

控轧控冷工艺对低碳贝氏体高强钢 AH80DBD 组织和力学性能的影响

陈尹泽, 李娜, 宋立伟, 马志强

(安阳钢铁集团有限责任公司技术中心, 安阳 455004)

摘要: 通过宏观断口、扫描断口、金相组织、透射电镜等方法分析了 AH80DBD 低碳贝氏体钢的组织结构对冲击性能的影响。试验结果表明:该钢轧后冷速 22 °C/s 时,冲击韧性较好(-20 °C A_{KV} 204 ~ 235 J),其组织为粒状贝氏体 + 板条贝氏体 + 细小的 M-A,板条间距 200 ~ 400 nm,而轧后冷速 12 °C/s 时,板条间距 ~ 800 nm, -20 °C A_{KV} 41 ~ 57 J,因此,AH80DBD 钢在生产过程中冷却速率应 ≥ 20 °C/s。

关键词: AH80DBD 低碳贝氏体钢; 轧后冷速; 冲击功; 组织性能

Effect of Controlled Rolling and Cooling Process on Microstructures and Mechanical Properties of Low Carbon Bainitic Steel AH80DBD

Chen Yinze, Li Na, Song Liwei, Ma Zhiqiang

(Technology Centre, Anyang Iron & Steel Group Co., Ltd., Anyang, 455004)

Abstract: The effect of microstructure on impact properties of AH80DBD low carbon bainite steel is analyzed by macrofractography, scanning fractography, metallography and transmission electron microscope. The experimental results show that by cooling rate 22 °C/s after rolling, the microstructure with better impact toughness(-20 °C A_{KV} 204-235 J) is granular bainite + Lath Bainite + fine M-A. With distance between lath 200-400 nm, by cooling rate 12 °C/s after rolling, the distance between lath is ~800 nm, and the -20 °C A_{KV} of steel is only 41-57 J. Therefore, the cooling rate of AH80DB is greater than 20 °C/s during production.

Key Words: AH80DBD Low Carbon Bainitic Steel; Cooling Rate After Rolling; Impact Energy; Microstructures Performance

低碳贝氏体钢具有高强韧性和优良焊接性能,主要应用在工程机械、煤矿机械、造船和钢结构等领域^[1-3]。现有 Mo-B 系^[4]、Mn-B 系、Si-Mn-Mo 系^[5-8]等低碳贝氏体钢^[9]。化学成分、轧制工艺和冷却工艺,组织类型等均影响其性能,尤其是轧制工艺和冷却工艺,轧制后可得到细化的、含有高位错密度的奥氏体组织,相变后高密度位错、亚结构遗传到贝氏体组织中强化钢的性能^[10]。AH80DBD 为安钢自主研发的 690 MPa 级别钢,在 150 t 转炉- 3500 mm 炉卷轧机生产线上采用 TMCP 工艺生产,采用 TMCP 工艺生产,钢板比较容易达到目标强度(屈服强度 \geq

690 MPa),但冲击值出现不稳定现象。通过对不同工艺下试验钢的冲击宏观断口、扫描断口、金相组织、透射电镜等深入分析了 AH80DBD 钢的组织结构对冲击性能的影响规律。

1 化学成分、轧制工艺及力学性能

1.1 化学成分

AH80DBD 钢的化学成分见表 1。

1.2 轧制工艺

实验材料取自安钢炉卷生产的 25 mm 厚度的 AH80DBD 低碳贝氏体钢,冷却设备为层流集管,为

表 1 AH80DBD 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of AH80DBD steel/%

| 项目 | C | Si | Mn | P | S | Nb | Ti | Cr | Mo | B |
|-----|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 实测值 | 0.07 | 0.25 | 1.70 | 0.015 | 0.003 | 0.055 | 0.018 | 0.20 | 0.15 | 0.0015 |
| 标准 | ≤ 0.12 | ≤ 0.50 | ≤ 2.0 | ≤ 0.020 | ≤ 0.010 | ≤ 0.10 | ≤ 0.03 | ≤ 0.80 | ≤ 0.50 | ≤ 0.003 |

