

DOI: 10.3901/JME.2013.20.170

# K418B 和 FGH91 双合金热等静压扩散连接的动力学模拟研究\*

廖宗博<sup>1,2</sup> 国为民<sup>1</sup> 赵明汉<sup>1</sup> 董建新<sup>2</sup> 张麦仓<sup>2</sup> 曾强<sup>1</sup>  
张龙飞<sup>1</sup> 燕平<sup>1</sup>

(1. 钢铁研究总院高温材料研究所 北京 100081;  
2. 北京科技大学材料科学与工程学院 北京 100083)

**摘要:**采用 DICTRA 动力学软件和 Thermo-Calc 热力学软件对 K418B 铸造高温合金和 FGH91 镍基粉末高温合金进行热等静压扩散连接动力学模拟研究。主要进行两种不同的高温合金在热等静压扩散连接反应层中的元素互扩散规律模拟计算。利用热力学软件模拟确定两种合金在不同温度下的相分布情况,为成分的确定和温度的选取提供参考。在热力学相分析的基础上,利用动力学软件计算不同温度、不同时间扩散连接界面的元素分布情况,得到界面元素互扩散区宽度随时间和温度变化的增长规律,综合考虑过高温度和保温过长时间增加的设备负担,提出热等静压(Hot iso-static pressing, HIP)扩散连接的优化工艺范围,即连接温度为 1 120~1 150 °C、扩散时间为 3~5 h 是较合适的扩散连接工艺范围。

**关键词:** K418B FGH91 热等静压扩散连接 动力学模拟

**中图分类号:** TG132

## Dynamic Simulations of Hot Iso-static Pressing Diffusion Bonding between K418B and FGH91

LIAO Zongbo<sup>1,2</sup> GUO Weimin<sup>1</sup> ZHAO Minghan<sup>1</sup> DONG Jianxin<sup>2</sup> ZHANG Maicang<sup>2</sup>  
ZENG Qiang<sup>1</sup> ZHANG Longfei<sup>1</sup> YAN Ping<sup>1</sup>

(1. High Temperature Material Research Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;  
2. School of Material Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**Abstract:** Element mutual diffusions between K418B and FGH91 during hot iso-static pressing(HIP) diffusion bonding are simulated by DICTRA and Thermo-Calc software. The inter-diffusion behaviors of the elements of two alloys after HIP are calculated. The distribution of phases formed under different temperatures in the alloys is thermodynamically simulated, which provide a sound theoretical evidence for the determination of composition and the selection of temperature. The joining processing of the two alloys with various temperatures and time is determined by dynamic simulation. By analyzing the changing of elements inter-diffusion distance with the changing of temperatures and time, and taking the huge cost of high temperature and long time into consideration, the proper diffusion time for HIP diffusion bonding is 3 to 5 hours and the proper diffusion temperature is 1 120-1 150 °C.

**Key words:** K418B FGH91 Hot iso-static pressing(HIP) Dynamic simulation

## 0 前言

航空发动机所用的低压和高压整体涡轮一般采用普通精密铸造工艺生产,从 20 世纪 80 年代起 K418 合金就被应用于低压涡轮叶片和整体涡轮转

子等零件中<sup>[1]</sup>。细晶铸造的 K418B 合金具有较高的持久性能和较好的低周疲劳性能,受到了业内人士的广泛关注。粉末冶金的高温合金是继非真空熔炼、真空熔炼高温合金后的第三代高温合金,它具有组织均匀、无宏观偏析、屈服强度高和疲劳性能好等一系列优点。作为第一代粉末高温合金的 FGH91,其组织和性能的研究也一直是学者们的研究热点。而将两种合金进行连接,制造出具有更高使用性能

\* 国家自然科学基金资助项目(50974044)。20130415 收到初稿,20130716 收到初稿

的涡轮转子,也是目前世界上先进发动机涡轮转子研究的尖端课题<sup>[2]</sup>。

热等静压(Hot iso-static pressing, HIP)扩散连接是连接高温合金有效且很有前途的工艺方法。它避免了榫齿连接工艺复杂和连接后部件易于产生应力集中的缺点,而且作为成熟的工艺,在国外已经运用于工业生产中。然而,仅仅依靠试验来寻找合适的工艺参数,研究元素扩散规律,不但耗费大量资金、精力和时间,效果也不明显。尤其是对于新出现的合金,研究更难以进行。

