

FGH95-K418B 双合金热等静压复合工艺研究

罗学军, 马国君, 王晓峰, 田高峰, 盖其东, 穆松林

(北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095)

摘要: 采用热等静压扩散连接工艺实现了 FGH95 高温合金粉末和 K418B 铸造合金之间的可靠连接。研究了热等静压复合连接工艺对 FGH95-K418B 复合界面的成分扩散、界面组织的影响, 以及对叶片材料组织和性能的影响。结果表明, 通过合理的工艺选择与改进, 可以在保证对偶材料性能满足要求的前提下实现界面的良好扩散与结合。

关键词: 双合金; 整体叶盘; 热等静压; 扩散连接

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2011.4.006

中图分类号: V223; V215.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2011)04-0029-04

整体叶盘 (Blisk) 制造技术是美国 IHPDET(国防综合高性能发动机技术) 发展计划的重要支撑技术, 在美国的先进战斗机 (ATF) 计划中列为重要核心技术, 双合金整体叶盘 (Blisk) 是发动机转子制造技术的发展方向之一, 在国外新型航空发动机辅助动力装置上已得到广泛应用^[1-5]。整体涡轮叶盘中所用盘件材料主要是粉末高温合金, 以满足中温轮盘部分高的屈服强度和良好的低周疲劳性能; 叶片材料主要是铸造高温合金细晶、定向合金和单晶合金, 以满足叶片部位高温持久蠕变性能要求, 双合金结合良好使轮毂和叶片都能获得良好的组织和性能; 从而实现盘件与叶片的灵活选择和最佳性能匹配。与整体铸造叶轮相比, 双合金整体叶盘可以兼顾盘心盘缘的性能; 与机械榫齿连接的叶盘结构相比, 可大大减少机加工量, 免除高精度加工和装配要

求, 减轻涡轮重量, 从而提高涡轮转速、性能和可靠性^[6-9]。

本工作以 FGH95 粉末高温合金和 K418B 铸造高温合金为研究对象, 采用粉-固热等静压 (HIP) 扩散连接工艺, 针对 FGH95-K418B 界面的扩散反应、叶片材料组织形貌变化以及界面的组织和性能, 研究采用双合金热等静压复合工艺实现粉末高温合金与铸造高温合金的可靠连接, 为我国整体叶盘制造技术的发展奠定实验基础。

1 实验材料及过程

以氩气雾化 (Argon Atomization) 的 FGH95 高温合金粉末和 K418B 铸造高温合金试验锭作为复合研究对象。两种材料的化学成分见表 1。

表 1 合金的主要化学成分 (质量分数 / %)
Table 1 Chemical composition of alloys (mass fraction / %)

	Al	Co	Cr	W	C	Ti	Mo	Nb	Zr	Ni
FGH95	3.4	7.8	12.6	3.6	0.05	2.4	3.5	3.7		Bal.
K418B	6.1		11.8		0.05	0.8	4.5	2.1	0.09	Bal.

采用粉-固连接的复合工艺, 将铸造的 K418B 铸造合金锭进行机械加工、表面净化处理后装入包套内, 然后向包套内充填 FGH95 高温合金粉末, 经

过真空热动态除气、氩弧封焊包套、粉末预处理、热等静压复合成形及最终热处理。复合成形工艺参数的选择主要根据较为成熟的、温度及压力更高的细晶精密铸造高温合金的成形工艺, 以保证粉末高温合金和铸造高温合金的致密化成形和性能要求, 以不损害材料组织和性能为前提 (粉末的成形及后处理温度低于叶片材料的热处理温度和再结晶温度), 达到界面的良好冶金结合。

收稿日期: 2010-04-20; 修订日期: 2011-05-20

基金项目: 重点实验室基金资助项目 (9140C4303021004)

作者简介: 罗学军 (1977—), 男, 工程师, 主要从事粉末高温合金制件的制造技术及其工程应用研究, (E-mail) xuejun.luo@biam.ac.cn。

