

轧制工艺对 CSP 生产低碳贝氏体高强钢组织和性能的影响

Effects of Processing Parameters on Microstructures and Properties of Low-carbon Bainitic High Strength Steels Produced by CSP

陈林恒¹, 康永林¹, 黎先浩¹, 温德智², 刘国民²

(1 北京科技大学 材料科学与工程学院,

北京 100083; 2 涟源钢铁集团有限公司, 湖南 娄底 417009)

CHEN Lin-heng¹, KANG Yong-lin¹, LI Xian-hao¹, WEN De-zhi², LIU Guo-min²

(1 School of Materials Science and Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083,

China; 2 Hunan Lianyuan Iron and Steel Co., Ltd., Loudi 417009, Hunan, China)

摘要: 研究了 CSP 工艺生产低碳贝氏体高强钢的工艺控制与显微组织和力学性能的关系。通过比较不同终轧温度和卷取温度对低碳贝氏体高强钢组织性能的影响, 得出钢板最终组织为不同比例的铁素体加贝氏体复相组织, 且随着终轧温度和卷取温度尤其是卷取温度的降低, 组织中贝氏体的体积分数增多, 组织更加细小均匀, 并且可以获得细小弥散的 M-A 组织和析出粒子, 从而提高钢的屈服强度和韧性。

关键词: 贝氏体; 终轧温度; 卷取温度; M-A 岛; 析出

中图分类号: TG142.1; TG146.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2009)09-0047-04

Abstract: The effects of controlled rolling and controlled cooling parameters on the microstructures and mechanical properties of low carbon bainitic high strength steels produced by CSP (Compact Strip Production) were investigated. Through comparing the influence of several hot-rolling processes on the microstructures and properties, the results indicated that with the decreasing of finish rolling and coiling temperature especially coiling temperature, the volume fraction of bainite in bainite-ferrite matrix increased. Moreover, much more finer microstructure, M-A islands and smaller dispersion precipitates were obtained by reducing the finish rolling and coiling temperature. Therefore the yield strength and toughness were improved.

Key words: bainite; finish rolling temperature; coiling temperature; M-A island; precipitation

为了节约资源、降低制造成本, 大幅度地提高金属材料各项性能, 既要求材料具有很高的强度和优良的焊接性能, 又要求材料在高寒及腐蚀等恶劣环境下具有良好的韧性和耐蚀性, 因而具有良好综合性能的新一代钢铁材料日益得到人们的广泛重视^[1]。由于冶金生产技术和微合金技术的发展, 新型超低碳贝氏体钢中碳含量已大幅度降低, 因而彻底消除了碳对贝氏体组织韧性的不利影响, 在控轧控冷后可得到极细的含有高位错密度的贝氏体基体组织。这类钢的强度不再依靠钢中碳含量, 而主要通过细晶强化、位错及亚结构强化、铌、钛等微合金元素的析出强化等方式来保证, 钢的强韧性匹配极佳, 尤其是具有优良的野外焊接

性能, 无需焊前预热和焊后热处理。

由于薄板坯连铸连轧工艺与传统工艺在钢铁冶金过程中的热历史不同, 加上在连铸、均热、连轧及层流冷却过程中采取了一系列新的工艺控制技术, 因此应充分认识到这些新的工艺特点, 并在新产品开发、扩大品种规格范围等方面充分发挥其技术优势^[2]。薄板坯连铸连轧的研究及产品开发经验表明, 热轧薄板最终产品的组织性能不仅取决于冶金成分, 而且与各工艺工程环节的控制方法及参数密切相关, 需要在各工艺过程中对其组织性能进行综合的优化控制才能达到最佳效果^[3]。本工作正是基于 CSP 流程实际生产过程中几种不同工艺的轧制实验结果对比, 探讨了铁素体

贝氏体型微合金钢的微观组织和力学性能受终轧温度和卷取温度的影响规律。

1 实验过程

实验数据均来自涟钢基于 CSP 流程试制工程机械用低碳贝氏体高强钢的现场数据, 材料来自试制后的成品板。工艺路线为经高炉冶炼、炉外精炼、薄板坯连铸, 连铸坯厚度为 71mm, 铸坯凝固后直接进入辊底

