

铜在高强度手工焊焊缝金属中的析出行为

薛 钢, 魏金山, 张俊旭, 张京海

(洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471039)

摘要: 研究了高强度手工焊焊缝金属中铜的析出行为。研究结果显示, 单道焊焊缝金属中铜难以析出, 在多道焊道间热影响区有 ϵ -Cu 析出颗粒的存在, 但析出颗粒尺寸与分布存在不均匀性。

关键词: 铜; 焊缝金属; 析出

中图分类号: TG444⁺.1 文献标识码: A

在一些时效强化钢中, 铜是一种重要的强化元素, 在一定温度和时间进行时效热处理, 可以使过饱和的铜在 α -Fe 中弥散析出, 从而起到很好的强化作用, 有利于降低碳含量, 改善焊接性能^[1~3]。理论上讲铜在钢中的优势应能在焊缝中得到体现, 在多道焊中, 后继焊道对前面焊道存在一定的热影响作用, 可以起到类似的时效热处理作用, 许多研究人员对不同焊接条件下铜对钢焊缝金属强韧性的影响进行了研究, 取得了很大的进展^[4~7], 由于这种影响和作用与焊缝金属中铜的析出行为有关, 在不同的焊接条件下铜的析出行为存在差异, 最终的研究结论也存在分歧。目

前对焊缝金属中铜的析出行为的研究报道较少, 因而研究焊缝金属中铜的析出行为是十分必要的。

1 试验材料和方法

试验用手工焊条为高强度结构钢焊条, 采用药皮过渡的方式加入一定量的铜。

熔敷金属按 CB/T 3750—1995《船用金属材料试样制备技术要求》焊制和取样, 底板为 10CrNi3MoV 钢。焊条焊前于 450℃进行 3h 的高温烘焙, 随炉冷却到 100℃保温待用。焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1 焊接工艺参数

电源	电流/A	电压/V	焊接速度/mm·s ⁻¹	预热/层间温度/℃
直流反接	170	25	2.5	100~120

对熔敷金属进行成分分析; 在光学显微镜下对最后焊道和中间焊道的显微组织进行分析, 试验设备为 NEOPHOT 21 金相显微镜, 腐蚀试剂采用 4% 硝酸酒精溶液; 把经过电解液双喷和离子减薄获得最后焊道和中间焊道区域的薄膜试样在 Philips CM200 透射电镜下进行组织形貌和析出物观察, 运用选区电子衍射对析出物进行分析。

2 试验结果

2.1 熔敷金属成分

熔敷金属主要合金元素的含量如表 2 所示, 可见, 铜含量接近美国舰船用高强度结构钢 HSLA-100 中的铜含量^[1], 超过了铜在 α -Fe 中的平衡固溶度。

表 2 熔敷金属化学成分(w)

C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	%
0.045	0.00585	0.0098	0.25	1.5	2.7	0.5	0.6	1.4	

