以减少共格弹性能。

在 Ni 基高温合金中, Al, Ti, Nb, Ta, V, Zr, Hf 元素优先进入 γ 相, 而 Co, Cr, Mo 优先进入 γ 基体, W 大致平均分配在两相中, 故一般用 Σ (Al+ Ti + Nb+ Ta+ V+ Zr+ Hf+ 1/2W) 的原子百分数作为 γ 相形成因子^[3], γ 相形成因子越高, γ 数量越多。由于中间层成分为在母材基础上去除 Hf, C 再加入一定

量的 B 配制, 所以 γ 相形成因子只有 Al, Ta, W。保温时间为 5min 时, 由图 3a 可见, 焊缝中形成大量 B 化物, 并且母材中的 Hf 扩散进入焊缝也形成 Ni-Hf 共晶, 所以焊缝中 γ 相形成因子较低, γ 数量较少。 γ 的尺寸也与 γ 数量有关, γ 数量较少时, γ 尺寸也较小易于呈球形。当保温时间增加至 24h, 焊缝扩散均匀, 成分基本与母材一致。 γ 相形成因子增大, γ 数量也相应增多, 尺寸变大, 形状也变为四方形。

在连接过程中焊缝中的 γ 相是由无到有的一个形成过程。而母材中原本就存在 γ 相, 它在连接过程中只是一个 γ 相的长大过程。而由母材成分可知, 其 γ 相形成因子较高, 故在初始状态下的 γ 形状即为方形, 而在保温时间增加时, 其尺寸进一步变大。

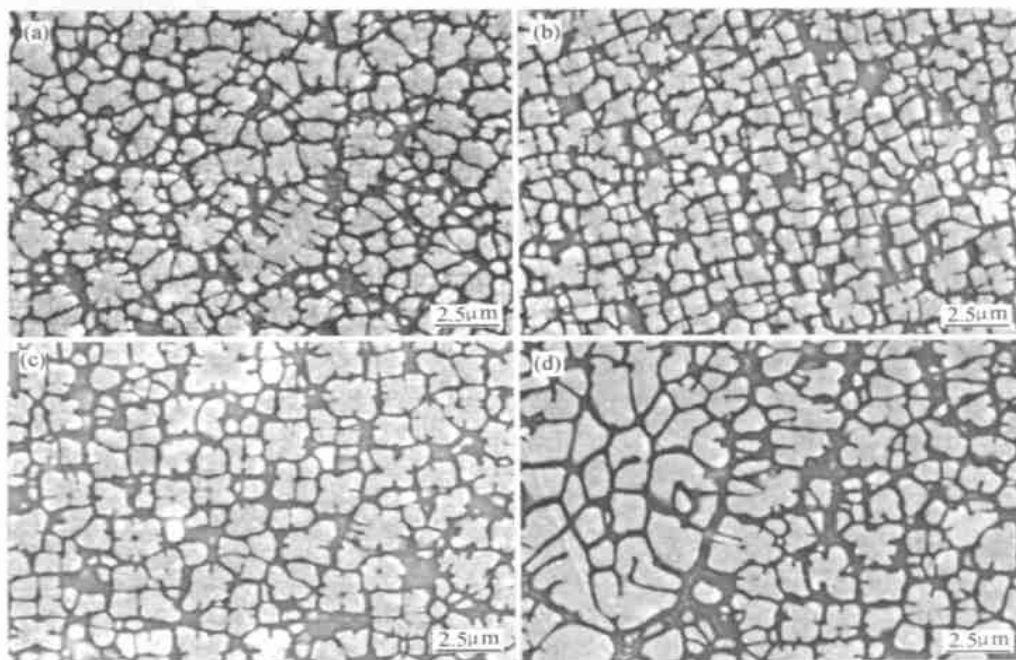


图 3 YL 中间层扩散焊接头中的 γ 相

(a) 1270 °C / 5min 焊缝; (b) 1270 °C / 5min 母材; (c) 1270 °C / 24h 焊缝; (d) 1270 °C / 24h 母材

Fig. 3 γ phase in the diffusion bonded joint with YL interlayer

(a) 1270 °C / 5min bonding seam; (b) 1270 °C / 5min base metal; (c) 1270 °C / 24h bonding seam; (d) 1270 °C / 24h base metal

参考文献

- [1] 郑运荣, 张德堂. 高温合金与钢的彩色金相研究 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 142—184.
- [2] 龙正东, 等. 高强度镍基变形高温合金的热加工性能 [J]. 金属学报, 1999, (增刊 2): 114—116.
- [3] 谢永慧. IC-6 合金 TLP 连接机理及接头组织、性能研究 [D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2000.

收稿日期: 2003-09-18; 修订日期: 2003-12-20

作者简介: 叶雷 (1981—), 男, 硕士, 材料加工工程专业, 现从事高温合金钎焊扩散焊方面的研究, 联系地址: 北京 81 信箱 (100095)。

3 结论

(1) 采用含 B 的中间层, 在保温时间较短时, 焊缝中形成大量的 B 化物及 C 化物, 经过较长保温时间的扩散后, 焊缝中 B 化物基本消失, C 化物数量也明显减少, 焊缝组织基本与母材一致。

(2) 在保温时间较短时, 焊缝中 γ 相为球状, 保温时间增加, 形状变为四方形, 尺寸也有所增加; 而母材中的 γ 相在保温时间较短时即为四方形, 保温时间增加, 尺寸明显增大, 形状也变得不规则。