

冷却速度对 $\Phi 13$ mm SWRH82B 线材组织性能影响及 控冷工艺优化实践

秦凤婷¹ 王红伟¹ 董战利² 宋玉安¹

(1 济源职业技术学院冶金化工系, 济源 459000; 2 河南济源钢铁(集团)公司, 济源 459000)

摘要 采用热模拟试验机测定了 SWRH82B 钢(/% : 0.80C, 0.84Mn, 0.22Si, 0.013P, 0.008S, 0.32Cr) 的相变点和连续冷却转变(CCT)曲线, 通过金相显微镜、SEM、TEM 及力学性能测试分析了冷却速度(1~25 °C/s)对 SWRH82B 线材相变组织、珠光体片层间距和力学性能的影响, 得到了最佳冷却速度为 8~10 °C/s; 通过 150 mm × 150 mm SWRH82B 钢铸坯轧成 $\Phi 13$ mm 盘条后风冷 4 组 $Z_1 \sim Z_{13}$ 辊道速度(0.8~1.25 m/s, 1.0~1.45 m/s, 1.05~1.50 m/s, 1.10~1.55 m/s) 和冷却速度(8.9, 9.5, 10.4, 11.2 °C/s) 进行了生产试验, 得出在斯泰尔摩风冷线上的获得最佳冷却速度 8~10 °C/s 首段辊道速度应为 0.8~1.0 m/s, 可达到用户要求的指标: 时效后抗拉强度 $\geq 1\ 130$ MPa 和断面收缩率 $\geq 30\%$, 索氏体率 $\geq 80\%$, 表面脱碳深度 $\leq 1.5\%$ D (D - 线材直径)。

关键词 $\Phi 13$ mm 线材 SWRH82B 钢 控冷工艺 相变组织 首段辊道速度 力学性能

Effect of Cooling Rate on Structure and Properties of $\Phi 13$ mm SWRH82B Rod Coil and Optimized Practice of Controlled Cooling Process

Qin Fengting¹, Wang Hongwei¹, Dong Zhanli² and Song Yu'an¹

(1 Department of Metallurgy and Chemical Industry, Jiyuan Vocational Technical College, Jiyuan 459000;
2 Henan Jiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Jiyuan 459000)

Abstract The phase transformation point and continuous cooling transformation (CCT) curves of SWRH82B steel (/% : 0.80C, 0.84Mn, 0.22Si, 0.013P, 0.008S, 0.32Cr) are measured by thermal simulation machine, and the effect of cooling rate (1~25 °C/s) on phase transformation structure, pearlite interlamellar spacing and mechanical properties of SWRH82B rod coil is analyzed by optical microscope, SEM, TEM and mechanical testing to get the optimum cooling rate 8~10 °C/s. The commercial production test is carried out by 150 mm × 150 mm billet of SWRH82B steel rolled to $\Phi 13$ mm rod coil and fan cooling with four $Z_1 \sim Z_{13}$ cooling roller speed (0.8~1.25 m/s, 1.0~1.45 m/s, 1.05~1.50 m/s and 1.10~1.55 m/s) and cooling rate (8.9, 9.5, 10.4 and 11.2 °C/s), and it is obtained that in order to get optimum cooling rate 8~10 °C/s at Stelmor cooling line the roller speed of first section should be 0.8~1.0 m/s to come up to the required index of user: aged tensile strength $\geq 1\ 130$ MPa and reduction of area $\geq 30\%$, sorbitic structure ratio $\geq 80\%$ and depth of surface decarburization $\leq 1.5\%$ D (D - diameter of rod coil).

