

IC10 合金 TLP 扩散焊技术

TLP Diffusion Welding Technology of IC10 Alloy

中航工业北京航空制造工程研究所 侯金保 吴松 滕俊飞 魏友辉
中国人民解放军驻黎阳机械公司军事代表室 赵科
中航工业贵州新艺机械厂 雷强



侯金保

研究员,主要从事新材料和新结构的钎焊与扩散焊技术研究和新焊料设计研制。申报国防专利4项,曾获国防科技进步三等奖、部科技进步二等奖和三等奖。

航空科学技术的发展,促使航空发动机性能不断提高,具体体现在航空发动机朝高温、轻量化方向发展。目前用于制造航空发动机热端部件的高温合金无法满足高推比发动机耐温性能的要求,于是开展了 Ni_3Al 基金属间化合物材料等新型高温材料的研究。由于 Ni_3Al 金属间化合物原子的长程有序结构和原子间金属键及共价键共存^[1],使其具有熔点

高、密度小、抗氧化性好和耐温强度高特性,在高性能航空发动机中有很好的应用前景。

本文针对 Ni_3Al 基合金IC10进行过渡液相扩散焊技术研究,研制专用中间层,分析接头组织变化规律及其与接头强度的关系,实现TLP扩散焊技术在IC10合金导向叶片的工程应用。

微量硼元素可显著提高 Ni_3Al 的室温塑性,采用 γ 相可使 Ni_3Al 的强度和韧性同时提高,高熔点元素Mo、Co、W、Ta等可对 γ 相和 γ' 相起固溶强化作用^[2-3],现在研制出的 Ni_3Al 基双相合金性能显著提高,达到了飞机发动机应用要求。如美国的NX-188、WAZ-20、IC163、IC164、IC72;俄罗斯的BKHA-4已用于武装直升机^[4-5];我国研制的IC6合金用于某型发动机二级涡轮导向叶片,IC10合金将用于高推比发动机组联式涡轮导向叶片。本文针对 Ni_3Al 基合金IC10进行过渡液相(Transient

Liquid Phase, TLP)扩散焊技术^[6]研究,研制专用中间层,分析接头组织变化规律及其与接头强度的关系,实现TLP扩散焊技术在IC10合金导向叶片的工程应用。

试验材料及方法选择

1 试验材料

试验材料选用 Ni_3Al 基合金IC10,并采用定向凝固方法铸造,IC10合金的名义化学成分如表1所示。铸态IC10合金主要由 γ 相及 γ' 相组成,在枝晶间的 γ' 相大多为 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 的立方体形和尺寸大于 $10\mu\text{m}$ 的大块不规则形,枝晶干的 γ' 相尺寸为 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的不规则形和 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 的立方体形, γ 相呈网状

表1 IC10合金的主要化学成分

Co	Al	Cr	Mo	Ta	Ti	B	Ni
8.0~11	6.0~8.0	5.0~8.0	1.5~5.0	1.0~4.0	0.5~2.0	≤ 0.15	其余

分布于 γ' 周围,厚度约 $0.01\sim 0.2\mu\text{m}$,经 $1260\pm 10\text{ }^\circ\text{C}/2\text{h}$,油冷或空冷条件的均匀化处理后,枝晶间 γ' 相为 $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ 的立方体形,枝晶干的 γ' 相为 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的立方体形, γ 相呈网状分布于 γ' 相周围,即 $\gamma'+\gamma$ 双相网状组织。均匀化处理后的IC10合金 γ' 相含量约70%~80%, γ 相约20%~30%,以及少量硼化物和碳化物,其高温持久性能如表2所示。

2 试验方法选择

Ni_3Al 属于L12型结构,有明显的室温脆性,即使采用B元素提高合金的室温塑性,采用 γ 相进行强韧化, Ni_3Al 合金的室温塑性和普通金属材料相比差距仍很大。国内外有关 Ni_3Al 合金EBW、LBW、TIG等

间层合金,进行连接试验,分析接头组织、力学性能,优化连接工艺和中间层合金。

试样制备和 TLP 焊工艺试验

1 试样制备

Ni_3Al 基合金IC10硬度高,普通刀具难以加工,原材料有板材和棒材两种形式,用线切割和磨削方法将原材料加工成焊前试样;采用储能点焊方法将待焊试样用高温合金片固定,用 0.04mm 厚的金属片支撑焊接面两侧以控制焊缝间隙,焊接面周围添加粉末中间层焊料;TLP扩散焊后再按GB/T4338 2006标准测试高温拉伸性能,按GB/T2039 1997标准测试高温持久性能。

