

控制其含量在 ASME 标准规定的 0.010% ~ 0.040% 范围的中偏下限含量可得到强度与韧性的最佳配合。

参 考 文 献

- [1] 黎国磊. 加氢反应器技术的又一进步——新 Cr-Mo 钢材的开发[J]. 石油化工设备技术, 1997, 18(2)
- [2] 薛春芳, 王新华, 辛义德. 含铌微合金钢强化机理[J]. 金属热处理, 2003, 28(5)
- [3] 郭建. 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢的组织与性能[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2004.

- [4] 韩孝永. 铌、钒、钛在微合金钢中的作用[J]. 宽厚板, 2006, 12(1)
- [5] 杨春楣, 胡贻苏, 辛义德. 含 Nb-V 高强度钢强韧化机理研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1998, 21(6)

(收稿日期 2006 03 01)

作者简介: 王小刚, 1980 年出生, 在读硕士研究生, 研究方向为焊接材料开发及工艺编制。

Nb 对 690 镍合金带极堆焊金属结晶裂纹的影响

机械科学研究院哈尔滨焊接研究所(150080) 薄春雨 杨玉亭 李向阳 周世峰

摘要 采用横向可调拘束方法, 研究了典型合金元素 Nb 对 690 镍合金带极堆焊金属结晶裂纹的影响。试验结果表明: 随着 Nb 含量的增加, 690 堆焊金属的开裂临界应变减小, 最大裂纹长度增大, 临界应变速率下降, 结晶裂纹敏感性增大。金相分析表明, 随 Nb 含量的增加, 奥氏体晶界变宽, 晶界富 Nb 第二相数量增多, 在 Nb 含量大于 2.0% 的材料中, 第二相的晶界偏聚甚至诱发了二次裂纹。

关键词: Nb 690 镍合金 结晶裂纹 横向可调拘束试验

EFFECT OF NB ON WELDING SOLIDIFICATION CRACKING OF 690 NICKEL ALLOY SURFACING METAL

Harbin Welding Institute Bo Chunyu, Yang Yuting, Li Xiangyang, Zhou Shifeng

Abstract The effect of Nb on solidification cracking resistance of 690 nickel alloy surfacing metal was researched by trans-varestraint test. When the content of Nb increases, the minimum cracking strain and the critical strain for temperature drop decreases, while the maximum cracking length increases. The results show that solidification cracking susceptibility increases when the content of Nb increases. Metallographic analysis and SEM results show that the width of austenite grain boundary and the quantity of precipitated Nb-rich phase increase with the content of Nb increasing. When the content of Nb increases to higher than 2.0%, the segregation of Nb in grain boundary even lead to a secondary cracking.

Key words: Nb, 690 nickel alloy, solidification cracking, trans-varestraint test

0 前 言

690 合金是美国、日本、法国在 20 世纪 80 年代联合开发的镍基材料, 被作为最佳耐应力腐蚀材料推广应用。目前, 国内使用的 690 体系材料主要依靠进口。在 690 体系材料焊接过程中, 热裂纹是较为严重和多

发的问题之一, 其中, 在 690 焊带堆焊过程中, 结晶裂纹是最为敏感的热裂纹问题。在 690 合金的成分体系中, Nb 作为稳定化元素, 是提高其抗晶间腐蚀性能的最佳选择; 但同时, Nb 的加入可能导致 690 体系材料焊接结晶裂纹敏感性增大。如何合理地 在 690 体系材料中添加 Nb, 以保证其抗裂性能的最优化, 是 690 体

系材料研制的关键。文中结合目前 690 焊带的发展现状,设计了不同 Nb 含量的 690 焊带,对带极堆焊金属进行抗结晶裂纹性能试验。采用电子显微镜观察熔敷金属的金相组织;采用扫描电镜观察裂纹试样断口,对典型区域拍摄照片并进行电子能谱分析。通过上述试验获得具有最优抗裂性的 690 焊带,为实现该类焊接材料的工程化应用提供实验依据。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

