

高强度低合金钢 Q420N 轧制工艺优化实践

李小龙¹ 时 涛¹ 陈章明¹ 周敦世¹ 周立新²

(大冶特殊钢有限公司 1 中棒厂; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

摘 要 试验高强度低合金钢 Q420N (/%: 0.16C, 0.28Si, 1.39Mn, 0.015P, 0.003S, 0.11Cr, 0.009N) 的生产流程为 120 t 转炉-LF 精炼-RH 真空脱气-连铸 300 mm × 340 mm 方坯-热连轧成 Φ90 mm 棒材。试验研究了普通轧制工艺(开轧 1 100 ~ 1 150 °C, 终轧 950 ~ 1 000 °C, 上冷床 900 ~ 950 °C, 冷却速度 0.5 ~ 1.0 °C/s) 和控轧控冷工艺(开轧 1 100 ~ 1 150 °C, 终轧 800 ~ 850 °C, 上冷床 700 ~ 750 °C, 冷却速度 5.0 ~ 15 °C/s) 对 Q420N 钢热轧显微组织和力学性能的影响。结果表明, 随着终轧温度的降低和冷却速度的增大, Q420N 钢材的显微组织得到改善, 屈服强度明显增加; 普通工艺轧制 Q420N 钢材屈服强度为 325 ~ 340 MPa, 晶粒度为 6.0 级, 控轧控冷工艺轧制 Q420N 钢材屈服强度为 495 ~ 515 MPa, 晶粒度为 9.0 级, 满足了标准要求, 降低了生产成本。

关键词 Q420N 高强度低合金钢 控轧控冷工艺 力学性能 晶粒度

Optimization Practice of Rolling Process for High-Strength Low-Alloy Steel Q420N

Li Xiaolong¹, Shi Tao¹, Chen Zhangming¹, Zhou Dunshi¹ and Zhou Lixin²

(1 Department of Medium Size Rolled Bar; 2 Hubei Province Key Laboratory of High Quality Special Steel, Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract HSLA Steel Q420N (/%: 0.16C, 0.28Si, 1.39Mn, 0.015P, 0.003S, 0.11Cr, 0.009N) at production line is 120 t BOF-LF-RH-300 mm × 340 mm casting bloom-hot continuous rolling to Φ90 mm bar product. The effect of hot-rolled billet rolling to bar product processes by normal rolling (beginning rolling at 1 100 ~ 1 150 °C, finishing rolling at 950 ~ 1 000 °C, to cooling bed at 900 ~ 950 °C, cooling rate 0.5 ~ 1.0 °C/s) and controlled rolling and controlled cooling (beginning rolling at 1 100 ~ 1 150 °C, finishing rolling at 800 ~ 850 °C, to cooling bed at 700 ~ 750 °C, cooling rate 5.0 ~ 15 °C/s) on microstructure and mechanical properties of steel Q420N is tested and studied. The results show that the microstructure of Q420N steel is improved and yield strength is increased obviously with decreasing the finishing temperature and increasing the cooling rate. The yield strength of Q420N steel by normal rolling process is 325 ~ 340 MPa and the grain size rating is 6.0, while the yield strength of Q420N steel by controlled rolling and controlled cooling process is 495 ~ 515 MPa and the grain size rating is 9.0 which meets the standard requirements and reduces production cost.

Material Index HSLA Steel Q420N, Controlled Rolling and Controlled Cooling, Mechanical Properties, Rating of Grain Size

高强度低合金钢, 因具有高的强度、良好的塑性和韧性, 已经广泛应用于航空航天、船舶、石油管线、桥梁、大型建筑物等基础设施和车辆、机械、化工、医疗等领域^[1-3]。高强度低合金钢 Q420N 钢材因强度高、成型性好和综合性能稳定, 得到了广泛应用。但是该产品性能满足不了用户需求, 伸长率和低温冲击韧性余量不大, 抗拉强度和屈服强度达不到标准要求, 需要进行离线正火处理才能到达标准要求。为了解决 Q420N 钢材的力学性能问题, 研究分析了钢厂传统轧制工艺特点, 并在此基础上进行了轧制工艺的优化试验研究, 通过轧制工艺优化, 生产的高强度低合金钢 Q420N 钢材, 其力学性能满足用户需求, 而且抗拉强度和屈服强度超出标准 100 MPa。与此同时, 通过轧制工艺优化, 降低了离线正火热处理费用, 节约了能源, 提高了成材率, 降低了成本, 提

