

Nb 对镍基合金高温失塑裂纹敏感性的影响机理

唐正柱¹, 陈佩寅¹, 吴 伟¹

(哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080)

摘 要: 通过应变—裂纹(STF)试验法测定临界开裂应变值和开裂温度, 确定 HS690 焊丝中 Nb 含量对熔敷金属抗高温失塑裂纹(DDC)能力的影响规律, 并采用透射电镜对焊丝熔敷金属中析出物的尺寸和形态进行了观察。结果表明, 在焊接工艺条件相同的情况下, 采用向 HS690 焊丝中添加 Nb 的冶金方法能够调整晶界处第二相(Nb, Ti)C 的数量和形态, 晶界条件得到改善, HS690 熔敷金属抗 DDC 的能力得到明显的提高。

关键词: 镍基合金; 应变—裂纹(STF)试验; 高温失塑裂纹; 第二相

中图分类号: TG116 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2008)01-0109-04



唐正柱

0 序 言

镍基合金焊接接头容易产生热裂纹, 主要包括结晶裂纹、液化裂纹和高温失塑裂纹(DDC)。DDC^[1]是一种尺寸较小, 发生在奥氏体不锈钢、镍基合金、铜基合金和钛合金等材料中的固态开裂现象, 它主要出现在固相线温度以下一个狭窄的温度区间, 在这一温度区间材料表现出较低的塑性, 当在一定的应变量下, 容易出现沿晶开裂。这种裂纹的形成与晶界处液膜的出现无任何联系。HS690 是一种高铬镍基合金焊丝, 型号为 ERNiCrFe-7, 主要应用于压水堆和沸水堆蒸发器等关键部件上。

作者对四种不同 Nb 含量的焊丝熔敷金属进行了应变—裂纹(STF)试验, 确定了焊丝中 Nb 含量对熔敷金属抗 DDC 能力的影响规律, 揭示了 Nb 元素的影响机理, 为镍基焊材的研制与生产了提供试验依据和理论基础。

1 试验方法

试验用焊丝直径为 $\phi 1.2$ mm, 焊丝成分参照美国焊接学会标准 AWS A5.14-1997《镍和镍合金填充丝和焊丝》, 根据试验的需要对焊丝中 Nb 的含量进行了调整, 四种焊丝的主要化学成分如表 1 所示。

采用在 Gleeble 热模拟试验机上进行 STF 试验以研究四种焊丝的 DDC 敏感性, STF 试验是由 Nissley 等人^[2]提出的, 它主要通过确定试样开裂的临界

表 1 试验用 HS690 焊丝的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of HS690 welding wire

焊丝编号	Cr	Nb	Al	Ti	Ni
1 号	29.07	0.44	0.32	0.37	余量
2 号	28.31	0.77	0.34	0.33	余量
3 号	28.90	1.09	0.29	0.36	余量
4 号	28.95	1.93	0.29	0.34	余量

应变 E_{min} 和出现 E_{min} 的温度点来评价裂纹的敏感性。此方法能够较好地模拟焊接过程中的热循环, STF 相对于可调拘束试验以及高温拉伸等试验方法, 能够区分液化裂纹和(DDC), 从而有利于提高试验结果的准确性。

STF 试样的制备是采用 TIG 自动焊在厚度为 10 cm 的 Q235 钢板表面进行堆焊。焊接参数为电压 12 ~ 13 V; 焊接电流 130 A; 焊接速度 85 ~ 90 cm/min。堆焊结束后, 采用线切割将距试板表面 5 mm 以上的堆焊层切下, 并加工成 STF 试验试样, 由于 DDC 与晶界的方向有一定的相关性, 所以采用在试件中心处进行点焊从而获得多方向晶界。试样尺寸如图 1 所示。

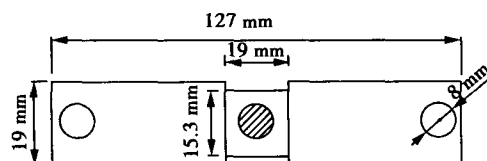


图 1 STF 试样尺寸

Fig.1 Dimension of STF sample

图 2 是在 1 000 ℃ 温度点的加热和加载的过程示意图,首先以 100 ℃/s 的加热速度将试样加热到 1 000 ℃ 并保温 10 s,然后以 0.06 cm/s 的加载速度拉伸到预定的伸长量并保持载荷 10 s,最后冷却至室温。采用 30 倍光学显微镜观察拉伸试样中间是否出现微裂纹,计算试样的拉伸应变值,确定出现裂纹的临界应变值。