式均热炉, 出炉后通过 7 机架连轧, 轧后经层流冷却线冷却后再卷取。试制钢的主要化学成分及范围如表 1 所示。其中 1[#]、2[#] 和 3[#] 试样化学成分完全一致, 4[#]、5[#] 和 6[#] 试样成分也基本一致。试轧工艺以及各工艺条件下的性能见表 2。在成品板上截取小块金相试样, 将试样板面或纵截面磨光后机械抛光, 用 4% 硝酸酒精侵蚀后, 在光学显微镜和扫描电子显微镜下观察显微组织。另外, 从成品板上沿板面方向切取金属薄片制取了薄膜试样在 JEM- 2000FX 透射电子显微镜

表 1 实验钢的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of experimental steels(mass fraction/%)

No	C	Si	Mn	Nb+ Ti	Mo	B
1	0.04-0.06	0.20-0.35	1.4-1.6	< 0.1	< 0.25	Microcontent
2	0.04-0.06	0.20-0.35	1.4-1.6	< 0.1	< 0.25	Microcontent
3	0.04-0.06	0.20-0.35	1.4-1.6	< 0.1	< 0.25	Microcontent
4	0.04-0.06	0.20-0.35	1.4-1.6	< 0.1	< 0.25	0
5	0.04-0.06	0.20-0.35	1.4-1.6	< 0.1	< 0.25	0
6	0.04-0.06	0.20-0.35	1.4-1.6	< 0.1	< 0.25	0

Note: Some other alloy elements were also added in test steels.

表 2 CSP 生产低碳贝氏体高强钢轧制工艺参数及力学性能
Table 2 Mechanical properties and processing conditions of low-carbon bainitic high strength steels produced by CSP

No	h/mm	Finishing temperature/℃	Coiling temperature/℃	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A/%	Cold bent (180℃, d=3a)
1	4.8	880	580	575	830	15.0	Excellent
2	4.8	845	575	615	865	14.5	Excellent
3	5.2	835	565	635	895	15.5	Excellent
4	7.6	840	590-620	555	760	20.0	Excellent
5	7.6	845	570-590	610	730	19.0	Excellent
6	6.7	840	540-570	660	730	18.5	Excellent

下观察, 并对部分试样进行了化学相分析。

2 实验结果与分析

2.1 终轧温度的影响

从表 2 中 1[#]、2[#] 和 3[#] 试样可以看出, 1[#] 和 2[#] 试样卷取温度接近, 2[#] 试样终轧温度比 1[#] 试样要低 35℃, 但屈服强度和抗拉强度都比 1[#] 试样高, 其中屈服强度高出 40MPa, 伸长率变化不大。3[#] 试样与 2[#] 试样相比, 终轧温度和卷取温度都略有降低, 而屈服强度提高了 20MPa。各试样光学显微组织如图 1 所示。从图 1 可以看出, 各显微组织虽然都是以贝氏体为主, 但明显可以看出: 终轧温度较高的 1[#] 试样组织中含有

一定比例的准多边形铁素体, 随着终轧温度的降低, 铁素体含量逐渐减少, 最后演变成粒状贝氏体和板条贝氏体的混合组织。实验结果还表明, 降低终轧温度, 铁素体和贝氏体晶粒明显细化, 钢的屈服强度提高。

从理论上讲, 采用较低的终轧温度, 将扩大奥氏体非再结晶区轧制温度区间, 加大材料的非再结晶奥氏体区变形, 可以减小相变前的奥氏体晶粒尺寸, 在形变奥氏体中形成较多的形变带, 且奥氏体中空位、位错等缺陷密度增多, 促进得到细晶粒转变组织, 加强了细晶强化。文献[4-6]认为终轧温度主要是对晶粒尺寸影响很大, 终轧温度的降低, 使过冷度加大, 铁素体的形核驱动力加大, 形核率增加, 从而提供更多的相变形核点且使得晶粒长大的速度变慢, 因而使晶粒明显细化。