母材试板采用 Q235A 钢板,化学成分如表 1 所示,试板形状和尺寸如图 1a 所示。试验焊带经真空冶炼、

轧制,规格 30 mm × 0.5 mm,钢带的化学成分范围如表 2 所示,其中的 Nb 含量分别固定在低、中、高三个水平。试验焊剂采用哈尔滨焊接研究所自行研制的 SJ121 电渣型烧结焊剂。堆焊设备采用 LINCOLN IDEALARE DC1500 电焊机 + 自行研制堆焊机头,焊接工艺参数如表 3 所示,每种材料堆焊 8 块试板(分别对应抗裂性试验中施加的不同应变变量),每块试板堆焊 3 层。堆焊完成并经机械加工后的试板形状和尺寸如图 1b 所示。

1.2 试验方法

速率采用横向可调拘束试验方法,该方法是国际上公认的定量评定材料结晶裂纹敏感性的最佳试验方

表 1 Q235A 钢板化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
0.15	0.13	0.38	0.016	0.027	0.014	0.012	0.016	余量

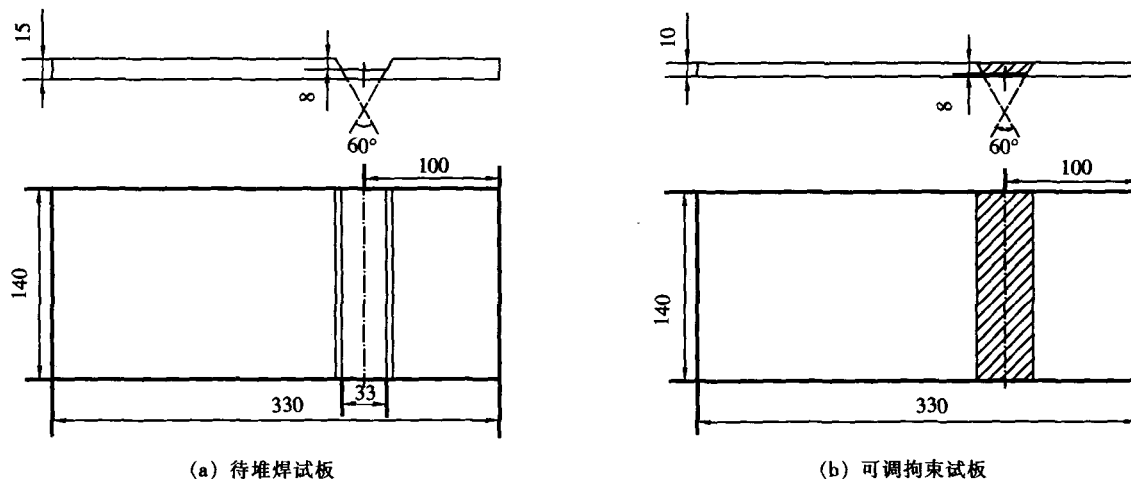


图 1 试板形状与尺寸示意图

表 2 690 钢带化学成分 (%)

项目	Ni	Fe	Cr	Mn	Nb	C	Si	S	P	其他
HD1	余量	9.0 ~ 11.0	28.5 ~ 31.5	3.0 ~ 4.0	0.29	≤0.030	≤0.20	≤0.010	≤0.010	<0.5
HD2	余量	9.0 ~ 11.0	28.5 ~ 31.5	3.0 ~ 4.0	1.86	≤0.030	≤0.20	≤0.010	≤0.010	<0.5
HD3	余量	9.0 ~ 11.0	28.5 ~ 31.5	3.0 ~ 4.0	2.79	≤0.030	≤0.20	≤0.010	≤0.010	<0.5

表 3 带极堆焊工艺参数

焊接电流	堆焊电压	焊接速度	送带速度	焊剂厚度	层间温度
I/A	U/V	$v/(mm \cdot min^{-1})$	$v_{送}/(mm \cdot min^{-1})$	δ/mm	$T/^\circ C$
500	25	150	1 016	25 ~ 30	<150