上下同时喷淋冷却,保证钢板上下表面冷却均匀,层流冷却出水方式有集中出水或分散出水,又称为集中冷却或分散冷却。再结晶区累计压下率 > 50%,未再结晶区累计压下率 $\geq 55\%$,二次开坯厚度 70 ~ 75 mm,二次开坯温度 850 ~ 900℃,终轧温度控制在 700 ~ 760℃,终轧完成后和水冷之前为弛豫阶段,

弛豫时间 10 ~ 15 s,用水喷淋冷却,终冷温度在 400 ~ 460℃,终冷温度至常温冷却方式为空气冷却。试样 1# 钢板运行速度是 0.9 m/s,出水组数 1、2、3、4、5;试样 2# 钢板的运行速度是 1.1 m/s,出水组数 1、2、4、6、8 组。具体轧制工艺见表 2。

1.3 力学性能

表 2 AH80DBD 钢 25mm 板卷的轧制工艺参数

Table 2 Rolling process parameters for AH80DBD steel 25mm coil plate

| 试样 | 二开厚度/mm | 二开温度/℃ | 终轧温度/℃ | 弛豫时间/s | 水喷淋至终冷温度/℃ | 冷却方式(水冷) | 冷却速率/(℃·s ⁻¹) |
|----|---------|--------|--------|--------|------------|----------|---------------------------|
| 1# | 71.74 | 898 | 730 | 15 | 441 | 分散出水冷却 | 12 |
| 2# | 71.70 | 899 | 742 | 10 | 433 | 集中出水冷却 | 22 |

表 3 AH80DBD 钢 25 mm 板卷的力学性能

Table 3 Mechanical properties of AH80DBD steel 25 mm coil

| 试样 | R_{el} /MPa | R_m /MPa | A_{50} /% | 冲击方向 | $A_{KV}(-20℃)$ /J |
|------|---------------|------------|-------------|------|-------------------|
| 1# | 778 | 844 | 37.5 | 纵向 | 41, 71, 57 |
| 2# | 744 | 817 | 33.5 | 纵向 | 204, 208, 235 |
| 企业标准 | ≥ 690 | 770 ~ 940 | 20 | 纵向 | ≥ 47 |

低碳贝氏体钢的力学性能见表 3。

从试验数据上看,试样 1# 的 -20℃ 冲击韧性

不能满足标准要求,钢板冲击韧性不合格,主要表现为两高一低或一高两低,低温冲击韧性检验结果相差较大。

2 试验结果

2.1 宏观断口

宏观断口采用 JEOL-6490 扫描电镜观察,组织形貌见图 1。

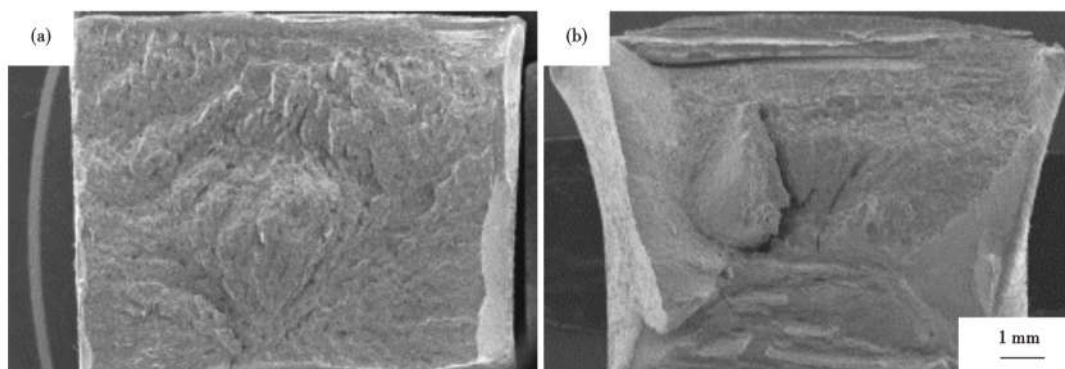


图 1 AH80DBD 钢 25 mm 板卷宏观断口形貌:(a) 试样 1#, 冷速 12℃/s;(b) 试样 2#, 冷速 22℃/s

Fig. 1 Morphology of macro fracture of AH80DBD steel 25 mm coil plate:(a) sample 1#, cooling rate 12℃/s;(b) sample 2#, cooling rate 22℃/s

