

镍基高温合金 TLP 扩散焊中间层材料研究进展

广州有色金属研究院 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院)(510650)

万 娣 房卫萍

陈和兴 刘凤美

科瓦斯基·维克多

摘要 针对镍基高温合金瞬时液相扩散焊,阐述了中间层材料的选择原则,并分类阐述了直接使用标准镍钎料和以母材成分为基的中间层材料研究现状。指出标准镍钎料的中间层材料受成分和焊接温度的限制,接头质量无法满足热端结构件的使用要求,而以母材成分为基的非晶箔状中间层材料可以得到同母材成分和组织均匀一致的接头,将在镍基高温合金瞬时液相扩散焊中得到更为广泛的应用。

关键词: 镍基高温合金 TLP 扩散焊 中间层材料

中图分类号: TG457.1

0 序 言

镍基高温合金以其优异的综合性能在整个高温合金领域内占有着特殊重要的地位,据统计作为航空发动机的关键材料,镍基高温合金的用量已超过先进发动机重量的 40%^[1-3]。但是镍基高温合金在熔焊过程中因导热性差、熔池温度高极易引起接头处裂纹萌生和强度降低等问题。因此,国内外普遍采用瞬时液相扩散焊(Transient liquid phase diffusion bonding,简称 TLP 扩散焊)对此类高温合金进行连接^[4-10]。

作为一种新型的非熔化焊技术,国内外针对镍基高温合金 TLP 扩散焊的研究主要是焊接工艺参数如焊接温度、保温时间、施加压力等对接头组织和性能的影响。近几年,研究学者们对 TLP 扩散焊中间层材料的研究也越来越多。中间层材料的成分、使用时的形式对接头的组织和形貌有重要影响。因此,文中将对国内外有关镍基高温合金 TLP 扩散焊用中间层的研究现状和进展进行归纳总结,为镍基高温合金的 TLP 连接提供重要的参考。

1 中间层材料成分设计原则

所谓中间层材料,即在不损害母材性能的工艺条件下熔化,把两种待焊材料连接起来的一种特殊材

料^[11]。镍基高温合金 TLP 扩散焊中间层材料成分的设计应遵循以下几个原则:①为最终得到与母材成分和组织上均质化的接头,中间层的成分应基本与母材相匹配;②为避免过高的连接温度对母材性能造成不利影响,中间层中应含有某些降低其熔点的元素(Melting point depressant elements,简称 MPD 元素),且加入的 MPD 元素应比较稳定,易于在母材中扩散,含量适中以兼顾熔点的降低与均匀化的难易^[12];③中间层材料应不与母材发生不良反应,如在接头形成有害第二相而降低接头力学性能;④为了满足某些特殊性能要求(如抗低温脆断性能、抗氧化性能、抗热腐蚀性能等),可添加一些特殊合金元素,如 Zr, Cr, Co 等。

2 TLP 扩散焊用中间层材料的研究进展

2.1 标准钎料的中间层材料

对于大部分镍基高温合金,目前国内外所用的中间层都是选用成分相对合适的镍基高温钎料或在此基础上发展而来的钎料。已标准化的镍钎料以镍为基体,并添加了能提高其热强度和降低熔点的元素,具有良好的高温性能,是高温合金最常用的钎料,同时也是镍基高温合金 TLP 连接中直接使用标准钎料作为中间层材料时的首选。

BNi-2^[13-16]和 MBF 系非晶钎料^[17-19]是近年来国内外 TLP 连接试验中出现得最为频繁的标准钎料,其性能及应用见表 1。BNi-2 钎料的熔化温度(971~999℃)较一般的镍铬硼硅钎料都低^[20],可实现较低温度下的连接以减弱钎料与母材的作用。非晶箔状的 MBF 系钎料成分均匀,在连接规范下能够实现均一地

收稿日期:2016-03-04

基金项目:国家国际科技合作专项项目(2015DFR50310);广东省重点实验室建设项目(2012A061400011);广东省主体科研机构创新能力建设专项。

熔化和铺展,且便于装配及焊缝间隙的控制,被广泛应用于连接各种镍基高温合金。M. A. Arafin 等人^[13]采用 BNi-2 作为中间层金属对 Inconel 625 合金和 Inconel 718 合金进行了 TLP 连接试验,并对不同连接工艺条件下所需的等温凝固时间进行了建模计算。试验发现连接

所需的等温凝固时间与用其它镍基钎料连接镍基高温合金所需的时间相比有明显减少。M. Pouranvari 等人^[17]采用 MBF-30 作为中间层对沉淀强化型镍基高温合金 GTD-111 进行了 TLP 连接试验时,在 1 180 °C 保温 30 min 得到扩散区几乎无沉淀相的接头。

