



8.8级贝氏体非调质紧固件用钢盐浴盘条 QM1020的研制

崔贵博, 侯建伟, 左锦中, 刘金庆, 邹剑勋, 戴 畅
(青岛特殊钢铁有限公司, 青岛 266409)

摘 要:基于国内首套实现工业化应用的在线盐浴等温热处理装备,通过系统性成分优化设计、纯净钢冶炼技术以及控轧工艺的协同创新,并结合盐浴设备精准控温的独特优势,成功开发出高性能QM1020非调质紧固件用钢盘条。其生产工艺关键为热吐丝后的盘条进入设计好盐温的在线盐浴等温热处理设备,配合斯太尔摩风冷线进行协同冷却,实现相变组织的精确调控,确保盘条组织以贝氏体为主。首次生产 $\phi 7$ mm规格的QM1020盐浴盘条,经420 °C在线盐浴等温热处理后,较采用常规斯太尔摩工艺生产的盘条综合性能实现大幅跃升。其抗拉强度均值达到775 MPa,断面收缩率均值达到76%,展现出优异的塑韧性,盘条1/6冷顶锻无开裂。进一步地对 $\phi 7$ mm规格的QM1020盐浴盘条进行29%减面率的拉拔加工后,生产的钢丝仍兼具高强度和优良的冷变形能力,用户可直接冷镦生产带法兰螺栓,生产的螺栓经检测完全满足8.8级高强紧固件的力学性能标准。

关键词:非调质紧固件用钢; 贝氏体; 在线盐浴; 力学性能

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N250557 **中图分类号:**TG142. 1

Development of QM1020 Salt Bath-Treated Wire Rod for Grade 8.8 Bainitic Non-Quenched-and-Tempered Fastener Steel

Cui Guibo, Hou Jianwei, Zuo Jinzhong, Liu Jinqing, Zou Jianxun, Dai Chang
(Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao 266409, China)

Abstract: Based on the first domestically developed industrial-scale online salt bath isothermal heat treatment equipment, a high-performance QM1020 non-quenched-and-tempered fastener steel wire rod has been successfully developed through systematic composition optimization design, clean steel smelting technology, and collaborative innovation in controlled rolling processes. Leveraging the unique advantages of precise temperature control in the salt bath equipment, the production process involves the wire rod entering the online salt bath isothermal heat treatment unit at a designed salt temperature after hot laying. This is combined with coordinated cooling via the Stelmor air cooling line to achieve precise regulation of the phase transformation microstructure, ensure a predominantly bainitic microstructure. For the first production of $\phi 7$ mm QM1020 salt bath-treated wire rods, after undergoing online salt bath isothermal heat treatment at 420 °C, the comprehensive properties significantly surpassed those of wire rods produced using conventional Stelmor processes. The average tensile strength reached 775 MPa, with an average reduction of area of 76%, demonstrating excellent plasticity and toughness. The wire rods exhibited no cracking during 1/6 cold heading tests. Furthermore, After drawing with a 29% reduction in cross-sectional area, the steel wires retained high tensile strength and good cold workability. The wires can be directly cold-headed into flanged bolts, which fully meet the mechanical property requirements of Grade 8.8 high-strength fasteners.

Key Words: Non-quenched and Tempered Fastener Steel; Bainite; Online Salt Bath; Mechanical Properties

随着国家为实现“双碳”目标和工业技术的快速发展,高性能、低成本、绿色制造的紧固件用钢成为行业的重要研究方向。8.8级紧固件作为应用最多和最广泛的高强紧固件,其传统的生产流程需经退火后拉丝和冷成形后调质处理(淬火+回火)后才能达到8.8级紧固件的性能要求,该工艺能耗高、

工序复杂、周期长,生产的紧固件易产生变形和氧化脱碳等问题^[1]。冷作硬化的非调质钢生产紧固件不仅可以缩短生产周期、减轻能耗、降低成本,同时,还符合绿色低碳发展的趋势^[2-4]。目前,国内传统的铁素体+珠光体型冷作硬化非调质紧固件用钢,通过添加Nb、V等贵重合金元素,结合控轧控冷

