

一种铜沉淀强化铁素体钢焊接热影响区性能研究

张毅斌

(海军驻鞍山钢铁集团公司军事代表室 辽宁 鞍山 114021)

摘 要: 通过 Gleeble 热模拟试验,研究了一种低碳铜沉淀纳米相强化铁素体钢焊接热影响区组织及性能,测试了试验钢粗晶区焊接 CCT 曲线。结果表明,试验钢焊接粗晶区组织主要为贝氏体,其它区域均为铁素体;铜沉淀纳米强化相随热循环不同而发生不同演变,从而引起热影响区性能变化。试验钢粗晶区冲击功及硬度与基体相当,细晶区、临界区及亚临界区冲击功均高于基体,有一定软化现象。在试验 $t_{8/5}$ 范围内,试验钢粗晶区对焊接热输入较为敏感,随 $t_{8/5}$ 的增加,组织粗化,并产生较多的粒状贝氏体组织,冲击功降低明显。

关键词: 铜沉淀;热影响区;冲击功;显微硬度

中图分类号: TG142.1 文献标识码: A

DOI:10.19515/j.cnki.1003-1545.2016.05.006

Properties of Welding Heat Affected Zone of a Cu Precipitation Strengthened Ferrite Steel

ZHANG Yibin

(Military Representative Office of the Navy in Anshan Iron and Steel Group Corporation, Anshan 114021, China)

Abstract: By Gleeble simulation tests, microstructures and properties of the heat affected zone (HAZ) for a low carbon Cu nano-precipitation strengthened ferrite steel are investigated. The results show that the microstructures of HAZ are ferrite except for those in coarse-grain HAZ which are dominated by bainite plus granular bainite. Cu nano-precipitation changes to the thermal cycle course, affecting the properties of HAZ. The coarse-grain HAZ exhibits comparable impact energy and microhardness to the unaffected base metal, while the impact energy in other HAZ regions are higher than the base metal and a certain loss of microhardness is observed as a result of dissolution of the Cu precipitates after the weld thermal cycle. The coarse-grain zone is sensitive to heat input in the range of heat inputs investigated in the study. With the $t_{8/5}$ increasing, the microstructure coarsens and more granular bainites are produced and the impact energy decreases obviously.

Keywords: Cu precipitation; heat affected zone; impact energy; microhardness

船体结构钢要求具备良好的强韧性匹配,并且要有好的焊接性。传统的高强度船体结构用钢采用调质工艺获得低碳回火马氏体组织,使其达到高强度和高韧性,钢中通常需要添加较高含量的 Ni、Cr、Mo 等合金元素,钢的碳当量较高,焊接工艺复杂苛刻。近年来,新型高强度低合金船体结构钢的开发越来越受到重视,如何兼顾高强度船体钢的强韧性和焊接性,已成为高强度船体结构钢设计的一个关键因素。HSLA 铜时效强化钢通过添加一定含量的铜,时效过程中沉淀析出 ε -Cu 强化相强化基体,弥补降碳带来的强度

损失^[1-3]。低碳含量使得该类钢种在焊接冷却过程中避免产生淬硬组织,表现出较好的焊接性。近年来,一些学者在铜时效沉淀强化钢基础上继续开展研究工作^[4-5],发现在 Ni、Cu 元素的基础上,添加一定含量的 Al 元素,利用 Ni、Cu、Al 元素间的复合作用,可抑制铜沉淀颗粒长大,获得细化的复合铜纳米沉淀相,有效地强化基体,进一步降低合金元素含量,提高焊接性,该类钢种铁素体基体组织即可获得高达 900 MPa 的屈服强度,具有好的发展潜力。本文拟制备一种低碳 Ni-Cu-Al 纳米强化钢,通过 Gleeble 热模拟

