

T91 钢管瞬时液相扩散焊接

陈思杰^{1,2}, 井晓天¹, 李辛庚³

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048; 2. 河南理工大学
机械工程系, 焦作 454000; 3. 山东电力研究院, 济南 250002)



陈思杰

摘 要: 用 FeNiCrSiB 非晶合金箔作中间层, 氩气保护, 对 T91 钢管进行了瞬时液相扩散连接。通过正交试验的方法研究了工艺参数对接头组织和性能的影响, 分析了 TLP 连接接头的显微组织、力学性能和元素分布, 确定出了合适的连接工艺参数。研究表明, 在合适的工艺参数下, 焊缝为成分与基体相似的固溶体, 且没有沉淀相, 可以获得良好的性能。研究出的最佳工艺为: 连接温度 1250 ℃, 中间层为 FeNiSiB 非晶合金箔, 等温凝固时间 3 min, 压力 6 MPa。

关键词: T91 钢; 瞬时液相扩散; 中间层; 正交试验; 显微组织

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)06-73-04

0 序 言

T91/P91 钢由美国 ORNL 公司在 9Cr1Mo 钢的基础上经改进后推出的, 严格限制硫磷含量, 添加少量的钒、铌元素进行合金化。它不仅具有优良的常温和 610 ℃以下高温力学性能, 而且具有良好的加工性能。在电站高温过热器, 高温再热器乃至主蒸汽管道上得到了越来越广泛的应用^[1]。但焊接性较差, 焊接时容易出现裂纹等问题。瞬时液相扩散焊 (Transient liquid-phase bonding 简称 TLP 连接) 接头强度高, 没有明显的界面和焊接物残留。连接时在接头处置入中间层, TLP 选用的中间层的成分除熔点较高的主要组成元素外, 都含有降低熔点的元素 (Melting point depressant elements, 简称 MPD)^[2]。TLP 连接作为一种新型的焊接技术在近 30 多年来获得了广泛的应用^[3,4]。对 TLP 连接技术的研究, 以前主要应用于航天航空先进材料的连接, 对这些先进材料的连接都是在真空或惰性保护气氛下进行的^[2~5]。20 世纪 80 年代末期, 日本将大气条件下的 TLP 连接技术应用在输气和输水管道、民用住宅等安装工程中, 并获得成功; 20 世纪 90 年代中期, 日本又将该技术应用于建筑工地实心钢筋的

焊接^[6,7], 到 1997 年出现了电站锅炉水冷壁管的更换及安装的报道。在大气条件下惰性气体保护的 TLP 扩散焊, 不使用真空炉, 节约了设备投资, 也适合在野外施工的场所, 具有很高的工程价值。国内关于 T91 钢管的液相扩散焊研究刚刚开始。

文中通过正交试验, 研究 T91 钢管的液相焊接工艺, 探讨了工艺参数对 T91 钢焊接组织和性能的影响。

1 试验设备和方法

试验在瞬时液相扩散焊机上进行, 采用高频感应加热, 氩气保护, 压力设定范围为 4~10 MPa。力学性能试验机型号为 WES-600W 万能试验机。拉伸试验按 GB2651-89《焊接接头拉伸试验方法》标准进行, 弯曲试验按 GB2653-89《焊接接头弯曲及压扁试验方法》标准进行。接头合格的标准为拉伸试验在母材断裂, 面弯和背弯的弯曲角大于 50°。焊缝组织和成分分析在 XRJ-8800 型电子显微镜上进行。

试验材料为 T91 钢管, 试样连接端面精车, 并用丙酮或酒精清洗端面。钢管的成分和试验用中间层成分见表 1, 钢管规格和力学性能见表 2。

表 1 T91 钢管和非晶中间层的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of T91 steel and insert metal used

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	N	Fe
T91	0.08	0.20	0.30	≤0.02	≤0.01	≤0.4	8.00	0.85	0.18	0.06		0.06	其余
	~0.12	~0.50	~0.60				~9.50	~1.05	~0.25	~0.10		~0.07	
FeNiCrSiB	6~8					45~47	4~5				7~8	其余	

表 2 T91 钢管的规格及常温力学性能
Table 2 Specification and mechanical
properties of T91 steel

