N80－1套管工艺及性能研究*

米永峰[1]，罗海炯[2]，刘玉荣[1]，郭志文[1]，罗忠辉[1]，董 珍[3]，王 鹏[1]

（1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司，内蒙古 包头 014010；
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术质量部，内蒙古 包头 014010；
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心，内蒙古 包头 014010）

摘 要： 文章基于Q/YS 1572.1标准中对规格为Φ139.7 mm×7.72 mm的N80－1套管屈服强度和冲击韧性指标，工业试验摸索了在线常化工艺中再加热温度对钢管屈服强度和冲击功的影响。工业试验结果表明，钢管入再加热炉前的温度不高于550 ℃，钢管再加热温度控制在870～900 ℃，可实现钢管的屈服强度达到570～620 MPa，0 ℃半尺寸纵向冲击功不低于40 J，钢管的屈服强度及冲击韧性满足Q/YS 1572.1标准要求。

关键词： N80－1套管；再加热温度；在线常化
中图分类号： TG335.71 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438(2019)04－0010－04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.04.003

Study on Technology and Performances of N80－1 Casing

Mi Yong－feng[1], *Luo Hai－jiong*[2], *Liu Yu－rong*[1], *Guo Zhi－wen*[1], *Luo Zhong－hui*[1], *Dong Zhen*[3], *Wang Peng*[1]

(1. *Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Technology and Quality Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, the effects of reheating temperature in the on－line normalizing process on yield strength and impact energy of steel tube were explored with industrial experiments based on the indexes of yield strength and impact toughness for Φ139.7 mm×7.72 mm N80－1 casing in the Q/YS 1572.1 standard. The results showed that the yield strength of steel tube could reach 570～620 MPa and the half－size longitudinal impact energy at 0 ℃ is ≥40 J if the temperature of steel tube before entering reheating furnace was ≤550 ℃ and reheating temperature was controlled at 870～900 ℃, which could meet the requirements of the Q/YS 1572.1 standard.

Key words: N80－1 casing; reheating temperature; on－line normalizing

* **收稿日期：** 2019－06－05
作者简介： 米永峰(1984－)，男，陕西省榆林市人，硕士，高级工程师，现从事无缝管新产品及工艺开发。

近年来油田对石油套管性能要求的不断提高，其中中石油的供货技术标准 Q/YS 1572.1 对 N80 – 1 钢级的冲击功要求较 API 5CT 标准要求大幅提高，且中石油个别下属单位对屈服强度的下限由 552 MPa 提高到 568 MPa，造成原有的 N80 – 1 生产工艺生产 N80 – 1 套管时性能合格率低，只能采用 N80Q(调质状态)方式供货。按照 Q/YS 1572.1 标准要求，N80 – 1 套管可选择直接轧态交货，或可对钢管进行正火或正火 + 回火交货，为了降低生产成本，国内基本采用直接轧制交货，在热连轧过程中采用控制轧制及控制冷却相结合的工艺以使产品的各项性能达到 Q/YS 1572.1 的要求；另外，API 石油学会即将发布的 API 5CT 第十版产品标准中将明确规定 N80 – 1 套管的冲击验收指标(0 ℃全尺寸纵向)冲击功不低于 27 J。从近年来国内生产情况来看，N80 – 1 直接轧制套管的产品稳定性还待提高，主要体现在钢管的屈服强度不稳定，冲击功波动性较大，制约了 N80 – 1 产品的批量化生产和市场化应用。

国内如天津钢管有限公司、衡阳华凌钢管有限公司等无缝钢管生产企业先后开发了在线常化工艺生产 N80 – 1 套管的钢种及生产工艺，包钢钢管公司也在直连轧生产 N80 – 1 套管产品上作了大量的实验室和工业试验研究，由于机组性质不同，产品生产过程中的变形量及温度可控范围不同，相互借鉴意义不大。为了满足市场的需求，降低生产成本，缩短产品的市场交货期，包钢钢管公司依托现有的 Φ159PQF 热连轧生产线，开展了规格为 Φ139.7 mm × 7.72 mm 的 N80 – 1 钢级套管在线常化工艺的试验研究。

1　主要技术条件

试制主要依据中石油供货技术条件 Q/YS 1572.1 和宝鸡石油钢管有限责任公司订货技术条件。

1.1　化学成分

规格为 Φ139.70 mm × 7.72 mm N80 – 1 套管化学成分及性能要求见表 1。

表 1　N80 – 1 套管化学成分要求(质量分数)　%

化学成分		拉伸性能			冲击性能
P	S	$R_{t0.5}$/MPa	R_m/MPa	$A_{50.8}$/%	冲击功/J
≤0.020	≤0.020	568 ~ 758	≥689	≥15	≥18