高了企业的经济效益和社会效益。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所用连铸坯为钢厂生产的 Q420N 钢。生产工艺流程为: 120 t 转炉→LF 精炼→RH 真空脱气→连铸 300 mm × 400 mm 方坯→步进式加热炉加热→连轧机组轧制。根据轧制工艺规程设定, Φ90 mm 规格产品棒材需要经过粗轧 6 道次, 中轧 6 道次以及精轧 2 道次, 共轧制 14 道次, 轧制工艺参数如表 1 所示。

Q420N 试验钢取自轧钢厂热轧态试样, 其主要化学成分如表 2, 其化学成分符合 GB/T1591-2018《低合金高强度结构钢》中要求。

1.2 试验工艺方案

高强度低合金钢 Q420N 钢材轧制前均热段温度为 1 180 ~ 1 240 ℃, 保温 2 h, 经过粗轧、中轧、预精轧和精轧轧制, 得到不同规格棒材。具体轧制工艺方案按照表 3 进行。

1.3 试验设备及方法

采用 SX2-10-13 型箱式电阻炉进行正火热处理; 采用 IN-STRON 5500R1186 型万能电子拉伸试验机依据 GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》进行拉伸试验; 采用 NCSI-500 型智能仪器化冲击试验机依据 GB/T229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行冲击试验; 采用 OLYMPUS BX51M 金相显微镜观测晶粒大小及显微组织。

2 试验结果

2.1 普通轧制和控轧控冷工艺对力学性能影响

普通轧制工艺和控轧控冷工艺生产的高强度低合金钢 Q420N 钢材的力学性能检验结果如表 4 所示。

由表 4 可见, 采用普通轧制工艺轧制 Q420N 钢材的终轧温度为 900 ~ 930 ℃, 其钢材试样的屈服强度为 325 ~ 340 MPa, 抗拉强度为 480 ~ 515 MPa, 强度力学性能未满足标准要求。与此同时, 钢材试样 -20 ℃ 冲击功为 62 J, -40 ℃ 冲击功为 37 J, 比标准要求仅超 3 J。而采用控轧控冷工艺轧制 Q420N 钢材, 由于其终轧温度比普通轧制温度低, 为 800 ~ 850 ℃, 其钢材试样的屈服强度为 495 ~ 515 MPa, 抗拉强度为 625 ~ 660 MPa, 强度力学性能超标准最低值 100 MPa。同时, 钢材试样 -20 ℃ 冲击功为 140 J, -40 ℃ 冲击功为 105 J, 冲击功富余量远超标准要求。

众所周知, 采用控轧控冷工艺, 可以通过塑性变形和固态相变相结合的方法改变钢的组织形态、晶粒大小、第二相大小和分布等, 从而提高钢材强度和冲击韧性^[6-8]。

2.2 普通轧制和控轧控冷工艺对显微组织影响

普通轧制工艺与控轧控冷工艺条件下轧制的 Q420N 钢材的金相组织和晶粒度见图 1 和图 2。由图 1(a) 可见, 普通轧制工艺轧制的 Q420N 钢材基体的金相组织为铁素体 + 珠光体, 由图 1(b) 可见, 晶粒度依据 GB/T6394-2002《金属平均晶粒度测定

表 1 Q420N 钢成品棒材轧制工艺参数

Table 1 Rolling process parameters of finish bar of Q420N steel

机架号	出口速度/ (mm · s ⁻¹)	孔型高度/ mm	辊缝/ mm	压下量/ mm	宽展系 数(β)	延伸系 数(μ)	咬入 角/°	轧件面积/ (mm × mm)
F1	220	355	30	45	0.30	1.08	21.7	112 421
F2	230	295	30	18	0.13	1.05	13.2	106 628
F3	290	270	30	87	0.21	1.24	28.5	85 687
F4	360	240	30	73	0.20	1.23	25.5	69 507
F5	450	204	30	81	0.27	1.27	26.2	54 571
F6	550	200	30	62	0.26	1.21	22.9	45 215
F7	230	142	20	79	0.50	1.33	25.0	34 051
F8	320	167	15	73	0.41	1.38	26.4	24 649
F9	380	133	10	38	0.40	1.21	18.6	20 359
F10	470	145	10	37	0.33	1.23	18.5	16 604
F11	630	97	10	48	0.44	1.33	20.5	12 471
F12	770	114	10	53	0.31	1.22	21.7	10 207
F13	960	80	6	34	0.39	1.25	20.5	8 175
F14	1 200	91	6	36	0.31	1.25	21.4	6 528