表2 IC10合金的持久性能

使用状态	980 $^\circ\text{C}$, 100h 持久强度 /MPa		1100 $^\circ\text{C}$, 100h 持久强度 /MPa	
	纵向	横向	纵向	横向
固溶	165	120	55	40

熔焊研究表明^[7-9],接头的熔化区和热影响区中容易出现凝固裂纹和应变时效裂纹,尽管采用工艺方法可以减少裂纹,但不能消除裂纹。这说明 Ni_3Al 合金的熔焊性能很差,应采用 Ni_3Al 基体不熔化的连接方法。

TLP扩散焊^[6]是结合钎焊和固相扩散焊二者优点形成的新型连接方法,其原理是将与基体材料相匹配的中间层合金置于连接面,在连接温度下中间层形成液相填充连接间隙,由于原子的扩散,液相对母材有适量溶解,然后液相凝固,获得和母材相近的组织,再进行扩散处理,使接头成分、组织和母材相近,得到高性能的连接接头。国外采用TLP扩散焊技术制造F119发动机的单晶对开叶片和MA956合金多孔层板结构等。该技术已广泛用于镍基、铁基、钴基及氧化物弥散强化高温合金的连接。对 Ni_3Al 基合金IC10采用TLP扩散焊技术,研制与IC10相匹配的中

2 TLP 扩散焊工艺试验

制备的试样焊前用超声波清洗,烘干后用丙酮擦净待焊面,将调制好的膏状中间层置于焊接面,装HBF80真空炉中,分别进行 $1240\text{ }^\circ\text{C}$ 不同保温时间的TLP连接工艺试验。采用的中间层合金为本试验针对 Ni_3Al 基合金TLP扩散焊研制的KNi3A镍基中间层(图1)。



图1 设计的镍基中间层制造的粉末

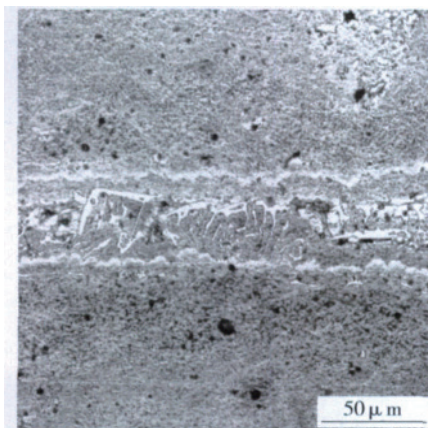
TLP 扩散焊试验与分析

对不同保温时间的TLP连

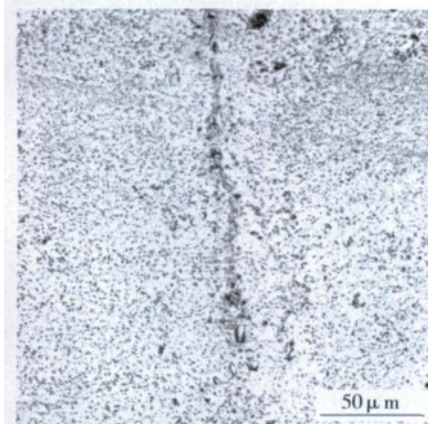
接工艺焊接的IC10合金试样,用JENAPHOT-2000型光学显微镜、JSW-840型扫描电镜和TN-5500型能谱仪分析接头组织、成分和线扫描元素扩散程度。

1 保温时间对IC10合金TLP连接接头组织影响分析

采用KNi3A中间层、 $1240\text{ }^\circ\text{C}\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ 、不同保温时间连接对该组织的IC10合金接头组织(图2)。保温4h后,焊接接头已等温凝固,接头组织由 γ 相基体、大块状 γ' 相、块状硼化物及少量碳化物组成;保温10h后,大块状 γ' 相、块状硼化物及少量碳化物等变成细小颗粒状均匀分布于 γ 相基体中,接头组织与被焊基体相近,焊接面与基体没有可见界面。这说明IC10合金TLP扩散焊保温10h的工艺能达到获得与基体相近接头的目的,其接头