近年来,随着计算机技术的进步,计算材料科学有了很大发展,在设计材料和优化工艺参数方面逐渐显示其独特的优势。其中,热力学 Thermo-Calc 和动力学计算软件 DICTRA 能够对扩散连接过渡区元素互扩散规律进行较为准确的模拟计算,可用其计算和分析扩散连接后相成分、元素的扩散规律,并根据计算数据确定出优化的工艺参数(扩散温度和扩散时间),为热等静压扩散连接的工艺提供一定的理论依据。

本文采用涡轮盘制造合金 K418B 和 FGH91 作为研究对象,通过扩散连接的动力学模拟计算,分析这两种不同的高温合金在热等静压扩散连接中的元素互扩散规律,为双合金 HIP 扩散连接工艺研究提供了理论依据。

## 1 试验与模拟方法

热等静压扩散连接是在低于连接金属的熔点温度下对连接材料施加一定的压力,以使连接界面产生塑性变形,当连接表面达到原子间结合力起作用的距离时在结合面两侧将会出现原子的互扩散,固态的金属材料便会冶金结合为一个整体<sup>[3-4]</sup>。由于高温合金的合金系十分复杂,给连接带来了极大的困难。而热等静压扩散连接对于通常难于焊接的金属以及不同种类的材料之间进行固态结合具有很大的适用价值,所以扩散连接是已公认的连接高温合金有效而又最有前途的工艺方法。近年来关于热等静压扩散连接的数值模拟也在不断地发展中<sup>[5]</sup>。

DICTRA 是一个模拟多元系统中扩散控制转变的软件包,该程序是基于材料不同区域内多元扩散方程的数值解,求得不同温度、时间、压力下的元素浓度分布<sup>[6]</sup>。DICTRA 软件建立在多组元扩散方程数值求解的基础上,其与 Thermo-Calc 软件配合使用,Thermo-Calc 用来处理必要的热力学计算。扩散模拟是基于储存于数据库内的已经评估的热/动力学数据。利用必要的热/动力学数据,DICTRA

可同时模拟包含 10 种元素以上合金的扩散过程,可以建立出多相模拟的模型<sup>[7]</sup>。

笔者所在的研究组已对 DD402 和 FGH95 热等静压扩散连接过程中的元素互扩散规律进行了计算分析,并与试验结果进行了对比<sup>[8]</sup>,图 1 为两合金经 1 120 °C、103 MPa、3 h 热等静压后反应区 Al 元素的成分分布图,可以看出试验结果和模拟结果是基本符合的。因此使用 DICTRA 对热等静压扩散连接进行模拟的结果是比较可靠的,可以为实际工艺提供较好的理论依据。因此本文采用此种模拟计算方法来探究不同工艺对 K418B 和 FGH91 合金元素互扩散规律的影响。