表 2 试验 Q420N 钢化学成分 / %

Table 2 Chemical composition of test Q420N steel / %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Al	N
0.16	1.39	0.28	0.015	0.003	0.11	0.03	0.009

表 3 试验 Q420N 钢的轧制工艺参数

Table 3 Controlled process parameters of test Q420N steel

工艺	开轧温度/ ℃	中轧温度/ ℃	终轧温度/ ℃	上冷床温 度/℃	冷却速度/ (℃ · s ⁻¹)
普通 轧制	1 100 ~ 1 150	1 000 ~ 1 050	950 ~ 1 000	900 ~ 950	0.5 ~ 1.0
控轧 控冷	1 100 ~ 1 150	1 000 ~ 1 050	800 ~ 850	700 ~ 750	5.0 ~ 15

表 4 普通轧制工艺和控轧控冷工艺生产的 Q420N 钢材力学性能

Table 4 Mechanical properties of Q420N steel produced by normal rolling and control-rolling-cooling process

工艺	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	冲击功/J	
				-20 ℃	-40 ℃
普通轧制	325 ~ 340	480 ~ 515	28	62	37
控轧控冷	495 ~ 515	625 ~ 660	32	140	105
标准要求	≥360	520 ~ 680	18	40	27

方法》评定, 普通轧制工艺条件下钢材的晶粒度为 6.0 级。

控轧控冷工艺轧制的 Q420N 钢材的金相组织和晶粒度见图 2。由图 2(a) 可见, 控轧控冷工艺轧制的 Q420N 钢材基体的金相组织仍然为铁素体 + 珠光体, 但组织更细小和均匀, 依据 GB/T6394-2002《金属平均晶粒度测定方法》评定其晶粒度为 9.0 级(图 2b)。

3 结果分析与讨论

高强度低合金钢 Q420N 钢材在 1 100 ~ 1 150 ℃ 开轧后, 终轧温度在 800 ~ 850 ℃, 属于奥氏体未再

结晶区轧制,变形使奥氏体晶粒伸长,形成条带状晶粒,增大了晶界面积,在变形奥氏体中形成变形带,而这变形带可作为铁素体的形核部位,在晶界上和变形带上铁素体晶粒能够同时形核,必然造成了铁素体晶粒的细化。终轧温度越低,过冷度增大,增加了形变奥氏体的形变储存能,也使形变亚结构增多,铁素体的相变形核得到提高。铁素体的形核率增加,同时促进了碳、氮化合物形变诱导析出,然而轧制温度越低,奥氏体向铁素体转变的形核驱动力就越大,应变诱导铁素体相变,越易促使晶内形核^[9-11]。控轧控冷工艺条件下轧制的 Q420N 钢材,其金相组织为铁素体+珠光体,组织细小均匀,晶粒度达到 9.0 级。

根据 Hall-Petch 公式得知,晶粒度级别的增加一般导致抗拉强度和屈服强度的增加。因此,通过控轧控冷工艺, Q420N 钢材的屈服强度为 495 ~ 515 MPa,抗拉强度为 625 ~ 660 MPa,延伸率和冲击韧性良好。

采用普通轧制工艺轧制 Q420N 钢材,由于终轧温度在 950 ~ 1 000 °C,变形温度较高,其变形过程属于完全再结晶区轧制,变形奥氏体发生再结晶及晶粒长大过程,相变后得到的晶粒相对较大。同时,因为采用普通轧制工艺,奥氏体向铁素体组织转变过程充分,转变后的铁素体组织相对粗大。因此,通过普通轧制工艺, Q420N 钢材的屈服强度为 325 ~ 340 MPa,抗拉强度为 480 ~ 515 MPa,冲击韧性下降明显。

4 结论

(1) 普通轧制工艺轧制的 Q420N 钢材的屈服强度为 325 ~ 340 MPa,抗拉强度为 480 ~ 515 MPa,晶粒度级别为 6.0 级,力学性能未达到标准要求。

(2) 控轧控冷工艺轧制的 Q420N 钢材的屈服强度为 495 ~ 515 MPa,抗拉强度为 625 ~ 660 MPa,晶粒度级别为 9.0 级,力学性能远超标准要求。