收稿日期: 2016-04-28

作者简介: 张毅斌,男,1968 年生,高工,主要从事结构钢及其焊接的研究, E-mail: 007_zyb@163.com。

试验研究试验钢的焊接热影响区组织及性能,考察热输入对粗晶区组织及性能的影响,为该类型钢种的研究和改进提供一定参考。

1 试验材料及方法

试验材料为一种含铜低碳 Ni - Cu - Al 低合金钢,其化学成分(质量分数,%)为: 0.048C, 0.49Si, 0.52Mn, 3.51Ni, 0.63Al, 0.07Nb, 0.013Ti, 0.0011S, 0.0075P。材料由 50 kg 真空感应炉熔炼,钢锭轧制成 30 mm 厚的钢板,轧后喷水冷却。对钢板进行淬火时效处理,钢板热处理后主要力学性能为: 屈服强度 772 MPa, 抗拉强度 825 MPa, 延伸率 22%, 断后伸长率 76%, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功 45 J。对试验钢取样并加工成 $\phi 6\text{ mm} \times 82\text{ mm}$ 的圆棒试样,在 Gleeble - 3500 试验机上进行焊接热循环模拟试验,峰值温度为 $1\text{ }300\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 1 s 后以不同 $t_{8/5}$ 冷却到室温,记录试样冷却过程中膨胀量变化数据,结合试样相转变分析、组织观察,绘制材料的粗晶区焊接 CCT 曲线。另外,通过不同峰值温度、不同 $t_{8/5}$ 参数设置模拟研究不同热影响区和不同热输入时试验钢的组织及性能,试验设置热循环参数如表 1 所示。采用 Leica DMI 5000M 光学显微

镜进行金相组织观察,采用 JEM - 2100 透射电镜进行微观结构及析出相观察;采用 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 71\text{ mm}$ 尺寸试样按相同热循环条件进行热循环试验,对试样进行 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下夏比 V 型缺口冲击试验,测试不同热循环条件下试样的低温韧性。

表 1 试验采用的热循环参数

| 模拟热影响区 | 峰值温度/ $^{\circ}\text{C}$ | $t_{8/5}/\text{s}$ |
|--------|--------------------------|--------------------|
| 粗晶区 | 1 300 | 5、15、60 |
| 细晶区 | 900 | 15 |
| 临界区 | 750 | 15 |
| 亚临界区 | 650 | 15 |

2 试验结果及分析

2.1 粗晶区 CCT 曲线

图 1 为典型 $t_{8/5}$ 条件下试验钢的金相组织,图 2 为试验钢热模拟试验获得的粗晶区焊接 CCT 曲线。结果显示,随 $t_{8/5}$ 增大,试验钢相变温度逐渐升高, $t_{8/5}$ 对试验钢组织影响较大, $t_{8/5}$ 增加,相变温度及组织变化明显。 $t_{8/5} \leq 5\text{ s}$ 时,相变温度低,主要为贝氏体组织; $t_{8/5} > 5\text{ s}$ 后,开始转变为粒状贝氏体,并且随 $t_{8/5}$ 的增大,粒状贝氏体组织逐渐增加。 $t_{8/5} > 60\text{ s}$ 后,组织明显粗化。

