

# 瞬时液相扩散连接在镍及镍基合金焊接中的应用

王非森<sup>1</sup>, 陈思杰<sup>2</sup>, 高增<sup>2</sup>, 文申柳<sup>1</sup>, 陈玲<sup>1</sup>

(1.四川化工职业技术学院 机电系, 四川 泸州 646000; 2.河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**针对镍及镍基合金在焊接过程中易出现热裂纹和气孔等问题,介绍了其瞬时液相扩散连接。叙述了瞬时液相扩散连接的理论、温度、压力和中间层等重要参数,分析了瞬时液相扩散连接镍及镍基合金在的优越性。描述了瞬时液相连接技术在镍及镍基合金焊接中的应用情况,并展望了瞬时液相连接技术的应用前景。

**关键词:**镍及镍基合金;瞬时液相扩散连接(TLP);优越性

**中图分类号:**TG457.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2303(2009)09-0038-05

## Applications of transient liquid-phase bonding in nickel and nickel-base alloy welding

WANG Fei-sen<sup>1</sup>, CHEN Si-jie<sup>2</sup>, GAO Zeng<sup>2</sup>, WEN Shen-liu<sup>1</sup>, CHEN Ling<sup>1</sup>

(1.Department of Mechanical Engineering, Sichuan College of Chemical Technology, Luzhou 646005, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Aiming at the gas cavity and crack are appeared regularly in nickel and nickel-base alloy welding process, this paper introduces the transient liquid-phase bonding technology of nickel and nickel-base alloy. The paper details major theory and parameter, and analyzed the superiority of nickel and nickel-base alloy on transient liquid-phase bonding, then introduced the transient liquid-phase bonding in nickel and nickel-base alloy welding process, and finally forecasted the nickel-base alloy on transient liquid-phase bonding.

**Key words:** nickel and nickel-base alloy; transient liquid-phase bonding(TLP); superiority

## 0 前言

镍基合金具有耐热、耐蚀、耐磨、精密与形状记忆等特点,在机械、石油、化工、电力等行业得到了广泛应用。在生产制造中镍及镍基合金的焊接性差,焊接时易产生裂纹和气孔,严重制约了镍及镍基合金的应用。目前镍及镍基合金的焊接多采用 SMAW 和 TIG 焊,焊接接头易出现气孔和裂纹,同时焊接变形大,生产率低,有时还需进行焊后机加工处理。

20 世纪 70 年代初,美国人在研究应用于涡轮叶片的镍基高温合金材料的焊接时,发现采用传统的焊接方法很难达到满意的焊接要求,研究开发了瞬时液相扩散连接技术,并将该技术成功地应用于涡轮叶片的焊接,从而揭开了 TLP 发展的序幕。TLP

作为一种新型的焊接技术在近 30 多年来获得了广泛应用<sup>[1]</sup>。

## 1 瞬时液相扩散连接简介

### 1.1 瞬时液相扩散连接的基本原理

瞬时液相连接(Transient liquid-phase bonding, 简称 TLP)是在母材间加入熔点低于母材的中间层,加热至中间层熔点与母材熔点之间,使中间层熔化或与母材发生共晶反应,在连接界面上形成一定数量的液相,中间层中降熔元素(Melting point depressant elements, 简称 MPD)迅速向母材扩散,使得结合界面化学成分明显改变,熔点升高从而实现等温凝固。经过等温凝固、固相成分均匀化,最后得到与母材化学成分和组织均匀一致的接头并获得连续的接合面组织<sup>[2-4]</sup>。瞬时液相连接作为一种新型的精密连接技术,具有连接速度快、变形小、连接温度低、残

收稿日期:2009-07-01

作者简介:王非森(1982—),男,四川泸州人,助教,学士,主要从事金属材料与焊接工艺的研究与教学工作。

余应力小、接头强度高优点<sup>[5-6]</sup>,可用于连接难以熔焊的材料,特别是高温合金、形状记忆合金、金属间化合物、复合材料等<sup>[7-10]</sup>。

TLP 连接一般利用共晶合金或包晶合金系统,主要目的是降低连接温度。对于任意 A-B 二元共晶系统(其中母材为 A,中间层为 B,共晶温度为  $T_E$ ,母材熔点为  $T_M$ ,连接温度为  $T_B$ ),根据液固两相的边界移动,可以将 TLP 扩散连接过程分为三个阶段:液相形成阶段(包括中间层 B 的熔化和液相的均匀化阶段)、等温凝固阶段、接头区域的均匀化阶段。TLP 连接过程如表 1 所示,瞬时液相扩散焊过程示意如