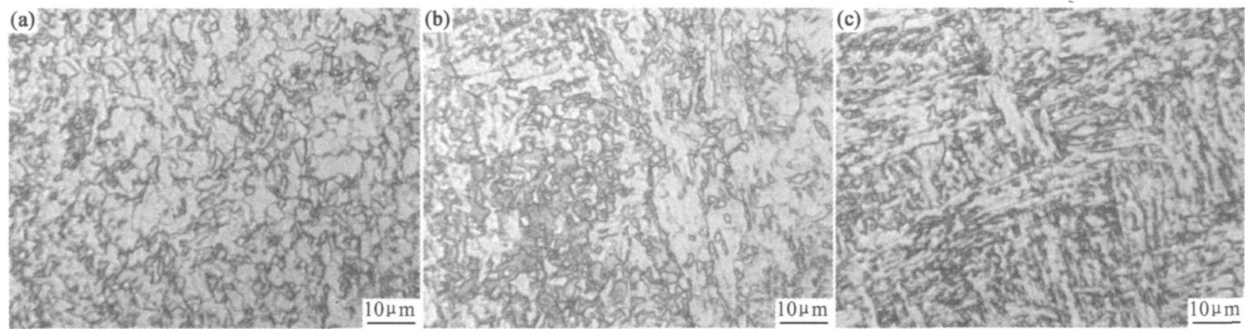


图 1 实验钢不同终轧温度下的光学显微组织照片 (a) 1[#] ;(b) 2[#] ;(c) 3[#]
Fig. 1 Optical microstructures of test steels with different finish rolling temperatures
(a) 1[#] ;(b) 2[#] ;(c) 3[#]

但对于高强度级别的低合金高强度钢, 轧制温度除了影响细晶强化外还影响析出强化。文献指出^[7]在较高轧制温度下, 板坯在奥氏体区的应变诱导析出多于在较低轧制温度条件下的应变诱导析出, 消耗了大量的析出元素, 导致微合金元素在随后的铁素体区的析出强化作用减弱。

终轧温度的变化直接影响晶粒细化的程度和析出强化粒子的数量和尺寸, 因此, 对于微合金高强度钢种终轧温度不宜过高, 但考虑到设备能力和综合性能, 一般控制在 A_{c3} 温度以上 10~ 20℃ 为宜。

2.2 卷取温度的影响

在轧制过程中, 卷取温度是影响实验钢强度的重要因素。卷取温度的变化可以使带钢的位错密度、析出物的尺寸和形态以及组织形貌等发生变化。从表 2 中 4[#], 5[#] 和 6[#] 的工艺及性能数据可以看出, 各试样终轧温度基本相同, 卷取温度依次降低 40℃ 左右, 屈服强度均增加近 50MPa。抗拉强度变化没有一定的规律, 伸长率虽随卷取温度的降低有所下降, 但下降幅度很小。因此可以认为降低卷取温度对抗拉强度和伸长

率的影响不大, 但是屈服强度升高明显。图 2 是各试样的显微组织照片, 可以看出, 卷取温度最高的 4[#] 试样由粒状贝氏体和铁素体组成, 比例约为 60% (体积分数, 下同) B+ 40% F, 组织较粗大; 随着卷取温度的降低, 组织中贝氏体含量逐渐增加, 组织越来越细, 卷取温度最低的 6[#] 试样组织中贝氏体的含量达到近 90%, 组织非常细小均匀。4[#] 试样组织中 M-A 组织粗大, 呈现长条状和尖角状, 而 5[#] 和 6[#] 试样 M-A 组织尺寸越来越细, 形状由尖角状逐渐过渡成球形颗粒状。粗大的岛状组织是降低韧性的一个重要原因, 当 M-A 组织比较粗大时, 这些粗大的相界面可因塑性变形而诱发出断裂的核心, 在外力作用下, 裂纹得以迅速扩展, 导致韧性恶化。而细小弥散的 M-A 组织则不易于激起脆性断裂的裂纹, 即使出现裂纹, 它的长度也小于裂纹失稳扩展的临界尺寸, 因此细小的 M-A 组织对裂纹有强烈的阻滞作用^[8]。而降低卷取温度显然对获得细小的球形颗粒状 M-A 组织有利, 因此低温卷取钢板具有相对更好的韧性。