利用扫描电镜(SEM) 和透射电镜(TEM) 研究对偶之间的界面扩散、界面成分变化及 K418B 合金中 γ' 形态变化。

2 结果与讨论

2.1 FGH95-K418B 复合工艺研究

研究了磨削、机械抛光、化学表面处理、超声净化处理、真空处理等铸造基体表面净化方式对

K418B-FGH95 界面结合质量的影响。图 1 为表面净化处理对界面有害相析出和界面污染的影响, 从图 1a 可以看出, K418B 材料表面处理不净, 在复合界面处就将形成有害膜和污染源, 将直接影响界面结合强度。无论是化学表面处理还是超声净化处理, 只要能保证良好的净化界面均可采用, 表面磨削抛光程度对界面结合影响不大。图 1b 为经表面净化处理后的复合界面形貌, 界面结合良好。因此, 保证复合界面足够的清洁度对界面结合至关重要。

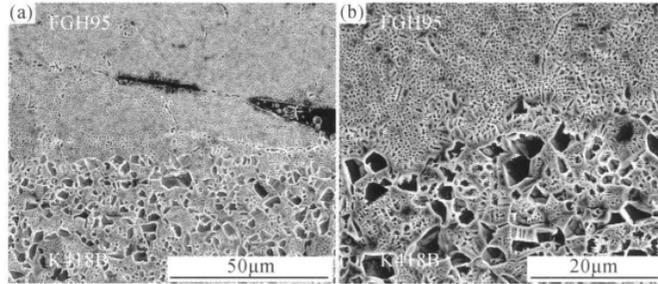


图 1 表面处理对界面结合的影响 (a) 未经表面处理; (b) 表面处理后

Fig. 1 Effects of surface treatment on the combination of two alloys

(a) no surface treatment; (b) after surface treatment

2.2 界面扩散反应研究

由于两种材料均属于镍基合金, 复合实验结果表明两者具有较好的相容性。但由于两种材料的化学成分存在一定差异, 复合界面存在一定的元素浓度梯度而相互扩散, 使得界面处合金成分和相组成较为复杂, 在 HIP 过程中必然发生界面的扩散反应。

图 2 为 HIP 后 FGH95-K418B 复合界面的 SEM 照片及成分分布图。从图中可以看出, 经有效处理

后界面结合良好, 未发现有害相析出。Al 元素存在较大的成分梯度, 由 K418B 向 FGH95 扩散, Mo 的扩散规律类似, 但成分变化较为平缓。Co, W, Ti, Nb 则明显由 FGH95 向 K418B 扩散, 基本呈连续过渡分布。扩散层厚度约 $15 \sim 18 \mu\text{m}$, 位于 K418B 合金一侧。这说明通过 HIP 过程的界面扩散反应可以实现界面成分的平稳过渡, 同时某些成分在近界面处的富集与贫化将直接影响近界面区域的强化相形态。

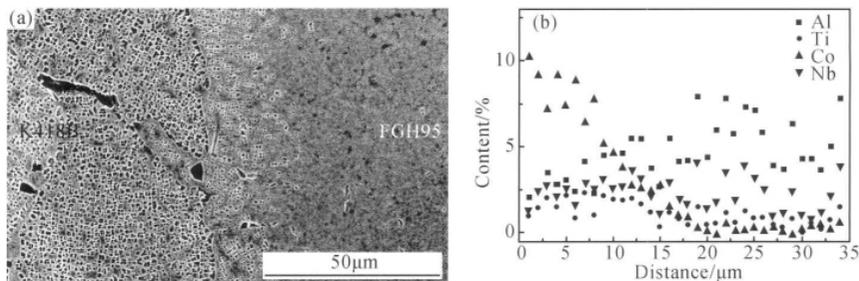


图 2 FGH95-K418B 复合界面 SEM 照片及成分分布

Fig. 2 The SEM micrograph and the composition distribution at the bonding interface