Material Index $\Phi 13$ mm Rod Coil, SWRH82B Steel, Controlling Cooling Process, Phase Transformation Structure, Roller Speed of First Section, Mechanical Properties

高强度低松弛预应力钢丝和钢绞线(简称 PC 钢)是线材制品中的一个重要品种,也是我国近年来发展速度较快的一种新型建筑材料,它广泛用于高速公路、大跨度桥梁、水利设施、高层建筑等工程上,其发展方向是大规格、高刚度、低松弛、耐腐蚀、大盘重。高碳钢线材 SWRH82B 是作为生产高强度、低松弛、大规格预应力钢丝及钢绞线的主要原料^[1]。

目前我国预应力制品用盘条的主要问题有钢质性能波动大、盘条通条性能差、索氏体化率不高且不均匀^[2],随着高速线材产量的逐年上升,提高组织索氏体化率、减小片层间距,以提高其拉拔性能迫在眉睫,为了更好的控制其产品性能,本文通过实验研究了冷却速度对高碳钢组织及片层间距的影响,得

出了冷却速度的理论控制值;又根据试验结果进行工业生产试验,验证了理论值的合理性,从而确定了其合理的冷却制度和斯泰尔摩风冷线首段辊道控制速度。

1 试验材料和方法

试验材料选用钢厂生产的 $\Phi 13$ mm 规格 SWRH82B 热轧线材,其化学成分见表 1,将线材机

表 1 SWRH82B 钢线材的化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of rod coil of SWRH82B steel /%

C	Mn	Si	P	S	Cr
0.80	0.84	0.22	0.013	0.008	0.32

机械加工成Φ10 mm × 15 mm的试样,利用Gleeble-1500热模拟试验机测量出试样的相变点和CCT曲线。试验方案:将试样加热达到1 000 ℃,保温2 min之后,以10 ℃/s冷却至960 ℃,两次以20 s⁻¹的变形速率,40%的变形量对试样进行压缩,然后以25 ℃/s快冷至吐丝温度870 ℃,再分别以1,3,5,6,8,9,10,15,18,20,25 ℃/s的冷却速度进行冷却,将测完CCT曲线的热模拟试样沿热电偶焊接处剖开,经过粗抛、精抛后,其金相观察面经硝酸酒精溶液进行腐蚀,利用光学显微镜观察金相组织。

2 试验结果和分析

2.1 CCT曲线

将各相变点标到温度-时间坐标上,用连线法将各物理意义相同的点连接起来,同时标出Ac₁、Ac_{cm}和Ms几段水平直线,即绘出如图1所示的CCT曲线图。

由动态CCT曲线可以看出,试样在冷却过程中只有珠光体转变区和马氏体转变区,当冷却速度很小(1 ℃/s)时,转变开始和转变终了的温度较高,温度区间较小,随着冷却速度的增大,转变开始和终了时间缩短,而转变经历的温度区间增大,得到珠光体组织,但组织的弥散程度不同。当冷却速度大于25 ℃/s时,奥氏体过冷至Ms点以下发生马氏体转变,最终得到马氏体加残留奥氏体组织。由此可见,冷却速度是诱发奥氏体组织转变的外部因素,研究冷却转变产物实质上就是研究冷却速度对过冷奥氏体分解及分解产物的影响。

对于SWRH82B高碳盘条而言,其主要用途是生产低松弛预应力钢绞线、钢丝绳、在制造行业生产胎圈钢丝、石油管线等产品,这就要求SWRH82B高碳盘条应具有良好的拉拔强度和延展性^[3],因此SWRH82B高碳盘条最理想的组织应是细珠光体即索氏体组织,索氏体组织片层间距细小,具有较高的强度和韧性,性能良好,组织均匀。线材组织为索氏体的同时应不能有马氏体、贝氏体和魏氏体等组织存在^[4]。为了得到索氏体组织,冷却速度应该控制在一个合理的范围。

