

薄板坯连铸连轧生产含铌汽车结构钢的开发

杨 丽¹, 董欣欣¹, 刘丽萍²

(1. 唐山科技职业技术学院 材料工程系, 河北 唐山 063000; 2. 唐山钢铁集团有限责任公司技术中心, 河北 唐山 063000)

摘要: 围绕薄板坯连铸连轧生产含铌汽车结构钢, 开展相关研究工作及工业化实践。在欧标热轧汽车结构钢中选取代表性钢种 S355MC 和 S420MC, 根据产品技术要求及合金元素在钢中的作用, 确定了低碳、低硅、高锰、铌钛微合金化的成分体系; 针对产品的成分特点, 确定了冶炼工艺制度, 转炉采用金属锰配锰, 精炼采用中碳锰铁微调, 同时转炉采用高温出钢, 从而有效地避免了增硅、增碳; 通过开展高温热塑性实验研究, 获取了 S355MC 钢和 S420MC 钢的高温塑性随温度的变化规律, 确定了连铸采用高碱度保护渣, 二冷采用弱冷模式; 依据控轧控冷过程中微合金元素的析出规律及相变机理, 确定了板坯加热温度、粗轧出口温度、终轧温度、卷取温度等关键工艺控制点, 使产品组织性能获得有效控制。

关键词: 薄板坯连铸连轧; 高温热塑性; 保护渣; 铌钛微合金化; 控轧控冷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.021

中图分类号: TG161

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 06-0148-05

Development on niobium-containing automotive structural steel produced by thin slab continuous casting and rolling

Yang Li¹, Dong Xinxin¹, Liu Liping²

(1. Department of Materials Engineering, Tangshan Vocational College of Science and Technology, Tangshan 063000, China;

2. Technical Center of Tanshan Iron & Steel Group Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

Abstract: Focusing on the production of niobium-containing automotive structural steel by thin slab continuous casting and rolling, relevant research work and industrial practice were carried out combined with the product technical requirements of hot-rolled automotive structural steel S355MC and S420MC selecting from the European standard and the role of alloy elements in the steel, the composition system of low-carbon, low-silicon, high-manganese and niobium-titanium microalloyed was determined. The smelting process system was determined according to the composition characteristics of the product, the converter adept metal manganese with manganese to effectively avoid the increase of silicon and carbon, and LF adept medium carbon ferromanganese for fine adjustment. At the same time, the converter was required to tap at high temperature. The law of high temperature plasticity for S355MC and S420MC steels changed with the temperature was obtained from the high temperature plasticity experiment, it was determined that the continuous casting adept high basicity casting powder, and weak cooling mode was used in the secondary cooling. The key process control points such as slab heating temperature, rough rolling outlet temperature, final rolling temperature and colling tempereature were determined according to the precipitation law and phase transformation mechanism of microalloyed elements in the process of controlled rolling and controlled coding, so that the structure and properties of products were effectively controlled.

Key words: thin slab continuous casting and rolling; high temperature thermoplasticity; casting powder; niobium titanium microalloyed; controlled rolling and controlled coding

薄板坯流程由于裂纹几率高、浇铸过程不稳定、力学性能波动大, 制约了多样化品种钢的开发, 但由于其生产效率高, 尤其是应用在薄规格带钢生产时的

优势明显, 因此, 有必要进行针对性的产品设计与工艺探索, 以达到充分挖掘产线潜能的目的^[1-3]。热轧高强汽车结构钢主要用于加工汽车横、纵梁及各种加强件, 为适应汽车轻量化发展趋势, 对薄规格产品的需求更加旺盛^[4]。本文依据 S355MC 钢和 S420MC 钢产品的技术要求^[5], 结合产线特点进行化学成分设计, 针对薄板坯流程中浇铸铌微合金化钢种铸坯时易出现裂纹缺陷、浇铸过程不稳定的特点, 结合高温热塑性测定结果, 确定了保护渣种类及二冷工艺, 同时