法^[1,2]。横向可调拘束试验中,临界应变 ε_{\min} 、最大裂纹长度 MCL 分别可用来表征试验材料的抗裂纹萌生能力、抗裂纹扩展能力,而临界应变速率 CST 则综合表征材料在整个焊接温度场内的塑性储备情况,体现了材料抵抗结晶裂纹的综合能力。故采用 CST 作为评定判据,同时辅以 ε_{\min} 和 MCL 作为参考依据。

试验在哈尔滨焊接研究所自行研制的 HHRL-1 型可调拘束试验机(图 2)上进行,试验过程如图 3 所示:在堆焊金属中心线上自 A 点至 C 点进行 TIG 电弧重熔, TIG 工艺参数见表 4。当电弧抵达 B 点时使试样快速形变,直至与弯曲模块贴合。冷却后自熔合线测量出最大裂纹长度。再次重熔焊缝,通过 W/RE5-W/RE20 热电偶采集焊缝中心热循环曲线。将最大裂纹

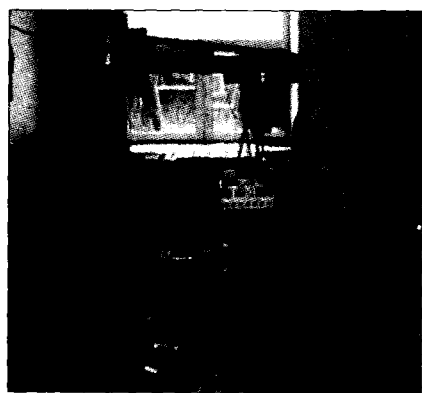


图 2 HHRL-1 型可调拘束试验机

长度与热循环曲线相结合,即可求出临界应变速率 CST。

在试验熔敷金属上切取大小适中的试样,经砂纸仔细磨光并抛光,采用光学电子显微镜,对试验熔敷金属显微组织进行金相检验,拍摄金相照片。

在可调拘束试板上取裂纹断口试样,对试样进行超声清洗,以减少断口污染物对试验结果的影响。试验在 Sirion 场发射扫描电子显微镜上进行。对断口表面进行扫描,拍摄照片;采用电子探针分析典型区域及析出物的成分。

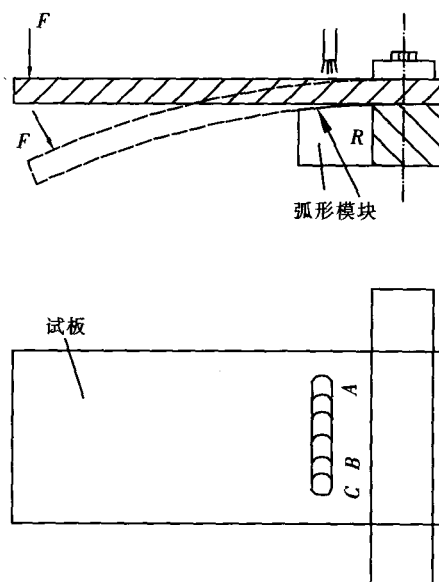


图 3 横向可调拘束试验示意图

表 4 可调拘束试验 TIG 重熔工艺参数

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	焊接热输入 $E/(kJ \cdot cm^{-1})$	弯曲速率 $v_{\text{弯}}/(mm \cdot s^{-1})$
200	13.5	120	13.5	≥ 200

2 试验结果与讨论

2.1 结晶裂纹敏感性评定结果

文中试验材料的 ε_{\min} 、MCL、CST 与 Nb 的关系分别如图 4~6 所示。由试验结果可以看出,HD1、HD2 的抗裂纹萌生能力、抗裂纹扩展能力相对较好,处于同一水平或变化微小,均优于 HD3;HD1、HD2 的综合抗裂能力也得到相同的结果。上述试验结果表明,就 690 体系焊材而言,Nb 含量小于 2.0% 时的抗裂能力显著优于 Nb 含量大于 2.0% 的抗裂能力。

