

## 热变形淬火对 L485QS 酸性管线用钢 09MnNb 淬硬性的影响

方剑<sup>1</sup> 黄彦<sup>1</sup> 唐应波<sup>2</sup>

(1 黄冈师范学院机电与汽车工程学院, 黄冈 438000; 2 湖北新冶钢有限公司技术中心, 黄石 435001)

**摘要** 对 L485QS 酸性管线用钢 09MnNb 进行不同工艺的热变形淬火试验, 测试淬硬性并观察相应的组织。结果表明, 试验钢在 850 ~ 1 100 °C 进行 0.2 ~ 0.8 变形水淬后可获得三种类型的组织, 变形温度是影响组织转变类型的主导因素, 当温度 ≤ 900 °C 时, 主要获得针状铁素体, 当温度为 950 ~ 1 000 °C 时, 主要获得细条状贝氏体, 当温度 ≥ 1 050 °C 时, 主要获得粗大的板条状贝氏体。增大变形量在未再结晶和部分再结晶区分别促进针状铁素体转变和细条状贝氏体转变, 在完全再结晶区使板条状贝氏体组织粗细不一致。采用 09MnNb 钢在 950 ~ 1 000 °C 进行  $\epsilon \geq 0.4$  的热变形淬火时, 可获得以细条状贝氏体为主的淬火组织, 以及较高且稳定的淬硬性, 并有利于后续回火性能的调控。

**关键词** 酸性管线 09MnNb 钢 形变淬火 组织 淬硬性

## Influence of Ausforming on Hardenability of Steel 09MnNb for L485QS Sour Service Pipeline

Fang Jian<sup>1</sup>, Huang Yan<sup>1</sup> and Tang Yingbo<sup>2</sup>

(1 College of Electromechanic and Automotive Engineering, Huanggang Normal Metallurgy University, Huanggang 438000; 2 Technical Center, Hubei Xinyegang Steel Co., Ltd, Huangshi 435001)

**Abstract** To study the effect of ausforming on hardenability in steel 09MnNb used for L485QS sour service pipeline, different ausforming processes were performed and the subsequent hardenability and microstructures were tested. It reveals that three types of microstructures could be gained when ausforming at temperature from 850 °C to 1 100 °C and under deformation degree  $\epsilon$  from 0.2 to 0.8. In the transformation of microstructures, it was a leading role of the deformation temperature that acicular ferrite, thin-strip bainite and thick-lath bainite were mainly obtained respectively when the temperatures at 900 °C and below, from 950 °C to 1 000 °C and at 1 050 °C or higher. Increasing deformation degrees could promote transformation of acicular ferrite in unrecrystallization zone and thin-strip bainite in partial recrystallization respectively, but in fully recrystallization zone make the lath bainite either coarsened or refined. When ausforming used of steel 09MnNb at temperatures from 950 °C to 1 000 °C and under deformation degree of  $\epsilon \geq 0.4$  or above, the microstructure consisted fully of thin-strip bainite could be obtained so as a higher and more stable hardenabilities could be achieved, which may be beneficial to the properties control when tempered in following.

**Material Index** Sour Service Pipeline, Steel 09MnNb, Ausforming, Microstructure, Hardenability

L485QS 管线钢属于低碳低合金钢, 具有良好的焊接性和耐腐蚀性, 按国际标准 ISO3183-2016、美国石油协会标准 API Spec 5L-2012 和国家标准 GB/T 9711-2017 进行生产制造, 按成型方式分为焊管 (Welded pipe) 和无缝管 (Seamless pipe) 两大类产品, 主要用于含 H<sub>2</sub>S 腐蚀介质的石油天然气输送管道和工程结构管件<sup>[1-6]</sup>。其中焊管以板材为母材, 通过热控制控冷技术来获得普通热处理无法达到的优异性能<sup>[7-8]</sup>。而无缝钢管则采用调质处理来调控其性能和组织<sup>[2,4]</sup>。近年来随着无缝钢管在线热处理装备的开发和改进<sup>[9]</sup>, 形变热处理作为一种节能减排和有效提高强韧性并改善组织的工艺方法, 在无缝钢管的热处理中已得到应用, 但仍然处于摸索阶