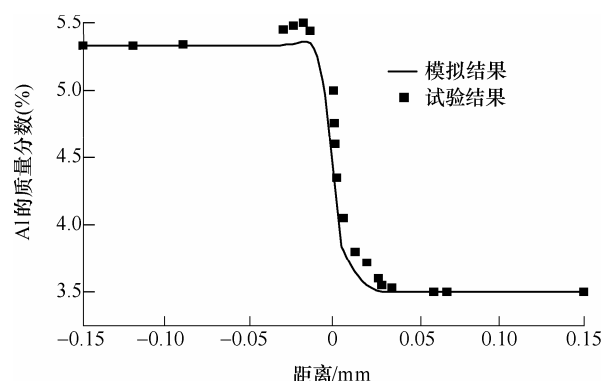


图 1 HIP 扩散连接反应层 Al 元素互扩散成分分布图

使用的模拟对象为 K418B 铸造高温合金和 FGH91 粉末高温合金,两种合金的典型成分列于表 1、2。

表 1 K418B 合金成分 %

元素	Al	Cr	Mo	Ti	C	B	Zr	Ni
质量分数	5.83	12.40	4.35	0.76	0.045	0.01	0.06	余量

表 2 FGH91 合金成分 %

元素	Al	Co	Cr	Mo	Ti	C	B	Ni
质量分数	4.0	17.0	15.0	5.0	3.5	0.04	0.02	余量

## 2 模拟结果

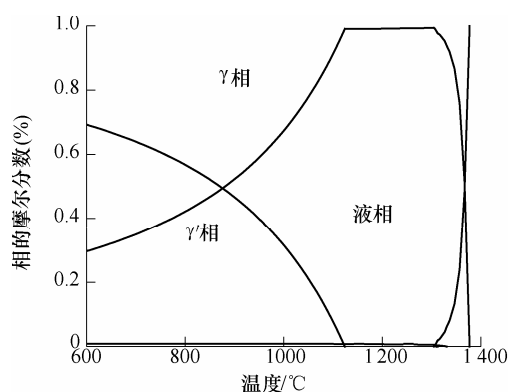
### 2.1 热力学模拟

根据表 1 和表 2 的合金成分,用 Thermo-Calc 计算出合金的平衡相图,其中图 2b 和图 3b 是将原图纵坐标放大而得到的。

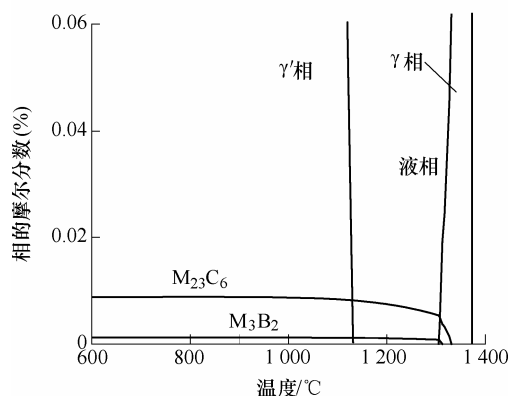
由平衡相图可知两种合金在不同温度下的相分布情况,从而为模拟过程中成分的确定和温度的选取提供较为可靠的参考。

### 2.2 动力学计算

由平衡相图可以看出,  $M_{23}C_6$ 、 $M_3B_2$ 、 $\mu$ 、 $\sigma$  等相摩尔分数很小,且大多数在扩散连接的温度范围即已回溶,故计算时将其忽略。