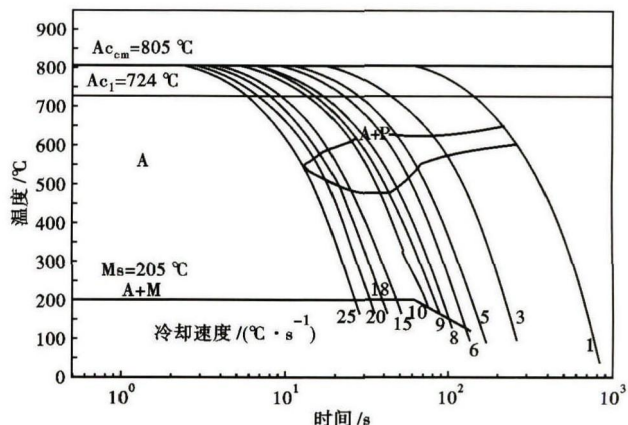


图1 SWRH82B钢线材的CCT图

Fig. 1 CCT diagram of SWRH82B steel rod coil

2.2 冷却速度对显微组织的影响

不同冷却速度下试样的金相组织如图2所示,SEM照片如图3所示。

从图2可以看出,当试样冷却速度为1 ℃/s和5 ℃/s时,金相组织全部为珠光体和索氏体组织,当冷却速度为6 ℃/s时,出现少量马氏体组织,当冷却速度为10 ℃/s时,因冷却速度增大,珠光体和索氏体的量逐渐减少,马氏体的量逐渐增多,当冷却速度为15 ℃/s时,冷却到室温的组织中大部分为马氏体组织,珠光体和索氏体较少,而当冷却速度达到25 ℃/s时,基本为马氏体组织。由此可见,冷却速度越大,马氏体所占比例越高。

对试样进行显微硬度测试,根据降温膨胀曲线上的切点或极点,结合金相组织、SEM照片,确定出不同冷却速度试样的相变温度、组织百分含量及显

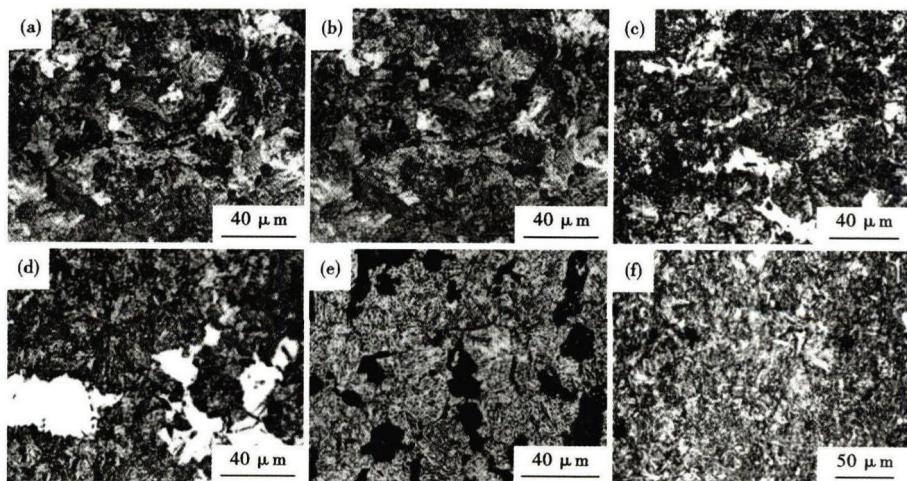


图2 SWRH82B钢Φ13 mm线材的组织形貌,冷却速度/(℃·s⁻¹):(a)1;(b)5;(c)6;(d)10;(e)15;(f)25

Fig. 2 Morphology of structure of Φ13 mm SWRH82B steel rod coil, cooling rate / (℃·s⁻¹): (a) 1; (b) 5; (c) 6; (d) 10; (e) 15 and (f) 25