段<sup>[2-3]</sup>。低碳低合金管线用钢决定了其极差的淬硬性, 如何获得较高且稳定的淬硬性一直是工业生产的技术难题。本文针对 L485QS 管线钢, 采用理论与试验相结合的方法研究热变形淬火工艺对淬硬性及其组织的影响规律, 并探讨相应的作用机理, 结合生产实际提出形变淬火工艺控制的合理化建议, 为工业生产提供技术支撑和理论依据。

### 1 试验材料及方法

材料为 09MnNb 钢的  $\Phi 600$  mm 连铸坯, 经过皮尔格 (Pilger) 机组热轧成  $\Phi 406.4$  mm  $\times$  23.8 mm  $\times$  12 m (外径  $\times$  壁厚  $\times$  长度) 规格的无缝钢管, 主要化学成分如表 1 所示。从热轧态钢管上取样并加工成

Φ8 mm × 12 mm 的短棒试样,在 Gleeble 3800 热模拟试验机上,以 10 °C/s 的速度加热到 1 250 °C 保温 10 min 进行固溶处理,再以 3 °C/s 的速率冷却至 850、900、950、1 000、1 050、1 100 °C 各温度保温 3 min 进行试样的均热处理,然后在每个温度下以 0.2 s<sup>-1</sup> 的速率分别进行 0.2、0.4、0.6 和 0.8 的热变形并水淬,记录热变形过程中的应力和应变数据。热模拟试验之后,对试样任一端面进行研磨和抛光,采用 HVS-1000 维氏硬度计测试试样端面的硬度,每个试样端面测试 3 个位置,取 3 个位置的平均值作为该试样的 HV 硬度值。最后对试样的端面重新逐级研磨和抛光,采用 4% 的硝酸酒精腐蚀后,在 GX40-VS 型金相显微镜下观察其组织形貌。

从热轧态钢管上分别取样,加工成 15 mm × 15 mm × 200 mm 的条状样,在箱式试验炉中加热到 1 250 °C 保温 15 min 空冷至 950 °C 后,在小型试验轧机上进行 0.4 的热变形并立即水淬,淬火后在箱式试验炉中进行 550、580、610、640 °C 的回火处理,保温时间均为 30 min。回火后加工成 Φ8 mm 的圆棒拉伸试样,在万能拉伸试验机上测试其拉伸性能,加工成 10 mm × 5 mm × 55 mm 半尺寸的冲击试样在摆锤式冲击试验机上做 0 °C 的冲击试验。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 真应力-应变曲线

根据热模拟试验数据,在 Excel 软件上绘制试验 09MnNb 钢的真应力-应变曲线如图 1 所示。随着变形量的增加,可将应力变化趋势分为 3 类:(1)先急剧增加再缓慢增加,达到峰值后缓慢降低到一个较平稳值,即发生并完成动态再结晶,如图 1 中曲线 5 和 6。(2)先急剧增加后缓慢增加,达到峰值后一直缓慢降低,即发生但未完成动态再结晶,如图 1 中曲线 3 和 4。(3)先急剧增加后缓慢增加到峰值后维持一个较高的应力值,即仅发生动态回复,如图 1 中曲线 1 和 2。

根据曲线峰值对应的变形量  $\epsilon_p$ ,采用经验公式  $\epsilon_c = 0.83\epsilon_p^{[10]}$  计算开始发生动态再结晶时对应变形量  $\epsilon_c$ ,求出峰值应力降到稳态时对应的变形量作为完成动态再结晶所需的变形量  $\epsilon_s$ ,绘制出动态再结晶的  $\epsilon_c$  和  $\epsilon_s$  与变形温度之间关系曲线,如图 2