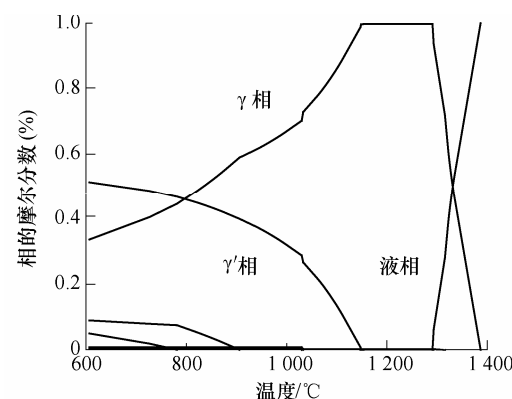


(a) K418B合金的平衡相图

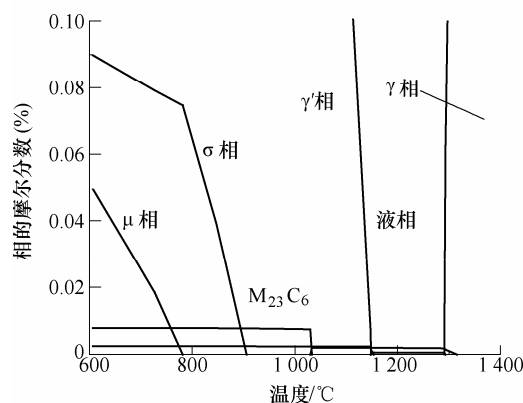


(b) K418B合金的平衡相图放大图

图2 K418B合金的平衡成分计算



(a) FGH91合金的平衡相图



(b) FGH91合金的平衡相图放大图

图3 FGH91合金的平衡成分计算

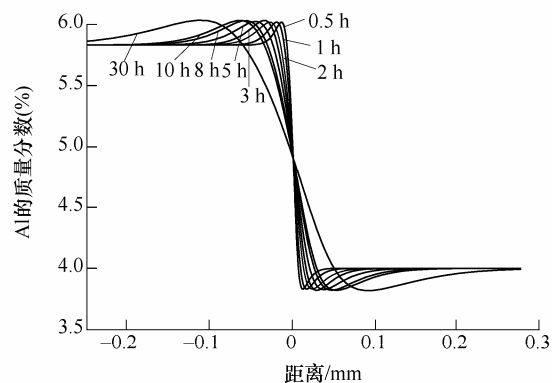
时间、温度和压力是影响热等静压扩散连接的主要工艺参数。其中,压力的作用是在一定的温度下,使连接表面产生微小的宏观变形并紧密接触,连接部件通过一定时间的扩散而实现结合。在模拟计算的过程中,扩散偶是在理想情况下紧密连接的。因此,本文只讨论时间和温度对扩散的影响。

### 2.2.1 不同时间下的动力学计算

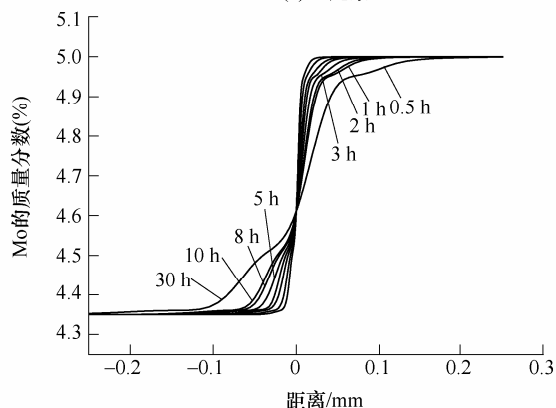
参考相关资料后<sup>[9-10]</sup>,将压力暂定为103 MPa,选取4个温度(1120℃、1160℃、1180℃、1200℃)进行计算,时间取为0.5 h、1 h、2 h、3 h、5 h、8 h、10 h、30 h。

计算结果如下所示。图4是1120℃下各元素的扩散情况。横坐标零点左侧为K418B,右侧为FGH91。可以看出,Al元素发生了明显的扩散,形成了宽度100 μm以上的扩散区,而Ti、Co、Mo元素的扩散区宽度相对较窄。

同时也可以看出各元素的互扩散区宽度都随时间的变化而增加。其他温度下的扩散规律随时间的变化情况与1120℃下的基本相同,故只选取1120℃的数据进行分析。观察1120℃时扩散区宽度随时间的变化情况,图5给出的是各元素扩散区宽度(单侧)随时间的变化。