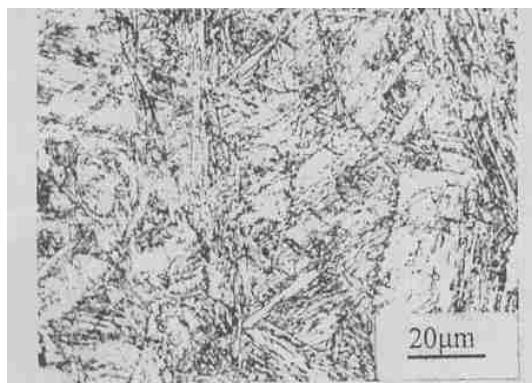
收稿日期: 2004-09-21

作者简介: 薛钢, 男, 1978 年生, 洛阳船舶研究所在读研究生, 研究方向为船用高强度结构钢焊接材料。

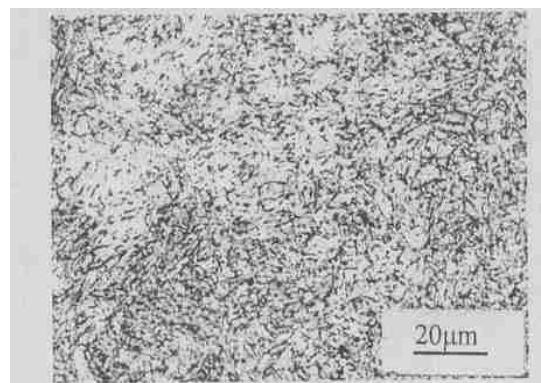
2.2 金相组织

对熔敷金属最后焊道和中间焊道区域进行金相组织分析,结果如图 1 所示。最后焊道区域的

组织以板条马氏体和贝氏体组织为主,中间焊道区域的组织较为细小,从形貌上看,与粒状贝氏体组织相似,局部区域为针状铁素体组织。



a) 最后焊道区域



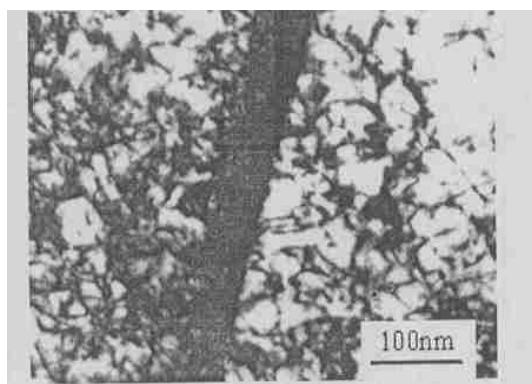
b) 中间焊道区域

图 1 熔敷金属显微组织

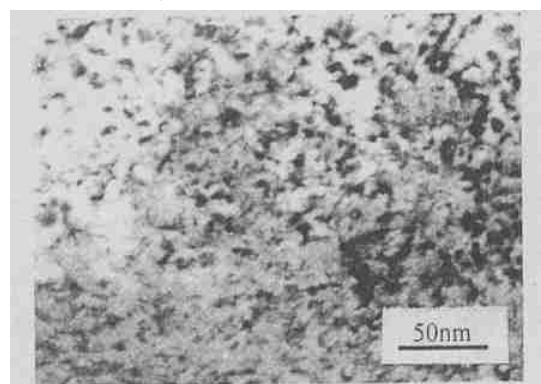
2.3 TEM 分析

采用 TEM 对熔敷金属不同区域的精细结构进行了分析,结果如图 2、图 3 所示。图 2a)表明,最后焊道区域板条马氏体的精细结构为高密度缠

结的位错,板条间存在残余奥氏体,由于最后焊道的情况大致等同于单道焊,因而在本试验采用的焊接条件下,单道焊焊缝金属的精细结构为高密度位错。图 2b)表明中间焊道区域弥散分布着大



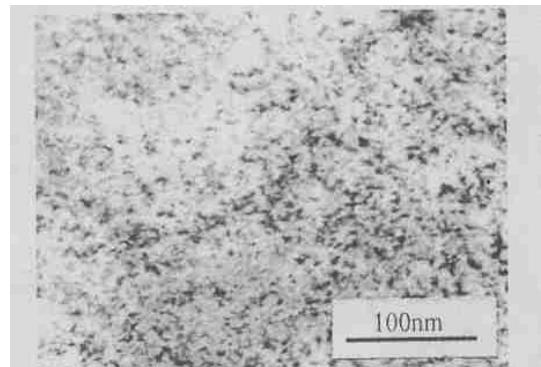
a) 最后焊道区域



b) 中间焊道区域

图 2 熔敷金属精细结构

量的析出颗粒。图 3a)、图 3b)显示了析出颗粒大小的不均匀性,颗粒直径约为几纳米至几十纳米。部分较粗大的析出颗粒的衍射花样见图 3c)。对衍射花样进行标定,确认为面心立方结构的 ϵ -Cu 相^[8,9],这是第一次利用衍射花样直接确认了焊缝金属中 ϵ -Cu 沉淀颗粒的存在。衍射花样呈环状,说明这些细小的颗粒已经从基体中脱溶出来,晶体取向无规律性,与基体无确定的位向关系^[9],这有别于以前的一些研究结果^[10],这些研究者认为 ϵ -Cu 相与 α -Fe 基体保持 Kurdjumov-Sachs 位向关系。



a) 细小的沉淀物(明场)