表 1 镍基高温合金 TLP 扩散焊常用标准钎料

中间层	固相线温度 $T_s/^\circ\text{C}$	液相线温度 $T_L/^\circ\text{C}$	母材
BNi-1a	977	1 077	Inconel 738
BNi-2	971	999	Inconel 718, Inconel 738, Inconel 625, GH3039, GH99
BNi-3	975	1 040	Inconel 718, Inconel 617
MBF-30	980	1 040	GTD-111
MBF-50	1 065	1 150	GTD-111
MBF-80	1 050	1 090	Inconel 939, Inconel 738, Nimonic 75, CMSX-2

镍钎料商业化标准生产所带来的便利使其在国内外镍基高温合金的 TLP 连接研究中受到很大程度的青睐。但是由于钎料同母材合金成分上存在着明显差异,通常需要保温很长时间才能得到成分和组织同母材均匀一致的接头。Lin 等人^[14]以 BNi-2 为中间层对 GH99 合金进行了 TLP 连接,并在 1 170 °C 下等温 24 h 获得与母材化学成分及组织基本相当的接头,但是长时间的保温过程却导致母材强度显著下降。而在保温 2 h 的规范下,接头的常温抗剪强度可达到 430 MPa。可见,随着高温合金不断发展,现有的标准钎料无法满足每一种高温合金的焊接要求。于是针对某一成分已定的标准钎料,往往只能通过调节焊接温度和保温时间以试图达到某一最佳的工艺规范,而难以实现母材与接头之间的均质化。

随着镍基高温合金应用温度的不断提升,特别是在航空发动机制造领域,各国研制的新型航空发动机涡轮前温度逐年升高(图1),例如欧美最新研制的航

空发动机涡轮前温度已超过 1 900 °C,而标准镍钎料中可供选择的型号有限,中间层材料又受到成分选择和焊接温度的限制,以至标准钎料 TLP 连接所得接头的性能已无法满足当前的工业发展对热端结构材料越来越高的要求。于是,越来越多的学者们开始倾向于使用母材成分为基的中间层材料。

2.2 以母材成分为基的中间层材料

母材成分为基的中间层材料,以被连接母材的成分作为基础成分,除去母材中可能形成稳定有害相的某些元素如 Ti 等,再加入 MPD 元素配制而成。

B 是目前为止被认为降熔作用最为明显的元素,只需少量的 B 即可将镍基合金的熔化温度降低至满意的程度,且 B 原子半径小,扩散速度高,更容易实现中间层材料与母材的迅速均质化。叶雷等人^[21]采用特别配置的 YL 合金在 1 270 °C 不同保温时间下对定向凝固高温合金 IC10 进行 TLP 扩散焊连接,其所用中间层是在母材合金成分基础上去除元素 Hf 和 C,再加入一定量的 B 作为降熔元素。研究发现,随着保温时间的增加和 B 元素的扩散,焊缝中硼化物逐渐减少,接头宽度逐渐变窄;保温 24 h 后,焊缝与母材之间的界面基本消失,组织基本与母材一致。

为提高接头持久性能,叶雷等人^[21]还研制了含 Zr 的中间层,并在 1 270 °C 和 1 240 °C 分别保温不同时间对 IC10 合金进行 TLP 连接试验。结果表明,虽然元素 Zr 的添加有利于焊缝中相的形成,但因为 Zr 原子半径大,保温过程中其在母材中的扩散速度相对缓慢,且随着保温时间延长,低熔点相 Ni_5Zr 的数量逐渐增多,诱发熔化周围的共晶,造成母材合金过多溶解。

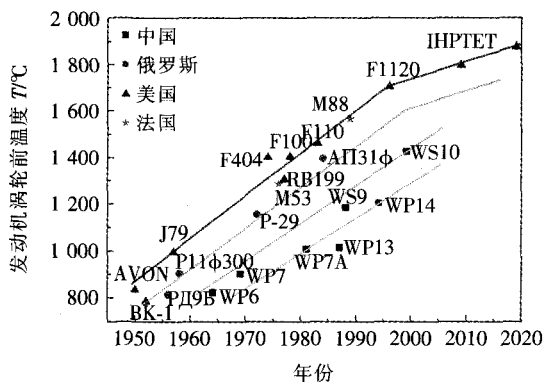


图 1 世界航空发动机涡轮前温度发展趋势

传统观念认为,中间层合金在成分选择时应将母材中的 Al,Ti 等形成弥散强化相的元素排除在外,以免在接头中形成有害的化合物相。而侯金保等人^[22-23]在使用自行研制的镍基中间层合金 TLP 扩散焊 IC10 合金时打破了这一观念。其试验结果表明,均匀化扩散相同时间后,含 Al 的 KNi-3 中间层接头中因 Al 含量高,相的体积分数大,双相网状组织的尺寸与基体更加接近;且在 $(1\,240 \pm 10)^\circ\text{C}$ 保温 10 h 炉冷的工艺规范下,接头 980 $^\circ\text{C}$ 持久强度达到基体的 83% 以上。