(a) Al元素



(b) Mo元素

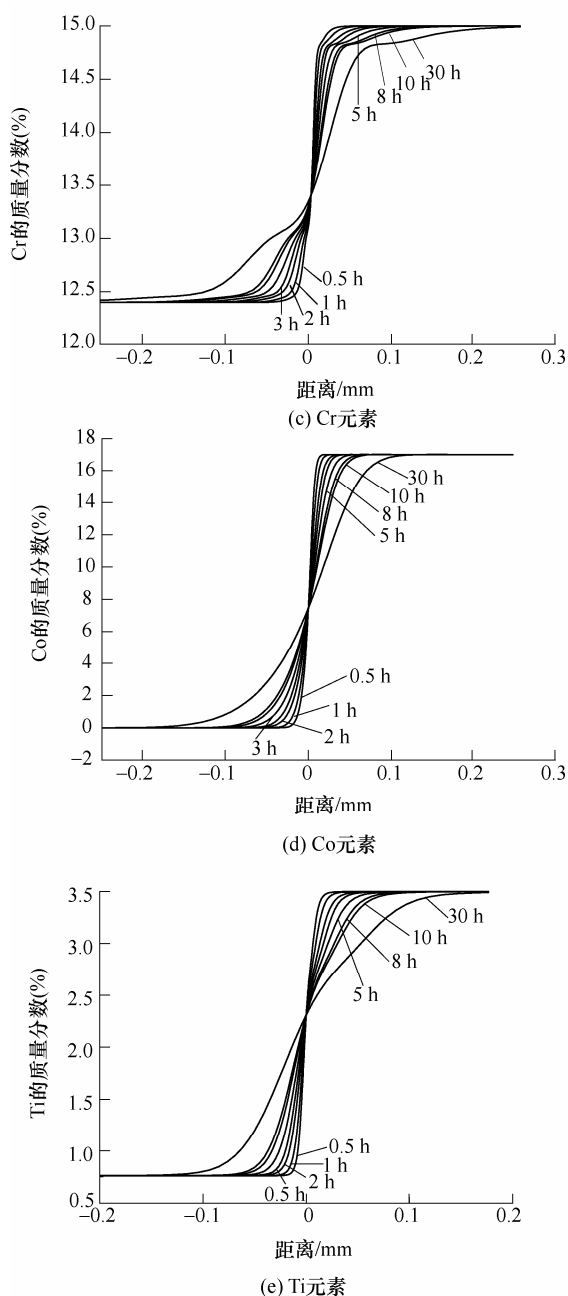


图 4 1120 °C 下不同扩散时间后的元素质量分数分布曲线

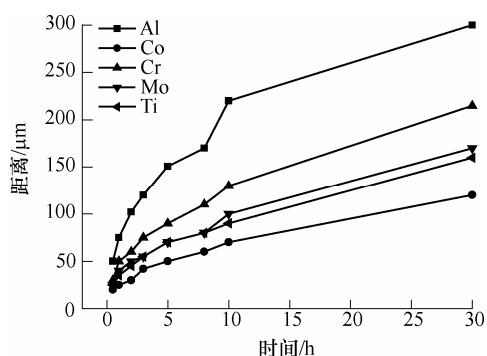


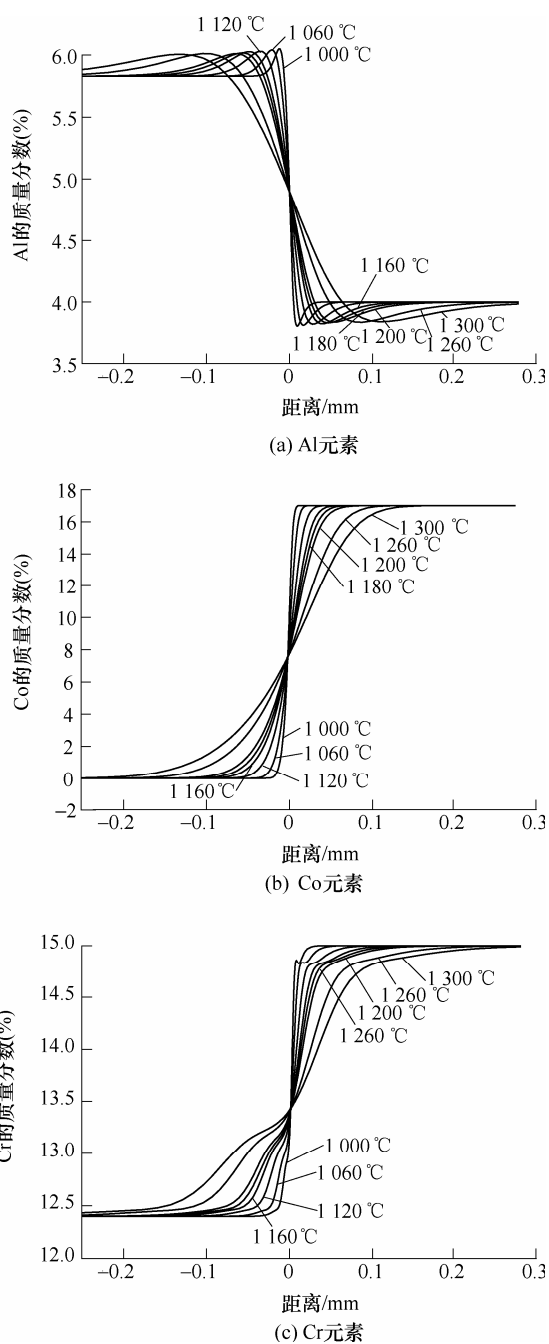
图 5 1120 °C 下各元素互扩散区宽度(单侧)随时间变化曲线

从图 5 可以看出在 3~5 h 的区间内有较快的增

长速率。随着时间的延长,即时间大于 10 h 后增长率开始下降并保持比较稳定的速度。大多数元素的曲线在大约 5 h 以后便出现转折点。同时考虑到随着时间的延长会增加设备的负担,且从热力学的角度应避免有害相的析出,故扩散时间大概在 3~5 h 内为宜。

