

N80 级非调质油井管用钢 36-40Mn2V 连轧和定径工艺 对组织和性能的影响

方 剑^{1,2} 李阳华² 邹喜洋² 谢凯意² 周 勇² 周梦雄² 袁泽喜¹

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 衡阳华菱钢管(集团)有限公司, 衡阳 421001)

摘 要 通过 Gleeble-1500 热模拟机, 模拟 340 机组 36Mn2V 和 40Mn2V 钢 950 ~ 1 100 ℃, 变形量 0.5 ~ 0.8, 变形速度 1.0 s⁻¹, 水冷和 3 ℃/s 冷却的连轧工艺与 800 ~ 950 ℃, 变形量 0.10 ~ 0.30, 变形速度 0.5 s⁻¹, 空冷的定径工艺对组织和硬度的影响。结果表明, 36Mn2V 和 40Mn2V 钢连轧变形温度和变形量分别大于 1 050 ℃ 和 0.5 时可发生完全动态再结晶, 细化晶粒和提高产品综合性能; 36Mn2V 钢管定径变形量 0.3 时, 40Mn2V 钢定径变形量为 0.2 时, 应控制定径温度大于 835 ℃, 才能满足力学性能要求。

关键词 36Mn2V 40Mn2V 非调质油井管用钢 热模拟 连轧 定径 组织 性能

Effect of Multi-Stand Pipe Mill Rolling and Sizing Process on Structure and Property of N80 Non-Quenching and Tempering Steel 36-40Mn2V for Oil Well Pipe

Fang Jian^{1,2}, Li Yanghua², Zou Xiyang², Xie Kaiyi², Zhou Yong², Zhou Mengxiong² and Yuan Zexi¹

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Hengyang Hualing Steel Tube (Group) Co Ltd, Hengyang 421001)

Abstract The effect of 340 multi-stand pipe mill (MPM) continuous rolling process (at 950 ~ 1 100 ℃ with strain 0.5 ~ 0.8, strain rate 1.0 s⁻¹, water or 3 ℃/s cooling) and sizing process (at 800 ~ 950 ℃, with strain 0.1 ~ 0.3, strain rate 0.5 s⁻¹, air cooling) on structure and hardness of steel 36Mn2V and 40Mn2V has been simulated by using Gleeble-1500 thermal simulation machine. Results show that with MPM deformation temperature being higher than 1 050 ℃ at strain 0.5, the complete dynamic recrystallization of steel 36Mn2V and 40Mn2V occurs, the grains are fine and the comprehensive properties are improved; As sizing strain of steel 36Mn2V is 0.3 and sizing strain of steel 40Mn2V is 0.2, as the sizing temperature is controlled higher than 835 ℃, the mechanical properties can meet requirement of standard.

Material Index 36Mn2V, 40Mn2V, Non-Quenching and Tempering Steel for Oil Well Pipe, Thermal Simulation, Continuous Rolling, Sizing, Structure, Property

非调质油井管的开发, 代替了调质钢油井管, 简化了生产流程, 大幅度降低了生产成本, 显著提高了生产效益^[1~3]。N80 非调质油井管通常是在中碳含锰钢中添加适量的微合金元素 V, 通过合理的变形以获得细小铁素体 + 珠光体组织以及弥散分布的 V 的碳氮化合物, 来提高材料的强度同时获得良好的韧性^[3~5]。然而, 在实际的生产过程中, 钢管在各机组上的变形量分配只与规格相关, 且不同的规格变形量相差很大, 导致产品的性能波动很大。工业上习惯采用传统方法, 对不合格钢管进行正火处理, 或正火 + 回火处理, 既延误了生产, 又增加成本。本文在 Gleeble-1500 热模拟实验机上, 对 40Mn2V 和 36Mn2V 两个钢种进行了模拟连轧和定径的试验,