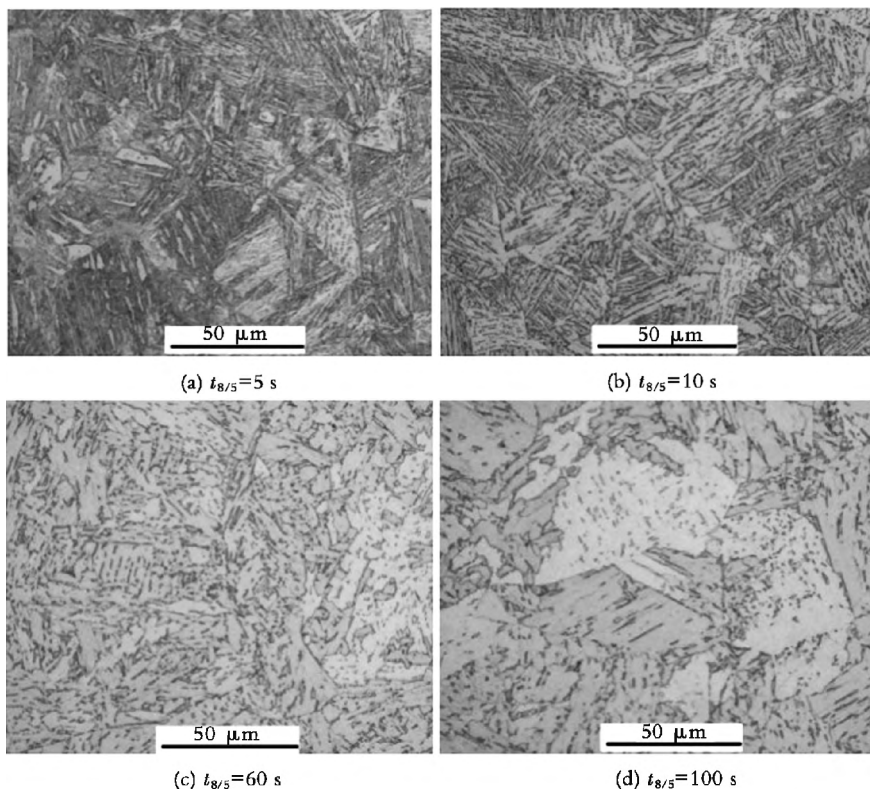


图 1 试验钢不同 $t_{8/5}$ 下金相组织

Fig. 1 Microstructures of tested steel under different simulated $t_{8/5}$

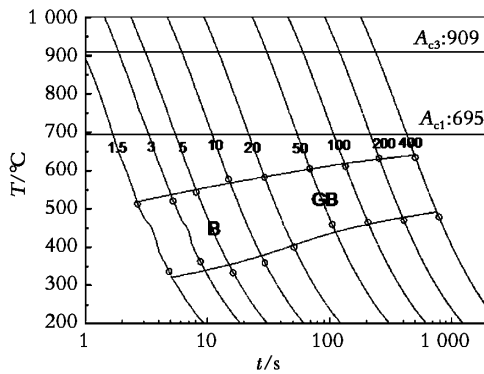


图 2 试验钢粗晶区焊接 CCT 曲线

Fig. 2 The CCT curve for coarse grain zone of tested steel

2.2 热影响区性能

表 2 为试验钢不同 $t_{8/5}$ 下粗晶区低温冲击功。可以看出, $t_{8/5}$ 对冲击性能影响较大, 随 $t_{8/5}$ 增加, 冲击功下降明显, 试验钢在 $t_{8/5} = 5$ s 时, -50 °C 冲击功为 208 J, 当 $t_{8/5}$ 增加到 15 s 时, -50 °C 冲击功下降到 44 J, 说明该钢对热输入较为敏感。结合试验钢的焊接 CCT 图(图 2), 试验钢冲击功下降与组织粗化、形成大量粒状贝氏体有关。表 3 为模拟热影响区不同部位的晶粒度、低温冲击和显微硬度试验结果。结果显示, 试验钢粗晶区冲击功及硬度与基体相当, 细晶区冲击功最高、硬度最低, 细晶区、临界区和亚临界区低温冲击功均高于基体, 并逐渐降低。

表 2 不同热循环后粗晶区试样 -50 °C 冲击韧性 KV_2

Table 2 Toughness of samples under different welding thermal cycle J

| $t_{8/5} = 5$ s | $t_{8/5} = 15$ s | $t_{8/5} = 60$ s |
|--------------------|------------------|------------------|
| 228 283 113 208 | 36 77 19 44 | 13 13 9 12 |

表 3 试验钢模拟热影响区不同部位的晶粒度及性能

Table 3 Grain size grade and properties of different simulated HAZ for tested steel

| 峰值温度 | 晶粒度级别 | -50 °C KV_2 / J | HV10 |
|-------------------|-------|---------------------|--------------------|
| 1 300 °C (粗晶区) | 6.5 | 36 77 19 44 | 271 279 274 275 |
| 900 °C (细晶区) | 11.5 | 261 270 265 265 | 231 228 228 229 |
| 750 °C (临界区) | 11.0 | 170 181 177 176 | 239 237 237 238 |
| 650 °C (亚临界区) | 11.0 | 155 96 33 95 | 280 280 284 281 |
| 基体 | 11.0 | 54 48 34 45 | 284 282 280 282 |

2.3 微观组织及析出相

图 3 为试验钢基体组织、析出相形貌及能谱分析结果。试验钢合金元素较低, 成分简单, 未添加 Cr、Mo、V 添加有 Al 元素, 基体组织为铁素体, 时效析出 Ni、Cu、Al 复合纳米颗粒, 析出相细小均匀, 颗粒尺度在 10 nm 以内, 有效地强化了基体。