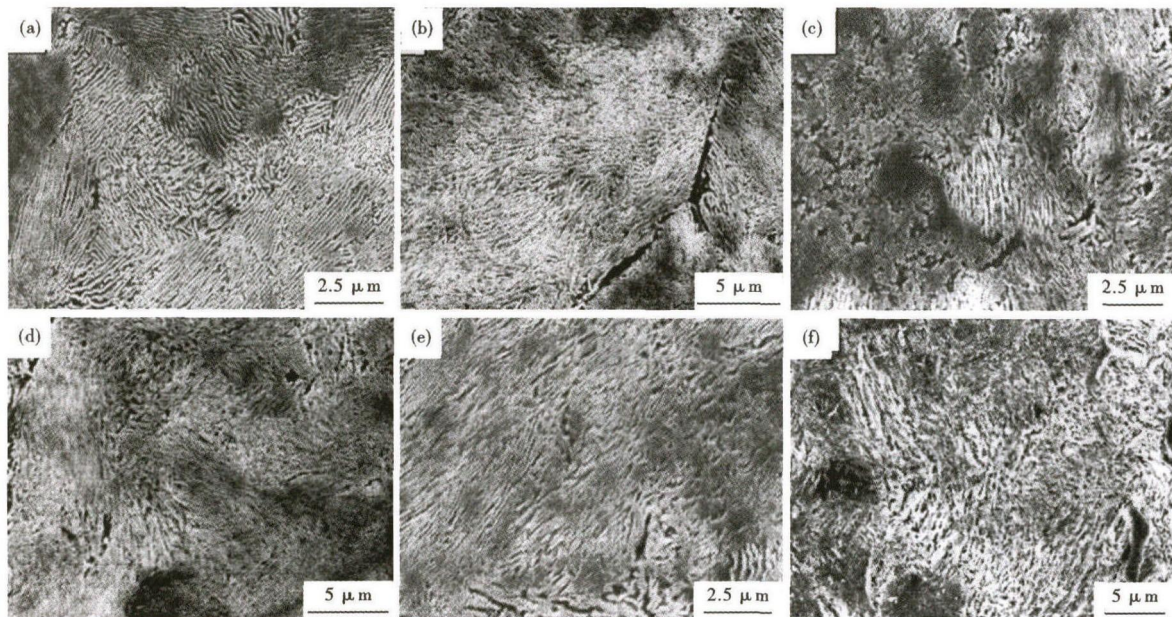


图 3 SWRH82B 钢 Φ13 mm 线材的 SEM 组织形貌,冷却速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$):(a)1;(b)3;(c)6;(d)8;(e)10;(f)15

Fig. 3 SEM morphology of structure of Φ13 mm SWRH82B steel rod coil, cooling rate / ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 1; (b) 3; (c) 6; (d) 8; (e) 10 and (f) 15

微硬度,如表 2 所示。

由 CCT 曲线结合显微组织分析表明,冷却速度加快使相变开始温度点变低,随着冷却速度的提高,过冷度增大,可促进铁素体的进一步形核,提高形核率,促使晶粒细化^[5]。

在冷却速度 6 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以下,没有马氏体产生,珠光体的力学性能逐步增加,说明珠光体的片层间距逐步变细。冷却速度为 15 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,硬度值增加明显,是因为马氏体的含量大增引起的。由此可知,引起 SWRH82B 盘条硬度增加的原因有两个:一是珠光体的片层间距,二是马氏体的含量。由于马氏体本身很脆,不能通过滑移或孪生变形使应力得以松弛,

导致容易形成裂纹或断裂,是应该避免的组织产物^[6]。因此,在抑制马氏体组织产生的同时,应该控制冷却速度,减小珠光体的片层间距。

2.3 冷却速度对珠光体片层间距的影响

珠光体的机械性能主要取决于珠光体的片层间距,共析钢珠光体的硬度和断裂强度均随片层间距的缩小而增大^[7],这是由于珠光体受力时,滑移的最大距离等于片层间距,片层间距越小,铁素体和渗碳体的相界面越多,对位错运动的阻力也就越大,所以片层间距小的珠光体硬度和强度都较高^[8]。因此,索氏体组织由于片层间距细小而具有较高的强度和良好的塑性,加工性能优良,索氏体化率越高,盘条越适合拉拔。

不同冷却速度下试样珠光体形态的 TEM 照片如图 4 所示。

利用测得不同冷却速度条件下的珠光体片层间距如表 3 所示。由数据可知,随着冷却速度增加,珠光体的片层间距在逐步递减。

珠光体的机械性能主要取决于珠光体的片层间距,片层间距越小,铁素体和渗碳体的相界面越多,对位错运动的阻力也就越大,因而硬度和强度都增高。由所测数据来看,片层间距在冷却速度为 8 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以后大幅减小,因此,初步考虑合理的冷却速

