

改善非调质 N80 套管强韧性的试验研究

解德刚¹, 王长顺¹, 陈勇², 陈克东¹, 郭海明²

(1. 鞍钢股份有限公司技术中心, 辽宁鞍山 114009; 2. 鞍钢股份有限公司无缝钢管厂, 辽宁鞍山 114009)

摘要: 在试验轧机上对一种非调质 N80 套管进行了改善强韧性能的试验研究。结果表明, 采用合适的轧后控冷工艺或增加奥氏体未再结晶区的累积变形量均可提高 N80 套管钢的强韧性能, 如果二者同时采用则效果更佳。采用上述结果进行了工业化批量生产, 所获得产品的强度和韧性均较试验前有较大的提高。

关键词: N80 级套管; 非调质; 强度; 冲击韧性

中图分类号: TF76, TG335.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2013)06-0091-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2013.06.018

Experimental Study on Improving Strength and Toughness of Non-quenched and Tempered Casing Tube N80

Xie Degang¹, Wang Changshun¹, Chen Yong², Chen Kedong¹, Guo Haiming²

(1. Technology Center of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Seamless Tube Plant of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: Experimental study was carried out for improving strength and toughness of non-quenched and tempered casing tube N80. The results show that strength and impact toughness can be improved by adopting appropriate controlled cooling process after rolling or increasing cumulative deformation in the austenitic non-recrystallization zone, and better performance can be achieved with the combination of these two methods. The commercial production proves that the strength and impact toughness of the products so produced can be noticeably enhanced.

Key words: casing tube N80, non-quenched and tempered, strength, impact toughness

0 引言

在石油管材中占比例最大的是石油套管。其中 N80 钢级石油套管是用量最大的品种, 约占 50%^[1-2]。通常在中碳锰钢中添加微合金化元素生产非调质石油套管用钢。用于生产 N80 级非调质石油套管的钢种主要为添加钒、钛的中碳锰系微合金钢^[3], 例如包钢无缝的 34Mn2VN^[4]、天津钢铁有限公司的 37Mn2V^[5]、无锡西姆莱斯的 33Mn2V^[1], 此外, 攀成钢、衡阳钢管也开发出了适应自身装备条件的非调质 N80 套管^[3]。各钢

厂生产非调质 N80 套管的工艺主要分为两类, 一类是采用在线常化工艺, 另一类是采用控轧控冷工艺。钢管的组织类型主要为铁素体-珠光体型和贝氏体型^[6]。与在线常化工艺相比, 控轧控冷工艺具有节能、高效的优势, 但在实际运用过程中存在不能同时获得预期的高强度和韧性高的问题, 而针对这一问题的研究相对较少。笔者结合鞍钢实际, 进行了采用“V-N 微合金化+控轧控冷”工艺生产非调质 N80 套管的试验研究和生产实践, 非调质 N80 套管的强韧性得到了很大的改善。

1 试验材料及方法

采用 100 t 转炉冶炼、连铸的 Ø185 圆坯作为试验原料,试验钢主要化学成分如表 1 所示。

在实验室 500 轧机上进行了模拟轧制 Ø139.7 mm × 7.72 mm 规格 N80 套管的试验。试验采用了两种工艺模拟制度轧成 12 mm 热轧板:试验钢加热

至 1 250 °C,再冷却至 1 200、1 050、850 °C 三个温度进行变形(850 °C 为奥氏体未再结晶温度以下),工艺 A 在 850 °C 采用了 2% ~ 7% (试样 a)和 10% ~ 15% (试样 b)两种不同的变形量变形,之后空冷;工艺 B 在 850 °C 只有一种变形量,但以 20 °C /s 的冷速快冷至 750 ~ 600 °C 不同温度(试样 c ~ f),然后以 0.1 ~ 3 °C /s 的冷速冷却至室温,如图 1 所示。

