

SUFC 工艺在大规格棒材生产中的应用

邱全康,王全礼,金永春,鲁丽燕,周玉丽,王 勇,程四华

(首钢技术研究院,北京 100043)

摘 要:首钢采用 SUFC 工艺试制了大规格($\Phi 40\text{mm}$)棒材,本文通过实验确定了变形工艺参数,测定了试样的 CCT 曲线,并对棒材断面的径向温度场进行了模拟,分析了试样组织。工业生产表明,柔性控轧+SUFC+自回火工艺大幅提高了材料的强度,且生产成本较低。

关键词:SUFC 工艺;大规格棒材;表面淬火与自回火

中图分类号:TG335.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-9996(2011)04-0026-03

Application of Surface Ultra-fast Cooling Process in the Production of Large-sized Bar

DI Quan-kang, WANG Quan-li, JIN Yong-chun, LU Li-yan, ZHOU Yu-li, WANG Yong, CHENG Si-hua

(Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: The large-sized bar($\Phi 40\text{mm}$) was trial-produced by surface ultra-fast cooling process in Shougang. The formation process parameters were confirmed and the CCT curves were measured by experiments. The cross-section temperature field of the bar section was simulated. Meanwhile, the structure of the samples was analyzed. The production practice show that flexible controlled rolling + surface ultra-fast cooling + self tempering process can increase strength greatly with low cost.

Key words: surface ultra-fast cooling process; large-sized bar; surface quenching and self-tempering

国内外采用超快冷(UFC)工艺轧制 CSP 薄板的案例较多^[1],但对于采用 UFC 工艺轧制大规格($\Phi 40\text{mm}$)棒材的案例鲜有报道。首钢集团公司采用表层超快冷(SUFC)工艺成功试制了大

规格高强度($R_m \geq 1080\text{MPa}$)铁路基建用带肋钢筋,降低了离线热处理生产成本。

1 实验材料及方法

试样的化学成分见表 1。

表 1 试样的化学成分

元 素	C	Si	Mn	V	P	S	Als	Alt	T.O
质量百分数/%	0.4000	1.6500	0.8200	0.1100	0.0130	0.0040	0.0109	0.0119	0.0012

实验采用 Gleeble-3000 热模拟机,研究了热加工变形工艺,得出了芯部珠光体比例、晶粒尺寸及应力值与变形温度的关系。模拟了轧制现场精轧机组后 4 道次变形^[2],以不同冷却速率冷却,测定了轧后试样的动态 CCT 曲线,模拟了 SUFC 工艺下试样的径向断面温度场,并分析了其组织。

2 实验结果分析及讨论

2.1 变形工艺

试样的晶粒尺寸、芯部珠光体含量及应力与

变形温度的关系见图 1。由图 1 可知,试样奥氏体化后,随变形温度的升高,晶粒尺寸增大。当变形温度低于 940°C 时,晶粒粗化趋势不明显(晶粒尺寸约为 $20\ \mu\text{m}$);当变形温度高于 940°C 时,晶粒明显粗化。因此,变形温度应低于 940°C 。当变形温度为 880°C 时,芯部珠光体含量约为 80%;当变形温度升高到 1020°C 时,芯部珠光体含量降至 40%。与变形温度为 1020°C 时相比,试样在 880°C 时的应力提高了 60%,可见,随着变形温度的升高,应力值降低。