收稿日期: 2021-05-13; 修订日期: 2021-08-25

基金项目: 河北省高等学校科学研究项目 (QN2021411)

作者简介: 杨 丽 (1983-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: tsyangli2009@163.com

通信作者: 董欣欣 (1977-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: tgdongxin@sina.com

通过控轧控冷工艺的优化，实现组织性能的有效控制。

1 产品主要技术指标与化学成分设计

欧标汽车结构钢 S355MC 和 S420MC 的化学成分要求见表 1，其中 Nb、V、Ti 之和的最大含量为

0.22%。欧标汽车结构钢 S355MC 和 S420MC 的力学性能要求见表 2，其中，A80 表示试样的标距为 80 mm，A 表示试样采用比例标距。拉伸试验采用纵向试样，弯曲试验采用横向试样，180°冷弯试验中，弯心直径 d 为试样厚度 a 的 1/2，即 $d = \Phi 0.5a$ 。

表 1 结构钢 S355MC 和 S420MC 的化学成分要求（%，质量分数）

Table 1 Chemical composition requirements for structural steels S355MC and S420MC（%，mass fraction）

牌号	C	Mn	Si	P	S	Als	Nb	V	Ti
S355MC 钢	≤0.12	≤1.50	≤0.50	≤0.025	≤0.020	≥0.015	≤0.09	≤0.20	≤0.15
S420MC 钢	≤0.12	≤1.50	≤0.50	≤0.025	≤0.015	≥0.015	≤0.09	≤0.20	≤0.15

表 2 结构钢 S355MC 和 S420MC 的力学性能要求

Table 2 Mechanical property requirements for structural steels S355MC and S420MC

牌号	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率/%	
			厚度<3 mm (A80)	厚度≥3 mm (A)
S355MC 钢	≥355	430~550	≥19	≥23
S420MC 钢	≥420	480~620	≥16	≥19

根据产品的技术要求，结合薄板坯连铸连轧流程

产线的特点进行化学成分设计^[6-9]。采用低碳、低硅、高锰、铌钛微合金化的成分体系：通过低碳设计减少钢中的珠光体量，提高钢板的成形性；通过低硅设计改善钢板表面的氧化铁皮结构，提高其酸洗后的表面质量；通过严格的 S、P 含量控制来提高钢水的洁净度，保证钢板的折弯性能；通过添加微合金元素 Nb 进行细晶强化和析出强化，保证钢板的综合性能；同时通过添加一定量的钛，提高奥氏体粗化温度，使得钢中的铌在奥氏体中充分溶解，促进其在后续轧制过程中强化作用的充分发挥^[10-12]。各主要元素含量见表 3。

表 3 结构钢 S355MC 和 S420MC 的化学成分（%，质量分数）

Table 3 Chemical compositions of structural steels S355MC and S420MC（%，mass fraction）

牌号	C	Mn	Si	P	S	Als	Nb	Ti	Fe
S355MC 钢	0.04~0.06	0.60~0.80	≤0.03	≤0.020	≤0.008	0.030~0.050	0.015~0.030	0.015~0.030	余量
S420MC 钢	0.04~0.06	1.28~1.45	≤0.03	≤0.020	≤0.012	0.030~0.050	0.025~0.040	0.015~0.030	余量

2 生产工艺设计

薄板坯连铸连轧生产热轧汽车结构钢的主要工艺流程为：铁水预处理→转炉冶炼→炉外精炼→薄板坯连铸→板坯加热→粗轧→精轧→层流冷却→卷取→打包入库。

2.1 冶炼工艺

将钢中的 Si 含量控制在≤0.03%范围内为本钢种的关键控制难点之一。转炉冶炼时硅是容易去除的元素，出钢时钢水的硅含量仅为痕迹量，因此，硅含量的控制主要在于转炉出钢之后。（1）尽量减少原材料中带入的 SiO₂，使用较低硅含量的合金；（2）出钢之后渣中 SiO₂ 含量较高，若转炉出钢控制不当，大量氧化性的炉渣进入钢水，在出钢和精炼脱氧过程中，必然会伴随发生 SiO₂ 的还原反