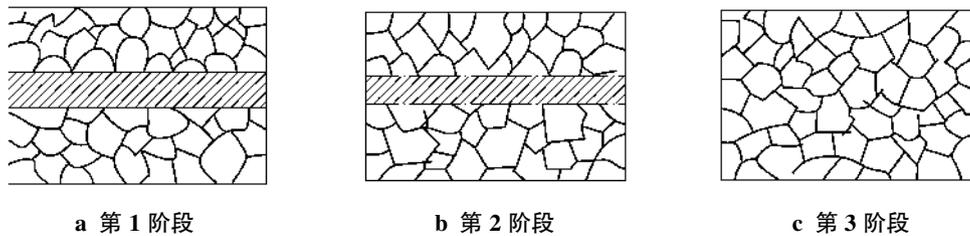


图 1 瞬时液相扩散焊过程示意

Fig.1 Abridged of Transient liquid-phase bonding process

(1)第 1 阶段——液相形成(包括中间层的熔化和液相的均匀化阶段)。在焊接之前将中间层材料夹在焊件间,并加上一定的焊接压力,使焊件与中间层材料紧密接触。在保护气体保护下进行加热,直至中间层材料液化和填满间隙。

(2)第 2 阶段——等温凝固阶段。当液相形成并填满焊缝间隙后,进入保温期,使液固相之间进行充分的扩散。由于液相中使熔点降低的元素大量扩散到母材内,而母材中的一些元素向液相中溶解,因此使液相的熔点逐步升高而凝固,最后形成接头,由于液相的凝固过程是在保温中完成的,故被称为等温凝固。

(3)第 3 阶段——接头组织的均匀化。由等温凝固形成的接头成分很不均匀,为获得成分和组织均匀化的接头,需要继续保温扩散来完成<sup>[11]</sup>。

## 1.2 瞬时液相扩散连接的重要参数

瞬时液相扩散焊一般在惰性气体保护的气氛中进行,这样可以避免在焊接过程中,保证焊接表面不产生氧化夹杂缺陷。

### 1.2.1 温度

热温度是扩散焊接中最重要的工艺参数。因为影响扩散焊进展的主要因素是原子的扩散,而影响原子扩散的主要因素是浓度梯度和温度。动力学理

论对温度在扩散焊中的影响提供了定量的解释,即

$$D = Ee^{-q/KT} \quad (1)$$

式中  $D$  为在  $T$  温度下扩散系数; $E$  为比例系数; $q$  为扩散激活能; $K$  为波尔兹曼常数; $T$  为绝对温度。

式(1)表明,升高温度对提高原子扩散速度有极大作用,在一定温度范围内温度越高,扩散过程越快,所获得的接头强度也越高。但是它又受到被焊材料,夹具的高温强度、焊件的相变、再结晶等冶金特性的限制。而且温度高于某一定值后,再提高温度对接头质量的提高亦不明显,甚至会下降,这是因为温度过高会导致晶粒长大所致。扩散焊接加热温度的选择应保证在短的时间内获得较好的焊接质量,达到完全的冶金结合。在不使接头及母材发生不希望的冶金反应的情况下,温度尽可能用高些。

### 1.2.2 压力

焊接压力的主要作用在于使焊接表面产生微观塑性变形,以达到最大的紧密接触,形成金属键和建立原子相互扩散的条件。在某些情况下压力还有利于防止扩散孔洞的产生,所以当其他参数固定时,较高的压力可以提高接头强度。实际应用的压力范围很大,但一般不许超过材料在焊接温度下的总体屈服点,其压力的上限还受到接头的几何形状和设备吨位的限制,高压需要昂贵的设备和更

表 1 TLP 连接过程  
Tab.1 The process of TLP

阶段	控制参数	速度	
液相形成 (阶段 1)	中间层熔化 液相均匀化	$D_L$ $D_L, D_S$	非常快 快
等温凝固(阶段 2)		$D_S$	快
接头均匀化(阶段 3)		$D_S$	快

注: $D_L$  为中间层溶质原子在液相中的扩散系数; $D_S$  为中间层溶质原子在固相中的扩散系数。

好的控制,还应有更复杂的夹持工件的方法。

### 1.2.3 中间层

近年来的研究表明,瞬时液相连接应采用低熔点的非晶态金属箔带(不用非晶态粉末)作为中间层。在选择用于中间层的具体成分时,基体元素的选择一般要考虑到非晶态金属箔带的成分应接近于母材,但其熔点应比母材低,强度应比母材高及其他一些诸如防锈、耐腐蚀、耐高温等特殊性能的要求。对于合金元素的选择,起降低熔点作用的元素是必不可少的,而且应在能降低熔点的元素中优选扩散速度快的元素,如 B, Si, P 等。同时,也需添加能改善液态中间层在母材界面间填充性能的元素。常用的有 Fe 基、Ni 基、Cu 基非晶态金属箔带。

