

薄板坯热连轧工艺对 65Mn 钢带 组织和性能的影响

李秀景 王淑华 张 星 李宏伟

(唐山钢铁集团有限责任公司 河北 唐山 063016)

摘 要: 对不同热连轧卷取工艺生产的 65Mn 钢带进行了组织和性能对比及模拟淬火试验分析,结果表明:卷取温度由 740 ℃降低至 600 ℃,组织中铁素体含量逐渐降低并消失,珠光体尺寸及层片间距逐渐减小,钢带强度和硬度不断上升;钢带在 850 ℃加热时相变奥氏体晶粒长大的阻力显著,再结晶奥氏体晶粒尺寸受原始珠光体尺寸直接影响;通过模拟淬火试验结果设定的工业生产工艺可满足钢带加工使用要求,淬火后钢带表面硬度(HRC) ≥ 53。

关键词: 薄板坯连铸连轧; 65Mn 钢; 奥氏体化; 组织; 力学性能

中图分类号: TF76 ,TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2020)06-0158-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.06.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of FTSR Hot Rolling Process on Microstructure and Mechanical Properties of 65Mn Strip

Li Xiujing ,Wang Shuhua ,Zhang Xing ,Li Hongwei

(Tangshan Iron and Steel Group Co.Ltd ,Tangshan 063016 ,Hebei ,China)

Abstract: Microstructure and mechanical properties of FTSR 65Mn steel strips produced by different hot coiling technologies was investigated and simulated quenching heat-treatment were carried on. The result shows that ferrite reduces in term of its volume fraction and finically disappears with coiling temperature going down from 740 ℃ to 600 ℃, but the pearlite size and space decrease and strength and hardness of resulted 65Mn strip increase. When the strip is heated at 850 ℃, the coarsening of transformed austenite grain is retarded, and the size of grains is directly affected by primary pearlite. Industrial quenching process based on experiment is suitable for strip production of the required performance, and the hardness of strip surface after quenching is above 53HRC.

Key words: FTSR ,65Mn steel ,austenitizing ,microstructure ,mechanical properties

0 引言

相对于传统的中板、厚板连铸及热连轧工艺流程,薄板坯连铸连轧生产的连铸坯更薄、连铸扇形段压缩比更大、铸坯入炉温度更高、加热时间更短,因

此连铸坯芯部质量更高、表面氧化烧损更少,特别有利于碳、锰等易偏析元素含量高、铸坯加热工艺敏感的优质碳素钢、碳素合金钢等热轧钢带产品的生产^[1]。唐钢利用薄板坯连铸连轧生产线(FTSR)的优势,成功开发了35、40Mn、45、50Mn等优质碳素钢

收稿日期: 2019-12-24

作者简介: 李秀景(1980—),女,河北邢台人,硕士,高级工程师,主要从事热轧钢带产品设计开发研究,E-mail: 404298642@qq.com。通讯作者: 王淑华(1979—),女,河北唐山市人,硕士,高级工程师,主要从事冷轧退火钢带产品设计开发,E-mail: wsh_sincere@163.com。

和 30CrMo、40Cr、65Mn、75Cr1 等碳素合金钢热轧钢带产品,形成了稳定的批量生产能力。65Mn 热轧钢带作为唐钢的优势产品,广泛应用于金刚石锯片、农用机械等行业,热处理淬火是最基本的加工使用方式^[2]。有研究表明,钢的初始组织状态对热处理淬火的奥氏体相变和热处理后性能影响显著,对于不含微合金元素的普通碳素结构钢和合金钢影响更加明显^[3-5]。为获得良好的淬火热处理组织和性能,特针对薄板坯连铸连轧 65Mn 钢带开展了不同热连轧工艺试验,对钢带组织和性能进行了对比分析;随后通过模拟淬火试验对比了不同初始组织的奥氏体化行为差异;最后基于模拟试验结果进行了工业生产试验,设计并验证了满足使用要求的最佳淬火热处理工艺。