应，造成钢水回硅。因此，需保证转炉下渣检测设备的灵敏度，控制下渣量，降低钢水回硅的几率。

此外，在生产高锰钢时，转炉工序需要进行锰合金化操作，即在出钢过程中加入一定量的金属锰或锰铁，由于此类合金中不可避免地含有少量的硅，合金进入钢水后会造成增硅。针对产品低碳、低硅、高锰的设计要求，转炉采用金属锰配锰，有效地避免了增硅、增碳，精炼过程采用中碳锰铁微调。同时，要求转炉高温出钢，避免精炼过程中因冶炼时间长而造成增碳。

2.2 连铸工艺

为确定连铸工艺制度，从结构钢 S355MC 和 S420MC 板坯上切取试样，在 Gleeble 3500 热模拟试验机上进行高温力学性能测试，测试结果见图 1。由图 1 可知：结构钢 S355MC 在温度低于 800℃时

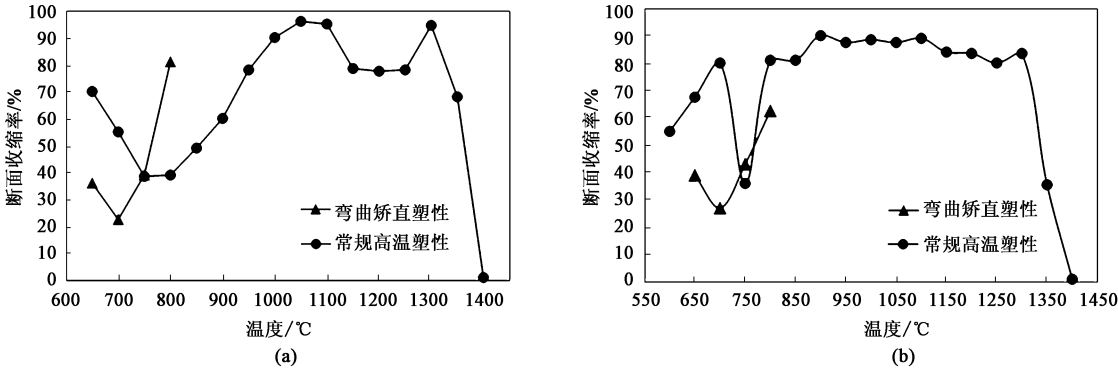


图 1 两种结构钢的高温热塑性曲线
(a) S355MC (b) S420MC

Fig. 1 High temperature thermoplasticity curves of two structural steels

塑性急剧下降，在 750 ℃ 时塑性最差，在 750 ~ 700 ℃ 时塑性有所改善，当温度低于 700 ℃ 时塑性又开始下降；结构钢 S420MC，在温度低于 1000 ℃ 时塑性急剧下降，在 750 ~ 800 ℃ 时塑性最差，在 750 ~ 650 ℃ 时塑性有所改善。热塑性检测结果表明，在高温区，结构钢 S355MC 和 S420MC 不易出现表面裂纹缺陷。为了减少内部裂纹和偏析等缺陷的产生，连铸二冷段采用弱冷方式，同时，保证矫

直温度在 850 ℃ 以上，避免出现矫直横裂纹。

由于薄板坯流程拉速较高，保护渣的选择将直接影响连铸工序的工艺顺行与铸坯质量，按照“工艺条件、钢种凝固特性→保护渣应满足的性能→化学成分→原料配方”的开发思路，确定了保护渣的选型，其理化指标见表 4，配合单锥度窄边结晶器，连铸坯未出现纵裂及凹陷缺陷，同时保证了浇注状态，热像图见图 2。