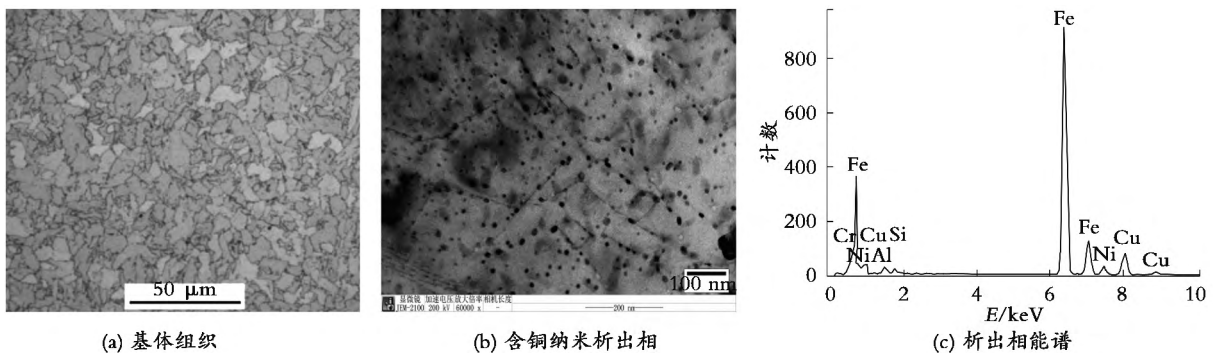


图 3 试验钢基体组织及沉淀强化相

Fig. 3 Microstructure and nano-precipitation of tested steel

试验钢热影响区性能变化结果与经历热循环后组织变化及沉淀析出相溶解析出作用有关。图 4 为试验钢模拟热影响区不同部位金相观察结果, 图 5 为热影响区不同部位采用透射电镜对微观析出相观察的结果。试验钢热影响

粗晶区组织粗化明显, 沉淀相完全溶解, 转变为贝氏体与粒状贝氏体的混合组织, 如图 3(a)、图 4(a) 所示。图 3 显示, 试验钢基体组织虽然为铁素体, 但晶粒细小, 并有纳米复合铜沉淀相强化, 因而, 粗晶区硬度及冲击功与基体相差不

大,两者基本相当。细晶区为铁素体组织,在热循环过程中纳米沉淀相发生溶解,冷却时 Cu 纳米析出相数量减少,尺寸减小,如图 4(c) 所示,产生软化,冲击吸收功增加。细晶区、临界区、