降低卷取温度可以使贝氏体相变过程得以更好的

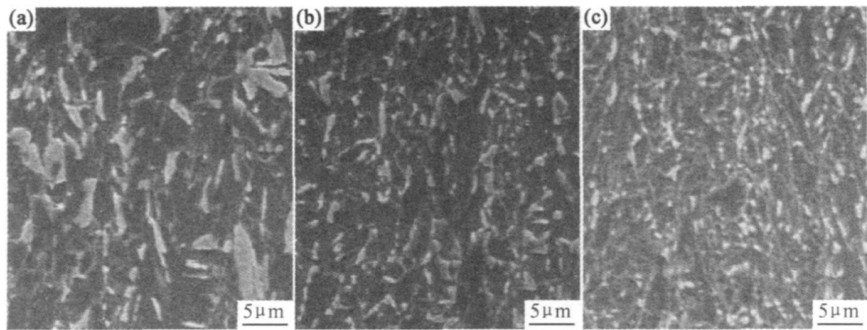


图 2 实验钢不同卷取温度下的显微组织照片 (a) 4[#] ;(b) 5[#] ;(c) 6[#]
Fig. 2 SEM microstructures of experimental steels with different coiling temperatures
(a) 4[#] ;(b) 5[#] ;(c) 6[#]

完成,从而使组织中的贝氏体体积分数增加,而且可以细化贝氏体组织。图 3 是 4[#]、5[#] 和 6[#] 试样组织中贝氏体组织在透射电镜下的形貌,可以看出,粒状贝氏体在透镜下呈现板条形状,板条宽度随卷取温度的不同有较大差异,随着卷取温度的降低板条宽度越来越小。

卷取温度最高的 4[#] 试样板条宽度为 500~ 600nm,卷取温度居中的 5[#] 试样板条宽度约为 300~ 400nm,而卷取温度最低的 6[#] 试样板条宽度在 100~ 300nm 之间,平均宽度在 200nm 左右。

金属塑性变形的物理实质是位错的运动,在塑性

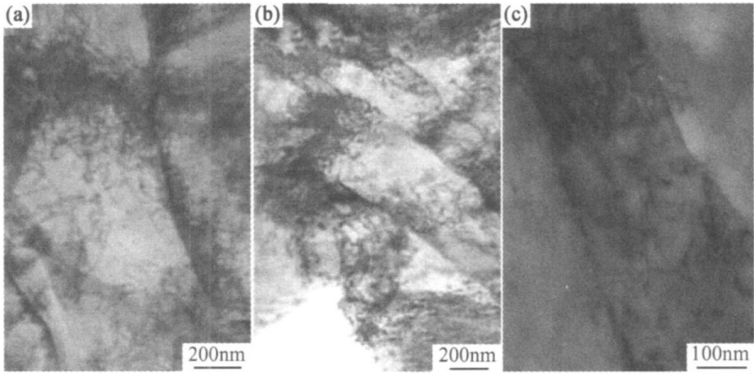


图 3 实验钢不同卷取温度下的 TEM 形貌 (a) 4[#] ;(b) 5[#] ;(c) 6[#]

Fig. 3 TEM microstructures of test steels with different cooling temperatures

(a) 4[#] ;(b) 5[#] ;(c) 6[#]

变形中,位错之间、位错与溶质原子之间、间隙原子与空位之间、位错与第二相质点之间都会发生相互作用,从而引起位错数量、分布与组态的变化。在 CSP 工艺连轧过程中,随着变形积累量的增加,位错密度明显增加^[2]。在贝氏体相变过程中,快速冷却能把相当一部分变形位错保存在贝氏体基体中,从而大幅度提高了贝氏体基体的强度。卷取温度较高,变形后的冷却速率相对较低,金属变形过程中产生的位错通过交滑移等方式运动,使部分位错消失,部分位错重新排列,使得其位错密度降低,因此高温卷取使得其位错强化作用减弱。