表 4 连铸保护渣理化指标

Table 4 Physical and chemical indicators of continuous casting powder

化学成分/(%，质量分数)									熔点/℃	碱度
SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	Na ₂ O	F	Li ₂ O	1130	1.34
26.85	36.05	2.75	3.52	0.60	0.11	7.99	8.91	0.68		

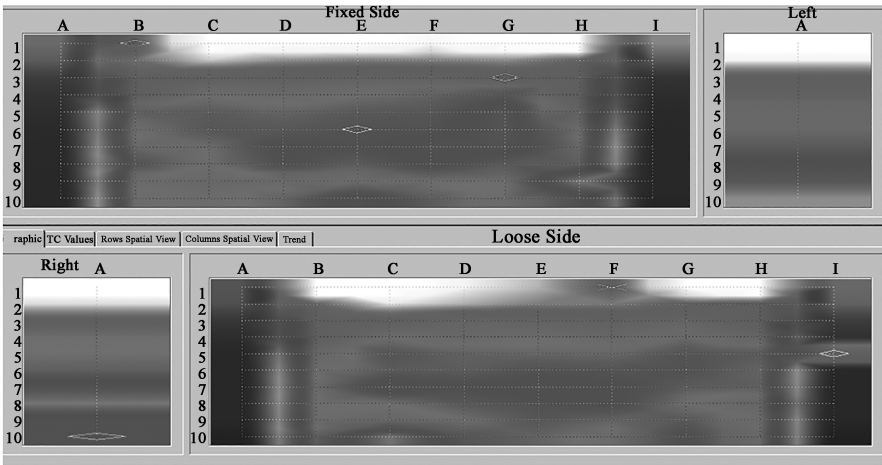


图 2 浇注过程热像图

Fig. 2 Thermal image of pouring process

2.3 热轧工艺

对于铌钛微合金化汽车结构钢 S355MC 和

S420MC，热轧工艺的制定原则为：板坯加热过程尽量使用高的加热温度，使铌的碳氮化物充分溶解^[13]；

粗轧时通过高温大变形轧制，使奥氏体发生动态再结晶，细化奥氏体晶粒；精轧时采用大的压下率，使组织具有高密度位错结构和亚晶结构；控冷过程中加速冷却，提高奥氏体向铁素体的相变驱动力，增加形核密度，最终得到细小的铁素体晶粒^[14]。分规格确定了热轧工序的关键工艺制度，结果见表 5。

表 5 结构钢 S355MC 和 S420MC 的热轧工艺制度
Table 5 Hot rolling process systems of structural steels S355MC and S420MC

牌号	厚度 t /mm	加 热 温 度/℃	粗轧出口 温度/℃	终 轧 温 度/℃	卷取温 度/℃
S355MC 钢	$t<2.0$	1240	1070	860	620
	$2.0\leq t<3.0$	1240	1060	860	610
	$3.0\leq t<5.0$	1230	1050	860	610
	$t\geq 5.0$	1230	1050	860	590
S420MC 钢	$t<2.0$	1250	1075	860	620
	$2.0\leq t<3.0$	1250	1065	860	600
	$3.0\leq t<5.0$	1240	1055	860	600
	$t\geq 5.0$	1240	1055	860	580

3 试制结果及分析

对工业化生产的 23 炉 S355MC 钢和 19 炉 S420MC 钢进行力学性能统计，结果见表 6。产品的拉伸性能和弯曲性能可满足要求，但强度的波动范围较大，结构钢 S355MC 的屈服强度和抗拉强度的波动范围分别为 76 和 83 MPa，结构钢 S420MC 的屈服强度和抗拉强度的波动范围分别为 86 和 74 MPa，需进一步通过窄成分控制和热轧关键制度优化来缩小性能范围区间。（1）加强炼钢区域操作管理，通过稳定转炉装入量、提高转炉终点命中率和一次拉碳水平、加强挡渣操作等措施，缩小 Mn、Nb 等关键强化元素的波动范围；（2）加强控轧控冷过程中的温度模型优化，提升模型精度，逐步缩小强度的波动区间。