注：表中的冲击功为纵向、0 ℃、5 mm × 10 mm × 55 mm 尺寸的性能要求。

1.2　晶粒度

要求基体组织的晶粒度不小于 6 级。

2　试验情况

2.1　试验钢种

N80 – 1 非调质油井管不仅要求高强度和良好的韧性。在 N80 – 1 非调质油井管用钢中[1-3]，C 是最有效的强化元素之一，增加 C 含量，材料中的铁素体量减少珠光体量增加，强度增加，但塑性和韧性会降低，当 C 含量超过 0.45% 时，材料明显变得很脆，因此 C 含量一般控制在 0.3% ~ 0.45% 之间。Mn 是常见的强化元素，也是主要添加的合金元素。Mn 不仅可起到固溶强化作用，还可以细化珠光体组织，使珠光体团变小、片间距变窄、渗碳体片变薄，从而提高材料的强度和韧性，对于 N80 – 1 油井管用管 Mn 含量控制在 1.3% ~ 1.7% 之间为宜。V 是主要添加的微合金元素，易于在铁素体中析出，而 N80 – 1油井管均采用空冷方式，冷却缓慢，在冷却过程中 V 的碳氮化物在铁素体中大量析出，不仅颗粒细小且弥散分布，可起到很强的沉淀强化作用，同时不降低材料的韧性。另外，固溶在奥氏体中的 V 通过合理的高温变形，可形变诱导析出部分 V(C、N)颗粒，这些细小的颗粒沿晶内变形带和位错处均匀分布，可有效的促进晶内铁素体转变，细化铁素体和珠光体组织，从而提高韧性。但 V 含量不宜过高，否则会降低韧性，尤其是在中碳含锰钢中，固溶在奥氏体中的 V 还可提高淬透性，促进贝氏体和马氏体转变，使韧性显著降低，一般 V 含量在 0.1% ~ 0.2% 之间为宜。

试验钢种设计主要考虑强度、塑性、韧性和成本，试验设计钢种为 C – Mn – V 钢，利用 V 的析出强化和在线常化细化晶粒达到产品要求的强度和冲击功要求，设计的具体成分要求见表 2。

表 2　试验 N80 – 1 套管化学成分要求(质量分数)　%

C	Si	Mn	V	P	S
≤0.42	≤0.37	≤1.80	0.10 – 0.16	≤0.020	≤0.020

设计钢种的各相变点温度为 A_{C3} = 784 ℃，A_{C1} = 710 ℃，A_{r3} = 716 ℃，A_{r1} = 602 ℃。

2.2　工业试验工艺路线

环形炉加热→穿孔→连轧→冷床冷却→再加热炉加热→高压水除磷→定径→冷床冷却(加风冷雾化)→排管锯锯切→矫直→无损探伤→水压试验和

通径→人工检查→包装。

实验机组连轧脱管荒管外径为173.5 mm，定径减径率为18.6%左右，上再加热炉前冷床管温在980～1 000 ℃；为提高生产节奏，在再加热炉前台的冷床上配置了水雾冷却系统，荒管在前进过程中不断径向转动，水雾系统通过将雾化后的高压水均匀喷射在荒管外表面上。

3 试制结果和分析

3.1 实验方案

按照Q/YS 1572.1标准要求，N80－1套管的交货状态为正火态，同时，规定当钢管是经热张力轧制成型的，若终轧温度高于所处理钢材的上临界温度（A_{r3}），且定径后的管材经空冷时，则认为钢管经正火处理。为了分析再加热温度对产品屈服强度和冲击韧性的影响，基于试验钢种的相变点温度，研究了不同再加热温度对钢管拉伸性能和冲击性能的影响。实验方案见表3，按照计划实验方案在现场开展工业试验后检测钢管的实际终轧温度见表3。

表3 不同试验工艺要求 %

实验方案	再加热炉设定温度/℃	再加热时间/min	入再加热炉管温要求/℃	实测终轧温度/℃
1	860	30	620～650	790～801
2	860	30	485～515	790～801
3	880	30	485～515	807～825
4	900	30	485～515	832～855
5	920	30	485～515	850～879