## 2 瞬时液相扩散连接在镍及镍基合金的优越性

### 2.1 与普通熔焊相比

与传统熔焊方法相比,瞬时液相扩散连接镍及镍基合金有以下优点:

(1)焊接温度低、焊接过程时间短,避免产生气孔。

传统熔焊焊接镍及镍基合金时易产生气孔,主要原因是:镍及镍合金液相与固相温差小,结晶过程短, $H_2O$  气体溶解度相差大,结晶时  $H_2O$  气体来不及溢出,形成气孔。而瞬时液相扩散连接,温度低,几乎不形成熔池(微熔),焊接过程一般几秒至几十秒, $H_2O$  气体来不及形成和溶解,避免了气孔的产生。

(2)焊接温度低、焊接应力小、变形小,避免出现热裂纹。

传统熔焊焊接镍及镍基合金时产生热裂纹,主要是由于低熔点共晶物(S、Si)形成的液态薄膜在结晶时被撕裂。瞬时液相扩散连接镍及镍基合金时,温度低,中间层材料中形成液态薄膜的 S、Si 等含量相对传统焊材少很多,不易形成液态薄膜;同时由于焊接应力小、变形小,即使有少量液态薄膜也不会被撕裂。

(3)节约母材金属、生产率高、成本低、无污染。

瞬时液相扩散连接无需开坡口,可节约大量母材金属;自动化操作生产率高,对工人操作技术的依赖性降低;中间层成本低,焊接过程中无弧光、磁场和射线。

### 2.2 与钎焊和固相焊相比

钎焊会导致镍及镍基合金焊缝的力学性能和

耐腐蚀性能降低;固相扩散焊虽然能够实现对沉淀强化和弥散强化镍基合金的焊接,但是它对试样表面质量和施加压力要求比较高,并且难以焊接形成复杂的构件。

## 3 瞬时液相扩散连接在镍及镍基合金焊接中的应用

随着镍及镍基合金应用的日渐广泛,其瞬时液相扩散连接技术也得到了飞速的发展。美国、英国、加拿大和日本等国在 TLP 扩散连接技术研究方面做了大量工作,研究了瞬时液相扩散连接的等温凝固模型、连接过程有关降熔元素扩散的规律和连接工艺参数等。Duvall 等人采用 Ni-Co 为中间层连接 Ni 基耐热合金,形成了无界面的连接接头,接头有效性达 100%。Nieman 和 Garrett 等人描述了共晶连接作为一种可能的用 Cu 作中间层低温低压连接 Al-b-B 复合材料的方法。该方法也可以用来连接 Ti-Al 接头,接头区域由于出现中间金属相,使得接头只能达到一定的性能<sup>[12-16]</sup>。

日本的液相扩散焊接技术始于 20 世纪 80 年代末 90 年代初,主要用于焊接中小直径的镍合金耐热钢管。特别值得一提的是:在日本,钢管的液相扩散焊技术已从最初的室内供水、电缆保护管等民用应用场合,向电站锅炉水冷壁管更换、修补方面的成功拓展。1998 年,三菱重工锅炉事业部首次报道了采用 TLP 焊管技术成功更换电站锅炉水冷壁管(代替手工 TIG 填丝焊);2004 年,日本的中国电力公司在三菱重工的协助下,成功采用 TLP 焊管技术实现了管径 150 mm 以下的水冷壁管的修补<sup>[11]</sup>。

哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室在扩散连接反方面的研究处于国内领先水平。针对异种材料的扩散连接过程,以热力学第二定律为基础进行了扩散连接接头区域元素分布的数值分析。利用耐热合金 K5 与耐热钢 2CrNiMoV 的扩散连接对建立的模型的实验验证表明,模型能较好地反映元素的分布规律,可以为扩散连接工艺参数的制定提供一定的参数<sup>[17-18]</sup>。

山东大学的杨敏等人对 TLP 连接接头的性能进行了试样分析。利用 Nb/Cu/Ni 复合层做中间层,采用部分液相扩散连接方法在连接压力、连接时间、冷却速度一定,连接温度变化的条件下进行了氮化硅陶瓷/镍基高温合金部分液相扩散连接实验,通过剪切实验评价连接温度对连接接头强度的影响和