2.2 熔敷金属显微组织

690 体系材料的结晶组织为奥氏体组织,柱状晶晶界及晶内分布着数量不一的第二相^[3]。在 690 合金的焊接中,铌对低熔点相形成的影响很大,是引起焊缝金属结晶裂纹的重要因素^[4]。Nb 在 600℃ 时能和 S 结合成 NbS₂,在 500℃ 时能与 P 结合成 NbP^[5]。另外,对于 S、P 含量很低、含 Nb 的奥氏体镍基合金焊接时, Ni 易与 Nb 结合形成低熔点 Ni-Nb 相(熔点 1 175℃)。铌在奥氏体中溶解度要低于其在铁素体中的溶解度。1 300℃ 时, Nb 在奥氏体中的溶解度仅为 1.0%^[6]。因

而在奥氏体结晶过程中, Nb 及其化合物易偏析于晶

界, 造成本来很平直光滑的晶界性能进一步恶化。因为 γ/γ 晶界表面极易被低熔点液相所润湿, 致使在 γ/γ 整个晶界上形成连续的低熔点液膜, 晶界塑性进一步降低, 裂纹很容易在 γ/γ 晶界启裂, 而光滑平直的晶界又为裂纹扩展提供了最有利的途径。

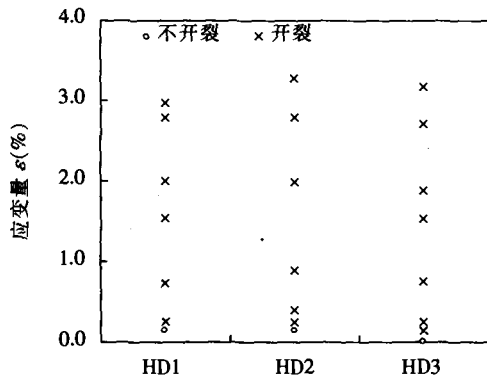


图4 ϵ_{min} 与 Nb 的关系

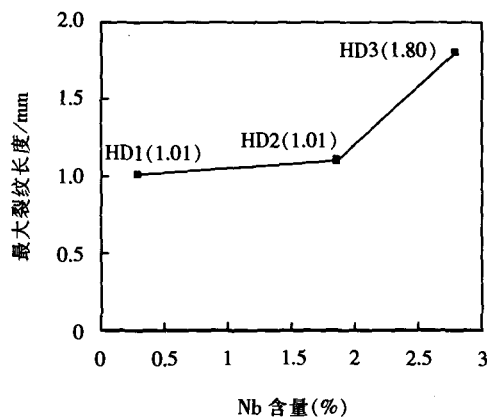


图5 MCL 与 Nb 的关系

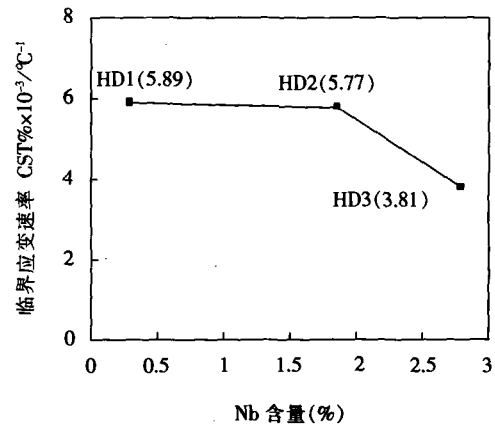
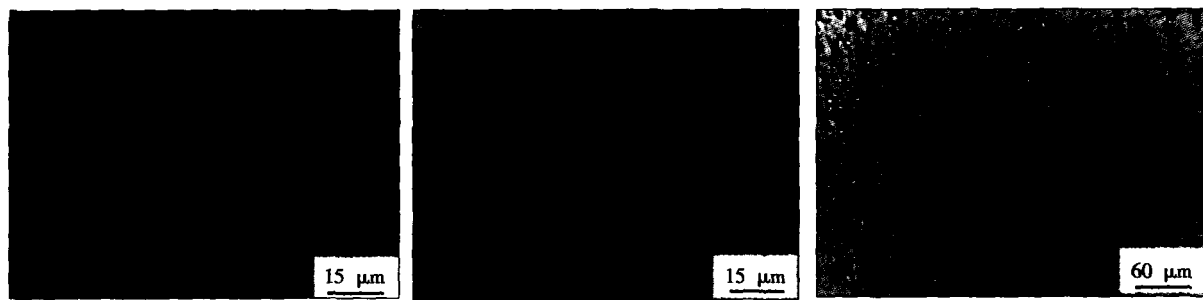