控制卷取温度不仅可以控制所需要的显微组织类型、晶粒尺寸和位错密度等,而且还可以控制析出物的数量和析出粒子的大小^[6]。实验表明,4[#]、5[#] 和 6[#] 试样钢种纳米级析出物尺寸大小虽都是从几纳米、几十纳米甚至几百纳米不等,但其不同尺寸级别的粒子数量和质量分数有所差别。4[#] 和 6[#] 试样的化学相粒度分析结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,卷取温度最低的 6[#] 试样在各尺寸区间的粒子析出物的质量分数比卷取温度最高的 4[#] 试样要多得多,就粒子直径小于 18nm 区间内的累积析出物质量分数而言,4[#] 试样仅为 6.7%,而 6[#] 试样为 24.9%,是 4[#] 试样析出物质量分数的 3 倍多。采用 Ashby-Orowan 修正模型计算出 4[#] 和 6[#] 试样中由析出粒子钉扎位错而引起的析出强化分别为 63MPa 和 104MPa。

表 3 4[#] 和 6[#] 试样不同粒度纳米级析出物的质量分数(%)

Table 3 Mass fraction of precipitates with different diameters in steels of 4[#] and 6[#] (%)

No	Diameter/ nm				
	< 5	5-10	10-18	18-36	> 18
4 [#]	1.5	3.1	6.7	14.0	6.7
6 [#]	2.3	5.7	16.9	26.5	24.9

由上述实验结果和分析可知,低温卷取引起的屈服强度上升主要是通过卷取温度密切相关的细晶强化、位错强化、相变强化和析出强化来实现的。而通过低温卷取引起的晶粒细化和获得的细小球形颗粒状 M-A 组织相比高温卷取得到的粗大的尖角状 M-A 组织对韧性更为有利。然而,卷取温度太低也会抑制析出,降低合金元素的利用率,但析出被抑制的临界温度有待进一步研究,同时制定工艺时应考虑到设备能力。

3 结论

(1) 随着终轧温度的降低,屈服强度有所上升。终轧温度的变化主要是影响晶粒细化的程度以及析出强化粒子的数量和尺寸。

(2) 降低卷取温度,钢的屈服强度明显提高,韧性得以提高。低温卷取引起的屈服强度上升主要是通过

(下转第 60 页)

别为 0.992 和 0.994, 与理论推导相符, 因此, 对于该合金可以尝试根据扩展区面积来推算疲劳寿命。从图 6 还可以发现, 在相同寿命下, 温度越高, 扩展区面积越大; 在同一温度下, 疲劳寿命越小, 扩展区面积越小。

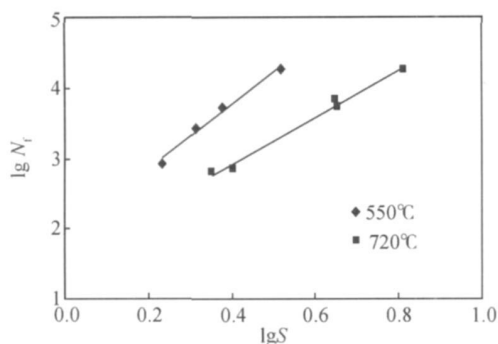


图 6 FGH96 合金在不同实验温度下的 $\lg N_f$ - $\lg S$ 关系曲线

Fig. 6 $\lg N_f$ - $\lg S$ curves of FGH96 superalloy at different temperatures

3 结论

(1) FGH96 合金的疲劳断口由源区、扩展区和瞬断区三部分组成, 瞬断区的面积最大, 裂纹沿周边起源, 应变幅越高, 裂纹源的个数越多, 断口特征主要以穿晶解理为主。

(2) FGH96 合金在较高温度下具有较低的疲劳寿命是与氧化损伤和材料的塑性变形密切相关; 应变幅较小时温度对合金疲劳寿命起主导作用是因为应变幅较小时它在高温下经历的时间更长, 氧化损伤的效应更明显; 同一温度下, 合金在较高应变幅下具有较低的疲劳寿命是与合金的循环塑性变形密切相关。