收稿日期:2010-11-16

收修改稿日期:2010-12-08

作者简介:邱全康(1984-),男(汉族),江苏宿迁人,助理工程师。

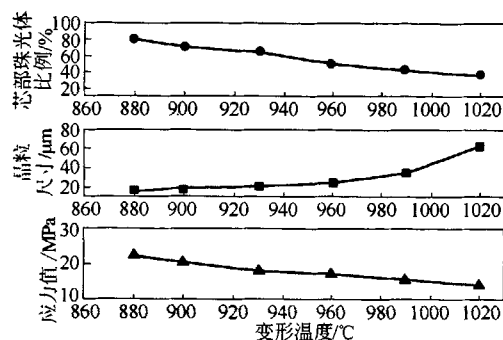


图1 试样芯部珠光体含量、晶粒尺寸及应力值与变形温度的关系

2.2 CCT 曲线测定及组织分析

试样的 CCT 曲线见图 2。

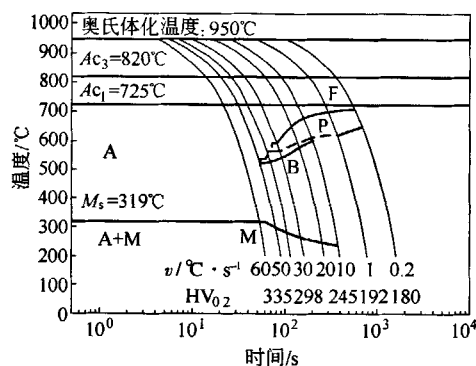


图 2 试样的 CCT 曲线

由图 2 可知,试样的相变点 Ac_1 、 Ac_3 分别为 725、820℃, B_s 、 M_s 点分别为 525、319℃。当冷却速率达到 10℃/s 时,开始发生贝氏体相变;冷却速率达到 60℃/s 时,发生马氏体转变。在 SUFC 工艺条件下,即使冷却速率低于贝氏体相变临界速率(10℃/s),也可能导致芯部产生贝氏体,这是由于大规格带肋钢筋表面和芯部温度梯度较大,表层温度过低,同时由于铸坯存在 C、P 和 S 等成分偏析,且这些元素具有缩小奥氏体相区的作用,使中温转变 CCT 曲线右移。因此, SUFC 工艺易诱导芯部贝氏体相变,导致无屈服现象或者脆断。由此可知,较高的钢质洁净度和较小的成分偏析是实现 SUFC 工艺的前提。

不同冷却速率下奥氏体向珠光体转变的相变温度和相变时间见表 2。由表 2 可知,随着冷却速率的增大,相变时间快速缩短。由此可知,实际生产过程中,轧件在经过 SUFC 冷却后,相变起始温度、峰值温度和结束温度将大幅降低,相变时间大幅缩短,相变潜热巨大,形成淬火组织,轧件

边部过冷组织经过芯部自回火形成回火索氏体。

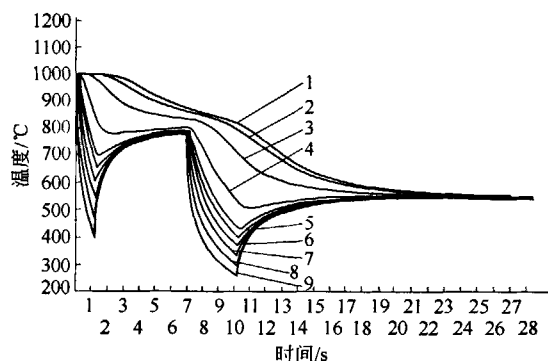
表 2 不同冷却速率下奥氏体向珠光体转变的相变温度和相变时间

冷却速率/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$	相变起始 温度/ $^{\circ}\text{C}$	相变峰值 温度/ $^{\circ}\text{C}$	相变结束 温度/ $^{\circ}\text{C}$	相变 时间/s
10	700	680	650	281
30	682	673	637	128
50	661	655	604	68

SUFC 工艺下试样表面冷却速率大于 $200^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 直接跨越珠光体和贝氏体相变区域, 快速冷却到马氏体点以下, 并立即终止强冷; 而试样芯部由于冷却时过冷度小, 冷却速率显著低于表面, 且需控制芯部冷速以避免贝氏体相变区, 保证芯部组织为极细珠光体+铁素体。

2.3 SUFC 工艺下试样的组织性能研究

SUFC 工艺下 $\Phi 40\text{mm}$ 试样断面温度场见图 3。

图3 SUFC 工艺下 $\Phi 40\text{mm}$ 规格试样断面温度场

径向位置: 1—芯部; 2— $\frac{1}{4}R$; 3— $\frac{1}{2}R$; 4— $\frac{3}{4}R$

距表面层/mm: 5—2.0; 6—1.5; 7—1.0; 8—0.5; 9—0

由图 3 可知,冷却过程中试样芯部温度变化与表层完全不同,芯部冷却较为平稳,但冷却速率明显高于空冷工艺,表层温度在终轧后经历 2 次激冷,激冷过后又各有一个迅速返温的过程。

经表面超快速冷却后,试样上冷床时的实际表面温度约为 500°C ,在冷床上进行返温,返温温度即自回火温度约为 $550\sim 600^{\circ}\text{C}$,试样在此温度区间完成等温相变,等温相变温度和应变量对奥氏体晶粒内铁素体形核数量的影响,见图 4。可见,等温相变温度越低,相同的真应变条件下奥氏体晶粒内铁素体形核数量越多。