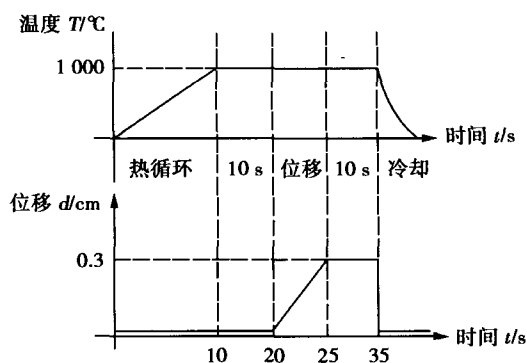


图 2 1 000 ℃ 温度点加热和加载过程

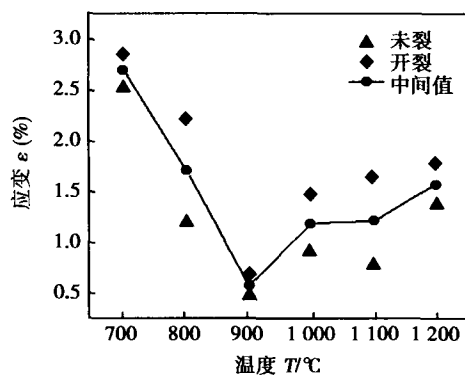
Fig.2 Process of heating and loading at 1 000 ℃

2 试验结果及其讨论

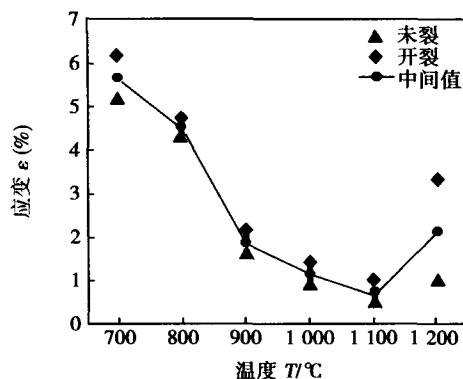
2.1 STF 试验结果

四种焊丝的 STF 试验曲线如图 3 所示,可以看出四种焊丝的 STF 试验曲线表现为澡盆状,即曲线表现出两头高中间低趋势。曲线在低温阶段下降的原因主要因为在此温度下晶界强度出现弱化趋势,此时的塑性变形主要集中在晶界处,而晶界面积相对于晶内面积较小,因此在较小的应变下就会出现沿晶开裂;曲线在高温阶段表现出上升趋势,这主要因为在这一温度下发生动态再结晶,材料的塑性得到了恢复。从 1 号焊丝的 STF 试验曲线,可以明显看出,在温度 700 ~ 900 ℃ 的范围内临界应变值 E 有一个下降趋势,整条曲线的最低点(E_{\min})出现在 900 ℃,曲线在 1 000 ~ 1 200 ℃ 范围内存在一定的上升趋势。四种焊丝的 E_{\min} 和出现 E_{\min} 的温度点如表 2 所示。

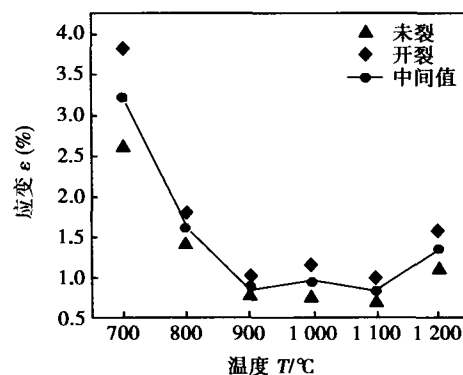
从 STF 试验结果可以看出,四种焊丝的 E_{\min} 基本上随着 Nb 含量的增加而增加,从而说明焊丝的抗 DDC 能力是随着 Nb 含量的增加而得到了改善。Nb 在高温阶段极易形成碳氮化物,这些析出物主要弥散分布在晶界和晶内,文献[3]认为弥散分布于晶界的碳氮化物能够阻碍位错的移动和晶界的迁移,从而有助于增加晶界的曲折性并能避免晶粒尺寸的粗大,而奥氏体晶粒尺寸粗大和晶界平直是导致 DDC