除了 B,Zr 元素之外,常见的中间层添加元素主要还有 W,Mo,Cr,Co 等。W 与 Mo 的作用类似,都可以强化焊缝,提高中间层的抗氧化性以及润湿性,但 W 和 Mo 的原子半径较大,不利于在母材中迅速扩散。Cr 和 Co 起固溶强化作用,能够显著提高接头的抗热腐蚀性能,是镍基中间层的基础添加元素,但是含量都不宜太高,Jing 等人^[24]采用含 Cr 量高至 22% 的钴基中间层对 DZ468 合金进行了 TLP 连接试验,虽实现了连接,但在焊缝中形成了大量脆性相,接头性能受到严重影响。

可见,以母材成分为基的中间层材料在一定程度上降低了焊缝和母材之间各元素的浓度梯度,焊接过程中较容易实现母材与接头之间的均质化,是目前较为理想的 TLP 焊接材料,但是,合理的选定 MPD 元素并确定其合适的含量是首要前提。

3 TLP 焊接用中间层材料的发展趋势

国内外瞬时液相扩散焊试验研究中中间层合金最常用的使用形式为粉末和箔带。试验证明,粉末状的中间层合金的确可以使 TLP 连接接头在一定程度上满足性能要求,但是粉末状中间层合金在使用过程中必需借助粘结剂,且难以实现焊缝间隙的精确控制。相比之下,非晶箔状的中间层能够溶解更多的溶质(MPD 元素),成分均匀,母材溶解层窄,无需粘结剂,易于装配,已开始得到越来越多的应用。目前常用的箔状中间层规格见表 2^[25]。

Li 等人^[26]以母材成分为基配制中间层合金对 DZ22 合金和 DD3 合金的 TLP 连接工艺进行研究时发现,以 Z2P(粉末状,100 μm 厚)和 Z2F(非晶箔状,40 μm 厚)中间层合金 TLP 扩散焊 DZ22 合金的接头比 Microbraz300 钎料钎焊接头具有更好的持久性能,且非晶箔状中间层 Z2F 优于粉末状中间层合金 Z2P,Z2F 焊接接头 980 $^\circ\text{C}$ 的持久强度达到母材的 90%。在进行

TLP 连接 DD3 合金时也得到了类似的结果,D1P 粉末状中间层合金 TLP 扩散焊所得到的接头中存在明显的组织不均匀现象,需经过高温长时间保温才得以消除,而采用非晶箔状中间层 D1F 连接 DD3 合金,更易得到与母材组织趋于一致的接头,且经过 1 250 $^\circ\text{C}$ 保温 24 h TLP 焊接后接头的持久性能已达母材持久性能 90% 以上。甚至在采用较短保温时间的扩散规范时,D1F 扩散焊接头高温持久性能也明显优于 D1P 扩散焊接头^[27-28]。

可见,以母材成分为基的非晶箔状中间层合金定会在日后的 TLP 焊接中得到更为广泛的应用。

表 2 TLP 扩散焊用箔状中间层常用厚度

厚度范围/ μm	常用厚度/ μm	使用频率 $f(\%)$
<1	—	5
1~5	1,2	10
10~30	20,25	35
40~60	40,50	24
70~150	75,100	18
200~500	200,500	6
>500	—	2

4 结束语

随着应用温度和强度的提高,镍基高温合金的合金化程度不断升高。对于传统的镍基高温合金,其瞬时液相扩散焊所用中间层材料多为标准的镍基钎料;而对于一些新型镍基高温合金,以母材成分为基体自主研制的中间层材料得到越来越多的应用,其中非晶箔状形式的中间层材料更是当下的大势所趋。

目前,有关高温合金瞬时液相扩散焊用中间层材料的研究正处于开发研究阶段,中间层合金尚无较系统、全面的数据,其种类、使用性能及使用形式等均不够完善,有关中间层合金成分的设计、优化及其制备工艺仍然是当前重要的研究领域。

参 考 文 献

- [1] 刘巧沐,黄顺洲,刘 佳,等. 高温材料研究进展及其在航空发动机上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究,2014,27(4):51-56.
- [2] 王会阳,安云岐,李承宇,等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报,2011,25(12):482-486.