表 1 试验钢主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of the tested steel

C	Mn	Si	P	S	O	V	N	Ti	Als
≤0.30	≤2.0	适量	≤0.022	≤0.010	≤0.002 0	适量	适量	适量	适量

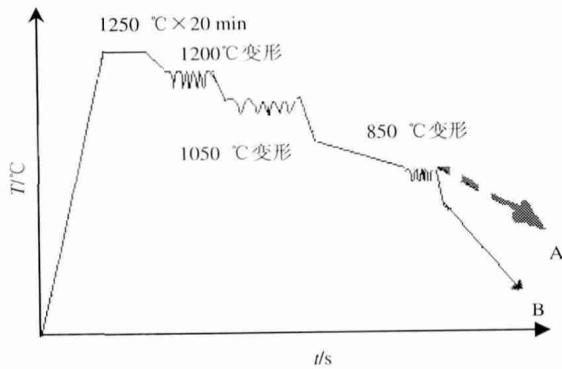


图 1 试验的工艺示意

Fig. 1 Test scheme for controlled cooling and rolling

在轧后钢板上取样,按标准制成 Ø8.9 mm 纵向圆拉力试样和全尺寸纵向冲击试样,分别进行拉伸和冲击试验,其中冲击试验温度为 0 °C。力学性能检验后用冲击试样的残样进行金相检验。经机械研磨、抛光并用硝酸酒精腐蚀后在卡尔·蔡司(ZEISS Axiovert 200 MAT)光学显微镜下进行组织观察。另外,金相样腐蚀后还制作了萃取复型试样,并在 Tecnai G2 20 透射电子显微镜下观察析出相。

2 试验结果与分析

2.1 合金设计

本试验钢的成分是基于提高钢的强韧性而设计的。采用低 C 及适宜的控轧控冷工艺,以保证 N80 钢的强韧性;添加适量的 Si、Mn 可以弥补由于降碳引起的固溶强化的损失;添加适量的 V 和 Ti,利用其碳化物的析出强化来增加钢的强度;利用形成的 Ti 的 C、N 化合物的固溶温度较高,加热和轧制时可起到较好的阻止奥氏体晶粒长大的作用^[7];严格控

制 S、O 的含量,保证 Ti 的细晶作用的充分发挥。

2.2 变形量对强韧性的影响

进行了不同变形量对强度和韧性影响的试验(工艺 A),实验室变形量对钢强韧性影响的试验结果见表 2。试验钢金相组织如图 2 所示。

从表 2 可知,与试样 a(变形量 2% ~ 7%)相比,试样 b(变形量 10% ~ 15%)的屈服强度平均高 33 MPa、冲击功平均高 27 J。这说明,通过增加奥氏体未再结晶区各道次的累积变形量能较好地改善非调质 N80 套管钢的强韧性。这个结果应该归结于两种因素的影响:一方面是变形量增大使过冷奥氏体的位错密度增加,产生更多的铁素体形核位置,可使相变过程中形成的晶内铁素体的含量增加、晶粒尺寸变小(如图 2 所示),从而提高钢的韧性;另一方面是随着变形量增大,增加了过冷奥氏体分解的驱动力,珠光体团尺寸细化^[8-10]。

表 2 不同变形量试验力学性能
Table 2 Mechanical properties under different deformation

序号	$R_m /$ MPa	$R_{10.5} /$ MPa	$A_{50mm} /$ %	$\alpha(kV8 \text{ 纵向 } 10 \text{ mm} \times$ $10 \text{ mm } 0^\circ\text{C}) / \text{J}$
a	780	548	28.5	60, 48, 50
b	782	579	29	60, 108, 70
标准	≥689	552 ~ 758	≥15	≥27