图6 CST 与 Nb 的关系

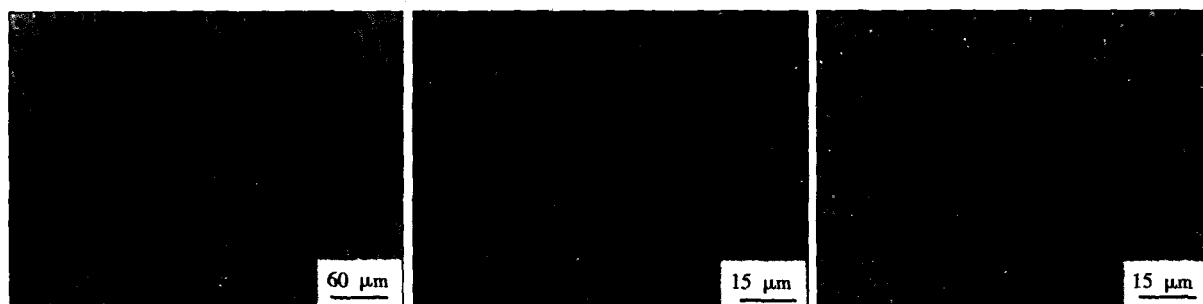
图7所示为各试验材料的显微组织照片。从图中可以发现: HD1 的晶界宽度很小, 晶界及晶内仅有少量析出物(图7a); HD2 晶界宽度相对较宽, 晶界上分布有较多的链状析出物, 晶内析出物较少(图7b); HD3 中, 大量的链状析出物密布于晶界, 并在部分区域扩展至晶内区域(图7c)。



(a) HD1 晶界析出物

(b) HD2 晶界析出物

(c) HD3 晶界析出物



(d) HD3 晶界二次裂纹

(e) 晶内块状析出物

(f) 晶内链状析出物

图7 试验材料显微组织

上述结果表明,随 Nb 含量的增加,690 体系材料中的第二相析出量逐渐增多,这种趋势尤以柱状晶界处最为显著,部分链状析出物大量偏聚区域,诱发了二次裂纹,裂纹宽度 50 μm 左右(图 7d)。

观察中还发现,晶内部分区域有块状及链状析出物存在于晶内,块状析出物直径 2~3 μm ,链状析出物长约 15~20 μm ,宽约 3~4 μm ;随 Nb 含量增加,析出物的数量呈增多的趋势,这种现象在一定程度上代表了晶内偏析的程度。Nb 含量较少时,晶内偏析并不严重(图 7e);Nb 含量增至 2.0% 以上时(图 7f),偏析相对严重,密布于整个观察区域。

2.3 裂纹断口形貌

图 8 所示分别为各试验材料高温段和低温段裂纹断口照片。由照片可见,HD1 裂纹断口高温段可见沿柱状晶方向分布的鹅卵石花样,表面未见析出物或共晶花样;低温段枝晶间结晶已完成,晶粒表面局部可见少量的共晶花样;HD2 裂纹断口高温段呈尺寸较小的

鹅卵石花样,未见共晶花样或析出物;低温段仍呈鹅卵石花样,且部分表面覆盖着一层白色薄膜。HD3 裂纹断口高温段表面有块状突起(尚未形成鹅卵石花样)。块状突起间有大量的点状析出物;低温段鹅卵石花样基本消失,晶粒表面布满共晶花样。对断口表面典型形貌进行能谱分析(表 5)发现,随着 Nb 含量的增加,断口表面共晶物的 Nb 显著增加。

综合比较上述结果可知:当 Nb 含量较低时,断口高温段形成鹅卵石花样较早,低温段起伏度较低,呈较平坦的形貌,表明结晶完成相应较快,无残留液体;当 Nb 含量较高时,在整个断面上都具有起伏特征,高温段鹅卵石花样形成相对较晚,低温段的痕迹也能较为清晰地辨认,Nb 含量越高,共晶形貌越明显,共晶花样的数量显著增多。试验结果证明,富 Nb 共晶物在晶界的形成是诱发 690 体系材料结晶裂纹的主导因素,Nb 含量越高,裂纹敏感性越大。