- [3] 李亚江,夏春智. 国内镍基高温合金的焊接研究现状[J]. 现代焊接, 2010,91(7):1-4.
- [4] 王刚,张秉刚,冯吉才,等. 镍基高温合金叶片焊接修复技术的研究进展[J]. 焊接,2008(1):20-23.
- [5] Ghoneim A, Ojo O A. On the influence of boron-addition on TLP bonding time in a Ni₃Al-based intermetallic[J]. Intermetallics, 2010,18(4):582-586.
- [6] Xing B, Chang B H, Yang S, et al. A study on the cracking behaviour in laser metal deposition of IC10 directionally solidified nickel-based superalloy[J]. Materials Research Innovations, 2015,19(10):281-285.
- [7] 范玮,毛唯,吴欣,等. GH4169与DD6单晶合金TLP扩散焊接头组织及力学性能研究[J]. 焊接,2013(8):37-40.
- [8] 毛唯,李晓红,周媛,等. DD3单晶合金TLP扩散焊接头的高温拉伸性能和持久性能[J]. 焊接,2008(3):28-31.
- [9] 李菊,侯金宝,张胜,等. IC10合金TLP扩散焊接头拉伸性能研究[J]. 焊接,2015(6):22-26.
- [10] 方洪渊,冯吉才. 材料连接中的界面行为[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
- [11] 姚凯,范振红,李玉国. 瞬时液相扩散焊的发展及应用前景[J]. 石油工程建设,2007,33(2):1-4.
- [12] Zhou Y, Gale W F, North T H. Modeling of transient liquid phase bonding[J]. International Materials Review, 1995,40(5):181-196.
- [13] Arafin M A, Medraj M, Turner D P, et al. Transient liquid phase bonding of Inconel 718 and Inconel 625 with BNi-2: Modeling and experimental investigations[J]. Materials Science and Engineering A, 2007,447:125-133.
- [14] Lin Tiesong, Li Haixin, He Peng, et al. Effect of bonding parameters on microstructures and properties during TLP bonding of Ni-based superalloy[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2012,22(9):2112-2117.
- [15] Zhang L X, Sun Z, Xue Q, et al. Transient liquid phase bonding of IC10 single crystal with GH3039 superalloy using BNi2 interlayer: Microstructure and mechanical properties[J]. Materials and Design, 2015,90:949-957.
- [16] Pouranvari M, Ekrami A, Kokabi A H. Transient liquid phase bonding of wrought IN718 nickel based superalloy using standard heat treatment cycles: Microstructure and mechanical properties[J]. Materials and Design, 2013,50:694-701.
- [17] Pouranvari M, Ekrami A, Kokabi A H. Effect of bonding temperature on microstructure development during TLP bonding of a nickel base superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009,469:270-275.
- [18] Khakian M, Nategh S, Mirdamadi S. Effect of bonding time on the microstructure and isothermal solidification completion during transient liquid phase bonding of dissimilar nickel-based superalloys IN738LC and Nimonic 75[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015,653:386-394.
- [19] Pouranvari M, Ekrami A, Kokabi A H. Microstructure-properties relationship of TLP-bonded GTD-111 nickel-base superalloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2008,490(8):229-234.
- [20] 张启运,庄鸿寿. 钎焊手册(第二版)[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [21] 叶雷,李晓红,毛唯,等. 不同中间层合金对IC10合金的连接[J]. 航空材料学报,2006,26(3):319-320.
- [22] 侯金宝,张蕾,魏友辉. IC10合金TLP扩散焊接头组织与强度分析[J]. 焊接学报,2008,29(3):89-92.
- [23] 侯金宝,吴松,滕俊飞,等. IC10合金TLP扩散焊技术[J]. 航空制造技术,2011,23(24):98-100.
- [24] Jing Yanhong, Zheng Zhi, Liu Enze, et al. Microstructural evolution of a Ni-base alloy DZ468 joint bonded with a new Co-base filler[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014,30(5):480-486.
- [25] Grant O C, Sorensen Carl D. Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding[J]. Journal of Materials Science, 2011,46(6):5305-5323.
- [26] Li Xiaohong, Mao Wei, Cheng Yaoyong, et al. Microstructures and properties of transient liquid phase diffusion bonded joints of DZ22 superalloy[J]. Welding in the World, 2005,49(1/2):34-38.
- [27] 李晓红,谢永慧,钟群鹏,等. DD3单晶合金短时液相扩散焊连接接头组织与性能[J]. 材料工程,2005(5):3-6.
- [28] 李晓红,钟群鹏,曹春晓,等. 不同取向DD3单晶合金扩散连接接头组织及性能[J]. 材料工程,2011(12):1-5.

作者简介: 万娣,1992年出生,硕士研究生。主要从事瞬时液相扩散焊中间层材料的研制和焊接工艺研究工作。