从图 1(a)中可以看出试样 1# 断口形貌为沿晶断裂,断口上没有明显撕裂且断口表面为片状组成,各片状向缺口方向排列;从图 1(b)中试样 2# 可以看出,在靠近 V 型口最先断裂处,就开始出现明显的塑性变形,同时四周有大量的撕裂棱痕迹。

图 1(a)基本没有剪切唇出现,而在冲击试样结束端出现了非常少量的纤维区,其余大部分为放射区,没有明显撕裂棱,冲击韧性很差;图 1(b)出现明显的剪切唇区域,在中间小部分区域内形成了放射区,但剪切唇与纤维区占的比例很大,两侧及中间部分撕裂棱痕迹明显,造成大量塑性变形,共同决定其

具有较好的冲击韧性。

2.2 冲击韧性不合试样的扫描电镜断口分析

微观断口采用 JEOL-6490 扫描电镜观察,组织形貌如图 2 所示。

断口形貌扫描观察发现,断口均由高低不同的区域组成,凸出的区域呈岛状、条状和扫帚状等不规则形状。从图 2(a)可以看出,试样 1# 断口为解理断裂,呈现解理河流状花样,每个解理花样均由里向缺口根部倒流,说明解理是塑性变形区域初生裂纹首先开始扩展的,初生裂纹是在初生裂纹顶端的塑性

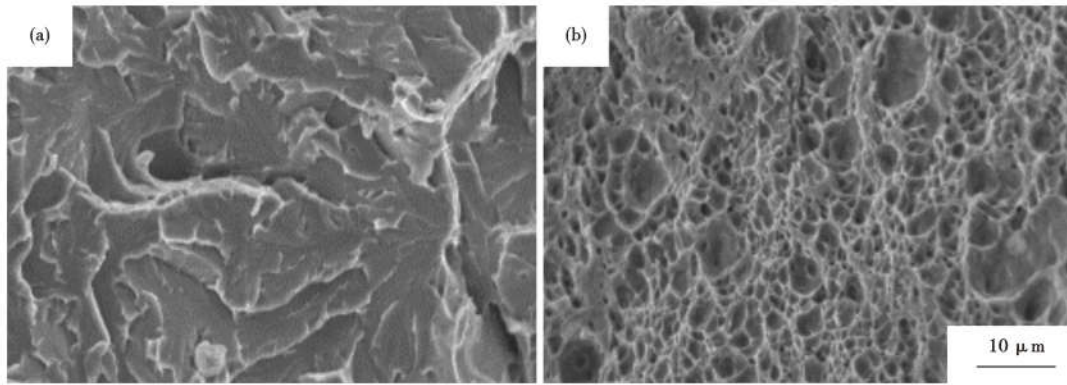


图 2 AH80DBD 钢冲击端口扫描电镜组织形貌:(a) 试样 1[#];(b) 试样 2[#]
 Fig. 2 SEM structure morphology of impact fracture of AH80DBD steel:(a) sample 1[#];(b) sample 2[#]