(TMCP)工艺,利用细晶强化和析出强化机制提高钢的强度,成本较高,生产的盘条需要经过大的拉拔减面率来提升精丝强度,但提升强度的同时,韧性、塑性和冷镦性能下降,影响加工性能,只能生产冷变形较小的紧固件,如U型螺栓和座椅丝杆等,同时控轧控冷工艺对冷却速度敏感,易导致组织不均匀,影响通条性能稳定性^[5-7]。

贝氏体组织凭借其优良的综合力学性能,成为高性能非调质钢的理想基体组织,相较于传统的铁素体+珠光体型冷作硬化非调质紧固件用钢,贝氏体非调质紧固件用钢具有高强度、高韧性、高疲劳和冷成型性优良的特点^[8-9],青岛特钢具有国内首条在线盐浴等温处理设备,具备稳定的相变前超快冷和多类型组织等温相变的能力,可以精准控制盘条组织为均匀的贝氏体组织,通过研究各合金元素对组织性能的影响和无贵重合金成分设计,利用在线盐浴精准控温相变的特点,开发出以贝氏体组织为主的QM1020非调质紧固件用钢盘条,可免去退火热处理和调质热处理用于8.8级高强度紧固件的生产制造。

1 化学成分设计

QM1020非调质紧固件用钢盘条成分设计思路是通过多元素协同调控的贝氏体相变优化体系来保证高性能和高可靠性,突破了传统非调质钢的合金设计思路来实现高性能,通过采用低C的Mn-B元素组合贝氏体组织替代昂贵的Nb-V微合金化,其中,Mn细化贝氏体组织中铁素体片层及碳化物颗粒尺寸^[10-11],提升强度同时改善塑性;B可抑制先共析铁素体析出,并促进贝氏体转变^[12],QM1020钢盘条化学成分范围见表1。

表1 QM1020钢盘条化学成分(质量分数)

Table 1 QM1020 wire rod Chemical composition of wire rod %

C	Si	Mn	P	S	B
0.18~0.25	≤0.30	0.60~1.20	≤0.025	≤0.020	0.0008~0.0050

2 工艺流程

QM1020非调质紧固件用钢盘条生产工艺流程基于青岛特钢现有的冶炼、轧制设备及在线盐浴等温热处理设备,通过纯净钢冶炼技术、控轧工艺优化和在线盐浴等温热处理精准相变控制技术,控制盘条组织为贝氏体,使QM1020钢盘条获得高性能,

QM1020钢盘条工艺流程如下:

100 t转炉冶炼→LF精炼→RH处理→连铸(180 mm×240 mm)→铸坯修磨探伤→加热→轧制→吐丝→在线等温热处理→斯太尔摩风冷线缓冷→集卷→检验→包装入库。

3 生产工艺设计

3.1 炼钢工艺设计

采用100 t转炉进行冶炼,转炉冶炼终点控制 $w[P] \leq 0.015\%$ 、 $w[S] \leq 0.015\%$,出钢过程采用钢流加入法同步添加渣料及部分合金;LF精炼时在还原渣形成后精准加入B微合金元素,LF精炼后实施15 min静置软吹氩处理并进行RH脱气处理,保证钢水纯净度;冶炼好的钢水转入连铸工序浇铸180 mm×240 mm断面铸坯,浇铸时中间包全程氩气保护浇铸,钢水过热度精确控制在10~30℃,浇铸好的铸坯火焰切割后进行堆冷;为保障产品质量,对堆冷后的铸坯进行修磨探伤处理。