1 试验材料和方法

试验采用的试样取自 FTSR 流程生产的 65Mn 钢热轧钢带,化学成分如表 1 所示。钢带在相同轧制变形条件下调整轧后冷却工艺,分别使用 740、720、650、640、600 °C 进行轧制卷取,对应试样厚度、编号及轧制工艺如表 2 所示。在热轧钢带上加工与轧向垂直的标准拉伸试样和表面硬度试样,分别进行拉伸、硬度试验检测;在终冷温度 740 °C 和 640 °C 的热轧板上加工 25 mm×25 mm×厚度的热处理试样,在马弗炉中进行模拟淬火热处理,淬火加热温度 850 °C,加热时间分别为 10、30、60、120、240 min,保温时间结束后在 20# 机油中进行淬火至室温。热轧钢带试样及淬火试样金相组织制备方法参考文献[6]。

表 1 65Mn 钢化学成分
Table 1 Composition analysis results of 65Mn steel

C	Mn	S	P	Si	N	Als	Fe
0.62~0.70	0.90~1.20	≤0.025	≤0.025	0.17~0.37	≤0.006 5	≤0.04	Bal.

表 2 热轧工艺条件及对应试样编号
Table 2 Hot rolling process and sample codes

试样编号	钢带厚度/mm	终轧温度/°C	卷取温度/°C
1#	8.0	870	740
2#	8.0	870	720
3#	8.0	870	650
4#	8.0	870	640
5#	5.0	870	600
6#	4.0	870	600

2 试验结果及分析

2.1 热轧钢带原始组织及力学性能

钢带热轧组织形貌如图 1 所示。由图 1 分析,不同热轧工艺条件下 65Mn 钢带组织均为珠光体+极少量的铁素体,由于 FTSR 工艺生产条件下钢带终轧后在层冷辊道上冷却强度高于普通热轧线,导致奥氏体先共析转变受到抑制,因此得到大量共析转变珠光体组织;在组织组成上,高温卷取时析出的先共析铁素体沿原始奥氏体晶界分布,但由于含量较少,未完全呈现网状分布的特点;随着卷取温度降低,组织中铁素体含量逐渐减少,当温度低于 640 °C 时,铁素体几乎消失,得到完全共析转变组织。

为进一步分析钢带组织差异,对卷取温度差异较大的 1#、4# 和 5# 试样珠光体组织进行了扫描电子

显微镜观察,结果如图 2 所示。图 2 对比珠光体形貌差异明显,随着卷取温度由 740 °C 降低到 640 °C 和 600 °C,珠光体尺寸发生了显著的降低,珠光体层片间距也明显减小。根据钢的过冷奥氏体连续转变理论,轧后冷却强度越大,相变驱动力越大,转变得到的珠光体形核数量越多,得到的珠光体尺寸越细小、层片间距也越小^[7-8]。对图 2 中圆圈范围内的珠光体层片间距进行统计分析,得到在 740、640、600 °C 卷取条件下珠光体层片间距平均值分别为 315、277、197 nm。

表 3 是不同热连轧工艺生产的钢带实际性能检测结果。不同热连轧工艺条件下 65Mn 钢带性能均符合金刚石锯片基体用 65Mn 钢板及钢带标准 GB/T 24181—2009 要求;随卷取温度降低,65Mn 钢带呈现强度和硬度升高、塑性降低的趋势;钢带力学性能变化规律与组织变化规律基本吻合。

2.2 不同原始组织的奥氏体化行为

分别对卷取温度 740 °C 和 640 °C 的 65Mn 钢带 1#、4# 试样在 850 °C、不同保温时间条件下进行奥氏体化处理,淬火后采用《GB/T 6394—2017 金属平均晶粒度测定法》中截点法对晶粒尺寸和晶粒度进行测量,结果如表 4 所示;奥氏体晶粒形貌如图 3、4 所示;晶粒尺寸与保温时间的关系如图 5 所示。