外径 d/mm	壁厚 h/mm	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	伸长率 $\delta_5(\%)$	冲击吸收功 A_{kv}/J
63.5	4.6	585	415	20	40

前期试验主要是中间层的优化, 并确定出了合适的非晶中间层的成分, 配制的 FeNiCrSiB 非晶中间层厚度为 30~40 μm 。正交试验采用 3 因素 3 水平。温度、时间和压力是连接成功的关键参数, 利用正交试验方法可以在很多试验条件中选出代表性的试验, 推断出最好的连接工艺参数。根据正交试验原理和焊接工艺要求, 进行工艺连接试验。正交试验参数和水平的排列见表 3。

表 3 T91 钢管正交试验参数和试验结果
Table 3 Orthogonal experiment parameters
and result of T91 steel

序号	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	时间 t/min	压力 p/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	抗弯强度 σ_{bb}/MPa
1	1 200	1	8	478	1.11
2	1 200	3	6	783	1.66
3	1 200	5	4	750	1.60
4	1 225	1	6	810	1.82
5	1 225	3	4	875	1.77
6	1 225	5	8	673	1.44
7	1 250	1	4	753	1.76
8	1 250	3	6	1 025	1.98
9	1 250	5	8	930	1.47

文献[8] 利用热膨胀法测定了 T91 钢焊缝金属连续冷却组织转变相图(WM-CCT), 得到马氏体的开始转变温度(M_s)为 370~380 $^{\circ}\text{C}$, 转变完成温度(M_f)为 220 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 淬透性很好, 焊接后接头区域在空冷状态下可以淬火得到马氏体组织。为了提高接头区域的塑韧性, 有必要对接头进行回火处理。因为 T91 焊接接头冷却到室温时就有产生冷裂纹的危险, 所以焊接后不允许冷却到室温再进行回火。接头温度降到 100~150 $^{\circ}\text{C}$, 就要进行回火。试验的回火工艺为 800 $^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, 保温 8 min。

2 试验结果与讨论

2.1 正交试验结果及分析

对 9 个连接试样取样进行力学性能试验, 拉伸

和弯曲试样取样位置见图 1, 分别取 0 点、3 点、6 点和 9 点等 4 个位置, 每一个位置分别取 1 个拉伸试样和 2 个弯曲试样(面弯和背弯), 进行力学性能试验。正交试验接头的强度值列于表 3。

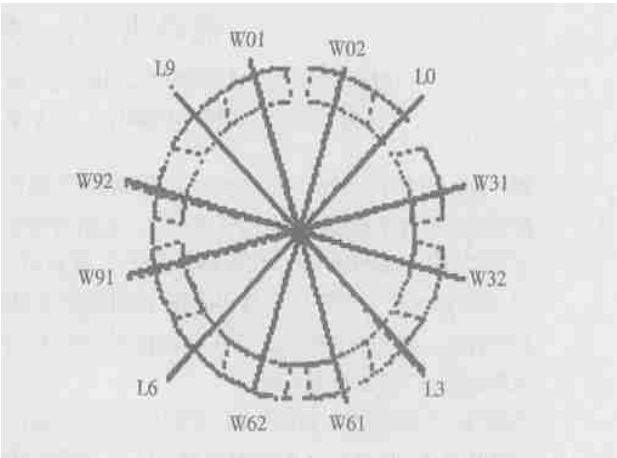


图 1 钢管拉伸(L)弯曲(W)试样取样位置
Fig. 1 Diagram of steel pipes sampling used
to tensile and bend test

图 2 是根据正交试验得到的试验参数(温度, 时间, 压力)与拉伸和弯曲强度的关系。由图可以看出, 拉伸强度和弯曲强度都随连接温度升高而不断增大, 弯曲强度在 1 225 $^{\circ}\text{C}$ 后变化平缓。时间和压