3.2 轧制和在线盐浴工艺设计

首次生产的QM1020盘条规格 $\phi 7$ mm,对修磨探伤后的钢坯进行加热后轧制,加热时严格控制加热炉气氛(残氧量 $\leq 3\%$)、加热温度(1050~1150℃)及加热时间(100~150 min),以确保盘条获得低脱碳层;钢坯加热后采用 ≥ 18 MPa的高压水除鳞处理,有效避免氧化铁皮压入基体;轧制精轧阶段采用780~820℃的低温轧制工艺,通过抑制再结晶实现晶粒细化^[13],提升盘条的强度和塑性,盘条热吐丝温度780~820℃,确保冷却前的盘条奥氏体化,热吐丝后的盘条分别进入盐温420℃的在线盐浴等温热处理设备中和斯太尔摩风冷线进行冷却以获得不同状态的盘条,不同状态盘条试验工艺见表2。

表2 $\phi 7$ mm规格QM1020钢试验工艺参数

Table 2 Test process parameters of $\phi 7$ mm QM1020 steel

试验方案	盘条状态	精轧温度/℃	吐丝温度/℃	冷却方式
1#	热轧态	800	800	斯太尔摩
2#	盐浴态	800	800	在线盐浴

4 试验结果

4.1 盘条力学性能试验

将传统斯太尔摩风冷工艺生产的热轧态和经在线盐浴等温热处理的盐浴态 $\phi 7$ mm规格QM1020盘条头尾各取1圈均分为8支检测力学性能,力学

性能对比结果如图1所示,从图1数据可知,盐浴态的QM1020盘条的抗拉强度和面缩均高于热轧态,其中抗拉强度均值提升至775 MPa,较热轧态升高263 MPa,断面收缩率均值提升至76%,较热轧态升高15%。

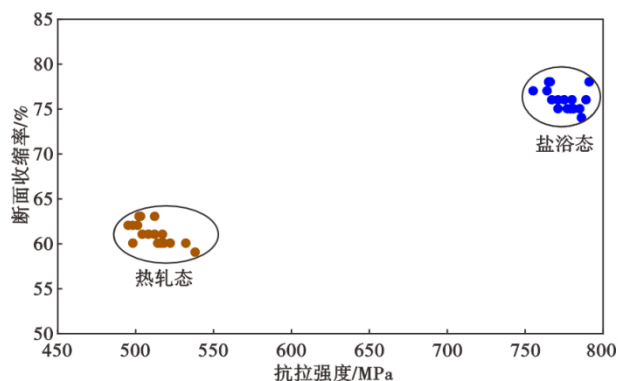


图1 热轧态和盐浴态 $\phi 7$ mm规格QM1020盘条力学性能
Fig. 1 Mechanical properties of $\phi 7$ mm QM1020 wire rod in hot rolling and salt bath state

4.2 盘条冷顶锻试验

将传统斯太尔摩风冷工艺生产的热轧态和经在线盐浴等温热处理后的盐浴态 $\phi 7$ mm规格QM1020盘条取样检验冷顶锻,热轧态的QM1020盘条1/4冷顶锻已开裂,盐浴态的QM1020盘条1/6冷顶锻未开裂,盐浴态的QM1020盘条冷变形能力较强,可满足生产大部分紧固件性能要求,盐浴态的QM1020盘条1/6冷顶锻照片如图2所示。

4.3 盘条组织检验

将传统斯太尔摩风冷工艺生产的热轧态和经



图2 盐浴态 $\phi 7$ mm规格QM1020盘条1/6冷顶锻
Fig. 2 1/6 Cold upsetting of $\phi 7$ mm QM1020 wire rod in salt bath state

在线盐浴等温热处理的盐浴态 $\phi 7$ mm规格QM1020盘条镶嵌横向金相样,金相样抛光后利用4%硝酸酒精浸蚀观察盘条的心部组织,热轧态的QM1020盘条的组织为F+P,盐浴态的盘条组织以B为主,不同状态的盘条心部组织如图3所示。

利用扫描电子显微镜对不同状态的 $\phi 7$ mm规格QM1020盘条组织进行进一步观察,热轧态的QM1020盘条组织为块状铁素体和片层状珠光体组成,盐浴态盘条组织为细小的铁素体板条束上弥散分布细小碳化物,不同状态盘条的心部电镜组织如图4所示。