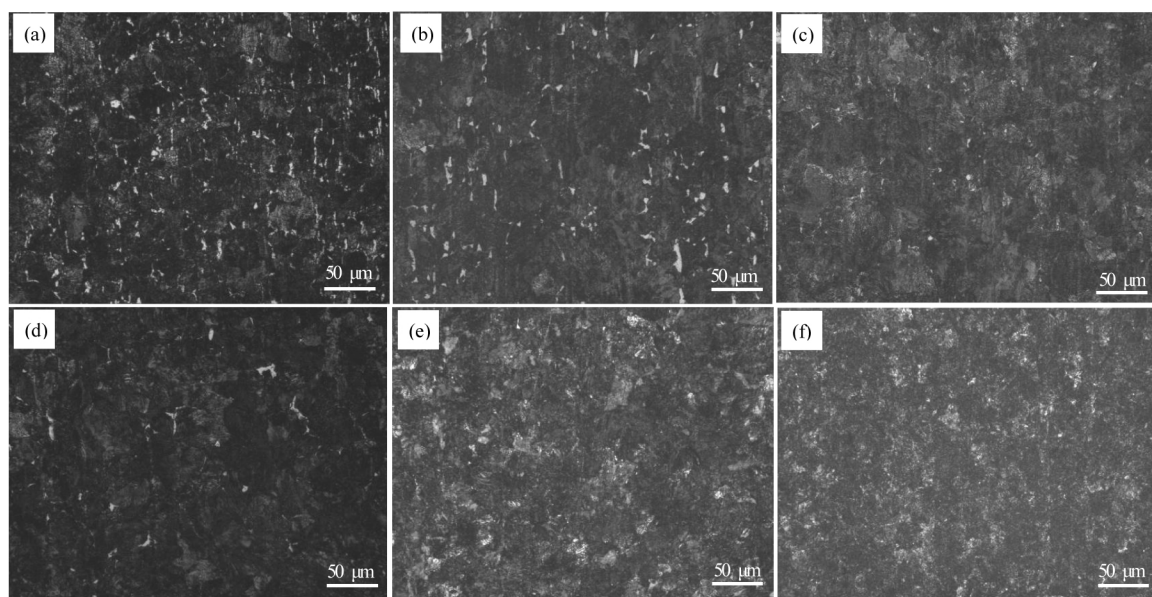
(a)1[#]; (b)2[#]; (c)3[#]; (d)4[#]; (e)5[#]; (f)6[#]

图1 热轧板组织形貌

Fig.1 Microstructure of hot rolled strips with different thickness coiled at different temperatures

(a)1[#]; (b)4[#]; (c)5[#]

图2 不同终冷温度钢带珠光体微观形貌

Fig.2 Pearlite microstructure of 65Mn strip at different finish cooling temperatures

表3 热轧 65Mn 钢带力学性能

Table 3 Mechanical properties of resulted hot rolled 65Mn strips

试样编号	钢带厚度/mm	R_m /MPa	A /%	硬度(HBW)
1 [#]	8.0	853	19.5	251
2 [#]	8.0	862	16.5	258
3 [#]	8.0	882	16.0	267
4 [#]	8.0	888	15.0	269
5 [#]	5.0	906	15.5	270
6 [#]	4.0	911	14.0	276

图3、4分别为1[#]和4[#]试样保温10~240 min后的奥氏体晶粒形貌。从晶粒分布上看,在240 min以内保温时,奥氏体晶粒由大量细小晶粒组成,无明显混晶形貌,说明此保温时间区间内奥氏体晶粒以

正常形核、长大方式演变;由于原始组织基本为共析转变的珠光体,而此类组织奥氏体化过程中晶粒形核与长大会比较均匀,最易得到均匀、细小的奥氏体晶粒^[9],因此1[#]和4[#]试样相变奥氏体组织形貌并未出现显著差异。

表4 不同保温时间条件下奥氏体晶粒尺寸

Table 4 Austenite grain size of steel strip reheated at 850 °C holding for different time

试样编号	保温时间/min	平均直径/μm	试样编号	保温时间/min	平均直径/μm
1 [#]	10	15.357	4 [#]	10	11.979
	30	15.978		30	12.467
	60	16.646		60	12.563
	120	16.308		120	13.355
	240	17.429		240	14.179