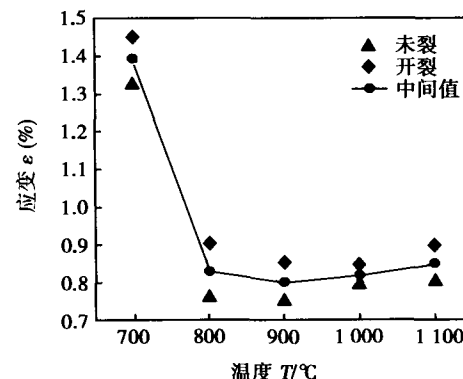
(a) 1号焊丝的 STF 试验结果



(b) 2号焊丝的 STF 试验结果



(c) 3号焊丝的 STF 试验结果



(d) 4号焊丝的 STF 试验结果

图 3 四种焊丝的 STF 试验曲线

Fig.3 STF curves of 4 kinds of welding wires

敏感性较高的主要原因,除了能够阻碍晶界的迁移

表2 四种焊丝的 E_{\min} 和出现温度Table 2 E_{\min} and susceptible temperature of 4 kinds of welding wires

焊丝编号	临界应变值 E_{\min}	敏感温度 $T/^{\circ}\text{C}$
1号	0.58	900
2号	0.65	1100
3号	0.82	1100
4号	0.76	900

外,晶界上的 Nb(C,N)还能够阻碍塑性变形过程中的晶界滑移,从而提高晶界区域的强度,避免由于晶界的弱化而出现 DDC,所以焊丝中添加一定量的 Nb 能够降低熔敷金属对 DDC 的敏感性。

2.2 透射电镜分析

图4为2号、3号和4号焊丝熔敷金属晶界上析出物的形态,可以看出随着 Nb 含量的增加析出物

在形态上由四方形逐渐过渡为六边形并最终成为圆形或椭圆形。2号焊丝熔敷金属中的析出物尺寸主要集中在 40~50 nm;3号焊丝熔敷金属中的析出物尺寸主要集中在 80~90 nm;4号焊丝熔敷金属中的析出物尺寸主要集中在 100~120 nm;析出物的整体尺寸随着 Nb 的含量增加而增大。图5和表3分别为方形析出物、近圆形析出物以及基体的能谱结果,可以看出这两种形态的析出物均为富 Nb,Ti 相。图6a为方形析出物的电子衍射斑点,计算结果表明此析出物为(Nb,Ti)C;图6b为近圆形析出物的电子衍射斑点,计算的结果同样为(Nb,Ti)C。从分析结果可以看出(Nb,Ti)C的形态与析出物中 Nb 的含量存在着内在的联系。试验结果表明,随着(Nb,Ti)C中 Nb 含量的增加,(Nb,Ti)C形态将由方形逐渐转变为近圆形。

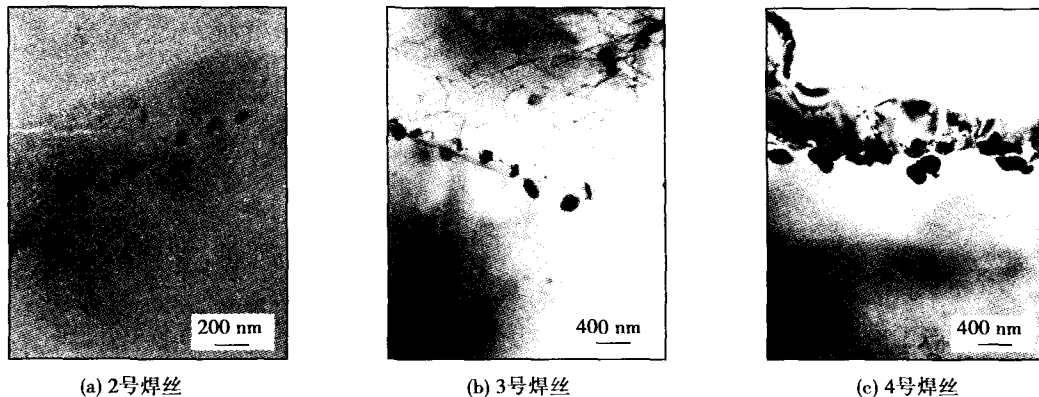


图4 熔敷金属中的析出物形态

Fig.4 Forms of precipitates in deposited metal

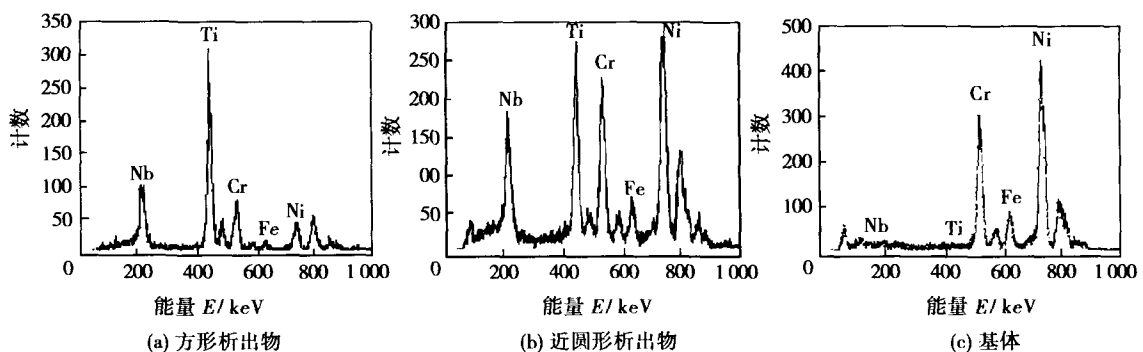


图5 能谱分析结果

Fig.5 Results of EDX

表3 能谱分析结果(质量分数,%)