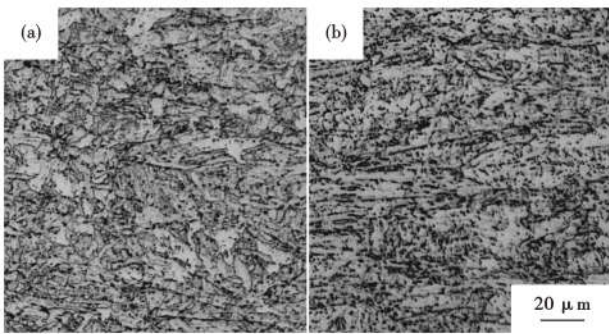


图 3 AH80DBD 钢金相组织形貌:(a) 试样 1[#];(b) 试样 2[#]
 Fig. 3 Metallographic structure morphology of AH80DBD steel:(a) sample 1[#];(b) sample 2[#]

变形区内产生,反向宽展造成失稳脆性断裂。从图 2(b)可以看出,试样 2[#]断口有韧窝,大部分为小的等轴状韧窝,部分韧窝中出现极少小颗粒夹杂物,韧窝也随着韧性的提高,由小变大,并且越来越深,越来越均匀,大而深的韧窝分布均匀,形状比较规则,则冲击韧性就会很高。

2.3 金相组织

在 Carl ZEISS 光学显微镜下观察金相组织,采

用 4% 硝酸酒精溶液侵蚀。金相组织形貌如图 3。

从图 3(a)可以看出,试样 1[#]组织为粒状贝氏体、板条状贝氏体、多边形铁素体和粗大的 M-A 组成,粗大的 M/A 组织塑性变形能力比较差,在基体中易产生应力集中成为裂纹的萌生源或裂纹扩展的通道,使整体韧性降低;图 3(b)中以粒状、板条状贝氏体为主的复相组织,M/A 细小均匀,可以保证其强度和韧性。

2.4 透射电镜观察

在 Tecnai 30 透射电镜观察试验钢的位错及 MA 组元,组织形貌如图 4。

从图 4(a)可以看出试样 1[#]的组织主要为板条状贝氏体,贝氏体板条尺寸在 800 nm 左右,同样有大量位错缠结;在晶界上没有发现细小析出物,且在部分晶粒内部存在细小的位错线,使晶粒更加细化。从图 4(b)可以看出试样 2[#]的组织也为板条状贝氏体,贝氏体板条尺寸在 200 ~ 400 nm,板条贝氏体尺寸细小均匀。从图 4(c,d)可以看出局部分区域存在 50 ~ 200 nm 的析出物。

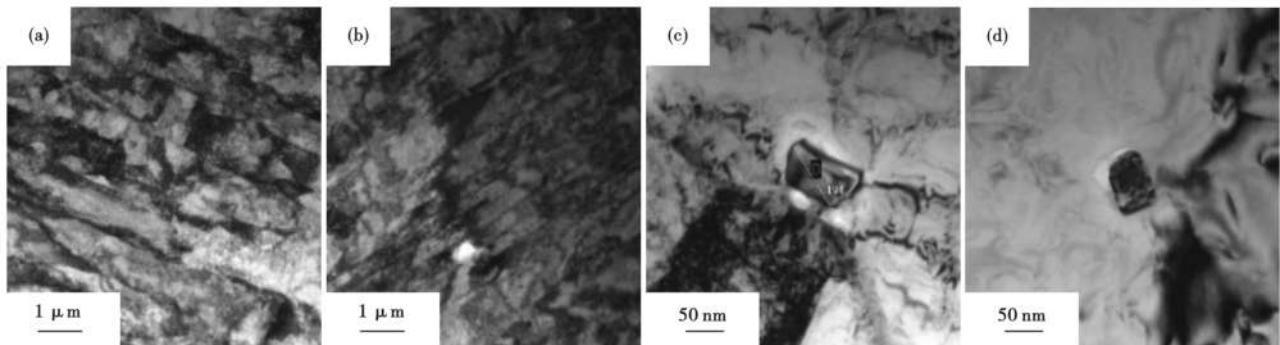


图 4 透射电镜 AH80DBD 钢板条贝氏体(a)(b)和局部析出物(c)(d)形貌:(a)(c)试样 1[#];(b)(d)试样 2[#]
 Fig. 4 Morphology of lath bainite (a)(b) and partial precipitate (c)(d) in AH80DBD steel:(a)(c) sample 1[#];(b)(d) sample 2[#], transmission electron microscope