分析研究连轧 (MPM) 动态再结晶细化晶粒及定径变形参数对性能的影响。

1 试验材料和方法

试验用钢采用钢厂工业生产的连铸圆坯 36Mn2V 和 40Mn2V 钢, 其化学成分如表 1 所示。

热模拟连轧试样的尺寸为 Φ8 mm × 12 mm, 每组 4 个试样 (图 1a)。图 1(b) 热模拟试验的所有试样在进行热变形试验前, 都要先加热到 1 200 ℃ 保温 10 min, 进行固溶处理, 然后再以相应的冷却速度或加热速度冷却或加热到各变形温度保温 1 min, 进行热变形试验, 各试样的热变形参数如表 2 所示。做完热模拟试验后, 5# ~ 16# 试样在洛氏硬度计 TH300 上测量硬度, 并在金相显微镜 Axioplan-2 上进行组

通讯作者: 袁泽喜, 教授, 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081

表 1 非调质钢管 36Mn2V 和 40Mn2V 的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of non-quenching and tempering steel 36Mn2V and 40Mn2V for pipe /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	N
36Mn2V	0.38	0.21	1.5	0.015	0.005	0.02	0.02	0.04	0.01	0.12	0.004 9
40Mn2V	0.42	0.20	1.6	0.012	0.005	0.02	0.02	0.03	0.01	0.10	0.005 5

注: (Ti + Nb) ≤ 0.02% 为残余元素。

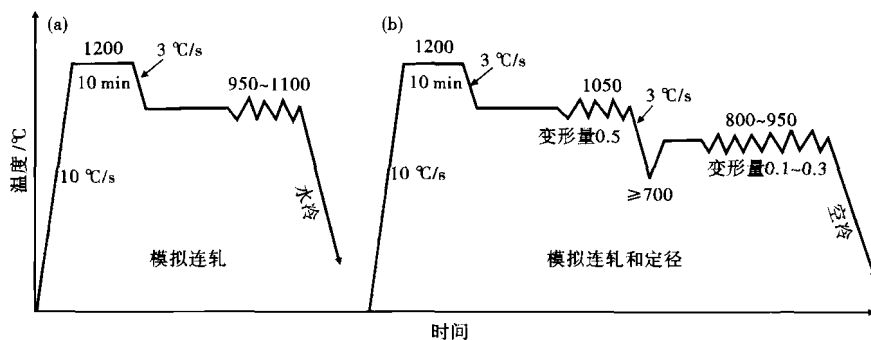


图 1 热模拟试验工艺简图: (a) 1[#]~4[#]试样; (b) 5[#]~16[#]试样

Fig. 1 Schematics of thermal simulating test process: (a) No1 ~ No4 samples; (b) No5 ~ No16 samples

表 2 连轧和定径工艺热模拟试验参数

Table 2 Parameters of simulating test for continuous rolling process and sizing process

试样	模拟连轧工艺				模拟定径工艺			
	温度/ ℃	变形 量 ϵ	变形速度 $\dot{\epsilon}/s^{-1}$	冷却 方法	温度/ ℃	变形 量 ϵ	变形速度 $\dot{\epsilon}/s^{-1}$	冷却 方法
1 [#]	1 100	0.8	1.0	水冷	-	-	-	-
2 [#]	1 050	0.8	1.0	水冷	-	-	-	-
3 [#]	1 000	0.8	1.0	水冷	-	-	-	-
4 [#]	950	0.8	1.0	水冷	-	-	-	-
5 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	800	0.10	0.5	空冷
6 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	850	0.10	0.5	空冷
7 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	900	0.10	0.5	空冷
8 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	950	0.10	0.5	空冷
9 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	800	0.20	0.5	空冷
10 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	850	0.20	0.5	空冷
11 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	900	0.20	0.5	空冷
12 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	950	0.20	0.5	空冷
13 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	800	0.30	0.5	空冷
14 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	850	0.30	0.5	空冷
15 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	900	0.30	0.5	空冷
16 [#]	1 050	0.5	1.0	3℃/s	950	0.30	0.5	空冷