采用 SEM 研究连接温度对接头微观组织的影响,并分析得出接头的剪切强度与温度呈抛物线关系,其试样氮化硅陶瓷/镍基高温合金部分液相扩散连接接头,存在的最佳连接温度为 1 130 °C,连接温度影响 Cu 的熔化量和接头的微观组织结构形态<sup>[19]</sup>。

河南理工大学、山东电力研究院的陈思杰等人在国内首次将 TLP 连接技术用于镍合金耐热钢管的连接,国内关于该项技术的研究刚刚开始。采用非合金箔做中间层,采用氩气保护,瞬时液相扩散连接 T91、TP304 等镍基耐热钢管,研究了工艺参数对接头组织和性能的影响,分析了 TLP 连接接头显微组织、力学性能和元素分布,确定了合适的连接工艺参数。研究表明,新工艺连接的组织和性能都优于传统的工艺,得到了理想的无焊缝组织<sup>[20-21]</sup>。

中国科学院金属研究所李文等人采用镍基非晶中间层,研究了 DD98 单晶高温合金 TLP 扩散连接,分析了接头的结构成分分布及连接区域与基体之间的位相关系,结果表明,接头区域由连接区、中间金属/基体金属扩散区、基体金属区组成。均匀化处理后的接头与基体的  $\gamma'$  沉淀相的尺寸趋于一致,连接层与基体之间的取相匹配良好<sup>[22]</sup>。

北京航空材料研究院的李晓红、毛唯等人对国内自行研制的第二代单晶合金 DD6 的过渡液相扩散焊(TLP 扩散焊)工艺进行了研究,所采用中间层合金的主要成分与 DD6 母材基本一致,同时加入一定量的 B 作为降熔元素。试验结果表明,1 290 °C/12 h 规范扩散焊接头的连接界面,约一半区域为与 DD6 母材类似的  $\gamma + \gamma'$  组织,其他区域则为  $\gamma$  固溶体基体上分布着不同形态的硼化物,其 980 °C 的持久性能接近母材性能指标的 90%。延长扩散焊保温时间至 24 h,连接界面上的不均匀区域减少,其 980 °C 和 1 100 °C 的持久性能分别达母材性能指标的 90%~100% 和 70%~80%<sup>[23]</sup>。

山东鲁能节能设备公司开发的管道液相扩散焊成套设备(见图 2)实现了中小口径管道( $\phi$  40 mm~ $\phi$  133 mm)的 TLP 快速连接。该设备利用中频感应加热方式快速加热被焊管件,可编程控制器(PLC)及可编程温度调节器(PRC)控制焊接工艺温度、时间和压力。设备预设成套焊接工艺,自动化程度高,焊接质量稳定。每个焊缝的工艺时间为 2~5 min,加热温度 1 100 °C~1 250 °C,并可实现焊接的原位热处理。利用自主开发的铁镍基非晶合金箔带中间层

焊接,组织连续,焊缝和热影响区域极小,焊缝成形美观,具有与母材相似的金相组织且无脆性相析出,保证了焊缝强度、塑性和韧性,拉伸、弯曲和冲击性能满足标准要求,实现了真正意义上的无缝对接<sup>[24]</sup>。



图 2 管道液相扩散焊设备

Fig.2 Equipment of pipelineon Transient liquid-phase bonding

## 4 结论

从目前的研究情况来看,针对镍及镍基合金在焊接时具有较高的热裂纹和气孔敏感性,易在敏化温度区晶界处发生其他元素的碳化物沉淀现象,瞬时液相扩散连接比 SMAW 和 TIG 具有较大的优势,同时利用瞬时液相扩散连接更利于实现镍及镍基合金的焊接生产自动化。目前镍及镍基合金瞬时液相连接的研究大都是在管道等单一界面上展开,随着对镍及镍基合金瞬时液相连接各项研究工作的深入,镍及镍基合金的应用将更加广泛,制约镍及镍基合金的焊接问题将一去不返。

## 参考文献:

- [1] Duvall D S, Czarski O W, Panlonis D F. TLP bonding: a new method for joining heat resistant alloys[J]. *Welding Journal*, 1974, 53(4): 203-214.
- [2] 王非森, 陈思杰, 高增, 等. 降熔元素对 T91 钢 TLP 连接组织和性能的影响[J]. *电焊机*, 2008, 38(11): 18-21.
- [3] 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.
- [4] Gale W F, Butts D A. Transient liquid phase bonding—An Overview[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2004, 9(4): 283-300.
- [5] Illingworth T C, Golosnoy I O, Clyne T W. Modelling of transient liquid phase bonding in binary systems—A new parametric study[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007: 445-