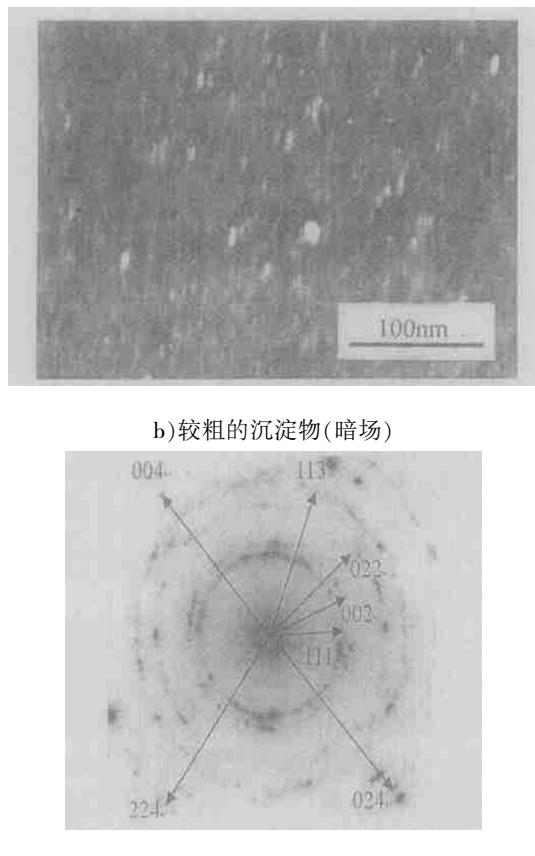


图 3 铜的析出物

3 分析与讨论

由 Fe-Cu 相图可知^[11, 12], 铜在钢中的溶解度随着温度的降低而降低, 在奥氏体中的溶解度较大, 在 1193°C 时, 其溶解度可达 10%, 在 α -Fe 中溶解度相对较小, 室温下溶解度仅为 0.35%。由于 Cu 和 Fe 原子半径差别不大, 铜在 α -Fe 基体中析出引起的应变能较小, 只有界面能成为形核的门槛, 因而铜在 α -Fe 基体中比较容易析出^[7]。从铜沉淀强化钢的研究来看^[13~16], 对铜含量超过室温下溶解度的钢在 400°C 以上至奥氏体转变温度之间进行一定时间的时效热处理, 过饱和的铜能在 α -Fe 基体中沉淀析出。

在多道焊中,后继焊道对前面焊道有着热作用,在一定程度上能起到时效热处理的作用,有利于铜的析出。由于各个焊道经历的热循环作用比较复杂,为了分析问题的简便性,仅研究图4所示的多道焊示意图中焊道1中铜的析出(经实际测量,本试验焊接条件下中间焊道焊肉厚度约为3.

5mm),且假设焊道1仅受焊道2、3、4、5的热循环作用。对于图中虚线所示自上而下各点所经历的热作用过程,根据焊接热循环温度场分布与传热理论^[17,18],利用计算机软件Matlab计算得出在各次热循环中各点所能达到的峰值温度分布^[19],如图5所示。该图显示,在焊道2的热作用下,焊道1所有区域峰值温度都高于铜的析出温度;而在焊道5的热作用下,焊道1中各个区域所能达到的最高温度已低于400°C,因此,对于研究焊道1中铜的析出行为,在当前假设条件下,主要考虑焊道2、3、4对焊道1的热循环作用。图6所示为在焊道2、3、4的热循环作用下,焊道1中各个区域在经历各种不同峰值温度时铜的析出、溶解或粗化行为示意图。该图显示,从熔点温度冷却到室温时,过饱和的铜存在析出的可能;在后继焊道的热作用下,峰值温度高于奥氏体化温度的区域发生了完全重结晶,原先析出的沉淀物由于在 γ -Fe和 α -Fe中溶解度的不同而发生一定程度的溶解,在随后的冷却过程中又重新析出;峰值温度介于奥氏体化温度和400°C之间的区域,原先析出的粒子会发生Ostwald熟化而有一定程度的长大,在到达峰值温度后的冷却过程中,又有部分新的粒子从基体中析出。