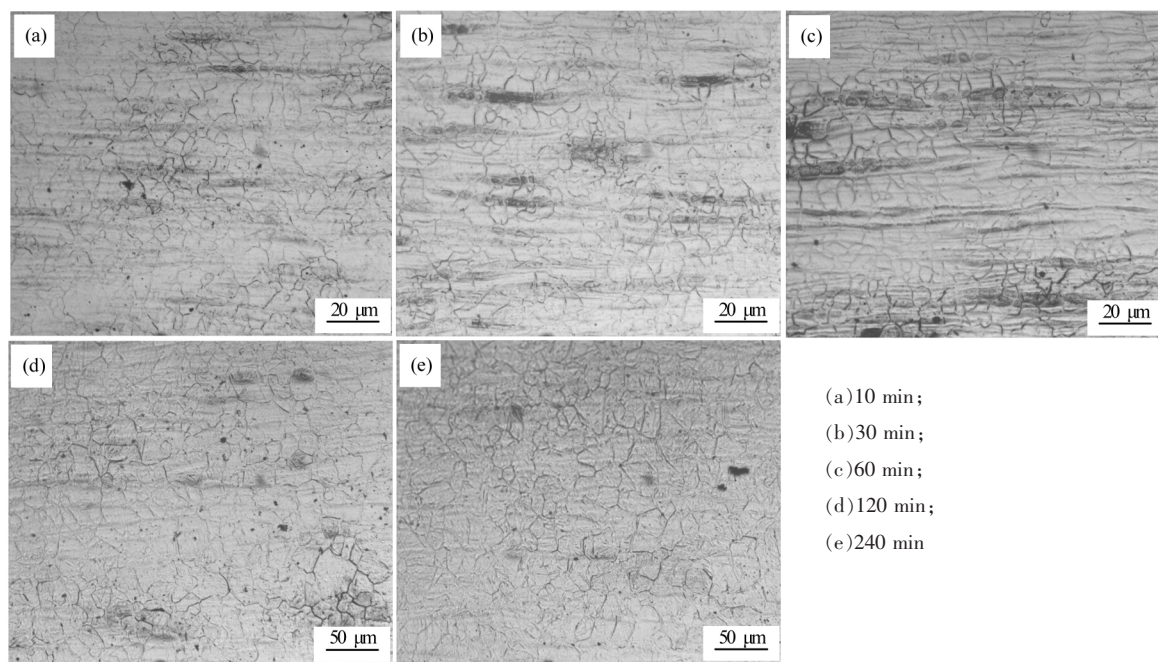
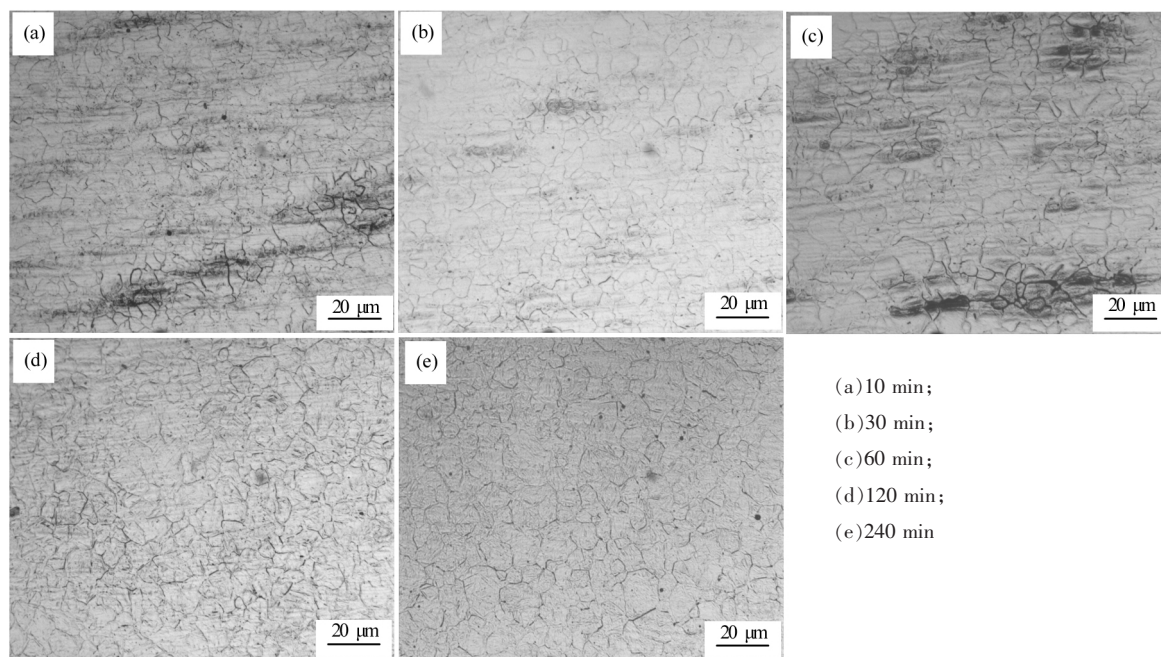
图 3 1[#]试样 850 °C 加热条件下奥氏体形貌Fig.3 Austenite grains of sample 1[#] reheated at 850 °C图 4 4[#]试样 850 °C 加热条件下奥氏体形貌Fig.4 Austenite grains of sample 4[#] reheated at 850 °C