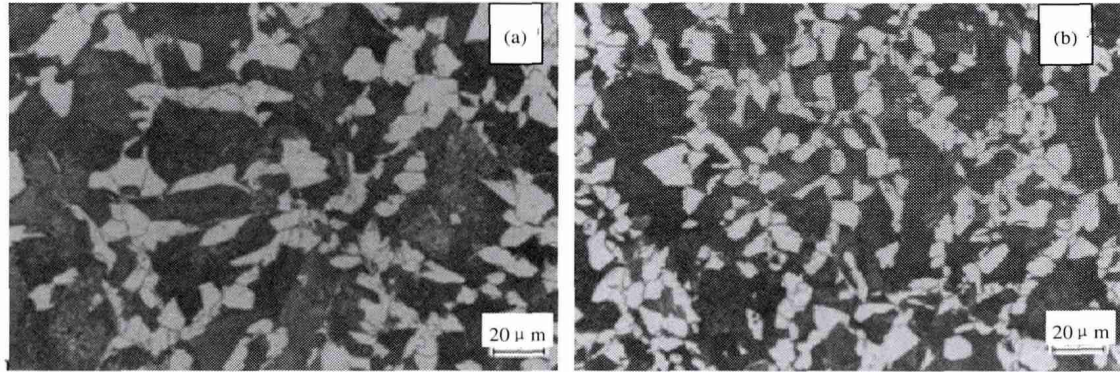
由图 2 可以看出,两个试样的组织均为铁素体(F) + 珠光体(P),但试样 b 中 P 和 F 的晶粒尺寸比试样 a 的细小,尤其是 P 团的尺寸得到了减小。

2.3 控冷温度对强韧性的影响

进行了不同控冷温度对试验钢强度和韧性影响的试验(工艺 B),不同控冷温度试样的金相组织和析出相检验结果如图 3、4 所示。图 3 显示,快冷终冷温

度在 600 °C 以上 组织均为 F + P。当快冷终冷温度为 750、700 °C 时 F 晶粒和 P 团的尺寸与热轧后空冷的试样 b 组织没有明显区别;当快冷终冷温度为 650、600 °C 时 F 晶粒和 P 团的尺寸明显细化 P 团尺寸均在 20 μm 以下。试样 a (快冷终冷温度 750 °C) 与试

样 b (快冷终冷温度 700 °C) 的 F 量明显少于试样 c 和 d 的。试样 d 的 F 量与试样 c 相比没有明显增多, 但是 F 晶粒更细小。试样 c 和试样 d 组织的共同特点是 P 团尺寸得到了有效的细化, 而且细小的 F 量也有所增加 这对钢的强韧性有利。