Table 3 Results of EDX

	Nb	Ti	Cr	Fe	Ni
方形析出物	41.9	36.2	7.9	2.3	11.7
近圆形析出物	33.0	16.0	16.4	4.4	30.2
基体	2.8	0.3	31.3	9.3	56.3

3 结 论

(1) Nb 能够有效降低 HS690 焊丝 TIG 熔敷金属的 DDC 裂纹敏感性。在试验范围内,随着 Nb 含量的增加,DDC 的敏感性得到了改善。

(2) 焊丝中 Nb 以形成第二相(Nb,Ti)C 的方式

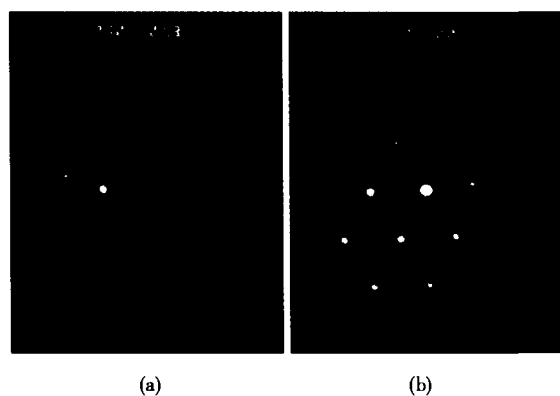


图 6 析出物的电子衍射斑点

Fig. 6 Electron diffraction pattern of precipitates

改善熔敷金属的晶界条件,增强晶界的抗变形能力,提高熔敷金属抗 DDC 能力,(Nb,Ti)C 的最佳尺寸为 100 ~ 120 nm。

(3) (Nb,Ti)C 提高熔敷金属抗 DDC 能力的作用

[上接第 108 页]

方法的数据训练本神经网络预测系统,训练样本的预测结果误差将会大幅度降低。

参考文献:

- [1] 刘雪梅,高连才,张彦华. X70 管线钢焊接性能分析[J]. 电焊机, 2004, 34(7): 14-16.
- [2] Bayraktar E, Kaplan D. Parametric approach model for determining welding conditions: New type of welding limit diagrams (WLD)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170: 477-486.

最明显;开裂最小临界应变 E_{\min} 主要出现在 900 ~ 1100 °C,此温度区间是 DDC 敏感区域。

参考文献:

- [1] Nissely N E, Lippold J C. Ductility - dip cracking susceptibility of austenitic alloys[C]// Proceedings of 6th International Conference on Trends in Welding Research. USA, Pine Mountain Georgia, 2002.
- [2] Nissely N E, Collins M G, Guaytina G, et al. Development of the strain-to-fracture for evaluating ductility-dip cracking in austenitic stainless steels and ni-base alloys [J]. Welding in the World, 2002, 46(7-8): 32-40.
- [3] Collins M G, Ramirez A J, Lippold J C. An investigation of ductility dip cracking in nickel based weld metals part I [J]. Welding Journal, 2003, 82(10): 288s-295s.

作者简介: 唐正柱,男,1980 年出生,硕士。主要从事镍基合金焊接材料的研制工作。发表论文 1 篇。

Email: hhs_tangzhengzhu@163.com

- [3] 王 玉,高大路,廖明夫,等. 优化异种材料摩擦焊接工艺参数的神经网络模型[J]. 焊接学报, 2005, 26(4): 33-36.
- [4] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [5] 徐培全,杨德新,赵秀娟,等. ANN 在焊接接头抗弯强度预测中的应用[J]. 焊接学报, 2005, 26(5): 41-45.
- [6] 吕其兵,戴 虹,谭克利,等. 基于 BP 人工神经网络的钢轨交流闪光焊焊接接头质量预测[J]. 焊接学报, 2005, 26(5): 65-68.

作者简介: 白世武,男,1959 年出生,博士研究生,高级工程师。主要从事金属材料检测与分析领域的研究工作。发表论文 20 余篇。

Email: bsw2557@126.com