不同试制工艺条件下的试验钢管拉伸、冲击性能见图1、图2。显微组织见图3。

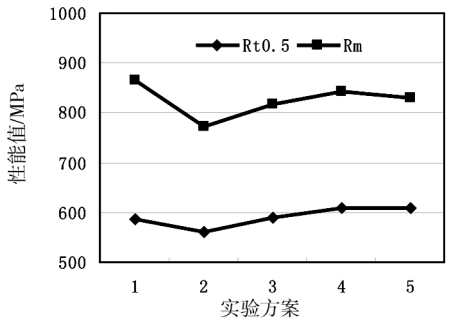


图1 不同工艺条件下试验钢管的拉伸性能

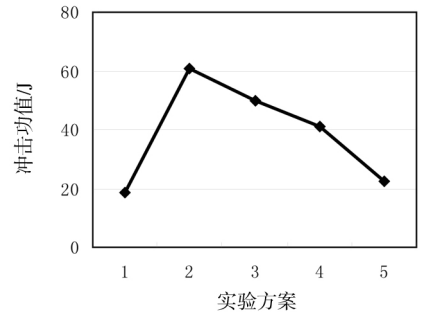
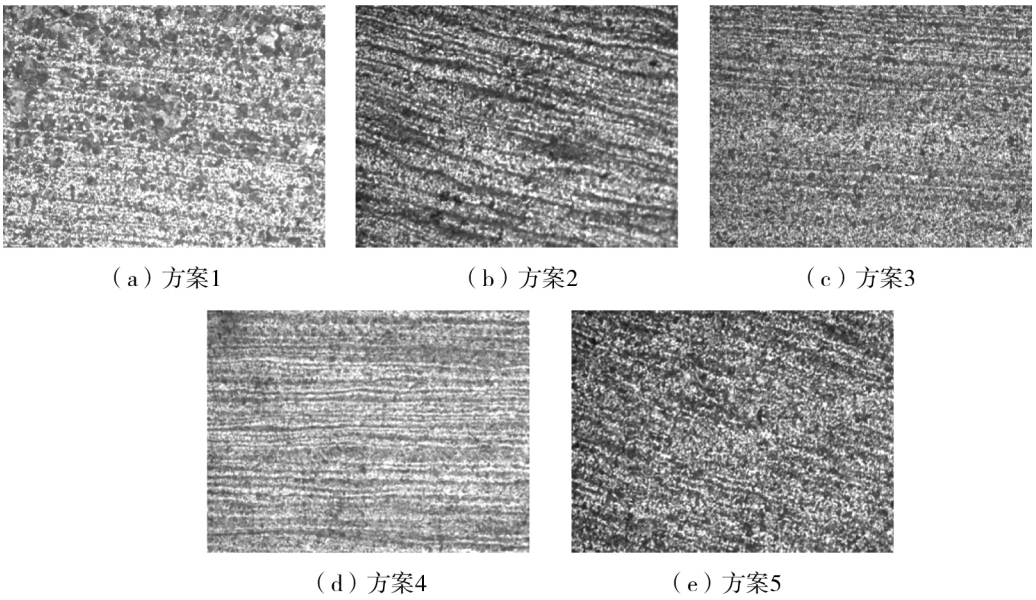


图2 不同工艺条件下试验钢管的冲击性能(0 ℃，半尺寸，纵向)

从试验结果来看，钢管的拉伸性能和冲击性能受钢管入再加热炉前的温度及再加热炉加热温度影响。当钢管入再加热炉前的温度为620～650 ℃，即入炉温度大于A_{r1}时，试验钢管的基体组织为铁素体＋珠光体，晶粒度为6.5～8.5级，混晶明显，屈服强度和抗拉强度满足设计要求，但冲击功值仅为17 J，低于Q/YS 1572.1标准要求。当钢管入再加热炉前的温度设定为485～515 ℃，随着再加热炉加热温度提高，试验钢管的屈服强度和抗拉强度总体呈上升趋势，冲击功呈降低趋势，当再加热炉温度为920 ℃时，试验钢管的最低冲击功为18 J，处于Q/YS 1572.1标准要求的下限；当再加热炉加热温度为860 ℃时，实验规格的屈服强度和抗拉强度最低，其中屈服强度为560 MPa，仅比Q/YS 1572.1标准中552 MPa的下限要求高8 MPa。

从工业试验结果分析来看，为了达到Q/YS 1572.1标准要求，实际生产时钢管入再加热炉前的温度应控制在520 ℃以下，再加热炉的温度应控制在880～900 ℃。



（a）方案1　（b）方案2　（c）方案3

（d）方案4　（e）方案5

图 3　不同工艺条件下钢管的基体显微组织

3.2　试制结果分析

试制的 N80 – 1 套管为铁素体 + 珠光体型非调质钢，设计试制钢种为 C – Mn – V 钢，V(C、N) 析出强化效果对非调质 N80 – 1 强度方面具有非常重要的作用，同时采用在线常化细化晶粒，均匀组织，提高冲击韧性。