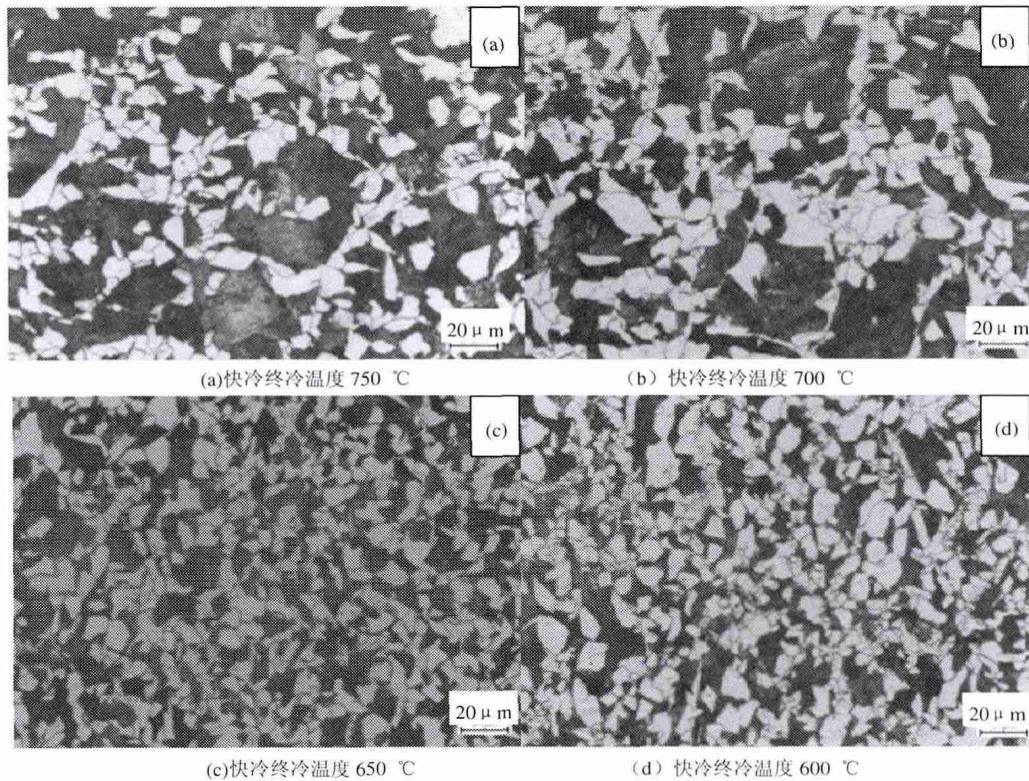


(a) 试样 a

(b) 试样 b

图 2 非调质 N80 试验钢金相组织

Fig. 2 Metallographic structures of non-quenched and tempered steel N80



(a) 快冷终冷温度 750 °C

(b) 快冷终冷温度 700 °C

(c) 快冷终冷温度 650 °C

(d) 快冷终冷温度 600 °C

图 3 控冷试验金相组织

Fig. 3 Microstructures of samples at controlled cooling test

图 4 为析出相 TEM 照片。图 4 表明:随着快冷终冷温度的降低 析出相数量增多, 尺寸减小。这是由于随着控冷温度的降低, 微合金元素的过饱和度

增大, 使微合金碳、氮化合物析出的驱动力增大, 形核率升高, 因而析出较多的第二相质点。析出温度越低, 原子扩散系数越小, 原子迁移率越低, 析出的

第二相质点越不易长大,导致尺寸减小。特别是试样 c(快冷终冷温度 650 °C)和试样 d(快冷终冷温度 600 °C)中析出相数量明显增多,细小弥散。经能谱分析得知,小尺寸析出相为 V 的碳氮化物,这与文献报道的 $V(C_xN_{1-x})$ 的大量析出发生在 550 ~

650 °C^[11]十分吻合。但如果快速冷却到 600 °C 以下,例如 500 ~ 550 °C,则由于冷却时间短,冷却后温度低,在变形过程未析出的钒在此过程中不可能析出,最终处于固溶状态^[12],析出强化的作用得不到有效发挥。