- 446, 493-500.
- [6] Duvall D S, Owezarski W A, Paulonis D F. TLP Bonding: A new method for joining heat resistant alloy[J]. Welding Journal, 1974, 53(4): 203-214.
- [7] 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.
- [8] Gale W F, Guan Y. Microstructural development in copper-interlayer transient liquid phase bonds between martensitic NiAl and NiTi[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(1): 357-364.
- [9] Sun D Q, Gu X Y, Liu W H. Transient liquid phase bonding of magnesium alloy(Mg-3Al-Zn) using aluminum interlayer[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 391(1): 29-33.
- [10] Yan P, Wallach E R. Diffusion-bonding of Ti Al[J]. Intermetallics, 1993, 1(2): 83-97.
- [11] 张贵锋, 张建勋. 日本 T91 钢管液相扩散焊技术的发展[J]. 电焊机, 2006, 36(1): 37-40.
- [12] Khan T L, Orhan N, Eroglu M. Transient liquid phase bonding of a microduplex stainless steel using amorphous interlayers[J]. Materials Science and Technology, 2002, 18(4): 396-400.
- [13] Gale W F. Transient liquid phase bonding of intermetallic compounds[J]. Materials Science Forum, 2003, (426-432): 1891-1896.
- [14] Wikstrom N P, Ojo O A, Chaturvedi M C. Influence of process parameters on microstructure of transient liquid phase bonded Inconel 738LC superalloy with Amdry DF-3 interlayer[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 417(1-2): 299-306.
- [15] Saha R K, Wei S, Khan T. A comparison of microstructural developments in TLP diffusion bonds made using ODS Ni alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 406(1-2): 319-327.
- [16] Lugscheider E, Bobzin K, Erdle A. Solder deposition for transient liquid phase(TLP)-bonding by MSIP-PVD-process[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, (174-175): 704-707.
- [17] 何鹏, 冯吉才, 钱乙余, 等. 异种材料扩散连接接头残余应力的分布特征及中间层的作用[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 25-29.
- [18] 何鹏, 冯吉才, 钱乙余, 等. 扩散连接界面物理接触行为的动态模型[J]. 焊接学报, 2001, 22(5): 20-24.
- [19] 杨敏, 邹增大, 王新洪, 等. 连接温度对氮化硅陶瓷/镍基高温合金部分液相扩散连接接头性能的影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2005, 35(2): 35-38.
- [20] 陈思杰, 井晓天, 李辛庚. TP304 钢管的瞬时液相扩散焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2004, 33(11): 58-60.
- [21] 陈思杰, 井晓天, 李辛庚. 瞬时液相扩散连接双温工艺模型[J]. 焊接学报, 2005, 26(4): 69-72.
- [22] 李文, 金涛, 孙晓峰, 等. 镍基单晶高温合金 TLP 连接[J]. 金属学报, 2001, 37(11): 1165-1168.
- [23] 李晓红, 毛唯, 郭万林, 等. DD6 单晶合金过渡液相扩散焊工艺[J]. 焊接学报, 2005, 26(4): 51-55.
- [24] 陈思杰, 赵丕峰. 钢管 TLP 连接设备和技术[J]. 矿山机械, 2005, 33(1): 58-60.

## 手工钨极氩弧焊焊前清理

氩弧焊时, 必须对被焊焊件的接头附近及填充焊丝进行焊前清理, 去除金属表面的氧化膜、油脂、湿气等物质, 以保证接头的质量。

清理方法有机械清理方法、化学清理方法、化学-机械清理方法三种:

(1) 机械清理。该方法简单、效果好, 对不锈钢可用砂布打磨, 对铝合金可用钢丝刷或电动钢丝刷以及刮刀。机械清理后, 可用丙酮清洗油污。

(2) 化学清理。焊件、焊丝的化学清理最好采用化学方法清除其表面的油锈, 不锈钢焊丝一般采用酸洗液和钝化液清理。

(3) 化学-机械清理。大型焊件采用化学清洗往往不够彻底, 因而在焊前需要用钢丝刷和刮刀, 再清理一次焊接坡口边缘。

通过以上清理后的焊件与填充焊丝必须保持清洁, 严禁沾上油污以及其他污物, 并且要求清理后立即用于焊接。