织形貌观察。

2 试验结果及分析

2.1 热模拟真应力-应变曲线

由图 2 可见,随着温度的升高应力变小;随着变形量的增加,应力在初始阶段急剧增加,增加的幅度与温度有关(温度低幅度大),当变形量继续增加时,应力会出现峰值或峰值不太明显(图 2b 中 4[#]),经过峰值后应力会缓慢下降达到平稳值(图 2 中的

1[#]、2[#]曲线),或缓慢降低未出现平稳值(图 2 中的 3[#]、4[#]曲线),这些现象都是加工硬化和高温软化的共同作用。根据动态再结晶理论,真应力-应变曲线上出现峰值应力,表明发生了动态再结晶,发生动态再结晶的临界变形量 ϵ_c 约等

于峰值应力对应的变形量乘以系数 0.83,而完成动态再结晶的临界变形量 ϵ_s 近似于开始出现平稳值对应的变形量^[6~10]。从图 2 中的曲线可以得出,36Mn2V 和 40Mn2V 完成动态再结晶的曲线均为 1[#]和 2[#],且在变形量为 0.5 时均明显出现了平稳值,即当温度 $\geq 1 050$ °C、变形量 ≥ 0.5 时,36Mn2V 和 40Mn2V 均可以完成动态再结晶过程。因此,采用 36Mn2V 和 40Mn2V 非调质钢生产油井管的连轧过程,需控制变形温度和变形量分别大于 1 050 °C 和 0.5,使发生完全动态再结晶。

从图 3(a)可以看出,36Mn2V 钢模拟定径曲线在相同的变形量时,温度越低应力越大,应力随应变的增长的幅度越大,变形主要以加工硬化和动态回复为主,没有明显的高温动态再结晶软化现象。图 3(b)模拟 40Mn2V 两次变形与图 3(a)相似,但模拟 40Mn2V 定径变形抗力比 36Mn2V 稍微高一些,且温度越低越明显。这是因为 40Mn2V 的碳含量比 36Mn2V 略高,越容易在变形过程中诱导析出 V 的碳氮化物,阻碍金属变形提高了变形抗力^[11,12]。

2.2 力学性能试验分析
由图 4 可以看出温度越低、变形量越大,硬度值越高,这是因为温度越低,变形量越大,储存在基体中的位错和畸变能越多,这不仅促进了微合金元素 V 的碳氮化物析出,也为细小铁素体和珠光体的获得提供了有利的形核位置^[11,12]。实际上油井管的生产,许多用户接受变形正火态交货,但同时也强调终轧温度一定要大于 A_{c3} 相变点温度。通过对 36Mn2V 和 40Mn2V 的相变点温度测试,它们的 A_{c3} 温度分别为 835 °C 和 827 °C,因此 N80 级非调质油井管采用 36Mn2V 和 40Mn2V 钢生产,定径温度不应低于 835 °C,尽管温度越低性能越高。由图 4 可以看出,在同等条件下 40Mn2V 的硬度明显比

36Mn2V 的硬度高,这是因为前者碳含量较高,更有利于微合金元素 V 的碳氮化物过饱和析出,同时珠光体的含量也会增多^[13]。

根据 API 5CT 标准^[14] 对非调质 N80 级油井管的性能要求(屈服强度 552 ~ 758 MPa;抗拉强度 ≥ 689 MPa)及多年的生产经验,制定的 N80 级非调质油井管的内控标准,要求非调质 N80 级油井管的硬度应符合 HRC 21 ~ 28。由图 4 可以看出,3 条曲线均有部分硬度超出这个范围,当温度大于 A_{c3} (温度 835 $^{\circ}\text{C}$) 时,对于 36Mn2V 和 40Mn2V 钢,变形量分别为 0.3 和 0.2 时,力学性能完全可以满足要求;当变形量为 0.1 时,36Mn2V 性能偏低,不能满足性能要求,而 40Mn2V 则需要控制定径温度在 835 ~ 920 $^{\circ}\text{C}$,方可满足性能要求。可见 N80 级非调质钢油井管的生产,采用单一钢种无法满足众多规格钢管产品性能的控制要求。