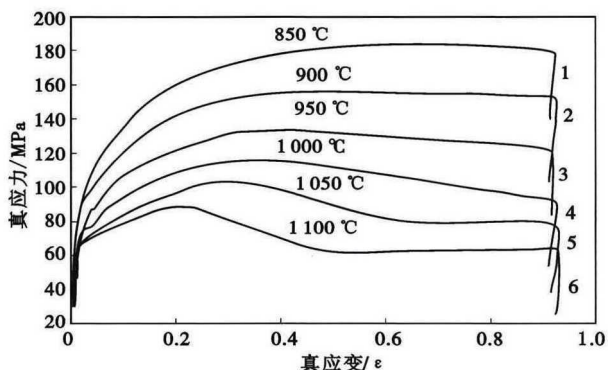


图 1 09MnNb 钢真应力-应变曲线  
Fig. 1 True stress-strain curves of steel 09MnNb

所示。可以看出,随着温度的升高,动态再结晶开始和完成时的  $\epsilon_c$  和  $\epsilon_s$  均逐渐降低,即温度越高容易发生和完成动态再结晶,当变形温度  $\geq 1 050$  °C、变形量  $\epsilon \geq 0.6$  时可发生完全动态再结晶,当变形温度为 950 ~ 1 000 °C、变形量  $\epsilon \geq 0.4$  时可发生部分再结晶,当变形温度  $\leq 900$  °C 时难以发生动态再结晶。另外,从图 2 还可以看出,试验钢的未再结晶区(Ⅲ)范围较宽,即在该区域内不太容易发生和完成动态再结晶。

### 2.2 力学性能

根据硬度测试结果,建立不同变形量下淬火硬度值随变形温度之间的变化曲线如图 3 所示。随变形温度的增加,可将硬度变化趋势分为两类:(1)先急剧增加后缓慢增加,最后呈逐渐接近某一平稳值的趋势,如图 3 中曲线 1 和 2。(2)先急剧增加后缓慢增加到某一峰值后,呈缓慢降低趋势,如图 3 中曲线 3 和 4。比较这两类曲线可得,当变形温度较低 ( $\leq 950$  °C) 时,2 类曲线的硬度值明显高于 1 类,当变形温度较高 ( $> 1 000$  °C) 时,2 类曲线的硬度值反而略低于 1 类。其中,当变形温度在 950 ~ 1 000 °C

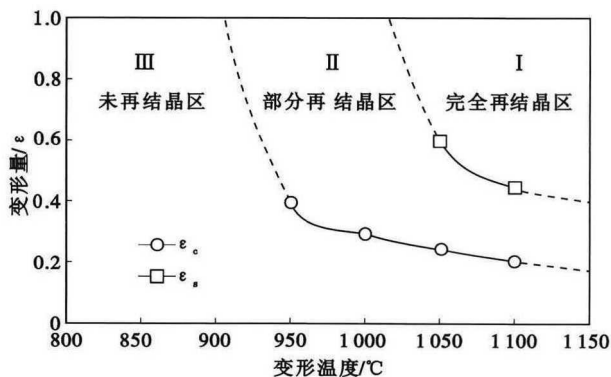


图 2 动态再结晶的  $\epsilon_c$  和  $\epsilon_s$  与变形温度之间关系曲线  
Fig. 2 Relationship curves between deformation temperature and critical value  $\epsilon_c$  and  $\epsilon_s$  of dynamic recrystallization

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested steel / %

C	Si	Mn	Nb	Ti	Cr	S	P
0.09	0.35	1.20	0.037	0.032	0.20	0.003	0.009

内、变形量  $\varepsilon \geq 0.4$  时,可获得较高且较稳定的淬硬性。图 4 为 950 °C 热变形 0.4 立即水淬后,不同回火温度下的拉伸强度和冲击韧性。可以看出,在 550 ~ 640 °C 温度进行回火时,随着回火温度的升高,屈服和抗拉强度均逐渐降低,冲击韧性逐渐升高,其屈服和抗拉强度以及冲击功范围分别为 535 ~ 605 MPa、660 ~ 745 MPa、114 ~ 136 J。根据 API 5L 标准的最低要求:屈服强度为 485 ~ 635 MPa;抗拉强度为 570 ~ 760 MPa;冲击功  $\geq 40$  J(全尺寸)。图 4 中的力学性能均能满足 API 5L 的最低要求,且冲击功远远大于最低要求。