试样力学性能与自回火温度的关系如图 5 所示。由图 5 可知, 经过表面超快速冷却及 550~600℃ 的自回火, 试样强度明显提高, 伸长率与

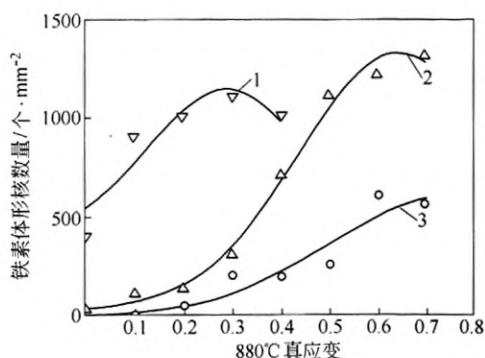


图4 等温相变温度和真应变对铁素体形核数量的影响

相变温度/℃: 1-550; 2-600; 3-650

空冷工艺相比有所降低,但仍能达到8%,且时效后有所回升,能够满足标准要求($A_5 > 7.0\%$)。当自回火温度降至440℃时,因SUFC工艺冷却速率太快,试样芯部出现魏氏组织,伸长率下降到5%~6%,不能满足标准要求。综上所述,自回火温度为550℃时,试样性能达到最优。

实验表明,热轧后试样空冷的平均屈服强度

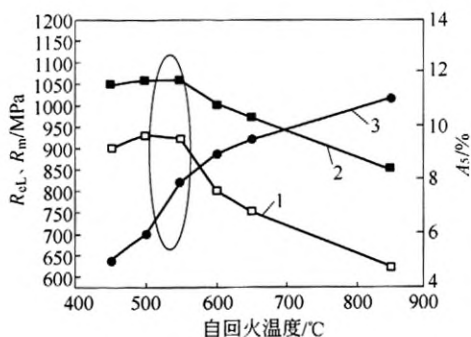


图5 试样的力学性能与自回火温度的关系

1- R_{eL} ; 2- R_m ; 3- A_5

为628MPa,抗拉强度为863MPa,SUFC工艺下试样表面形成一层2.0mm厚的回火组织,其面积约占总横截面23%,边部与芯部之间存在过渡层,厚度为3.0~3.5mm,平均屈服强度为893MPa,平均抗拉强度为1055MPa。试样边部及芯部扫描电镜显微组织见图6。经统计,试样芯部实际晶粒度为9.0~10.5级,芯部珠光体片层间距为0.226 μm ,片层间距得到细化。

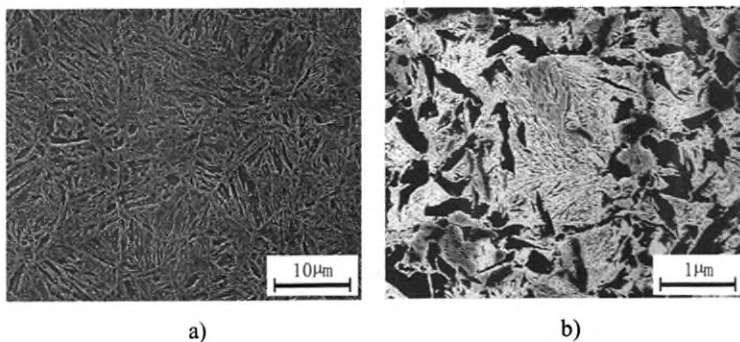


图6 SUFC工艺下试样扫描电镜显微组织

a)边部;b)芯部

2.4 工业化应用效果

首钢采用SUFC工艺已累计批量生产超高

强度带肋钢筋近6万t,产品性能稳定、质量优异,其力学性能见表3。

表3 SUFC工艺下批量生产超高强度带肋钢筋的力学性能

规格	R_{eL}/MPa			R_m/MPa			$A_5/\%$		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
$\Phi 40\text{mm}$	934	995	865	1060	1130	1030	9.50	14.50	7.00
国家标准		≥ 830			≥ 1080			≥ 6.0	

3 结语

根据实验结果,首钢采用SUFC工艺试制 $\Phi 40\text{mm}$ 规格棒材时,变形温度为880℃,自回火温度为550~600℃,其屈服强度可由空冷时628MPa提高至893MPa,抗拉强度由空冷时863MPa提高至1054MPa。因此,采用“柔性控轧+SUFC+自回火”工艺可大幅度提高材料的强

度和综合性能,且可替代热处理工艺,从而大大降低企业的生产成本。

参考文献:

- [1] 王国栋.以超快速冷却为核心的新一代TMCP技术[J].上海金属,2008,30(2):1-5.
- [2] 刘雅政,孙景宏,李志强,等.有效控制产品质量的轧制技术[J].轧钢,2003,20(3):19-22.