(3) 通过控轧控冷工艺优化后,不需要经过离线热处理,就能稳定地生产 Q420N 钢材,显著提高

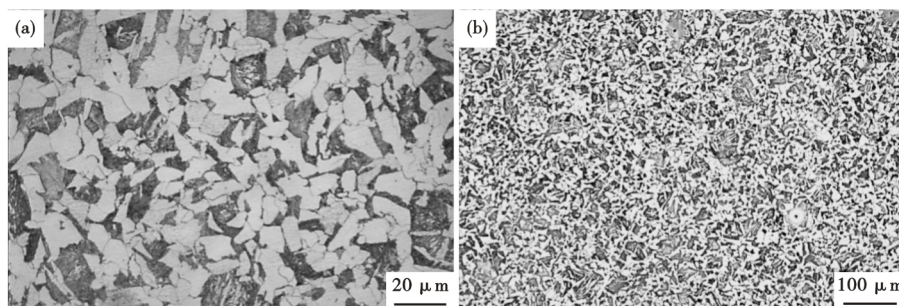


图 1 普通轧制工艺 Q420N 钢材的组织 (a) 和晶粒度 (b)

Fig. 1 Microstructure (a) and grain size (b) of Q420N steel bar by normal rolling process

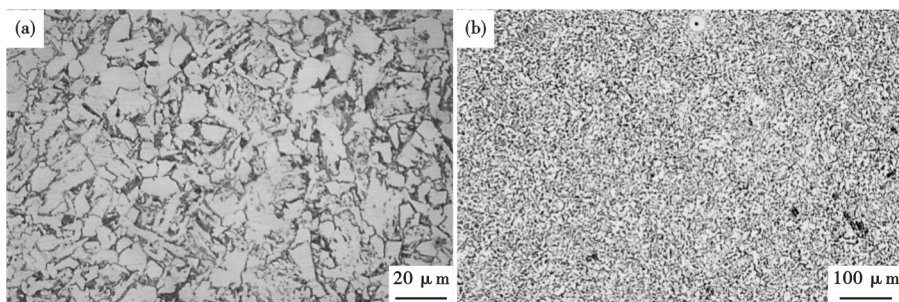


图 2 控轧控冷工艺 Q420N 钢材的组织 (a) 和晶粒度 (b)

Fig. 2 Microstructure (a) and grain size (b) of Q420N steel bar by control rolling and cooling process

产品的综合力学性能,并实现节能降耗,提高了企业的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 景伟德,王耀山,鲁维东,等. S355 系列钢板开发及裂纹缺陷的消除 [J]. 甘肃冶金,2010,32(5):1-3.
- [2] 李惠娟,孙国庆,王佩鑫. 欧标 S355 系列钢板的研制与开发 [J]. 天津冶金,2015(4):20-23.
- [3] 皮昕宇,杨林,任池锦. 武钢 S355 系列钢板工艺试验和生产实践 [J]. 武钢技术,2008(4):38-40.
- [4] 康文举,高照海. 低成本 S355 钢板生产方法研究 [J]. 中国冶金,2012,22(8):14-17.
- [5] 朱伏先,李艳梅. 控轧控冷条件下 Q345 中厚板的生产工艺研究 [J]. 钢铁,2005,40(5):32.
- [6] 李绍杰,王国营,樊一丁,等. Q345E 钢棒材低温冲击功的研究 [J]. 河北冶金,2011,185(5):23-25.
- [7] 齐建军,李绍杰,赵春风. 微合金元素对 Q345E 钢棒材低温韧性的影响 [J]. 热加工工艺,2009,38(10):80-83.
- [8] 李相前. S355 系列钢冲击韧性不合格原因分析 [J]. 钢铁研究,2017,46(6):83-86.
- [9] 胡志远. 控轧控冷工艺对冷镦柳螺组织和力学性能的影响 [J]. 特殊钢,2018,39(3):62-65.
- [10] Weng Y Q, Sun X J and Dong H, et al. Overview on the Theory of Deformation Induced Ferrite Transformation [J]. Iron & Steel Supplement,2005,40:9-15.

李小龙(1983-),男,硕士(2012 年南昌大学),工程师,工艺技术质量研究。E-mail:lixiaolong0520@163.com

收稿日期:2021-05-25