表 2 冷却速度对 SWRH82B 钢线材相变温度、组织和相含量及硬度的影响

Table 2 Effect of cooling rate on phase transformation temperature, structure and phase content and hardness of rod coil of SWRH82B steel

冷却速度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	珠光体转变/ $^{\circ}\text{C}$		Ms/ $^{\circ}\text{C}$	珠光体百分 含量/%	马氏体百分 含量/%	HV 值	HRC 值
	Ps	Pf					
1	650	602	-	100	0	319	37
3	640	575	-	100	0	353	39
5	628	548	-	100	0	380	41
6	626	510	125	96	4	382	42
8	624	485	159	91	9	416	44
9	618	471	174	88	12	463	46
10	606	470	188	85	15	491	49
15	590	495	205	20	50	747	57
18	576	506	205	13	87	851	63
20	564	522	未测出	10	90	864	63
25	549	535	未测出	1	99	914	66

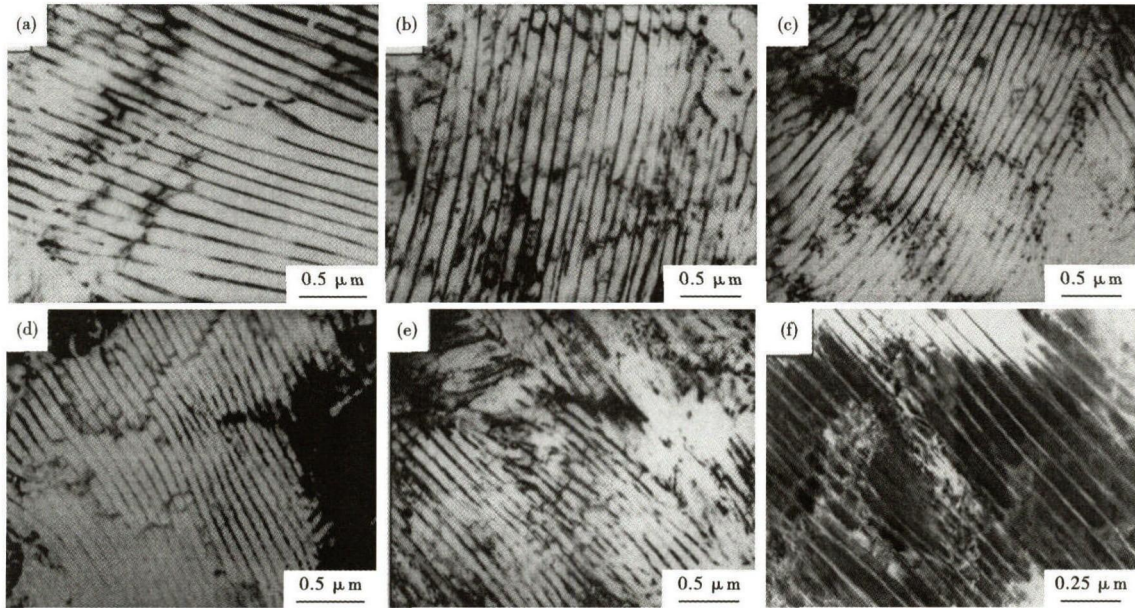


图 4 SWRH82B 钢 $\Phi 13$ mm 线材珠光体形貌, SEM, 冷却速度/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$: (a) 1; (b) 3; (c) 5; (d) 6; (e) 8; (f) 10

Fig. 4 Morphology of pearlite in $\Phi 13$ mm SWRH82B steel rod coil, SEM, cooling rate / $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$: (a) 1; (b) 3; (c) 5; (d) 6; (e) 8 and (f) 10

表 3 冷却速度对 SWRH82B 钢线材珠光体片层间距的影响
Table 3 Effect of cooling rate on interlamellar spacing of pearlite in rod coil of SWRH82B steel