图 5 的结果显示,在相同的奥氏体化条件下 1[#] 试样比 4[#] 试样晶粒尺寸增加了 20%~25%,且随保温时间增加,奥氏体晶粒尺寸与保温时间基本呈现等温长大的抛物线变化规律^[10]:

$$D = A \cdot t^n \quad (1)$$

式中 D 为奥氏体晶粒尺寸, μm ; n 和 A 为与材料有关的常数; t 为保温时间, min 。对表 4 中不同保温时间的奥氏体晶粒尺寸数据进行整理,通过自定义拟

合函数,分别得到1[#]和4[#]试样奥氏体晶粒尺寸与保温时间的拟合结果为:

$$D = 14.157 \cdot t^{0.0356} \quad (2)$$

$$D = 10.425 \cdot t^{0.0528} \quad (3)$$

理论上,忽略初始晶粒尺寸的影响,基于理论晶界迁移速度的晶粒尺寸的二次方正比于保温时间^[11],即材料参数 n 理论上接近0.5。通过回归得到的1[#]和4[#]试样抛物线模型的 n 值分别为0.0356和0.0528,均显著小于0.5,表明在850℃加热条件下奥氏体晶粒长大受到显著阻力,因此晶粒尺寸随时间变化不明显,与图3、4的观测结果一致。

2.3 钢带淬火热处理工艺设计及应用

通过淬火试验分析结果,使用马弗炉设计模拟热处理淬火工艺如下:淬火加热温度850℃;淬火加热时间参考工业生产经验时间15 min+2~2.5倍钢带厚度(mm),实际取30 min;淬火介质使用20[#]机油,油温采用室温。分别对1[#]试样和4[#]试样进行模拟淬火热处理,检测钢带表面硬度及显微组织,结果分别如表5、图6所示。模拟淬火热处理的结果表明,经过模拟热处理工艺处理后的钢带均可完全转变为均匀的马氏体组织,但初始珠光体尺寸和层片间距更小的组织淬火后硬度更高;由于初始组织的