2.3 组织形貌观察

36Mn2V 和 40Mn2V 两个钢种通过不同热模拟工艺得到的组织,均非常细小,主要为针状铁素体 + 条状贝氏体 + 少量珠光体,应该还有 V 的碳化物析出。并随着定径温度的降低和变形量的增加,晶内针状铁素体和碳化物增多,珠光体减少,铁素体和珠光体组织变得更细小。图 5 36Mn2V 钢和 40Mn2V 钢的组织对应的硬度分别为 HRC 27 和 HRC 25。图 5 中钢的组织均为细小针状铁素体 + 少量细小珠光体 + 少量贝氏体组织。比较可知,由于变形量大,图 5(a) 中 36Mn2V 钢的晶内针状铁素体较多且很细小,变形量大形成更多的晶内滑移带,给针状铁素体的形成提供了更多的形核位置,使珠光体组织变少。图 5(b) 中 40Mn2V 钢的铁

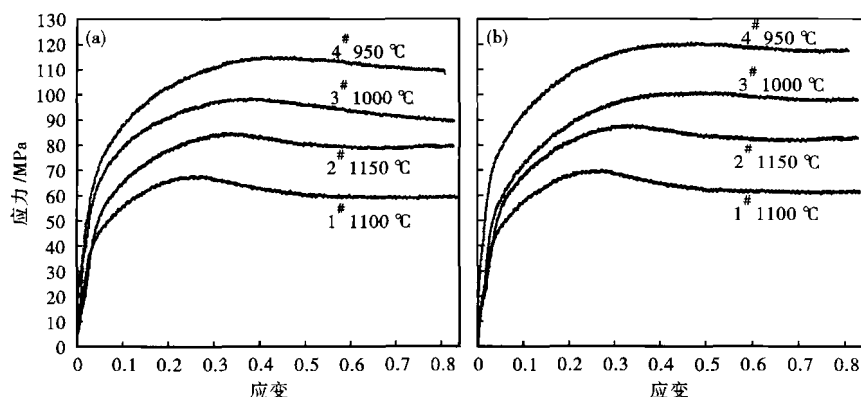


图 2 模拟连轧变形真应力-应变曲线:(a)36Mn2V 钢;(b)40Mn2V 钢
Fig. 2 True stress-strain curves for simulating hot continuous rolling of steel 36Mn2V (a) and steel 40Mn2V (b)

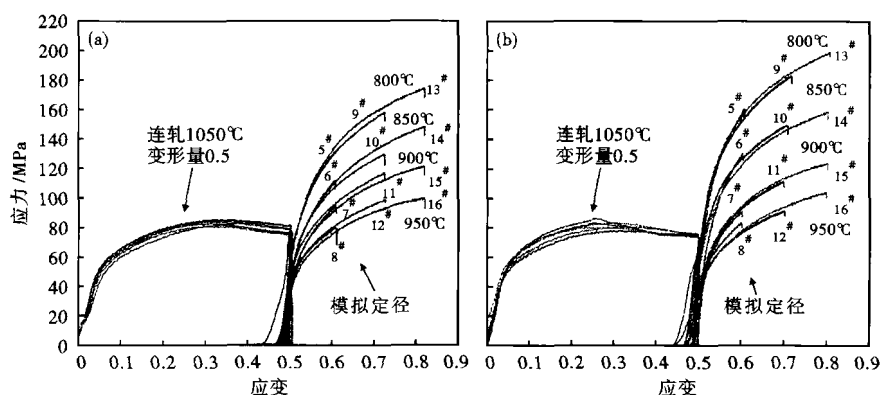


图 3 模拟 36Mn2V 钢(a)和 40Mn2V 钢(b)连轧和定径两次热变形曲线
Fig. 3 Curves of simulating hot continuous rolling and double sizing deformation of steel 36Mn2V (a) and steel 40Mn2V (b)