### 2.3 组织观察

根据组织观察试验结果,可将不同热形变工艺下的淬火组织分为 3 类:(1)以针状铁素体为主,含少量贝氏体和极少量块状铁素体,如图 5(a)、(b)、(c)和(d);(2)以细条状贝氏体为主,含少量针状铁素体,如图 5(e)、(f)、(g)和(h);(3)以粗大板条状贝氏体为主,含极少量马氏体,如图 5(i)、(j)、(k)和(l)。其中,温度是影响组织类型的主要因素,随着变形温度的升高,其组织类型按照 1、2、3 的顺序进行变化,三种类型组织之间的切换温度大约为 950 °C 和 1 050 °C。随着变形量的增加,组织变化主要表现为:当温度较低 ( $\leq 900$  °C) 时,针状铁素体逐渐增多且变细,如图 5(b)比(a)中针状铁素体更多且无明显块状铁素体,(d)比(c)中针状铁素体含量更多且明显更细;当温度为 950 ~ 1 000 °C 时,细条状贝氏体明显逐渐增多,但当变形量达到 0.8 时,针状铁素体反而略有增加,如图 5(f)比(e)和(h)比(g)中细条状贝氏体更多且更加细小;当温度较高 ( $\geq 1 050$  °C) 时,板条状贝氏体逐渐增多且粗细不一致,如图 5(j)比(i)中板条状贝氏体组织更细,而(l)中部分板条贝氏体组织比图 5(k)更粗大。

### 3 分析与讨论

09MnNb 钢试验用属于低碳低合金含 Nb 钢,在热形变过程中产生的变形带和高密度位错等晶体缺陷,一方面提高基体的畸变能驱使奥氏体发生动态再结晶,另一方面诱导 Nb 的碳化物的弥散析出,并钉扎晶界阻碍奥氏体再结晶及晶粒长大<sup>[11-14]</sup>。这些都影响过冷奥氏体的最终状态,并对随后淬火冷却过程中组织转变产生影响。根据试验结果,试验钢热变形后水淬均未获得明显的板条马氏体组织,可见热形变淬火未起到促进马氏体转变的效果。热变形工艺对淬火组织的影响并非单调的,当变形

温度较低 ( $\leq 900$  °C) 时,增大变形量主要促进铁素体转变从而减少贝氏体转变,并获得以针状铁素体为主的组织,当变形温度较高 (950 ~ 1 000 °C) 时,则促进贝氏体转变反而减少铁素体转变,并获得以细条状贝氏体为主的组织,当温度更高 ( $\geq 1 050$  °C) 时,主要获得不同尺寸的板条状贝氏体组织。可见,变形温度对组织转变类型起主导作用,其中 950 °C 和 1 050 °C 分别为铁素体向细条状贝氏体、细条状贝氏体向板条状贝氏体类型转变的分界温度,恰好对应于可发生和完成动态再结晶所需的最低温度。

在未再结晶区(图 2, III 区)变形时,铁素体沿变形带、位错和第二相质点进行形核,增大变形量促进铁素体转变的同时细化铁素体组织;在部分再结晶区(图 2, II 区)变形时,一方面动态再结晶消耗了部分畸变,另一方面温度的升高提高了过冷度及过冷奥氏体的稳定性,铁素体转变被推迟,变形带、位错

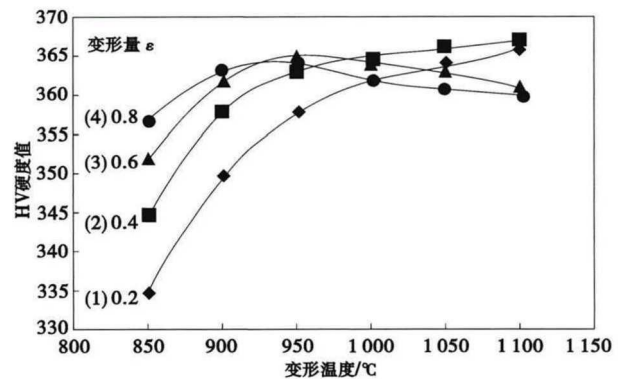


图 3 09MnNb 钢淬火硬度与变形温度之间关系曲线  
Fig. 3 Relationship curves between quenched hardness and deformation temperature of steel 09MnNb