4.4 冷拉后钢丝力学性能试验

综合盘条规格及相近螺栓的规格,将不同状态的 $\phi 7$ mm规格QM1020盘条经29%减面率拉拔至 $\phi 5.9$ mm的钢丝,取不同状态QM1020盘条拉拔后的钢丝头尾各1圈均分为8支进行力学性能试验,热轧态的QM1020盘条生产的钢丝抗拉强度均值712 MPa,断面收缩率47.5%,盐浴态的QM1020盘条生产的钢丝抗拉强度均值878 MPa,断面收缩率均值72.4%,盐浴态的QM1020盘条生产的钢丝符合《GB/T 5953.3—2012 冷镦钢丝 第3部分:非调质型冷镦钢丝》中MFT8钢丝的力学性能要求,且具有

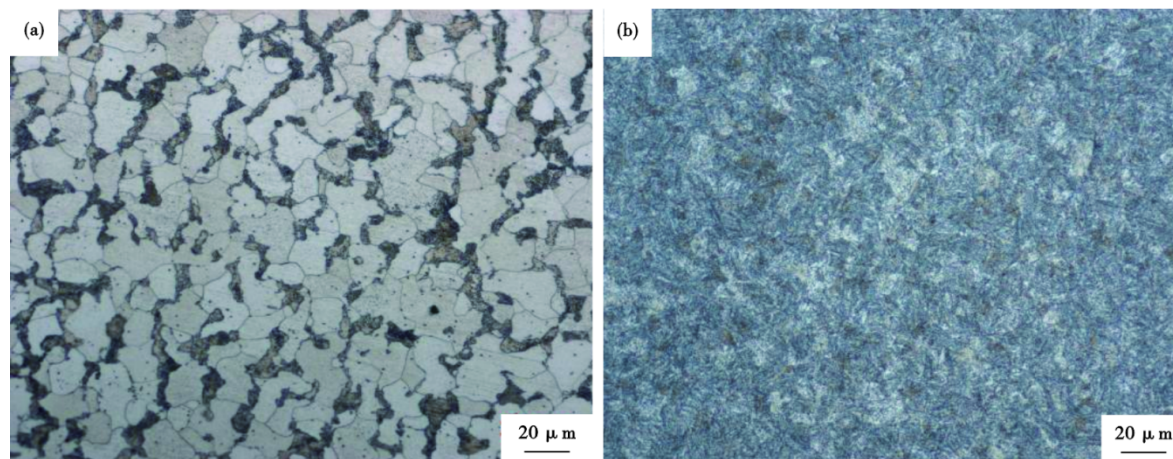


图3 $\phi 7$ mm规格QM1020盘条金相组织:(a)热轧态,(b)盐浴态

Fig. 3 Metallographic structure of $\phi 7$ mm QM1020 wire rod :(a) Hot rolled state, (b) Salt bath state