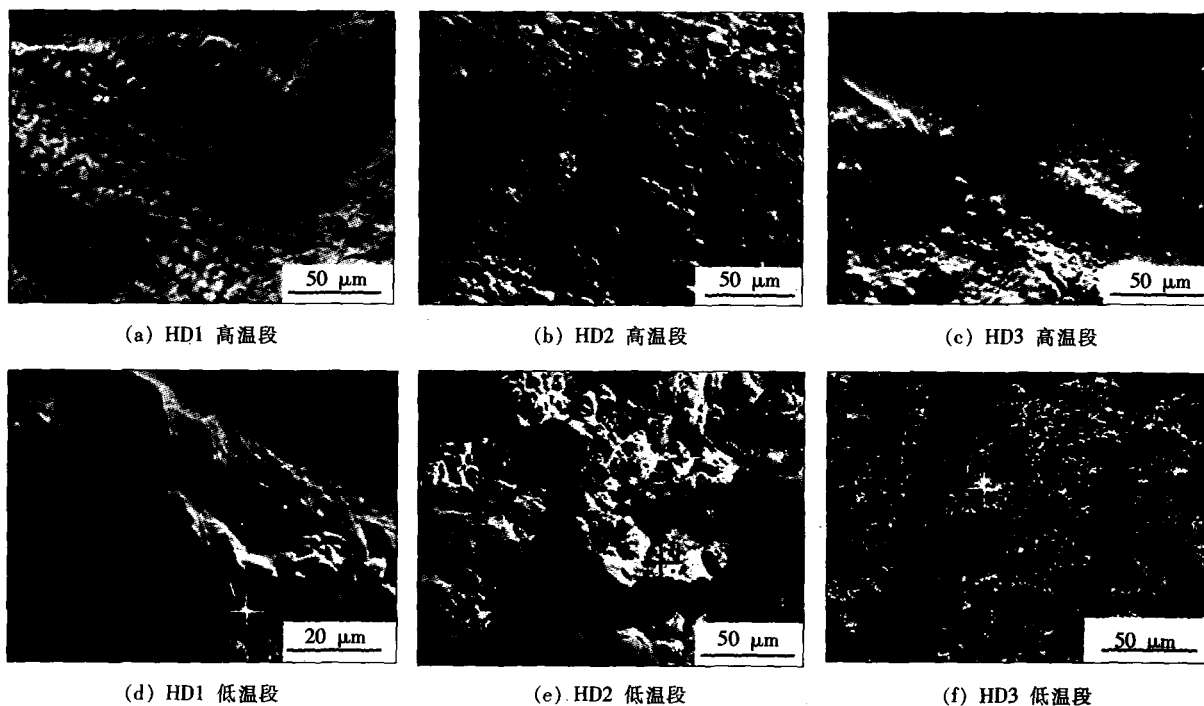


图 8 试验材料裂纹断口照片

表 5 断口表面典型形貌能谱分析结果(%)

位置	C	O	Si	Nb	Cr	Mn	Fe	Ni
A	9.11	6.06	0.96	3.02	21.16	4.07	10.60	45.02
B	—	3.68	0.82	8.40	25.45	4.73	10.24	46.68
C	5.15	6.04	1.45	27.67	13.84	3.01	5.17	37.68