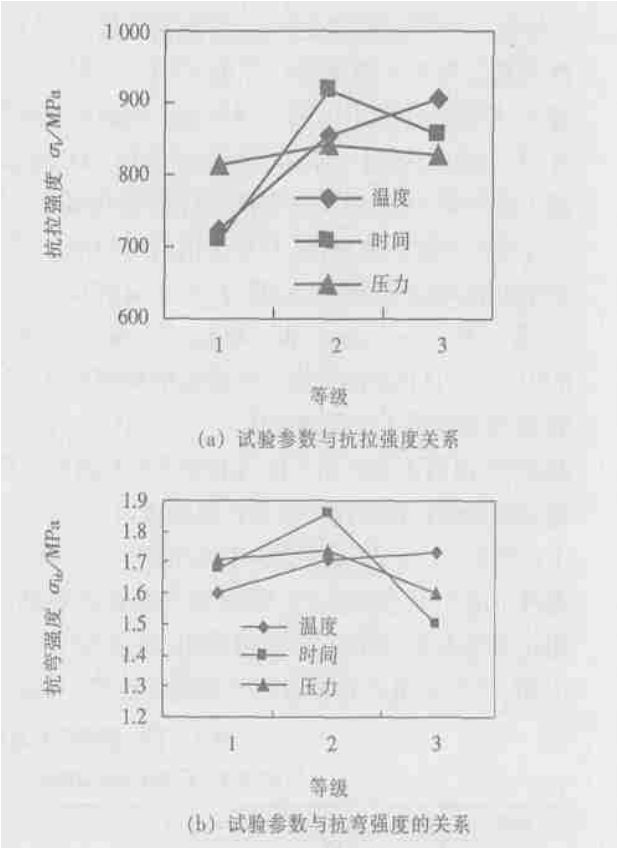


图 2 试验参数(温度, 时间, 压力)与接头拉伸和弯曲强度的关系

Fig. 2 Relation between process parameters
and mechanical properties of joints

力参数在水平 2 时接头强度较高。在低温水平 1 200 ℃, 中间层对母材的润湿很差, 接头性能不好, 拉伸试样都在焊缝处断裂, 弯曲能力很差。1 225 ℃焊接时中间层对母材润湿性明显提高, 拉伸试样有 50% 都在母材断裂, 弯曲性能也明显改善。在高温度水平 1 250 ℃连接的试样拉伸均在母材断裂, 拉伸合格率 100%, 抗拉强度均大于母材, 弯曲性能比 1 200 ℃和 1 225 ℃连接的接头好, 其中时间 3 min, 压力 6 MPa 的试样面弯和背弯 180°未断。因此, 正交试验推荐 T91 的 TLP 焊接工艺为 1 250 ℃保温 3 min, 压力 6 MPa。

2.2 温度和时间对接头组织和成分的影响

时间和温度对接头性能影响较显著, 压力的影响有一定的范围^[2]。初始压力是瞬时液相扩散连接中必不可少的, 其作用是缩小间隙并挤出多余的中间层, 增加润湿性; 保持连接工件的均匀接触。所以在一定的压力范围, 对 TLP 连接的性能影响不是很大。而时间和温度是影响原子扩散的主要因素, 所以对接头性能影响较大^[9]。在正交试验的基础上, 选择一个合适的压力 6 MPa, 然后分别研究了时间和温度对接头组织和性能的影响。试验结果见表 4。

表 4 时间和温度对接头强度的影响
Table 4 Effect of time and temperature on joints strength

序号	温度 <i>T</i> /℃	时间 <i>t</i> /min	压力 <i>p</i> /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	抗弯强度 σ_{bl} /MPa
1	1 225	2	6	806	1.67
2	1 225	3	6	875	1.77
3	1 200	3	6	783	1.26
4	1 250	3	6	988	1.99

在 1 225 ℃下分别用连接时间 2 min 和 3 min 进行 TLP 连接, 由表 4 可以看出, 2 号试样的接头强度高于 1 号试样。用 SEM 和 EPMA 分析了 1 225 ℃不同时间连接接头的组织和成分(见图 3a、b)。组织分析表明, 1 号试样由于保温时间短中间层扩散不充分, 有中间层残留的痕迹。EPMA 分析曲线表明, B 和 Cr 在相同的部位有峰值, 有条件形成脆性相, Ni、Si 扩散不充分, 成锯齿状分布, 说明中间层熔化后等温时间短, 等温凝固没有结束就开始冷却, 具有钎焊的组织特征^[9]。而 2 号试样中间层已扩散均匀, 元素分布比较平缓, 焊接处已形成了共同晶粒, B、Si 元素扩散已经比较均匀, 所以接头性能优