当荒管入再加热炉前的温度高于 A_{r1} 时，奥氏体未完全转变为铁素体 + 珠光体，残留的奥氏体会在再加热时发生继续长大，进而在后续的冷却过程中形成粗大的铁素体或珠光体组织，表观为基体组织存在混晶，混晶的存在会降低产品的冲击韧性，按实验方案 1 试验钢管的冲击韧性较低。当荒管入再加热炉前的温度低于 A_{r1} 时，随着再加热炉加热温度提高，增加了奥氏体再次形核、长大及均匀化的驱动能，同时固溶在奥氏体中的 V 在合理的高温及变形工艺条件下，可形变诱导析出 VC 或 V(C、N) 第二相颗粒，这些细小的颗粒沿晶内变形带和位错处均匀分布，可有效的促进晶内铁素体转变，细化铁素体和珠光体组织，从而提高韧性。另外，V 不易在奥氏体中析出，易于在铁素体或在冷却过程中的铁素体转变时大量弥散析出，通过 V 的碳氮化物析出沉淀强化作用，来提高强度并保证良好的韧性，为了保证奥氏体充分发生铁素体 + 珠光体转变，以最大限度发生 V 的析出沉淀强化作用，钢管的终轧温度应大于 A_{r3}。从工业试验结果分析来看，荒管入再加热炉前的温度≤550 ℃时，钢中的 V(C、N) 已充分析出，再加热炉加热温度高低影响 V(C、N) 在奥氏体中的固溶量，加热温度越高，V(C、N) 重新固溶到奥氏体中就越多[4]，在随后定径后相同冷速下析出就越多，强度就越高，但韧性会降低。通过不同加热温度试制结果，加热温度在 880 ~ 900 ℃强度和冲击功均能满足 Q/YS 1572.1 标准要求。

4　批量生产结果

2018 年 7 月，根据试验研究结果，采用再加热炉前冷床水雾冷却、再加热炉加热温度 870 ~ 900 ℃，定径后冷床采用风冷等工艺，批量生产了 2 000 多 t Φ139.70 mm × 7.72 mm 规格 N80 – 1 套管，性能全部合格，性能统计结果见表 4、表 5。

表 4　批量生产钢管的力学性能

项目	$R_{t0.5}$ /MPa	R_m /MPa	$A_{50.8}$ /%	0 ℃，5 mm × 10 mm × 55 mm，纵向冲击功/J
性能范围	570 ~ 664	770 ~ 890	22 ~ 32	30 ~ 78
平均	601	813	28.7	55
标准要求	568 ~ 758	≥689	≥15	均值≥32，单个值≥21

（下转第 21 页）

[7] 贾如雷,计波. 钛材热挤压成形技术发展和应用现状 [J]. 上海: 世界有色金属,2010,(11): 48 – 50.
[8] 日本钛协会著. 周连在译. 钛材料及其应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社,2008.
[9] 陆燕玲,TA2、TC4 热轧工艺制度研究 [D]. 上海交通大学,2009.
[10] 杨亚社,等. TA2 钛管加工工艺优化 [J]. 特种铸造及有色金属,2012,32(9): 869 – 871.
[11] 权亚平,等. 三辊斜轧穿孔生产 TA2 管坯工艺研究 [J]. 钛工业进展,2011,28(2); 33 – 35.

(上接第 13 页)

表 5　批量生产钢管的晶粒度

总检验频数/个	晶粒度 8 级占比/%	晶粒度 8.5 级占比/%	晶粒度 9 级占比/%	标准要求
58	13.8	82.8	3.4	6 级或更细

5　结论

(1) 生产规格为 Φ139.7 mm × 7.72 mm 非调质 N80 – 1 套管,钢种采用 C – Mn – V 设计思路,通过 V 的细化晶粒和析出沉淀强化作用,并结合在线常化的生产工艺,可工业化生产满足 Q/YS 1572.1 标准要求的产品。

(2) 按照设计的成分体系,钢管入再加热炉前的温度应控制在 550 ℃以下。

(3) 利用 V 在奥氏体中的析出细化奥氏体晶粒及铁素体区大量析出沉淀强化作用,钢管定径前应采用再加热炉加热,再加热温度控制在 880 ~ 900 ℃,工业化生产规格为 Φ139.7 mm × 7.72 mm 的 N80 – 1 套管的屈服强度达到 580 ~ 620 MPa,0 ℃纵向半尺寸冲击功为 30 ~ 78 J,满足 Q/YS 1572.1 标准要求。

参　考　文　献

[1] 李平全,史交齐,赵国仙. 油套管的服役条件及产品研制开发现状(上) [J]. 钢管,2008,37(4): 6 – 12.
[2] 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 – 11.
[3] 薛东妹,潘涛,赵苏娟,等. 钒微合金化 N80 级无缝管成分和工艺优化的模拟研究 [J]. 钢铁钒钛,2009,30(3): 26 – 32.
[4] V 的碳氮化合物析出对 $36Mn_2V$ 非调质钢组织性能的影响 [J]. 武汉科技大学学报,2012,35(2): 81 – 84.