(上接第 50 页)

与卷取温度密切相关的细晶强化、位错强化、相变强化和析出强化来实现的。低温卷取获得的弥散球状颗粒 M-A 岛比高温卷取得到的粗大尖角状 M-A 岛对韧性更有利。

参考文献

- [1] 薛小怀, 钱百年, 于少飞, 等. 超低碳贝氏体 (ULCB) 钢研究进展及应用[J]. 材料导报, 2001, 15(10): 12-14.
- [2] 康永林, 赵征志, 于浩, 等. 轧制工艺对 CSP 线热轧汽车用高强钢板组织特征的影响[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(1): 30-33.
- [3] 康永林, 傅杰, 毛新平. 薄板坯连铸连轧钢的组织性能综合控制理论及应用[J]. 钢铁, 2005, 40(7): 41-45.
- [4] 董春明, 张红梅, 刘振宇, 等. 终轧温度对热轧双相钢微观形貌的

(3) FGH96 合金的位错密度在较高的应变幅下比在较低的应变幅下高得多, 在较高应变幅下, 位错发生了交滑移甚至是攀移运动。

(4) FGH96 合金的疲劳断口扩展区面积与疲劳寿命存在线性对数关系。

参考文献

- [1] 张义文. 俄罗斯粉末冶金高温合金[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(3): 74-76.
- [2] 胡本英, 章守华. 镍基粉末高温合金 FGH95 涡轮盘材料研究[J]. 金属热处理学报, 1997, 18(3): 28-36.
- [3] 贾波, 李春光. 夹杂物对粉末高温合金损伤行为的影响[J]. 失效分析与预防, 2006, 1(2): 29-32.
- [4] 姚四伟, 张力先, 李建军. 某型发动机涡轮叶片烧蚀故障分析与预防[J]. 失效分析与预防, 2006, 1(4): 27-29.
- [5] 周晓明, 汪殿龙, 汪煜, 等. 非金属夹杂物在镍基粉末高温合金中的变形行为[J]. 失效分析与预防, 2008, 3(3): 23-27.
- [6] BRETT S J, DOHERTY R D. Loss of solute at the fracture surface in fatigued aluminium precipitation hardened alloys[J]. Mater Sci and Eng, 1978, 32(3): 255-265.
- [7] TOMKINS B, WASEING J. Elevated temperature fatigue interactions in engineering materials[J]. Metall Sci, 1977, 11(8-9): 414-424.
- [8] MAIYA P. Effect of wave shape and ultrahigh vacuum on elevated temperature low cycle fatigue in type 304 stainless steel[J]. Mater Sci and Eng, 1981, 47(1): 13-25.
- [9] 张栋, 钟培道, 陶春虎, 等. 失效分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [10] 颜鸣皋, 刘才穆. 金属的疲劳与断裂[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.

收稿日期: 2008-11-20; 修订日期: 2009-07-06

作者简介: 顾玉丽 (1979—), 女, 博士研究生, 主要从事材料的结构与损伤方面研究工作, 联系地址: 北京市 81 信箱 4 分箱 (100095), E-mail: bluebee4646@163.com

影响[J]. 机械工程材料, 2007, 31(3): 17-19.

- [5] 郭营利, 张红梅, 刘振宇, 等. 终轧温度对热轧双相钢组织细化的影响[J]. 材料热处理, 2006, 35(16): 7-9.
- [6] 李龙, 丁桦, 杨春征, 等. 控轧控冷工艺对低碳微合金钢组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(7): 46-51.
- [7] 沈凯, 李自刚, 温东辉, 等. 轧制温度制度对一种高强度耐候钢性能影响研究[J]. 宝钢技术, 2007, (2): 18-21.
- [8] 孔君华, 吴力新, 谢长生. 热轧工艺对低碳微合金钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2004, (11): 43-46.

收稿日期: 2008-09-26; 修订日期: 2009-03-31

作者简介: 陈林恒 (1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高强钢的组织性能及新品种的研发, 联系地址: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学材料科学与工程学院 254 信箱 (100083), E-mail: linhengchen@163.com