亚临界区和基体组织均为铁素体组织,粗细程度相差不大,然而冲击功却相差较大,基体的冲击功最低,细晶区、临界区、亚临界区均高于基体,并逐渐降低。

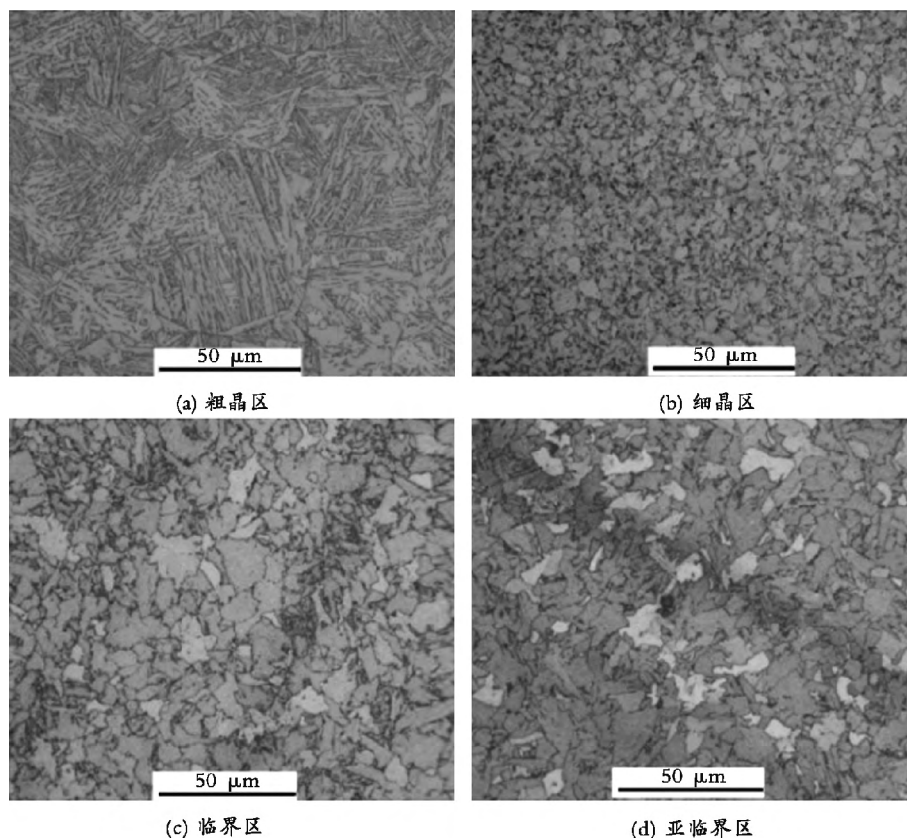


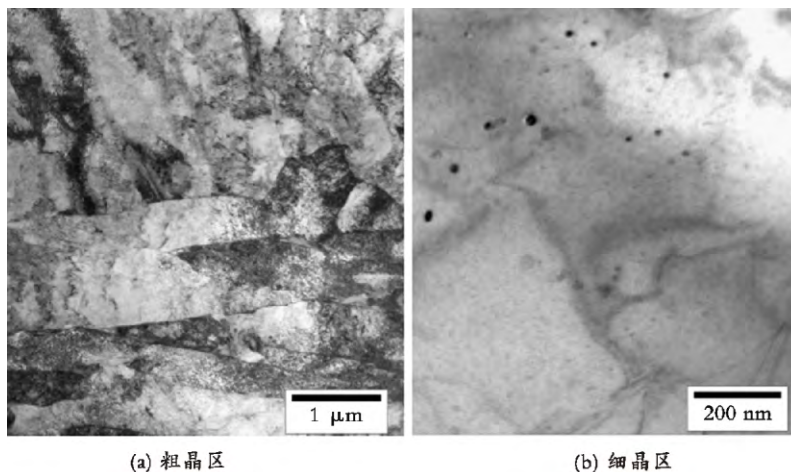
图 4 试验钢热影响区不同部位金相组织($t_{8/5} = 15$ s)

Fig. 4 Microstructures of different simulated HAZ for tested steel($t_{8/5} = 15$ s)

热影响区微观组织和析出相观察显示,随峰值温度的变化,细晶区、临界区、亚临界区中沉淀相溶解析出各不相同,如图 4(c) — 图 4(e) 所示。随峰值温度升高,细晶区和临界区中沉淀相升温时也大部分溶解,冷却过程析出相尺寸及分数不

同,细晶区析出相较少,临界区较多;亚临界区由于峰值温度更低,析出相有粗化现象。

可见,由于热循环过程不同,试验钢热影响区不同部位析出相数量及状态不同引起了热影响区不同区域冲击功及硬度值的变化。



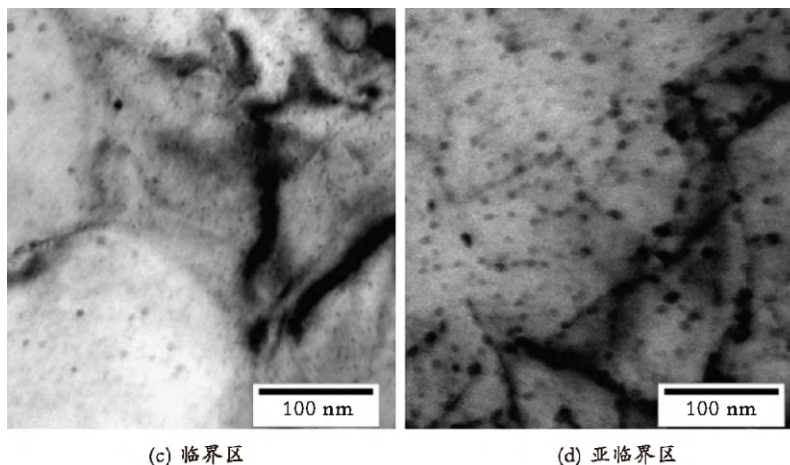


图 5 试验钢热影响区不同部位的微观析出相($t_{8/5} = 15$ s)

Fig. 5 TEM observation of nano-precipitation in different HAZ($t_{8/5} = 15$ s)

3 结论

(1) 试验钢主要通过铜复合纳米相沉淀强化,焊接热循环过程中,热影响区不同部位纳米相溶解及析出演化过程不同,引起热影响区性能变化,粗晶区的冲击功及硬度与基体相当,其它区域冲击功均高于基体,有一定软化现象。

(2) 试验钢具有较大的线能量敏感性,在试验参数范围内,随 $t_{8/5}$ 的增加,低温冲击功下降较为明显。

参考文献:

[1] Yoo J Y, Choo W Y, Park T W, *et al.* Microstructures and age hardening characteristics of direct quenched Cu bearing HSLA steel [J]. ISIJ Interna-

tional, 1995, 35(8): 1034—1040.

- [2] Thompson S W, Krauss G. Copper precipitation during continuous cooling and isothermal aging of A710 - type steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, 27A(6): 1573—1588.
- [3] 杨才福, 苏航, 李丽, 等. 高性能铜沉淀强化船体钢[J]. 中国有色金属学报, 2004 (1): 211—215.
- [4] Vaynman Semyon, Isheim Dieter, Prakash Kolli R, *et al.* High - strength low - carbon ferritic steel containing Cu - Fe - Ni - Al - Mn precipitates [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2008, 39A(2): 363—373.
- [5] Leister B M, Dupont J N. Fracture toughness of simulated heat - affected zones in NUCu - 140 steel [J]. Welding Journal, 2012, 91(2): 53—58.

(编辑: 房威)