奥氏体化行为有差异,导致淬火后的马氏体组织也不相同,初始较细的珠光体淬火后的马氏体片条也更加细小。

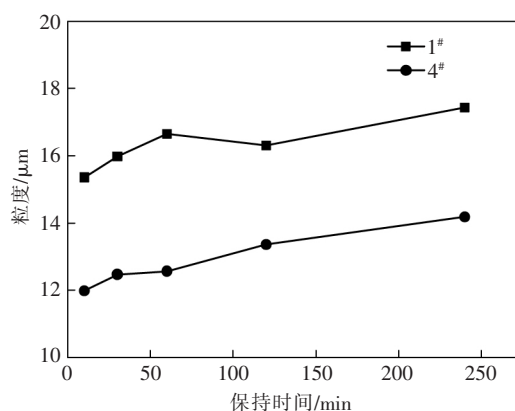


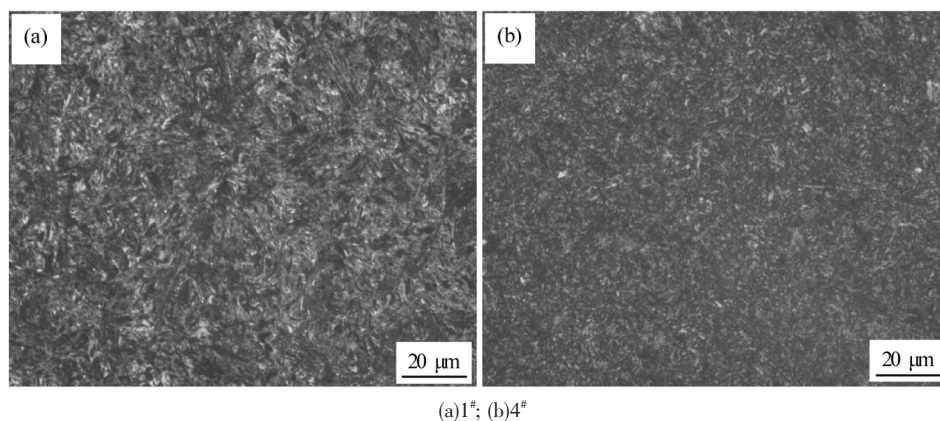
图5 奥氏体晶粒尺寸与保温时间的关系

Fig.5 Relationship between austenite grain size and austenitizing time

表5 65Mn钢带模拟淬火热处理表面硬度(HRC)

Table 5 Surface hardness of simulated quenching 65Mn strip

试样编号	硬度(HRC)			
	位置1	位置2	位置3	平均值
1 [#]	48.9	46.1	51.4	48.8
4 [#]	53.0	52.4	49.3	51.6



(a)1[#]; (b)4[#]

图6 模拟淬火热处理组织形貌

Fig.6 Microstructure of simulated quenching 65Mn strip

为了进一步验证钢带淬火热处理工艺的符合性,对1[#]、4[#]试样进行了工业试验,其中考虑到工业化生产过程与实验室小规模试验的差别,适当提高热处理淬火加热温度至860℃;淬火加热采用工业盐浴加热方式,钢带温度更加均匀;淬火介质使用75℃的32[#]机油,提高淬火降温能力;试样加工为实际零件尺寸235 mm×235 mm;设计淬火

硬度(HRC)≥52。

工业试制的钢带淬火硬度检测结果如表6所示,其中位置1~3分别为钢带表面随机检测点。

工业试制的钢带硬度稍高于实验室模拟结果;4[#]试样硬度仍略高于1[#]试样,与实验室结果吻合;工业试制的钢带硬度(HRC)≥53,满足设计要求。

表 6 65Mn 钢带工业淬火热处理表面硬度(HRc)
Table 6 Surface hardness of industrial quenching 65Mn strip

试样编号	硬度(HRc)			
	位置 1	位置 2	位置 3	平均值
1 [#]	49.6	55.8	52.2	52.5
4 [#]	53.4	54.0	56.4	54.6

3 结论

通过对 FTSR 不同热连轧工艺的 65Mn 钢带组织和性能分析、模拟淬火试验及应用研究,得到如下

结论:

1) 随着热轧卷取温度降低,钢带组织中铁素体含量逐渐降低并消失,珠光体层片间距逐渐减小,钢带强度和硬度不断上升。

2) 钢带原始珠光体层片间距越小,奥氏体再结晶晶粒尺寸越小。

3) 钢带在 850 ℃ 等温奥氏体化时晶粒长大的阻力显著,可作为热处理淬火加热温度制定的依据。

4) 通过模拟淬火试验结果设定的工业生产工艺可满足钢带加工使用要求,平均淬火硬度(HRc) 54.6。

参考文献

- [1] Wu Hao. Study on recrystallization of 30CrMo steel based on CSP process [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.
(吴浩. 基于 CSP 工艺 30CrMo 钢再结晶研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.)
- [2] Li Xiuqing, Hou Mingshan, Zhang Xing *et al.* Manufacturing defect analysis of 65Mn steel in thin slab continuous casting-rolling process [J]. Metallurgical Information Review, 2016(3): 31-34.
(李秀景, 侯明山, 张星, 等. 薄板坯连铸连轧生产 65Mn 钢常见缺陷浅析[J]. 冶金信息导刊, 2016(3): 31-34.)
- [3] Zheng Yafeng, Li Xiaocheng. Influence of Ti on grain growth behavior of non-quenched and tempered plastic mold steel [J]. Materials Review, 2017, 31(4): 82-87.
(郑亚风, 李晓成. 钛对非调质塑料模具钢奥氏体晶粒长大规律的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(4): 82-87.)
- [4] Ma Han, Wang Lei. Application of vanadium and titanium in high carbon steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(4): 69-74.
(麻晗, 王雷. V 和 Ti 在高碳钢中的应用[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(4): 69-74.)
- [5] Li Xiaolin, Xiao Baoliang, Cui Yang *et al.* Solid solution and re-precipitation of carbonitride in Nb, Ti-microalloyed steel [J]. Materials Review, 2017, 31(1): 105-111.
(李晓林, 肖宝亮, 崔阳, 等. Nb, Ti 微合金钢中碳氮化物固溶与再析出的研究[J]. 材料导报, 2017, 31(1): 105-111.)
- [6] Zhang Xing, Li Xiuqing, Hou Mingshan *et al.* Research of austenite grain growth behavior in 65Mn steel based on FTSC process [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(11): 62-65.
(张星, 李秀景, 侯明山, 等. 薄板坯连铸连轧 65Mn 钢奥氏体晶粒长大规律[J]. 金属热处理, 2018, 43(11): 62-65.)
- [7] Song Jinying, Qi Xiangyu, Chen Liansheng *et al.* Effect of cooling process on microstructure and mechanical properties of hot rolled 65Mn steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(11): 92-95.
(宋进英, 齐祥羽, 陈连生, 等. 冷却工艺对热轧 65Mn 钢显微组织和力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 39(11): 92-95.)
- [8] Qin Fengting, Wang Hongwei, Dong Zhanli *et al.* Effect of cooling rate on structure and properties of Ø13 mm SWRH82B rod coil and optimized practice of controlled cooling process [J]. Special Steel, 2016, 37(5): 40-44.
(秦凤婷, 王红伟, 董战利, 等. 冷却速度对 Ø13 mm SWRH82B 线材组织性能影响及控冷工艺优化实践[J]. 特殊钢, 2016, 37(5): 40-44.)
- [9] Cui Zhongxi, Qin Yaochun. Metallography & heat treatment [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 237.
(崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 237.)
- [10] Xu Changgan, Tian Yongge. Austenite grain growth and oxidization dynamics of steel 15Cr2Ni10MoCo14 at high temperature [J]. Special Steel, 1995, 16(6): 19-22.
(许昌淦, 田永革. 15Cr2Ni10MoCo14 钢奥氏体晶粒长大和高温氧化动力学[J]. 特殊钢, 1995, 16(6): 19-22.)
- [11] Zhong Yunlong, Liu Guoquan, Liu Shengxin *et al.* Austenite grain growth behavior of steel 33Mn2V designed for oil-well tubes [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(7): 699-703.
(钟云龙, 刘国权, 刘胜新, 等. 新型油井管钢 33Mn2V 的奥氏体晶粒长大规律[J]. 金属学报, 2003, 39(7): 699-703.)

编辑 邓淑惠