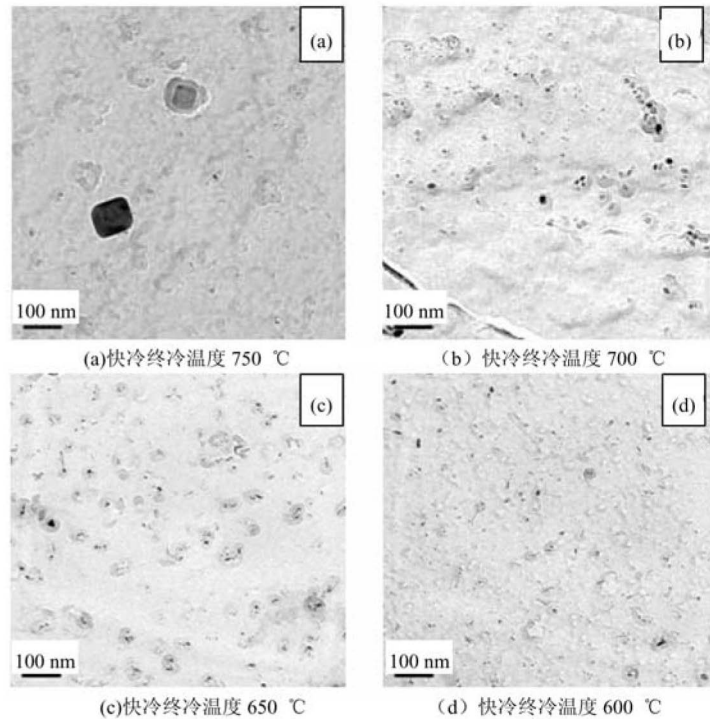


图 4 控冷试验析出相

Fig. 4 Precipitated phases of samples at controlled cooling test

从上述分析可知,试验的 N80 套管钢的控冷温度在 600 ~ 650 °C 时可以获得较理想的组织和析出相。

力学性能检验结果见表 3。表 3 表明:快冷终冷温度在 750 °C 时,钢的强韧性提高不明显,快冷终冷温度为 700 °C 时,强韧性提升也有限。而当快冷终冷温度降低到 650、600 °C 时,强度得到了显著提高,这主要归功于组织细化和微小析出相的数量增加。同时由于细晶作用,钢的冲击功也得到提高。综上所述,非调质 N80 钢的最佳控冷温度为 600 ~ 650 °C。

表 3 控冷试验力学性能检验结果

Table 3 Mechanical properties of the samples after controlled cooling test

序号	$R_m /$ MPa	$R_{0.5} /$ MPa	$A_{50mm} /$ %	$a($ kV8 纵向 10 mm × 10 mm 0°C) / J
c	785	573	30	75.89.68
d	790	581	29	65.92.70
e	825	615	27.5	102.96.94
f	825	660	28.5	120.102.145
标准	≥689	552 ~ 758	≥15	≥27

3 现场实施效果

根据鞍钢 PQF 热连轧机组的设备状况,生产 N80 套管可采用 $\varnothing 185$ 、 $\varnothing 210$ 两种规格的圆坯,前者的圆坯轧制孔型为已有,并生产了大批 J55 石油套管,为成熟规格,但热轧轧制 N80 套管时强、韧性难以同时达到要求;后者为鞍钢拟开发圆坯规格,希望通过增加奥氏体未再结晶区累积变形量和调整钢管轧制各工序的变形分配来改善 N80 套管的强韧性。

刘照、刘雅政等人的研究^[4]表明:非调质 N80 套管钢获得较好韧性的冷速区间为 0.8 ~ 2 °C/s。按照此速度将钢管由终轧冷却至室温,可获得较好的强韧性,但由于鞍钢无缝钢管厂现场场地和生产节奏等因素的制约,这一较低速度且恒定较长时间的冷却方式无法实现,只能实施终轧后大冷速的穿水短时冷却,将钢管温度迅速降低到某一合适温度,通过增大相变过冷度来增加晶粒形核和促进第二相

的低温析出。

根据以上试验研究结果,采用 $\varnothing 210$ 圆坯生产非调质 N80 套管,调整穿孔、连轧、定径的变形分配,终轧后控冷温度按 $600 \sim 650$ °C 控制,生产试制 $\varnothing 139.7$ mm 规格 N80 套管 316 批、 $\varnothing 114.3$ mm 规格 N80 套管 245 批,总量超过 5 万 t,力学性能指标全部合格。全尺寸冲击试样的冲击功由试验前的 15 ~ 20 J 提高至 30 J 以上,屈服强度由试验前的 550 ~ 580 MPa 提高至 600 MPa 以上,即大生产的非调