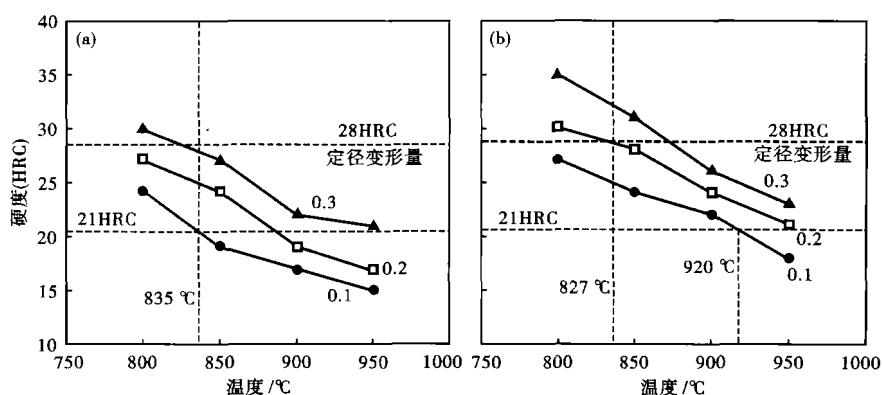


图 4 不同定径变形量时(a)36Mn2V 钢和(b)40Mn2V 钢的硬度值
Fig. 4 Values of hardness of steel 36Mn2V (a) and steel 40Mn2V (b) with different strain in sizing process

素体明显比图 5(a) 的要粗大一些,且一些铁素体呈多边形,沿晶界附近分布,局部有少量细小的珠光体和贝氏体组织。

2.4 生产工艺制定

为了获得良好的力学性能并稳定在满足要求的范围之内,需对其连轧和定径工艺进行生产控制。首先,36Mn2V 和 40Mn2V 钢的连轧均需控制变形温度和变形量分别大于 1 050 ℃ 和 0.5,使发生完全动态再结晶,细化晶粒和组织,提高材料的综合性能。对此,实际生产中连轧的变形量一般都超过了 0.8,故只需控制连轧温度 $\geq 1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即可。其次,定径工艺需要控制温度和变形量,一般定径的温度为 800 ~ 950 ℃,并可通过调整步进炉加热温

度来控制定径温度,而定径的变形量与钢管规格和机组有关,定径的变形量一般为 0.1 ~ 0.3。根据以上的研究结果:当钢管规格确定定径变形量分别为 0.3 和 0.2 时,可分别采用 36Mn2V 和 40Mn2V 连铸坯料生产,将定径温度控制在 A_{c3} 温度 835 ℃ 以上即可完全满足性能要求;而当变形量为 0.1 时,则需采用 40Mn2V 钢生产,并控制定径温度在 835 ~ 920 ℃,可满足性能要求。于是得出 340 机组生产 N80 级非调质油井管的定径工艺控制和非调质钢种的选用要点:当钢管外径(/mm)为 $\Phi 127$ 、 $\Phi 193.38$ 、 $\Phi 196.85$ 、 $\Phi 273.05$ 、 $\Phi 339.72$ 时(实际变形量 0.1),采用 40Mn2V 连铸坯料生产,并控制定径温度在 835 ~ 920 ℃;当外径(/mm)为 $\Phi 114.3$ 、 $\Phi 168.28$ 、 $\Phi 177.8$ 、 $\Phi 244.48$ 、 $\Phi 298.45$ 时(实际变形量 0.2),采用 40Mn2V 连铸坯料生产,温度大于 835 ℃;当外