结构钢 S355MC 和 S420MC 的显微组织检测结果见图 3，光镜下观察到显微组织类型均为铁素体和珠光体，平均晶粒度分别为 10 级和 11 级，组织较均匀，未发现明显的带状组织。

表 6 工业化生产的结构钢 S355MC 和 S420MC 的力学性能
Table 6 Mechanical properties of industrially produced structural steels S355MC and S420MC

牌号		屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率/%		180°冷弯后钢板的折弯性能
				厚度<3 mm (A80)	厚度≥3 mm (A)	
S355MC 钢	范围	395~471	441~524	21~27	24.0~29.5	良好
	均值	434	480	23	27	—
S420MC 钢	范围	450~536	509~583	18~23	20~26	良好
	均值	491	551	21	23	—

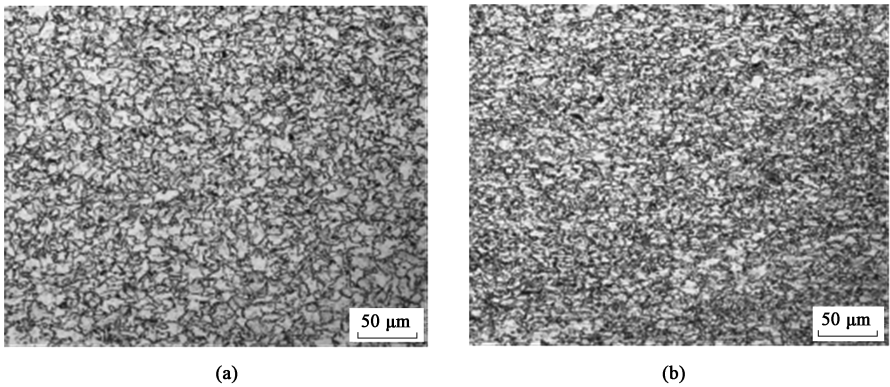


图 3 两种结构钢的显微组织
(a) S355MC (b) S420MC

Fig. 3 Microstructures of two structural steels

4 结论

（1）依据产品的技术要求，结合薄板坯流程产

线的特点，设计了结构钢 S355MC 和 S420MC 的化学成分体系为低碳、低硅、高锰、铌钛微合金化系。
（2）针对薄板坯流程浇铸铌微合金化钢种铸坯易出现裂纹缺陷、浇铸过程不稳定的特点，结合高

温热塑性测定结果, 确定了连铸采用高碱度保护渣, 二冷采用弱冷模式。

(3) 通过控轧控冷工艺的优化, 包括提高板坯加热温度、粗轧采用高温大变形轧制、提高轧后冷却速度等, 实现结构钢 S355MC 和 S420MC 组织性能的有效控制, 产品满足使用要求。

参考文献:

- [1] 毛新平. 薄板坯连铸连轧微合金化技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- Mao X P. Microalloying Technology on Thin Slab Casting and Direct Rolling Process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [2] 康永林, 傅杰, 柳得棹, 等. 薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- Kang Y L, Fu J, Liu D L, et al. Microstructure and Properties Control of Thin Slab Continuous Casting and Rolling Steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [3] 毛新平, 陈麒麟, 朱达炎. 薄板坯连铸连轧微合金化技术发展现状 [J]. 钢铁, 2008, (4): 1-9.
- Mao X P, Chen Q L, Zhu D Y. Recent development of microalloying technology in thin slab casting and rolling process [J]. Iron & Steel, 2008, (4): 1-9.
- [4] 付俊岩. 汽车零部件用高品质特殊钢技术的最新发展 [J]. 汽车工程, 2009, 31 (5): 407-413.
- Fu J Y. The latest development of high quality special steels for auto part [J]. Automotive Engineering, 2009, 31 (5): 407-413.
- [5] EN 10149-2-2013, 冷成型用高屈服强度钢热轧扁平制品 第 2 部分: 热机械轧制钢交货技术条件 [S].
- EN 10149-2-2013, Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming Part 2: Technical delivery conditions for thermomechanically rolled steels [S].
- [6] 曹建国. 薄板坯连铸连轧工艺与设备 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- Cao J G. Thin Slab Continuous Casting and Rolling Technology and Equipment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [7] 魏兵, 刘永前, 刘斌, 等. 短流程薄规格热轧汽车结构钢 QStE340TM 的开发与研究 [A]. 第十一届中国钢铁年会论文集-S07. 汽车钢 [C]. 北京: 中国金属学会, 2017.
- Wei B, Liu Y Q, Liu B, et al. Development and research of short process thin gauge hot-rolled automotive structural steel qste340tm [A]. Proceedings of the 11th China Iron and Steel Annual Conference-S07. Automotive Steel [C]. Beijing: Chinese Society for Metals, 2017.
- [8] 何建中, 刘雅政, 常大勇, 等. CSP 生产 X60 管线钢的化学成分和轧制工艺对混晶的影响 [J]. 特殊钢, 2005, (5): 57-59.
- He J Z, Liu Y Z, Chang D Y, et al. Effect of chemical composition and rolling process on mixed grain of CSP produced X60 pipeline steel [J]. Special Steel, 2005, (5): 57-59.
- [9] 魏杰, 赵丽丽. 钒钛微合金化对建筑用钢成形性能的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 244-249.
- Wei J, Zhao L L. Influence of vanadium titanium microalloying on formability for construction steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 244-249.
- [10] Thillou V, Hua M, Garcia C I, et al. Precipitation of NbC and effect of Mn on the strength properties hot strip HSLA low carbon steel [J]. Materials science forum, 1998, 284-286: 311-318.
- [11] 范敬国, 赵征志, 赵爱民. 钕钛微合金化汽车大梁板 510L 开发 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (8): 24-27.
- Fan J G, Zhao Z Z, Zhao A M. Development of Nb-Ti microalloyed steel for automobile frame 510L [J]. Hot Working Technology, 2009, 38 (8): 24-27.
- [12] 殷胜, 朱红丹. 500 MPa 汽车用 Ti-Nb 微合金高强度结构钢的优化和开发 [J]. 特殊钢, 2016, 37 (1): 68-70.
- Yin S, Zhu H D. Optimization and development of 500 MPa Ti-Nb microalloyed high strength steel steel for auto [J]. Special Steel, 2016, 37 (1): 68-70.
- [13] 刘祥, 杜群力, 李新, 等. 加热工艺对 Nb-Ti 微合金钢奥氏体晶粒长大的影响 [J]. 钢铁, 2019, 54 (9): 116-120.
- Liu X, Du Q L, Li X, et al. Effect of heating process on grain growth of Nb-Ti microalloyed steel [J]. Iron & Steel, 2019, 54 (9): 116-120.
- [14] 张志波, 张红斌, 张瑜, 等. 汽车大梁钢 K610L 在昆钢炉卷轧机上的研发与生产 [J]. 钢铁, 2011, 46 (8): 48-51.
- Zhang Z B, Zhang H B, Zhang Y, et al. Development of high strength steel for automobile frames by steckel mill of KISC [J]. Iron & Steel, 2011, 46 (8): 48-51.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”, 旨在加强刊物与读者的交流, 促进刊物质量的提高, 并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求: 内容填写完整、没有遗漏, 提供的信息准确、详细, 字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整, 字迹不清、无法辨认, 通讯地址模糊、不详细等, 编辑部将不予邮寄杂志, 特此声明。

“读者信息反馈卡” 1~12 期刊登, 位置在正文后, 请读者注意查看, 以免遗漏。

《锻压技术》编辑部