2.3 复合工艺对 K418B 叶片材料组织的影响

图 3 为 $1185 \sim 1200^\circ\text{C}$ 热等静压复合处理对 K418B 合金 γ' 形态的影响。复合处理后, K418B 合金中的显微疏松基本消除, γ' 相仍呈立方形, γ' 相网格状分布但尺寸明显增大, 且排列更加规则、有序,

显微组织更合理^[10]。

2.4 复合试样界面结合强度分析及性能测试

研究了 K418B-FGH95 复合试样的拉伸性能, 性能结果见图 4。可见, 复合试样拉伸性能较好, 但持久性能较差, 需要进行深入研究。所有拉伸试样的

断裂均未发生在结合界面处,断裂通常发生在 K418B 一侧。这是因为两种合金本身对温度的承受能力就有差别,同时复合工艺处理使得 K418B 合金

中的 γ' 聚集长大,因而影响了叶片材料的强度和持久性能。另外,对于这种复合件的性能表征方法也有待于进一步研究。

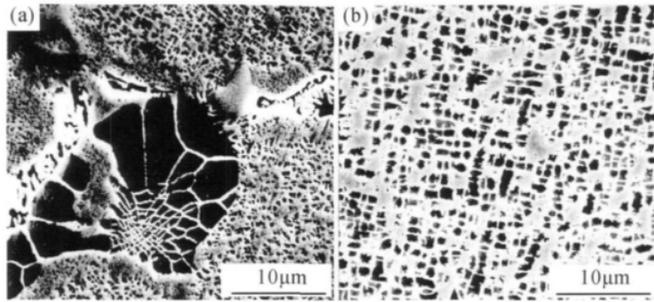


图3 HIP前后 K418B 合金 γ' 相的扫描电镜照片 (a)HIP 前; (b)HIP 后

Fig. 3 Comparison of γ' morphologies before and after HIP (a)original K418B; (b)after HIP

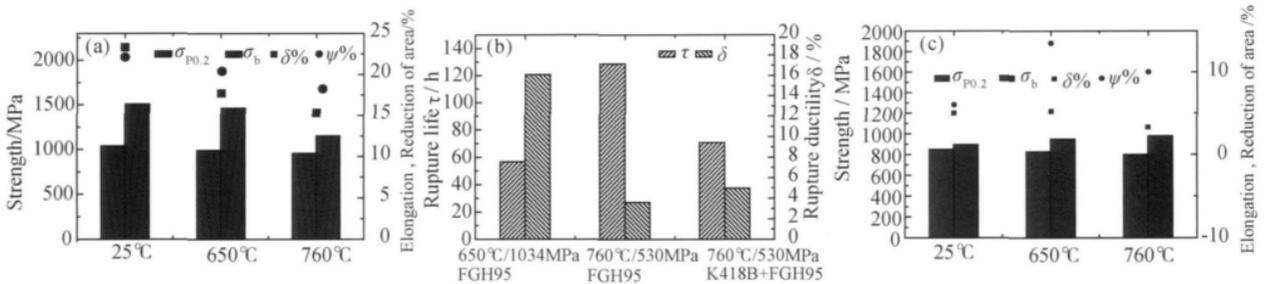


图4 K418B-FGH95 复合试样的力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of K418B-FGH95 alloy (a)tensile properties of FGH95; (b)stress rupture; (c)tensile properties of composite samples

3 结论

(1) 通过合适的复合工艺,可以保证 FGH95 和 K418B 两种合金实现良好的界面冶金结合,同时复合界面成分平稳过渡。

(2) 复合工艺处理使得 K418B 合金中的 γ' 聚集长大,对其强度和持久性能有一定影响。

(3) 热等静压扩散连接的 FGH95-K418B 试样具有较好的拉伸性能,但持久性能较低,热处理工艺有待于进一步研究改进。

参考文献:

- [1] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术 [J]. 航空制造技术, 2006 (4): 94 - 100.
- [2] BHAUMIK S K, BHASKARAN T A, RANGARAJU R *et al.* Failure of turbine rotor blisk of an aircraft engine [J]. Engineering Failure Analysis, 2002 9 (3): 287 - 301.
- [3] 陈光. 新型发动机的一些新颖结构 [J]. 航空发动机, 2001 (1): 3 - 10.