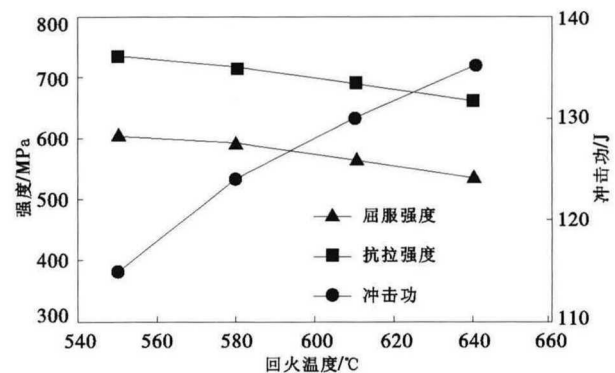


图 4 回火温度对 09MnNb 钢拉伸强度与冲击功的影响  
Fig. 4 Effect of tempering temperature on tensile strength and impact toughness of steel 09MnNb

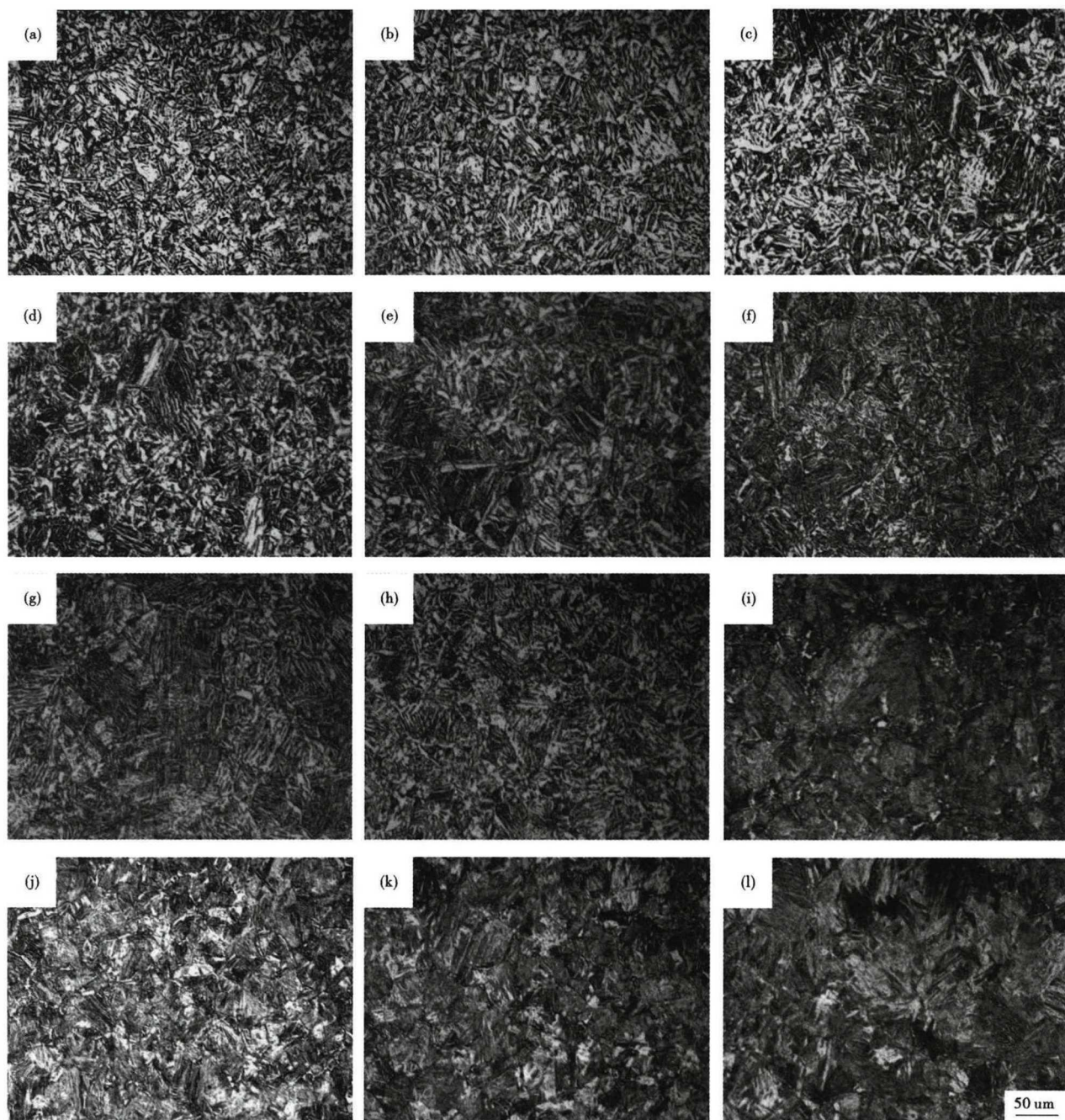


图 5 09MnNb 钢不同热变形工艺的组织(a)850 ℃,  $\epsilon$ -0.2; (b)850 ℃,  $\epsilon$ -0.4; (c)900 ℃,  $\epsilon$ -0.4; (d)900 ℃,  $\epsilon$ -0.6; (e)950 ℃,  $\epsilon$ -0.4; (f)950 ℃,  $\epsilon$ -0.8; (g)1 000 ℃,  $\epsilon$ -0.2; (h)1 000 ℃,  $\epsilon$ -0.8; (i)1050 ℃,  $\epsilon$ -0.2; (j)1 050 ℃,  $\epsilon$ -0.6; (k)1 050 ℃,  $\epsilon$ -0.4; (l)1 050 ℃,  $\epsilon$ -0.8

Fig. 5 Microstructures with different processes of hot-deformation of steel 09MnNb (a)850 ℃,  $\epsilon$ -0.2; (b)850 ℃,  $\epsilon$ -0.4; (c)900 ℃,  $\epsilon$ -0.4; (d)900 ℃,  $\epsilon$ -0.6; (e)950 ℃,  $\epsilon$ -0.4; (f)950 ℃,  $\epsilon$ -0.8; (g)1 000 ℃,  $\epsilon$ -0.2; (h)1 000 ℃,  $\epsilon$ -0.8; (i)1050 ℃,  $\epsilon$ -0.2; (j)1 050 ℃,  $\epsilon$ -0.6; (k)1 050 ℃,  $\epsilon$ -0.4; (l)1 050 ℃,  $\epsilon$ -0.8

等晶体缺陷及第二相质点反而为贝氏体形核和转变提供了有利条件,增大变形量促进贝氏体转变的同时细化贝氏体组织,使贝氏体形态呈细条状;在完全再结晶区(图 2, I 区)变形时,由于溶质原子的充分固溶及奥氏体动态再结晶的充分进行,基体中的变形带、位错和第二相质点密度均大幅度降低,不利于

铁素体的形核,铁素体转变被强烈抑制,在强大过冷度的驱使下,过冷奥氏体发生半切变型相变并转变为板条状贝氏体,伴随着变形过程中奥氏体晶粒的不断再结晶和粗化,贝氏体组织也变得粗细不一致。另外,试验钢未再结晶区(见图 2, III 区)范围较宽,即在该区域的热变形过程中不太容易发生和完成动

态在结晶,可以推测由于形变诱导 Nb 的碳化物弥散析出,显著阻碍了该区域的动态再结晶行为<sup>[11-14]</sup>。

结合 L485QS 管线钢实际生产,综合试验研究及结果,采用 09MnNb 钢进行热形变淬火时,变形温度尽量控制在 950 ~ 1 000 °C,并适当的增大变形量,有利于细条状贝氏体组织的充分转变,并获得较高、较稳定的淬硬性,为后续回火组织性能的调控打下基础。另外,在形变淬火之前可增加一道完全再结晶区(温度  $\geq 1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 、变形量  $\varepsilon \geq 0.6$ )的粗轧工序,通过动态再结晶细化奥氏体晶粒,为最终获得良好的组织和性能做铺垫。