### 2.2.2 不同温度下的动力学计算

选取与上例相同的模型和主要条件计算,压力选为 103 MPa,将时间暂定为 3 h,选取 8 个不同的温度 1000 °C、1060 °C、1120 °C、1160 °C、1180 °C、1200 °C、1260 °C、1300 °C。计算结果如图 6 所示。



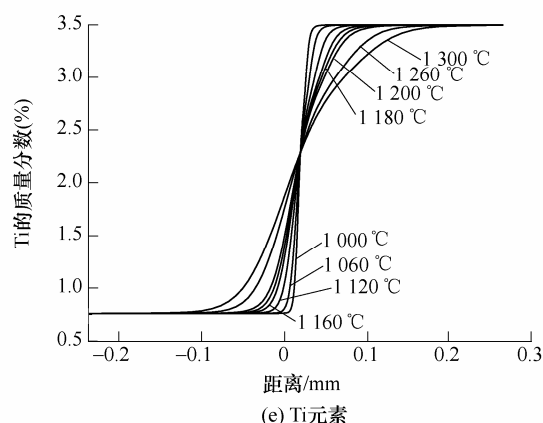
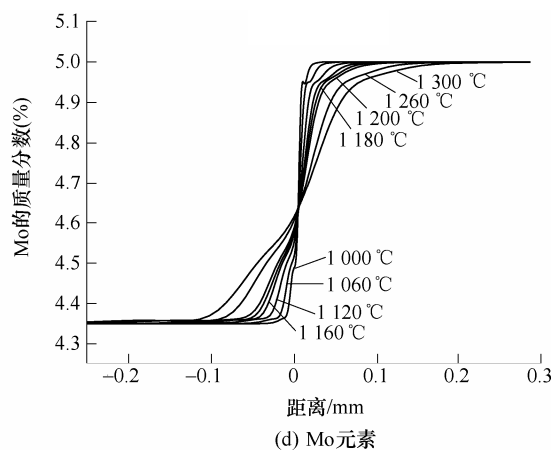


图6 不同扩散温度下扩散3 h后的元素质量分数分布曲线

从图6可以看出各元素都形成了一个明显的互扩散区,其中Al元素的互扩散区宽度要大于其他元素。Mo、Ti等元素扩散区宽度较小,随温度变化的程度也较小。因此这几个元素在扩散连接中的扩散速度较为缓慢,在实际工艺中可重点关注这几个扩散较慢的元素。

从图6也可以看出,各元素的扩散区宽度都随扩散温度的增加而增加,只是由于各自迁移率的差别而增加得或多或少。观察互扩散区宽度随温度变化的规律。如图7所示,可以看出图7中曲线可大致分为具有不同增长速度的几段,它们都在1 120~1 150 °C出现第一个转折点。但与时间对互扩散区宽度的影响不同,在温度更高的阶段,互扩散区宽度的增长速度变得更大。但考虑到温度升高可能带来的不利后果,例如增加设备负担、强化相回溶等,可将温度定为1 120~1 150 °C为宜。

采用DICTRA动力学软件和Thermo-Calc热力学软件对K418B铸造高温合金和FGH91粉末高温合金进行HIP扩散连接的动力学模拟计算研究能够在理论计算基础上确定理想的扩散连接工艺,而如果提出优化的HIP扩散连接工艺,还需要结合实际合金的组织 and 性能进行修正研究。