- [4] 孙广华, 梁春华. 航空发动机粉末冶金涡轮盘的新发展 [J]. 国际航空, 2008 (2): 62 - 64.
- [5] 丁立铭. 21 世纪航空制造技术将发生质的飞跃——谈高推重比发动机的关键制造技术 [J]. 国际航空, 2002, (1): 53 - 57.
- [6] 田高峰. FGH4096 合金双晶粒组织盘 γ' 相析出与强化研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2009: 11 - 15.
- [7] MAGERRAMOVA L A, ZAHAROVA T P, GROMOV M V. Optimal design of bimetallic components manufactured by HIP from powder and cast Ni-base superalloys [C]// Proceedings of International Conference on Hot Isostatic Pressing, Beijing, June, 1999: 229 - 238.
- [8] HOPPIN George S III, CURBISHLEY George. Dual alloy turbine wheels [P/OL]. US: 4581300. 1986 - 04 - 08 [2006 - 04 - 29]. <http://www.freepatentsonline.com/4581300.html>.
- [9] MOLL J H, SCHWERTZ J H, CHANDHOK V K. P/M dual property wheels for small engines [J]. Metal Powder Report, 1983: 547 - 552.
- [10] 汤鑫, 于保正, 呼和, 等. K418B 合金控晶铸造整体叶轮热等静压和热处理工艺研究 [J]. 材料工程, 2003 (9): 41 - 43.

FGH95-K418B Dual Alloy HIP Diffusion Bonding Process

LUO Xue-jun , MA Guo-jun , WANG Xiao-feng , TIAN Gao-feng , GAI Qi-dong , MU Song-lin

(Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory ,Beijing Institute of Aeronautical Materials , Beijing 100095 ,China)

Abstract: The development of HIP diffusion bonding of P/M superalloy FGH95 powder and K418B cast blade materials has been explored. The effects of HIP bonding process on elements diffusion and precipitation at FGH95-K418B interface were discussed. The variations of microstructure and mechanical properties of K418B cast blade materials after hipping have also been investigated. The results show that the perfect diffusion and bonding at powder -blade materials interface can be achieved by proper control , and the properties of K418B materials can also be maintained up to the desired level after HIP diffusion bonding.

Key words: dual alloy; blisk; HIP; diffusion bonding

为庆祝中国航空工业创建 60 周年将举办 北京国际无人机及航模展

2011 年 9 月 23 ~ 25 日 ,中国航空工业集团公司与中国航空学会将在中国航空博物馆联合主办“北京国际无人机及航模展”。本次展览是为庆祝中国航空工业创建 60 周年举办的系列活动之一 ,展览同期还将举办“中航工业杯——国际无人飞行器创新大奖赛”。

“北京国际无人机及航模展”是国内首次举办的具有国际水平的无人机及航模类专业展览 ,将充分展示国内外无人机和航空模型的最新技术和产品。

“北京国际无人机及航模展”作为中国航空工业创建 60 周年的重要活动之一 ,主办方强调 ,本次展览会将以推动航空科技创新、普及航空科技知识、营造航空文化氛围、提高国民航空意识为宗旨 ,并融合技术的实用性、先进性和集成性为一体 ,力争将本届展会打造成面向社会、面向国际展示无人机及航模领域的创新能力和创新产品的综合性盛会。

届时 ,主办方将邀请军民两地无人机科研、生产、使用部门的领导和专家参观指导 ,还将联合电视、网络、平面等媒体进行全方位报道 ,竭力搭建起无人机与航空模型的交流合作的国际平台。