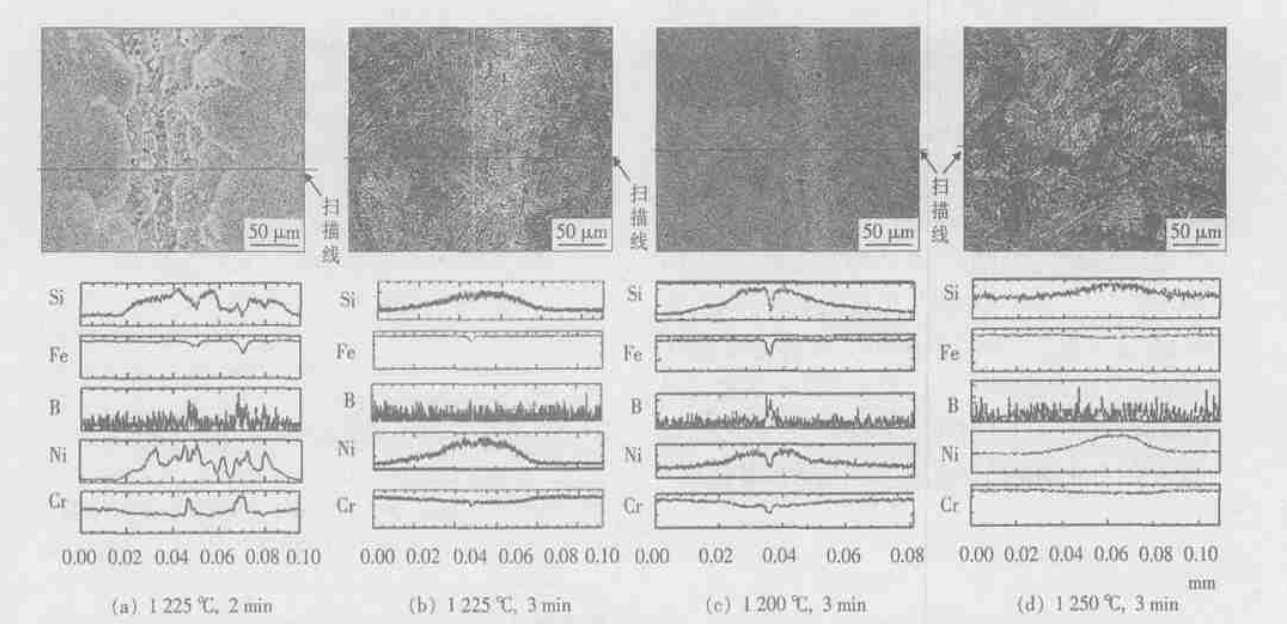


图 3 T91 钢不同等温时间和不同焊接温度 TLP 焊接接头 SEM 图像和 EPMA 曲线
Fig. 3 SEM and EPMA of T91 steel TLP bonded joint under different time and temperature

于 1 号试样。

3 号和 4 号试样连接温度分别为 1 200 ℃和 1 250 ℃, 等温时间 3 min 表 4 给出了试样的抗拉强度和弯曲强度值。4 号试样接头强度明显高于 3 号试样, SEM 和 EPMA 线分析表明(图 3c、d), 3 号试样由于连接温度低, 原子扩散能力小, 所以元素扩散距离近, 焊缝中心有 B、Si 和 Ni 的富集, 接头的力学性

能不好。4 号试样在 1 250 ℃进行连接, 元素已充分扩散, 分布平缓, 已形成了共同晶粒。图 3d 可以看出焊缝和母材组织已基本一致, 降熔元素 Si 和 B 的扩散很充分, 焊缝为铁和镍的固溶体, 没有硼化物形成, 连接性能好, 抗拉强度和抗弯强度能满足要求。用电子探针对 1 250 ℃连接的焊缝区域的成分进行了定量分析, 并和中间层、母材进行了对比(表 5),

焊缝降熔元素含量显著下降。

表 5 焊缝和中间层及基体成分(质量分数, %)
Table 5 Chemical compositions of joints, interlayer and matrix