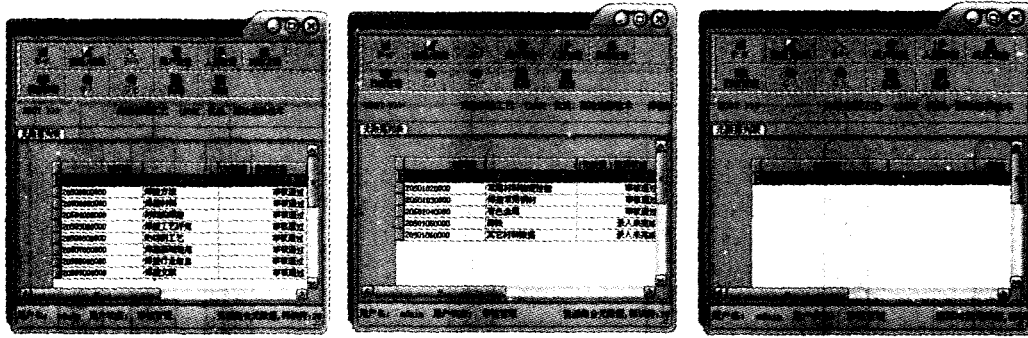


图5 从资源集合到资源对象逐级进行元数据录入

参 考 文 献

- [1] 程津培. 科学数据共享 - 当代科技界的战略选择[J]. 中国基础科学, 2004(4): 3-5.
- [2] 黄鼎成. 科学数据共享的理论基础与共享机制[J]. 中国基础科学, 2003(2): 22-27.
- [3] 李丽亚, 杜洪敏, 宋 扬. 对我国工程技术领域科技数据共享的思考[J]. 中国科技论坛, 2004(1): 102-105.
- [4] 闫华文. SQL Server 2000 与 ASP Web 数据库编程技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001.
- [5] 范 敏, 朱福成, 吴勇军. 一种基于元数据的 Web 数据共享技术[J]. 绵阳师范学院学报, 2004, 23(2): 34-40.
- [6] 冯 涛, 袁占亭, 余冬梅, 等. 基于元数据的网格应用系统研究[J]. 计算机工程与科学, 2003(2): 71-75.
- [7] 朱星明, 张行南, 李发文, 等. 水利科学数据共享元数据理论的应用探讨[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 946-949.
- [8] 徐久龄, 肖惠珍. 元数据的研究[J]. 情报理论与实践, 2003, 26(2): 163-166.
- [9] Cathro W. 袁 芳, 苑二坡. 元数据研究概述[J]. 现代情报, 2004(4): 195-198.
- [10] 张 婷. 浅析元数据在特色数据库建设中的应用[J]. 情报杂志, 2006(1): 136-138.

(收稿日期 2006 03 01)

作者简介: 陈 燕, 1980 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为新型无铅钎焊材料与工艺, 发表论文 4 篇。

[上接第 45 页]

3 结 论

综合横向可调拘束试验、显微组织金相试验及裂纹断口扫描电镜试验对 690 体系焊带堆焊结晶裂纹的研究结果, 可得到如下结论:

(1) 当 Nb 含量小于 2.0% 时, 690 体系材料的抗结晶裂纹性能相对较好; 当 Nb 含量大于 2.0% 时, 该材料的结晶裂纹敏感性显著增大。

(2) 随着 Nb 含量的增加, 奥氏体组织柱状晶界、枝晶间及晶内低熔点第二相的数量增加, 晶界宽度增大, 富 Nb 的第二相熔点很低, 其在晶界的偏聚将显著降低晶界的塑性储备。

(3) Nb 含量较高时, 结晶过程开始和结束均相对较晚, 即实际结晶开始及结束的温度更低, 裂纹断口表面起伏增大, 共晶花样数量更多更明显。

参 考 文 献

- [1] Savage W F, Lundin C D. The vareststraint test[J]. Welding Journal, 1965, 44 (10): 433s-442s.
- [2] 董祖珏, 潘永明, 王洪亮, 等. 焊接凝固裂纹评价技术的研究[R]. 哈尔滨: 哈尔滨焊接研究所, 2001.
- [3] Wu Weite, Tshi C H. Hot cracking susceptibility of fillers 52 and 82 in alloy 690 welding[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 30A(2): 417-425.
- [4] 路文江, 中尾嘉邦. 镍基高温合金焊接凝固裂纹敏感性研究[J]. 甘肃工业大学学报, 1989(12): 31-37
- [5] 陈伯蠡. 焊接冶金原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [6] Erich Folkhard. 不锈钢焊接冶金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

(收稿日期 2006 03 01)

作者简介: 薄春雨, 1981 年出生, 在读硕士研究生。主要从事不锈钢及镍基焊接材料的研究。