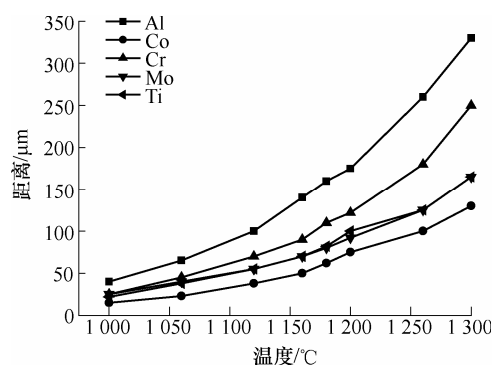


图7 3 h时各元素互扩散区宽度(单侧)随温度变化曲线

### 3 结论

(1) 使用热力学软件 Thermo-Calc 和动力学软件 DICTRA 可对 K418B 合金和 FGH91 合金的热等静压扩散连接过程进行热力学和动力学模拟计算研究。

(2) 模拟计算了在不同时间和不同温度下多元素互扩散的情况。从元素互扩散随时间和温度变化规律综合考虑得出, K418B 合金和 FGH91 合金的热等静压扩散连接温度为 1 120~1 150 °C、扩散时间 3~5 h 是较为合适的扩散连接工艺。

### 参 考 文 献

- [1] 陈荣章, 王罗宝, 李建华. 铸造高温合金发展的回顾与展望[J]. 航空材料学报, 2000, 20(3): 55-59.  
CHEN Rongzhang, WANG Luobao, LI Jianhua. Review and prospect on developments of cast superalloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(3): 55-59.
- [2] 国为民, 冯涤, 吴剑涛, 等. 镍基粉末高温合金冶金工艺的研究和发展[J]. 材料工程, 2002(3): 44-48.  
GUO Weimin, FENG Di, WU Jiantao, et al. Research and development of P/M superalloy metallurgic techniques[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(3): 44-48.
- [3] 毛健, 江武祥, 呼和, 等. 双合金热等静压工艺的研究[J]. 航空材料学报, 1996, 116(4): 7-12.  
MAO Jian, JIANG Wuxiang, HU He, et al. A study of dual-alloy hip diffusion bonding technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1996, 116(4): 7-12.
- [4] DAYANANDA M A. Average effective inter diffusion coefficients and the matano plane composition[J]. Metall. Trans. A, 1996, 27(9): 2504-2509.
- [5] ASHWORTH M A, JACOBS M H, DAVIES S. Basic mechanisms and interface reactions in HIP diffusion bonding[J]. Materials and Design, 2000, 21: 351-358.
- [6] 焦少阳, 董建新, 张麦仓, 等. 耐蚀合金/碳钢热等静

- 压扩散焊接反应层元素互扩散规律研究[J]. 材料工程, 2009(12): 10-16.
- JIAO Shaoyang, DONG Jianxin, ZHANG Maicang, et al. Investigation on elements inter-diffusion in reaction layer during hip between corrosion-resistant alloy and carbon steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(12): 10-16.
- [7] HENRIK L, LARS H. Multiphase diffusion simulations in 1D using the DICTRA homogenization model[J]. Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, 2009, 33: 495-501.
- [8] 董建新, 何东, 张麦仓, 等. 热等静压扩散连接反应层元素互扩散的动力学模拟计算[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(1): 36-39.
- DONG Jianxin, HE Dong, ZHANG Maicang, et al. Dynamic simulations of element mutual diffusion during hot isostatic pressing diffusion bonding[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(1): 36-39.
- [9] 何东. 异种高温合金扩散连接过渡区元素互扩散的动力学模拟[D]. 北京: 北京科技大学, 2002.
- HE Dong. Dynamic simulations of element mutual diffusion during diffusion bonding between DD402 and FGH95 superalloys[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2002.
- [10] 于保正, 汤鑫, 刘发信. 细晶铸造 K418B 合金热等静压工艺研究[J]. 机械工程材料, 2003, 27(3): 24-26.
- YU Baozheng, TANG Xin, LIU Faxin. HIP Technology for fine-grain casted K418B superalloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(3): 24-26.
- 
- 作者简介: 廖宗博, 女, 1988 年出生。主要从事高温合金材料研究。  
E-mail: 279558269@qq.com  
国为民(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授。主要从事高温合金材料和工艺研究。  
E-mail: fmgouwm@sina.com