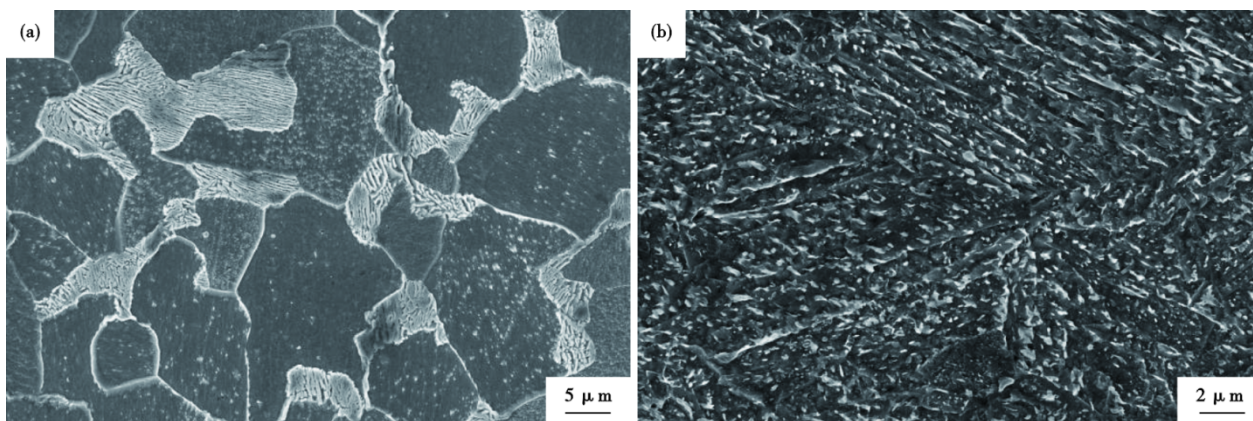


图4 $\phi 7$ mm 规格 QM1020 盘条电镜组织:(a)热轧态,(b)盐浴态

Fig. 4 Electron microscopic structure of $\phi 7$ mm QM1020 wire rod : (a) Hot rolled state, (b) Salt bath state

较高富余量,不同状态的 $\phi 7$ mm 规格 QM1020 盘条拉拔后钢丝力学性能见表3。

表3 $\phi 7$ mm 规格 QM1020 盘条拉拔后钢丝力学性能
Table 3 Mechanical properties of $\phi 7$ mm QM1020 wire rod after drawing

精丝状态	抗拉强度/MPa		断面收缩率/%	
	范围	均值	范围	均值
热轧态	695 ~ 738	712	45 ~ 52	47.5
盐浴态	868 ~ 885	878	70 ~ 74	72.4
MFT8 钢丝标准	≥ 810	/	≥ 52	/



图5 锻打螺栓图片

Fig. 5 Forged bolt picture

4.5 盐浴态 QM1020 钢丝锻打试验

选择盐浴态的 QM1020 盘条生产的钢丝供零部件厂进行带法兰螺栓冷锻打测试,法兰盘变形量为5倍,生产的螺栓无开裂,螺栓照片如图5所示。

对生产的螺栓性能进行测试检验,螺栓性能符合《GB/T 3098.1—2000 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》中 8.8 级紧固件力学性能要求,螺栓检验结果见表4。

5 分析与讨论

1)经盐浴处理后, QM1020 盘条的组织从传统斯太尔摩风冷工艺的 F+P 组织变为以 B 组织为主。传统的斯太尔摩风冷过程中,盘条是连续缓慢冷却的。当温度下降到 Ar3 以下时,首先会在原奥氏体

晶界析出铁素体。随后,剩余的奥氏体碳浓度增高,最终转变为珠光体,盐浴热处理工艺通过快速跳过铁素体和珠光体的最活跃转变温度区间,直接进入贝氏体转变区^[14],从而抑制了 F+P 的生成,促进盘条转变为以 B 组织为主。

2)经盐浴处理后, QM1020 盘条相比传统斯太尔摩风冷工艺生产的盘条强度得到提升。盐浴态盘条组织为细小的铁素体板条束上弥散分布细小碳化物,细小的贝氏体铁素体板条束将原奥氏体晶粒分割成多个亚单元,形成了极其细小的有效晶粒尺寸,对位错运动的形成阻碍,提高材料的强度,弥散分布的细小碳化物颗粒,能够有效地钉扎位

表4 螺栓检测力学性能
Table 4 Testing mechanical properties of bolts

试验方案	抗拉强度/MPa	芯部硬度(HV10)	表面和芯部硬度差(HV0.3)	破坏扭矩/(N·m·min)	保证载荷(11.6 kN 保持 15 s)
标准	>800	250 ~ 320	≤ 30	>13	无变形
实测值	885 ~ 923	290 ~ 307	5 ~ 11	16.9 ~ 17.7	无变形

错,当位错在外力作用下运动时,必须绕过或切过这些颗粒,这个过程需要消耗额外的能量,从而极大地提升了材料的强度。另外贝氏体相变是一个切变过程,在其铁素体板条内部产生了极高的位错密度,提升盘条强度。