冷却速度/ $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	相变区平均 温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均过冷度/ $^{\circ}\text{C}$	珠光体片层 间距/ μm
1	626	51	0.158
3	607.5	69.5	0.114
5	592	85	0.086
6	577	100	0.080
8	571.5	105.5	0.076
10	544	133	0.062

度应为 $8 \sim 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

3 控冷工艺优化

3.1 工业生产试验

根据理论试验结果,对 SWRH82B 钢进行了试轧,选取同一炉次的 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 断面规格 SWRH82B 钢坯轧制成 $\Phi 13 \text{ mm}$ 规格盘条,轧后选用 4 种不同的风冷速度进行试验,并对不同工艺下的试样进行性能检测,由检测数据得出实际生产中的理想冷却速度值。试样炉次的加热及轧制控制工艺参数如表 4 所示。

对于斯泰尔摩标准冷却模式-强制风冷来说,其

冷却速度不可能达到形成马氏体的临界转变温度,风冷速度越快,奥氏体转变成索氏体越容易。在避免马氏体组织的同时,在实际冷却时应采用大风量、高风压,以求快速冷却,来控制网状渗碳体的析出量,增大过冷度。因此,风速试验速度设计为上限速度,风冷线辊道保温罩全部打开,风机风量 100%,其辊道速度按照 4 种方案进行设计,具体参数如表 5 所示。

3.2 生产试验结果

试验后取样进行力学性能检测、金相组织观察和珠光体片层间距观察,其检测结果见表 6。

从实物检测结果看,采用 4 种控冷工艺控制的线材成品均达到了 JISG3506-2004 标准及用户的要求:抗拉强度 $\geq 1130 \text{ MPa}$ (时效后),断面收缩率 $\geq 30\%$ (时效 15 天),索氏体率 $\geq 80\%$;表面脱碳深度 $\leq 1.5\% D$ (D -线材直径)的指标。首段速度由 0.8 m/s 提高到 $1.0, 1.05, 1.10 \text{ m/s}$,在成品速度不变的情况下,随着辊道速度提高,线圈堆放密度变小,盘条的冷却速度加快。

从力学性能测试结果看,随着冷却速度提高,盘

表 4 SWRH82B 钢 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 铸坯加热制度和热轧控制工艺参数

Table 4 Parameters of SWRH82B steel $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ billet heating scheme and hot rolling control process parameters

加热控制温度/ $^{\circ}\text{C}$				加热时间/ min	热轧控制工艺		
预热段	加热段	均热段	出钢温度		进减定径温度/ $^{\circ}\text{C}$	吐丝温度/ $^{\circ}\text{C}$	成品速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
≤ 900	980 ~ 1 050	1 050 ~ 1 090	950 ~ 990	≤ 300	870 ± 10	890 ± 10	40

条的抗拉强度和断面收缩率并没有明显增加,工艺 3 和工艺 4 反而略有下降;从显微组织检测上看,随着辊道速度的提高,线材的索氏体率没有变化,仍为 1 级(95%),工艺 3、4 中有少量马氏体异常组织,马氏体异常组织应该是由 C、Cr 偏析造成的;从片层间距上看,随着辊道速度的提高,线材直径 1/4 处的珠光体片层间距逐渐变小,而线材芯部的珠光体片层间距逐渐变大。工艺 3 和工艺 4 中,线材芯部的冷却时间相对较短,芯部冷却不充分,珠光体片层间距相对较粗。由此可见,辊速越高,大规格线材内外温度梯度越大,组织均匀性越差。

综合上述因素,在目前的化学成分下,斯泰尔摩

表 5 SWRH82B 钢线材风冷辊道速度设计 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Table 5 Design of fan cooling roller speed for rod coil of SWRH82B steel / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