质 N80 套管的强韧性能得到很大改善。

4 结论

1) 采用 $\varnothing 210$ 圆坯,增加累积变形量并调整制管各工序的变形分配,可获得满足 5 寸半 N80 套管要求的强、韧性能,但余量较小。

2) 通过终轧后快速冷却的方法,当控冷温度为 $600 \sim 650$ °C 时可进一步显著提高 N80 套管的强韧性。

参考文献

- [1] Liu Shengxin, Chen Yong, Liu Guoquan *et al.* Effects of controlled cooling temperature on microstructure of medium-carbon microalloyed steel for non-quenched/tempered oil-well tubes [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(1): 28-31. (刘胜新,陈永,刘国权,等. 控冷温度对中碳非调质油井管用钢组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(1): 28-31.)
- [2] Yin Renjie, Wang Enuo, Chen Kun *et al.* R & D of large-sized non-quenched and tempered oil casing in grade N80 [J]. Steel Pipe, 2008, 37(5): 35-39. (尹人洁,王婀娜,陈坤,等. 大直径非调质 N80 钢级石油套管的研制与开发[J]. 钢管, 2008, 37(5): 35-39.)
- [3] Chen Zhiyong, Xin Guangsheng, Cheng Yongjiu. Development of non-quenched and tempered N80 oil well tube [J]. Science & Technology of Baotou Steel(Group) Corporation, 2009, 35(6): 9-17. (谌智勇,辛广胜,成永久. 非调质 N80 级油井管的发展[J]. 包钢科技, 2009, 35(6): 9-17.)
- [4] Liu Zhao, Liu Yazheng, Zhang Yusheng *et al.* Feasibility experimental study of new process of producing non-quenched and tempered oil casing N80 [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(10): 43-46. (刘照,刘雅政,张玉胜,等. 生产非调质 N80 级石油套管的新工艺可行性实验研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35(10): 43-46.)
- [5] Gao Shurong, Wang Yongran. Practice of development of non-quenched and tempered casing tube N80 by converter [J]. Tianjin Metallurgy, 2006(4): 10-11. (高淑荣,王永然. 转炉开发 N80 级非调质石油套管钢的实践[J]. 天津冶金, 2006(4): 10-11.)
- [6] Zhu Lixia, Li Jinfeng, Han Xinli *et al.* Analysis of and influence by typical structural defects of N80 non-quenched and tempered steel for OCTG-making [J]. Steel Pipe, 2008, 37(1): 34-37. (朱丽霞,李金凤,韩新利,等. 非调质 N80 油井管钢的典型组织缺陷分析及其影响[J]. 钢管, 2008, 37(1): 34-37.)
- [7] Kong Xiangwei, Xu Jianzhong, Shi Jing *et al.* Profile and flat control system of hot rolled strip [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2002, 23(7): 683-686. (孔祥伟,徐建忠,史静,等. 热轧带钢板形(PFC)控制系统[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(7): 683-686.)
- [8] Sun Tongtong, Zhao Zhiyi, Li Lianping, *et al.* Research on off-line analysis system of ultra-thin strip shape control [J]. Steel Rolling, 2005, 22(5): 3-4. (孙彤彤,赵志毅,李连平,等. 热轧薄带钢板形控制系统离线分析软件的开发[J]. 轧钢, 2005, 22(5): 3-4.)
- [9] Cheng Haitao, Cui Runjong. Brief discussion on domestic development of production of microalloyed non-quenched and tempered oil well pipe [J]. Steel Pipe, 2002, 31(3): 7-10. (成海涛,崔润炯. 浅谈我国微合金非调质油井管的发展[J]. 钢管, 2002, 31(3): 7-10.)
- [10] Wang Youming, Li Manyun, Wei Guang. The controlled rolling and controlled cooling of steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009. (王有铭,李曼云,韦光. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.)
- [11] Liu Shengxin, Chen Yong, Liu Guoquan, *et al.* Research on strain-induced precipitation behavior in microalloyed steel by stress relaxation [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(10): 73-77. (刘胜新,陈永,刘国权,等. 用松弛法研究微合金钢中的碳氮化物应变诱导析出行为[J]. 机械工程材料, 2006, 30(10): 73-77.)
- [12] Zhang Kaihua. Effect of vanadium on grain refinement with large deformation at lower temperature [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2004, 25(4): 29-32. (张开华. 钒在低温大变形条件下对晶粒细化的影响[J]. 钢铁钒钛, 2004, 25(4): 29-32.)