#### 4 结论

(1) 09MnNb 试验钢在 850 ~ 1 100 °C 变形 0.2 ~

0.8 立即水淬后可获得三种类型的组织,变形温度是影响组织转变类型的主导因素,当温度  $\leq 900\ ^\circ\text{C}$  时,主要获得针状铁素体,当温度为 950 ~ 1 000 °C 时,主要获得细条状贝氏体,当温度  $\geq 1\ 050\ ^\circ\text{C}$  时,主要获得粗大的板条状贝氏体。增大变形量在未再结晶区可促进针状铁素体转变、在部分再结晶区可促进细条状贝氏体转变。

(2) 09MnNb 试验钢在 950 ~ 1 000 °C 进行  $\varepsilon \geq 0.4$  的热变形淬火时,可获得以细条状贝氏体为主的淬火组织,以及较高且稳定的淬硬性,并有利于后续回火性能的调控。

湖北省教育厅科研计划重点项目(D20182902)资助

#### 参考文献

- [1] 方剑,黄彦,夏文斌. X56QS 低温用酸性管线管的亚温淬火及回火[J]. 金属热处理,2016,41(3):97-100.
- [2] Ling Z Q, Fang J and Yuan Z X, et al. Influence of Quenching on-line on Properties of X70 Steel for Sour Service Seamless Pipe[J]. Energy Procedia,2012,16( Part A):444-450.
- [3] 凌仲秋,方剑,袁泽喜,等. X70 无缝酸性线管的形变淬火和回火工艺[J]. 金属热处理,2012,37(4):99-101.
- [4] 黄少文,马光亭,霍孝新,等. 淬火及回火热处理对 X100 管线钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(4):133-139.
- [5] 徐天兵,方剑,彭国良. X70 钢级热轧无缝管线钢热处理工艺研究[J]. 热处理技术与装备,2006,27(1):31-33.
- [6] API 5L-2012, Specification for Line Pipe[S]. American Petroleum Institute Press.
- [7] 钱海帆. TMCP 工艺生产 X100 管线钢的微观组织及强化机理[J]. 钢铁研究学报,2011,23(10):54-58.
- [8] 马永杰,张光亮. TMCP 工艺对 Mn-Mo-Nb 系针状铁素体钢的组织及力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2011,23(7):35-38.
- [9] 袁国,康健,李振奎,等. 热轧无缝钢管在线热处理工艺组织性能调控研发技术进展[J]. 钢管,2018,47(1):30-34.
- [10] 方剑,邹喜洋,谢凯意,等. 40Mn2V 非调质钢热变形再结晶的研究[J]. 特殊钢,2009,30(5):65-67.
- [11] 唐兴昌,王向飞,张志坚. Nb、Ti 微合金化低碳贝氏体高强度组织性能及再结晶行为的研究[J]. 热加工工艺,2018,47(8):78-80.
- [12] 周超洋,吴光亮,刘新彬. 含铌低合金高强钢的热变形特征[J]. 材料热处理学报,2016,37(8):222-227.
- [13] Liu Q Y, Deng S H and Sun X J, et al. Effect of Dissolved and Precipitated Niobium in Microalloyed Steel on Deformation Induced Ferrite Transformation(DIFT)[J]. Journal of Iron and Steel Research: English Version,2009,(4):67-71.
- [14] Miao C L, Shang C J and Wang X M, et al. Microstructure and Toughness of HAZ in X80 Pipeline Steel with High Nb Content[J]. Acta Metallurgica Sinica,2010,46(5):541-546.

方剑(1980-),男,博士(2012年武汉大学),讲师/工程师,2003年武汉大学(本科)毕业,钢的强韧化及耐腐蚀性能研究。E-mail:jiangougou@163.com

收稿日期:2018-12-15