3 结果分析讨论

从透射电镜观察,在这两种钢板中只有少部位有细小析出物(几纳米)析出,主要原因是终轧完成后入水前,钢板存在弛豫,导致出现少部分细小析出物,但弛豫时间在 10~15 s,终轧后弛豫时间不足以使微合金碳氮化物大量析出;在两种试样中均有尺寸在 50~200 nm 较大析出物析出,大都为(Ti, Nb)C,这些大颗粒析出物不是在弛豫时析出的,可能是由于钢坯在凝固过程中没有完全溶解的碳氮化物,在轧制加热过程长大造成的。冲击不合格的组织为板条贝氏体,板条贝氏体间距为 800 nm 左右,冲击功韧性较高试样板条贝氏体间距为 200~400 nm,贝氏体板条束直接影响材料的韧性,板条束是由若干条板条组成,脆性裂纹扩展的过程,就是穿透板条束的过程,因此,板条束尺寸越小,裂纹的

起裂功越大,止裂能力越强,材料韧性越好^[11]。

贝氏体形态、分布随着冷却速率提高,贝氏体板条数量明显增多,贝氏体板条束细小,M-A 颗粒细小,并且形状规则,分布弥散,冲击韧性随着冷速的增加而明显改善^[12],但冷却速率为 20 °C/s 时冲击韧性良好,因此 AH80DBD 钢在生产过程中选择 > 20 °C/s 的冷却速率。

4 结论

(1) AH80DBD 低碳贝氏体钢的组织以粒状贝氏体+板条贝氏体+细小的 M-A 为主。

(2) 冲击韧性较好组织:以粒状、板条状贝氏体为主的复相组织,板条间宽度 200~400 nm, M/A 细小均匀。

(3) AH80DBD 钢在生产过程中冷却速率 \geq 20 °C/s。

参考文献

- [1] 赵燕青,孙力,刘宏强,等. 硼对 780 MPa 低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2018, 39(2): 65-67.
- [2] 王克鲁,鲁世强,康永林,等. 硼对高强度低碳贝氏体钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(3): 6-9.
- [3] 孔德南,李静宇,王立群,等. 700 MPa 级高强钢组织性能研究[J]. 宽厚板, 2011, 17(6): 9-11.
- [4] 孙斌,徐党委,陈尹泽. AH70DBD 焊接性能研究[J]. 河南冶金, 2020, 28(3): 17-19, 53.
- [5] 方鸿生,冯春,郑燕康,等. 新型 Mn 系空冷贝氏体钢的创制与发展[J]. 热处理, 2008, 23(3): 2-19.
- [6] 黄维刚,方鸿生,郑燕康,等. C-Si-Mn-B 系贝氏体钢的强度及强化机制[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(1): 38-41.
- [7] 刘丽华. 低焊接裂纹敏感性低碳贝氏体高强度钢板 Φ 800CFE 的研发[J]. 特殊钢, 2014, 35(2): 51-53.
- [8] 刘朝霞,刘俊,孟羽,等. 淬火温度对 80 mm 调质 690 MPa 级低碳贝氏体高强度钢板组织性能的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 77-80.
- [9] 贺信莱,尚成嘉,杨善武,等. 高性能低碳贝氏体钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [10] 陈林恒,康永林,黎先浩,等. 轧制工艺对 CSP 生产低碳贝氏体高强钢组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2009, 9: 47-50.
- [11] 刘文月,任毅,张帅,等. 新型超高管线钢的组织与性能研究[J]. 材料热处理技术, 2011, 40(22): 38-40.
- [12] 王吉满,王远琦,刘清友,等. 冷却工艺对超低碳贝氏体钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(11): 60-63.

欢迎订阅 2023 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:25.00 元/期、150.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 6292935