(a) 保温4h



(b) 保温10h

图2 IC10合金采用KNi3A中间层连接接头组织

组织与基体组织的连续性好,对提高接头高温力学性能有利。

2 IC10 合金 TLP 扩散焊接头强度

通过采用 KNi3A 中间层、1240℃ ± 10℃ 保温 10h 炉冷工艺焊接 IC10 合金,焊接接头组织如图 3 所示。强度试样分别按标准加工后测试高温拉伸、高温持久性能,测试结果如表 3、表 4 所示,IC10 纵向焊接试样 982℃、128MPa 应力的持久时间超过 120h,即高温持久强度接近基体强度(165MPa)的 77% 以上;横向焊接试样 980℃、100MPa 应力的持久时间超过 120h,即高温持久强度达到基体强度(120MPa)的 83% 以上。

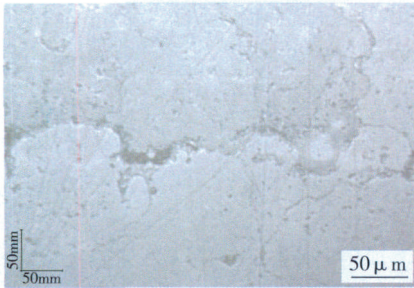


图3 焊接接头金相组织

3 TLP 扩散焊后固溶处理对接头强度的影响

IC10 合金 TLP 扩散焊接后再进行 1260℃ 固溶处理,通过热处理恢复基体材料组织性能,以减小焊接过程对基体材料组织性能的影响。强度试样分别按标准加工后测试高温拉伸和高温持久性能,测试结果如表 5、表 6 所示。可以看出,纵向焊接试样 1000℃ 高温抗拉强度达到基体的 89% 以上,横向焊接试样抗拉强度达到基体的 91% 以上。纵向焊接试样 980℃、144MPa 应力的持久时间达到 97.5h 以上,即纵向焊接试样 980℃、100h 持久强度接近基体强度的 87%;横向焊接试样 980℃、120MPa 应力的持久时间达到 120h 以上,即横向焊接试样 980℃、100h 持久强度和基体强度相等。

4 拉伸试样断口分析

表3 高温拉伸性能

试样状态	测试温度 /℃	拉伸强度 δ /MPa
纵向焊接	1000	395,425
横向焊接	1000	350,315

表4 IC10合金焊接接头高温持久性能

试样状态	测试温度 /℃	测试应力 /MPa	持久时间 /h
纵向焊接	982	128	>120, >120, >120
横向焊接	980	100	>120, >120, >120

表5 高温拉伸性能

试样状态	测试温度 /℃	拉伸强度 δ /MPa
IC10 基体纵向(焊接+固溶)	1000	500,500
IC10 基体横向(焊接+固溶)	1000	430,445
纵向焊接+固溶	1000	480,445
横向焊接+固溶	1000	395,410

表6 高温持久性能

试样状态	测试温度 /℃	测试应力 /MPa	持久时间 /h
IC10 基体纵向	980	165	>100
IC10 基体横向	980	120	>100
纵向焊接+固溶	980	144	>120, >120, 97.5
横向焊接+固溶	980	120	>120, >120, >120

拉断试样的断口形貌,如图 4 所示。高温拉断试样断口宏观上较平整,起伏不大;细观上具有柱状韧窝特征,与定向凝固高温合金断口形貌相同,也与 IC10 合金定向凝固组织相对应,微观上都是典型韧窝形貌。

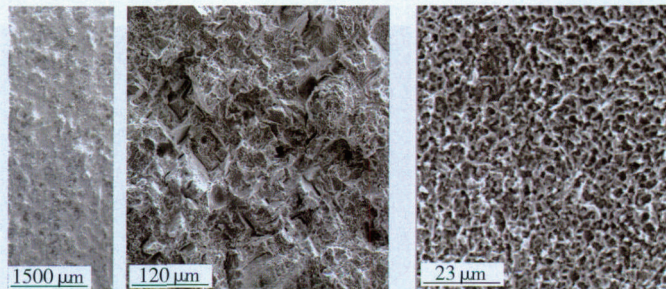


图4 宏观到微观的高温拉断试样断口形貌

的焊接接头。

(2) 研制了 Ni₃Al 基合金 IC10TLP 扩散焊用中间层合金 KNi3A,焊接接头 980℃ 持久强度达到 128MPa。

(3) TLP 扩散焊后再进行固溶

处理,可提高基体材料和焊接接头强度,纵向焊接接头强度提高到 144MPa,横向焊接接头强度提高到 120MPa。

结束语

(1) TLP 扩散焊能实现 IC10 合金的有效连接,获得组织与基体相近

本文共有参考文献 9 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 三丰)