辊道	工艺方案			
	1	2	3	4
Z_1	0.80	1.00	1.05	1.10
Z_2	0.85	1.05	1.10	1.15
Z_3	0.90	1.10	1.15	1.20
Z_4	0.96	1.16	1.21	1.26
Z_5	1.02	1.22	1.27	1.32
Z_6	1.08	1.28	1.33	1.38
Z_7	1.13	1.33	1.38	1.43
Z_8	1.17	1.37	1.42	1.47
Z_9	1.21	1.41	1.46	1.51
Z_{10}	1.25	1.45	1.50	1.55
Z_{11}	1.25	1.45	1.50	1.55
Z_{12}	1.25	1.45	1.50	1.55
Z_{13}	1.25	1.45	1.50	1.55

表 6 工业试验 SWRH82B 钢线材性能检测结果

Table 6 Examination results of performance of commercial-pilot SWRH82B steel rod coil

工艺方案	冷却速度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	热轧态性能(时效 15 天)		晶粒度/ 级	索氏体级别, 含量/%	芯部显微组织	脱碳层/ mm	珠光体片层间距/ μm	
		R_m/MPa	$Z/\%$					直径 1/4 处	芯部
1	8.9	1 143	31.0	9.0	1 级,95	S+少量片状 P	0	0.22	0.24
2	9.5	1 168	36.5	9.0	1 级,95	S+少量片状 P	0.10	0.20	0.25
3	10.4	1 152	34.5	9.0	1 级,95	S+少量片状 P+少量 M	0.08	0.19	0.26
4	11.2	1 154	35.5	9.0	1 级,95	S+少量片状 P+少量 M	0.07	0.18	0.28

注:S-索氏体;P-珠光体;M-马氏体。

风冷线辊道首段速度应不能超过 1.0 m/s,否则可能影响线材的组织性能。结合风冷线的实际数据,认为生产大规格 SWRH82B 线材时在斯泰尔摩风冷线上相变阶段的理想冷却速度为 8~10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,首段辊道速度以 0.8~1.0 m/s 为宜。

4 结论

(1) 利用热模拟试验机测定了 SWRH82B 的相变点和 CCT 曲线,结合金相观察、SEM、TEM 和力学性能测试等手段,分析了冷却速度对 SWRH82B 线材相变组织、珠光体片层间距及力学性能的影响。结果表明,要得到片层间距较细的索氏体组织,理论上冷却速度的合理控制范围为 8~10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

(2) 实际工业试验结果表明,在避免马氏体组织的同时,应在实际冷却时采用大风量、高风压,以求快速冷却。结合风冷线的实际数据,得出生产大规格 SWRH82B 线材时在斯泰尔摩风冷线上相变阶段的理想冷却速度为 8~10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,首段辊道速度为 0.8~1.0 m/s。

参考文献

- [1] 秦凤婷,王红伟,刘宗辉. SWRH82B 钢盘条笔尖状断口的分析和工艺改进[J]. 特殊钢,2013,34(4):49-52.
- [2] 黎孝根. X82B 盘条放线脆断原因分析[J]. 金属制品,2013,39(1):37-41.
- [3] 卫广智,潘广明,齐福利. SWRH82B 珠光体片层间距计算模型研究[J]. 现代机械,2012(1):72-73.
- [4] 王克杰,薛 瑞,董天真,等. 控冷工艺对 82B 盘条相变行为影响的研究[J]. 天津冶金,2010(4):13-15,20.
- [5] 陈振业. 变形工艺对微合金钢组织的影响[D]. 武汉:武汉科技大学,2009.
- [6] 杨 洁,王 勇,韩 涛,等. 焊接热循环峰值温度对 ASTM4130 钢热影响区组织和性能的影响[J]. 热加工工艺,2010,39(7):140-142.
- [7] 崔忠圻,谭耀春. 金属学与热处理(第二版)[M]. 北京:机械工业出版社,2007:244-246.
- [8] 洪树利. 帘线钢盘条索氏体片层间距控制生产实践[J]. 鞍钢技术,2011(2):57-62.

秦凤婷(1983-),女,硕士(2008 年东北大学),讲师,2006 年中原工学院(本科)毕业,钢铁冶金技术研究。

E-mail: qinfengting@163.com

收稿日期:2016-05-30