3)经盐浴处理后,QM1020盘条相比传统斯太尔摩风冷工艺生产的盘条塑性得到极大提升,可1/6冷顶锻不开裂。盐浴态盘条组织以细小的铁素体板条束组成,与粗大的铁素体晶粒相比,裂纹在贝氏体中扩展路径更曲折,需要消耗更多能量,因此,初始塑性就更好,另QM1020盘条组织中的碳化物是弥散、细小的颗粒状,而非连续的片层状,避免了像珠光体那样为裂纹提供快速的扩展通道。

6 结论

1)采用420℃在线盐浴工艺,φ7 mm规格QM1020盘条可获得具有优异综合性能的贝氏体组织。盘条抗拉强度达775 MPa,断面收缩率达

76%,并通过1/6冷顶锻检验,表明盘条具备高强塑性和优良的冷变形性能,满足高速冷锻变形要求。

2)经29%减面率拉拔后,钢丝抗拉强度提升至878 MPa,同时塑性保留良好,断面收缩率72.4%,力学性能完全达到并优于GB/T 5953.3—2012中MFT8级钢丝的技术要求。

3)采用贝氏体盐浴盘条QM1020生产的钢丝,可免去退火及调质处理,直接冷锻生产带法兰螺栓,螺栓成品各项性能指标均满足GB/T 3098.1—2000中8.8级紧固件的标准,验证了贝氏体盐浴盘条QM1020生产8.8级高强紧固件的可行性。

4)综上所述,本研究证实了以在线盐浴处理为核心的贝氏体紧固件用钢生产技术,能够制备出兼具高强塑性、良好冷变形能力的贝氏体QM1020盘条。贝氏体QM1020盘条研发成功省去了传统8.8级高强紧固件生产中能耗高、周期长的退火与调质工序,构建了一条高效、低碳、低成本的8.8级高强紧固件绿色制造技术方案,具有广阔的工业应用前景和显著的经济效益。

参考文献

- [1] 高建文,周国子,周文浩,等. 8.8级紧固件用非调质冷锻钢的组织性能研究[J]. 金属材料与冶金工程,2025,53(3):15-19.
- [2] 周剑波,丁建国,侯栋,等. 800 MPa级冷作强化非调质双相冷锻钢产品开发[J]. 山西冶金,2025,48(2):156-157+160.
- [3] 孔祥伟,白云,张剑锋. 8.8级非调质紧固件用10B21盘条研究与开发[J]. 特殊钢,2024,45(1):23-26.
- [4] 林再勇,王海华. 8.8级非调质紧固件线材的研制[J]. 特钢技术,2023,29(4):5-7.
- [5] 刘年富,沈伟,田钱仁,等. 汽车用非调质钢的发展现状及趋势[J]. 钢铁钒钛,2024,45(2):115-124.
- [6] 蒋波,冯奕洁,王芝林,等. 汽车用铁素体-珠光体型非调质钢研究现状[J]. 钢铁,2023,58(3):11-24.
- [7] 黄俊文,黄志杰. 汽车零部件用非调质钢盘条开发[J]. 金属材料与冶金工程,2023,51(5):8-11+17.
- [8] 王旭,周蕾,王莹,等. 控制轧制对Mn-Cr系贝氏体型非调质钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报,2025,46(4):154-161.
- [9] 王占花. 贝氏体型非调质钢的组织性能调控研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [10] 梅涛,刘静,柴希阳. Mn含量对超低碳贝氏体钢连续冷却转变规律的影响[J]. 金属热处理,2024,49(12):157-163.
- [11] 周雯. 中碳微纳结构贝氏体钢的组织调控与动态力学性能研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2019.
- [12] 徐晓春,惠卫军. 硼对Mn-Si-Cr系贝氏体型非调质钢过冷奥氏体连续转变行为的影响[J]. 现代交通与冶金材料,2024,4(6):87-94.
- [13] 陈尹泽,李娜,宋立伟,等. 控轧控冷工艺对低碳贝氏体高强度钢AH80DBD组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢,2023,44(1):97-100.
- [14] 李阳,邓铁松. 特殊钢线材在线等温热处理(QM)技术研究进展[J]. 中国冶金,2024,34(9):15-24.