类别	Ni	Cr	Fe	Si	Mo
基体	0.4	9	其余	0.20~0.5	0.85~1.05
焊缝	4.40	7.97	85.33	1.21	1.04
中间层	42	3.9	其余	6.8	—

2.3 讨 论

焊接温度和等温时间是影响 MPD 元素原子扩散的主要因素, 确定焊接温度的主要依据首先是中间层的熔点。焊接温度应高于中间层的熔点, 温度是决定原子扩散速度的主要因素, 对中间层的流动性和润湿性有重要影响。一般来说, 在不损害母材的前提下, 温度越高连接性能越好。但是温度过高是有害的, 它能引起晶粒长大, 以及中间层与母材过分地相互作用, 而导致溶蚀、晶间渗入等, 而使接头强度降低^[2,9,10]。分析 T91 钢 TLP 连接的接头组织发现, 1 250 ℃高温连接时焊缝附近母材得到了粗大的马氏体板条组织, 而 1 200 ℃连接温度低, 焊缝附近母材组织比较细。因此连接温度也不能太高。等温时间主要取决于中间层和母材的相互作用特性、中间层的原始厚度和焊接温度。当中间层与母材有相互作用强烈, 易形成脆性相, 引起晶间渗入等倾向时, 要尽量缩短等温时间。时间参数的选择, 取决于中间层厚度及 MPD 元素的相对含量。当中间层厚度较小, 且中间层中降低熔点元素的相对含量较低时, 需扩散进入母材的 MPD 元素的量, 及其扩散过程所经历的路程都变小, 等温凝固所需的时间便可缩短。由此可见, 时间不能太短也不能太长, 有一最佳值, 与中间层的种类、等温温度等因素有关。

3 结 论

(1) 研制的 FeNiCrSiB 中间层可以实现 T91 钢管的液相扩散焊连接, 焊缝组织成分和基体接近, 强度高于母材。

(2) 正交试验确定的工艺参数为中间层是 FeNiCrSiB, 温度 1 250 ℃, 时间 3 min, 压力 6 MPa。这个工艺接头组织性能比较好。

(3) 连接时间和温度对接头组织性能影响显著, 只有在合适的工艺参数下, 才能保证降熔元素扩散均匀, 不形成脆性相。

参考文献:

[1] 李 鹏, 郭 军, 徐德录. T91 钢及其异种钢焊接接头裂纹敏感性分析[J]. 电力建设, 1999 (7): 21—23.

[2] Duwall D S, Czarski O W, Parlonis D F. TLP bonding: a new method for joining heat resistant alloys[J]. Welding Journal, 1974, 53(4): 203—214.

[3] Cam G, Kocak M. Progress in joining advanced materials[J]. International Materials Review, 1998, 43(1): 1—30.

[4] 李志远, 钱乙余, 张九海. 先进连接方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[5] Zhou Y, Gale W F, North T H. Modelling of transient liquid phase bonding[J]. International Materials Review, 1995, 40(5): 181—196.

[6] 北野健次, 小沟裕一. 钢管のアモルフアス高速接合システム[J]. 配管技术, 1989, (5): 65—70.

[7] 谷口庸一, 加藤钦也. アモルフアス接合スリ—ブヨー クの実用化[J]. 自動車技术, 1995 49(11): 37—42.

[8] Long Xin, Xu Yonggang, Cai Guangjun. Study on the continuous cooling transformation of modified 9% Cr 1% Mo weld metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(1): 53—56.

龙 昕, 胥永刚, 蔡光军. 9%Cr—1%Mo 耐热钢焊缝金属连续冷却组织转变[J]. 焊接学报, 2000, 21(1): 53—56.

[9] Zhang Guifeng, Zhang Jianxun. Similarities and differences in main characteristics between transient liquid phase bonding and brazing process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(6): 92—96.

张贵锋, 张建勋. 瞬间液相扩散焊与钎焊主要特点之异同[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 92—96.

[10] 陈思杰, 井晓天, 李辛庚. 20 钢管的瞬时液相扩散工艺研究[J]. 热加工工艺, 2003(6): 37—38.

作者简介: 陈思杰, 男, 1964 年 3 月出生, 西安理工大学博士研究生, 副教授。研究方向为瞬时液相扩散连接技术和表面工程技术, 发表论文 6 篇。
Email: chensijie @163.com