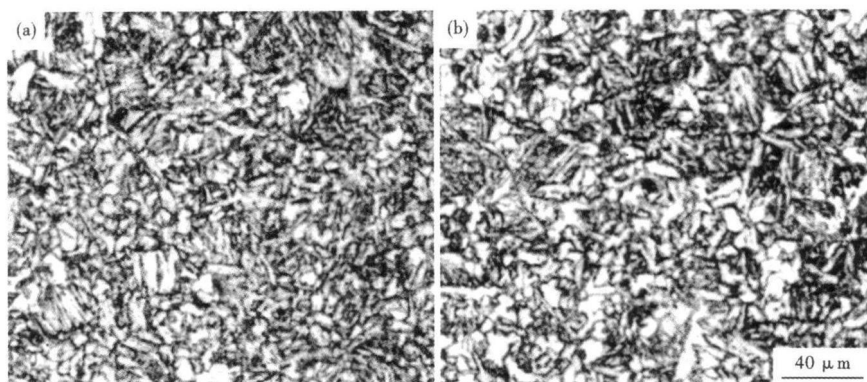


图 5 (a)36Mn2V 钢(定径 850 ℃,变形量 0.3)和(b)40Mn2V 钢(定径 850 ℃,变形量 0.2)的组织形貌

Fig. 5 Morphology of structure of (a) steel 36Mn2V (sizing at 850 ℃, strain 0.3) and (b) steel 40Mn2V (sizing at 850 ℃, strain 0.2)

径(/mm)为 $\Phi 139.7$ 、 $\Phi 219.08$ 时(实际变形量 0.3),采用 36Mn2V 连铸坯料生产,控制温度大于 835 ℃。

3 结论

(1)采用 36Mn2V 和 40Mn2V 连铸坯料生产油井套管,需控制连轧变形温度和变形量分别大于 1 050 ℃ 和 0.5,可发生完全动态再结晶,细化晶粒及组织,提高产品的综合性能。

(2)采用 36Mn2V 连铸坯料生产,控制定径温度大于 835 ℃,只适合于定径变形量为 0.3 对应规格的油井管。

(3)采用 40Mn2V 连铸坯料生产,对于变形量为 0.1 的钢管,需控制定径温度在 835 ~ 920 ℃;对于变形量为 0.2 ~ 0.3 的钢管,只需控制定径温度大于 835 ℃。

参考文献

- 任海鹏,马洪梯,刘春明,等.非调质油井管钢的开发应用.钢铁,2003,37(1):61
- 成海涛,崔润炯.浅谈我国微合金非调质油井管的发展.钢管,2002,31(3):7
- Fang J, Li Y H, Xie K Y, et al. Influence of Hot Deformation on Microstructure of Non-Quenching and Non-Tempering Pipe 36Mn2V Used in Oil Well. ICPNS2010:314
- 刘雅政,刘照,徐进桥,等.非调质 N80 石油套管轧制工艺优化的试验研究.钢铁,2006,41(7):41
- 洪智勇,辛广胜,成永久.非调质 N80 级油井管的发展.包钢科技,2009,35(6):9
- 方剑,谢凯意,邹喜洋,等.微合金非调质 40Mn2V 钢管的变形抗力研究.武汉科技大学学报,2009,32(3):238
- 方剑,邹喜洋,谢凯意,等.40Mn2V 非调质钢热变形再结晶的研究.特殊钢,2009,30(5):65
- 何宜柱,陈大宏,雷廷权.变形 Z 因子与动态再结晶晶粒尺寸间的理论模型.钢铁研究学报,2000,12(1):26
- Ryan N D, McQueen H J. Comparison of Dynamic Softening in 301, 304 and 317 Stainless Steels. High Temperature Technology, 1990, 8(3):185
- Bin Z, Hongbing Z, Xueyou R. Dynamic Recrystallization Behavior of 35CrMo Structural Steel. Journal of Central South University of Technology, 2003, 10(1):13
- 王安东,刘国权,刘胜新,等.V-Ti-N 微合金非调质无缝油井管钢中碳氮化物的热力学计算.北京科技大学学报,2006,28(9):824
- 王立军,王凯,任海鹏,等.V 和 V-N 微合金化低碳钢碳氮化物的形变析出.东北大学学报(自然科学版),2006,27(2):181
- 索进平,董瀚.40Mn2V 钢中微合金元素氮-碳化物的析出行为.特殊钢,2005,26(4):19
- API 5CT-2005 Specification for Casing and Tubing. American Petroleum Institute Press, 2005, 7:87

方剑(1980-),男,博士研究生,工程师,2003 年武汉科技大学毕业,钢管产品研发。

收稿日期:2011-11-05