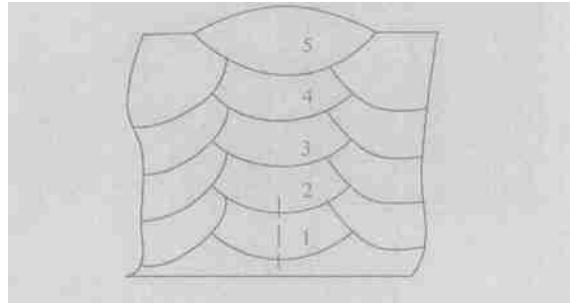


图 4 多道焊示意图

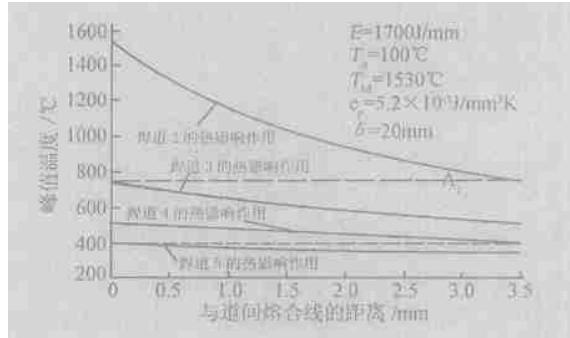


图 5 焊道 1 所受热循环

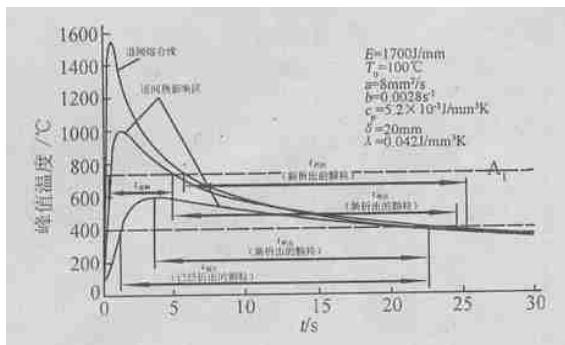


图 6 焊道 1 中铜的析出

为了进一步说明铜的析出, 选择两个典型的位置进行分析, 分别为焊道 1 中距离焊道 1 和 2 的道间熔合线 0.75mm 和 3.4mm 的区域, 两者经历的热循环如图 7 所示。焊缝金属从熔池冷却下来时, 在析出温度区间的停留时间较短, 因而析出较为困难。最后焊道区域未发现有铜的析出颗粒, 这也说明了在单道焊情况下铜难以沉淀析出; 在后继焊道的热作用下, 当满足析出温度条件时, 过饱和的铜继续其析出行为, 这相当于延长了析出时间, 使析出程度得到提高, 由于不同区域经历析出温度区间的时间不同, 从而析出程度不尽相同, 因而析出颗粒的尺寸与分布存在不一致性, 中间焊道区域 TEM 分析结果就说明了这一点。

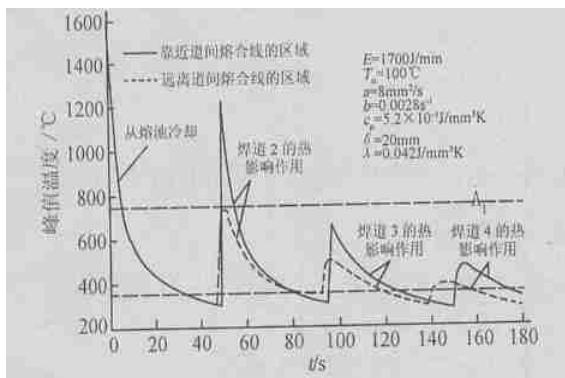


图 7 不同区域铜的析出

4 结论

(1) 在手工焊试验条件下, 本次试验含量的铜难以在单道焊焊缝金属中沉淀析出。

(2) 在多道焊中, 道间热影响区中过饱和的铜能发生析出, 但析出颗粒尺寸与分布存在不均匀性。

参考文献:

- Czyryca E J. Advances in high strength steels technology for naval hull construction [J]. Key Engineering Materials, 1993, 84~85: 491~520.
- Lis A K, Lis J, Jeziorski L. Advanced ultra-low carbon bainitic steels with high toughness [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 64: 255~266.
- Dhua S K, Ray Amitava, Sarma D S. Effect of tempering temperatures on the mechanical properties and microstructures of HSLA-100 type copper-bearing steels [J]. Materials Science and Engineering, 2001, A318: 197~210.
- Liu S. Arc welding consumables; covered and cored electrodes—a century of evolution [J]. Trends in Welding Research ASM Intl/AWS, 1998: 505~516.
- Wang W, Liu S. Alloying and microstructural management in developing SMAW electrodes for HSLA-100 steel [J]. Weld Journal, 2002, 81(7): 132s~145s.
- Es-Souni M, Beaven P A, Evans G M. Microstructure and mechanical properties of Cu-bearing MMA C-Mn weld metal [J]. WRA, 1991, XXXVII(2/3): 84~95.
- Ramirez J E, Liu S, Olson D L. Dual precipitation strengthening effect of copper and niobium in high strength steel weld metal [J]. Materials Science and Engineering, 1996, A216(1~2): 91~103.
- Fourlaris G, Baker AJ, Papadimitriou G D. Microscopic characterisation of ϵ -Cu interphase precipitation in hypereutectoid Fe-C-Cu alloys [J]. Acta Metall, 1995, 43(7): 2589~2604.
- 李树棠. 金属 X 射线衍射与电子显微分析技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980. 229, 257~259.
- Speich G R, Oriani R A. The rate of coarsening of copper precipitation in an alpha-iron matrix [J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1965, 233(4): 623~631.
- Altpeter I, Dobmann G, Katerbau K H, et al. Copper precipitation in 15 NiCuMoNb5 (WB36) steel: material properties and microstructure, atomistic simulation, and micromagnetic NDE techniques [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001 (206): 337~350.
- 项程云. 合金结构钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社,

1999. 160~174.
- [13] Wilson A D, Hamburg E G, Colvin D J. Properties and microstructures of copper precipitation aged plate steels[J]. ASM International Metals Park, 1988, 259 ~275.
- [14] Gagliano M S, Fine M E. precipitation kinetics of niobium carbide and copper in a low carbon [J]. Chromium-free Steel, 2001, 25(2):207~216.
- [15] 张永权, 刘天军, 杨才福. 铜的时效行为及其对06NiCuCrMoNb钢力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(4):41~45.
- [16] 王学敏, 周桂峰, 杨善武, 等. 含铜低合金高强钢的时效行为[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(5):40~45.
- [17] 拉达伊 D. 焊接热效应——温度场、残余应力、变形 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 41~53.
- [18] 牛济泰. 材料和热加工领域的物理模拟技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 57~77.
- [19] John Penny, George Lindfield. Numerical Methods Using Matlab (Second Edition) [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2000. 2~38.

Precipitation of Copper in High Strength SMAW Weld Metal

XUE Gang, WEI Jin-shan, ZHANG Jun-xu, ZHANG Jing-hai

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: The precipitation of copper in high strength SMAW weld metal (contain Cu 1.48%) was investigated by use of TEM. It is manifested that in single pass weld metal there are no copper precipitations, but in heat affected zone there are some ϵ -Cu precipitations and the distribution and size of the precipitations are not uniform.

Keywords: Copper; Weld Metal; Precipitation

(上接第4页)

本符合奥金格经验公式, 但550°C时其系数需重新总结。

参考文献:

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

- [2] 颜明皋. 高技术新材料要览—疲劳与断裂 [M]. 北京: 中国科技出版社, 1993.
- [3] 《金属机械性能》编写组. 金属机械性能 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.
- [4] 曼森 S S. 金属疲劳损伤 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1976.

An Investigation on Fatigue Behavior of 07Cr12NiMoVNb Heat-resistant Steel

CHEN Ji-zhi¹, WANG Jia-min¹, LIU Jun¹, SHU Xing-lou², WANG Wei-ying²

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China;

2. Naval Representative Office Resident at Wenzhou Area, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Rotating-beam fatigue tests of 07Cr12NiMoVNb steel were carried out at room temperature and 550°C. The results indicated that the damage behavior of the steel samples with different grain size is similar. The relation between room temperature fatigue strength and ordinary tensile strength is in accordance to ojuger's experiential formula. High-temperature fatigue strength is related to ordinary tensile strength, but the linear coefficient is different from that of room temperature fatigue. Grain size has less influence on fatigue strength at room temperature. Yet at 550°C, the steel with fine grain exhibits higher fatigue strength which is contrary to creep behavior. For creep behavior, the steel with coarse grain exhibits higher strength.

Keywords: Heat-resistant steel; Fatigue property; Grain size