

-70 °C 低温用 09MnNiD 钢 $\Phi 219$ mm \times 20 mm 无缝管生产实践

张银桥^{1,2}, 黎福华^{1,2}, 孔繁革^{1,2}, 潘先明^{1,2}, 朱志宝^{1,2}, 李 勇^{1,2}, 李海松^{1,2}

(1 大冶特殊钢有限公司钢管产品研究所, 黄石 435001; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

摘 要 按照 20 t EAF→LF+VD→模铸 3t 钢锭→轧制 $\Phi 270$ mm 圆钢→斜轧穿孔→CPE 轧管→在线常化工艺流程, 生产 $\Phi 219$ mm \times 20 mm 09MnNiD 钢无缝管 ($\% : 0.07 \sim 0.10\text{C}, 0.25 \sim 0.35\text{Si}, 1.35 \sim 1.40\text{Mn}, 0.49 \sim 0.51\text{Ni}, 0.020 \sim 0.035\text{Al}, \leq 0.02\text{Nb}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.006\text{S}$)。通过控制 EAF 终点 $\text{C} \leq 0.04\%$ 和 $\text{P} \leq 0.008\%$, LF 精炼 $\text{S} \leq 0.005\%$, $\text{VD} \leq 67\text{Pa}, \geq 15$ min, 模铸过热度 ≤ 45 °C, 热轧后荒管冷却速度 30 ~ 70 °C/min, 钢管常化温度 910 °C, 开发了 $\Phi 219$ mm \times 20 mm 钢管。测试结果表明: 生产的钢管显微组织为 F+P, 晶粒度 10 级, -70 °C 冲击功 $\text{KV}_2 \geq 275$ J, 抗拉强度 503 ~ 508 MPa, 屈服强度 354 ~ 356 MPa, 以及其化学成分、非金属夹杂物、无损检测均满足 GB 150.2-2011 标准要求。

关键词 -70 °C 09MnNiD 钢 $\Phi 219$ mm \times 20 mm 无缝管在线常化 晶粒细化

Production Practice of 09MnNiD Steel $\Phi 219$ mm \times 20 mm Seamless Tube for -70 °C Low Temperature and Cryogenic Service

ZHANG Yinqiao^{1,2}, LI Fuhua^{1,2}, KONG Fange^{1,2}, PAN Xianming^{1,2},
ZHU Zhibao^{1,2}, LI Yong^{1,2}, LI Haisong^{1,2}

(1 Daye Special Steel Co Ltd, Steel Pipe Products Institute, Huangshi 435001;
2 Hubei Province Key Laboratory for High Quality Special Steel, Huangshi 435001)

Abstract The $\Phi 219$ mm \times 20 mm seamless tube of 09MnNiD steel ($\% : 0.07 \sim 0.10\text{C}, 0.25 \sim 0.35\text{Si}, 1.35 \sim 1.40\text{Mn}, 0.49 \sim 0.51\text{Ni}, 0.020 \sim 0.035\text{Al}, \leq 0.02\text{Nb}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.006\text{S}$) has been produced by 20 t EAF→LF+VD→ ingot casting → rolling $\Phi 270$ mm round billet→ cross piercing →CPE rolling tube→ online normalization. By controlling EAF endpoint $[\text{C}] \leq 0.04\%$ and $[\text{P}] \leq 0.008\%$, LF refining $[\text{S}] \leq 0.005\%$, $\text{VD} \leq 67\text{Pa}, \geq 15$ min, ingot cast steel overheating ≤ 45 °C, cooling rate of hot rolled piercing shell 30 ~ 70 °C/min, and steel tube normalizing at 910 °C. The test results show that the microstructure is F+P, grain size grade 10, -70 °C impact energy $\text{KV}_2 \geq 275$ J, tensile strength 503 ~ 508 MPa, yield strength 354 ~ 356 MPa, and the chemical composition, mechanical properties, nondestructive testing meet the requirements of GB 150.2-2011 standard.

Material Index -70 °C, 09MnNiD Steel, $\Phi 219$ mm \times 20 mm Seamless Tube Online Normalization, Grain Refining

低温钢主要用于制造各种液化石油气、液氨、液氧、液氮的生产、存储器件、输送管道以及寒冷地区服役的设备^[1]。

我国从 1987 年开始 0.5% Ni 低温钢 09MnNiD 的研制^[2], GB 150.2-2011《钢制压力容器》要求使用温度低于 -20 °C 的钢管不允许用终轧温度符合正火来代替正火^[3]。研究表明, 控轧工艺得到 09MnNiD 钢的组织通常不均匀, 影响材料的低温性能^[4]; 正火工艺并采用加速冷却实现了厚壁钢板的 -70 °C 冲击要求^[5]; 09MnNiDR 钢获得优异低温冲击韧性的前提是提高钢水的洁净度以及降低夹杂物的含量^[6]; 以及研究分析了 09MnNiD 钢板经正火空冷、正火风冷和正火+回火后的强韧机理^[7]。大冶特殊钢有限公司拟研究采用 09MnNiD 钢管在线常化工艺, 调控组织性能, 以期简化生产流程, 减少能

耗, 提高生产效率。

1 化学成分设计

体心立方晶体的铁素体钢因其晶面原子数量少, 材料对温度较为敏感, 低温时材料变脆的趋势明显, 会存在明显的韧-脆转变温度^[8]。通过细化晶粒、合金化、提高纯净度及热处理等措施可以改善铁素体钢的低温韧性。

能使固溶体强化的元素如 Si、Mo 等均能使合金的低温韧性降低, 并使韧性-脆性转变温度升高。一些能在钢的晶界上形成脆性相的元素, 如 P、As、Sb、Bi、Sn、Pb 更显著提高韧性-脆性转变温度。元素 C 也是显著提高韧性-脆性转变温度的元素, 另外钢管材料用户使用时, 主要是采用焊接方式实现材料连接, 还需要考虑焊接性。晶粒细化可以使基体变形更加均匀, 增加晶界面积, 阻止裂纹扩张, 细晶粒度

表1 09MnNiD 无缝钢管的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 09MnNiD seamless steel tube/%

项目	C	Si	Mn	Ni	Als	Nb	P	S	Cr	Mo	Cu
设计成分	0.07~0.10	0.25~0.35	1.35~1.40	0.49~0.51	0.020~0.035	≤ 0.02	≤ 0.015	≤ 0.006	≤ 0.20	≤ 0.08	≤ 0.10
标准要求	≤ 0.12	0.15~0.50	1.20~1.60	0.30~0.80	≥ 0.015	≤ 0.04	≤ 0.02	≤ 0.01	-	-	-

表2 正火 $\Phi 262$ mm \times 20 mm 09MnNiD 钢力学性能Table 2 Mechanical properties of normalized $\Phi 262$ mm \times 20 mm 09MnNiD steel

正火处理	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	-70 °C 纵向冲击功(KV ₂)/J	冲击功极差/J
870 °C 正火	497	299	38	29/31/142	113
890 °C 正火	472	322	40	287/270/270	17
910 °C 正火	475	324	40	266/285/267	19
930 °C 正火	470	330	40	260/257/213	47
标准要求	440~580	≥ 280	≥ 24	≥ 47	-

的钢其脆性转变温度也较低,可以加 Al 促进脱氧和细化晶粒。合金元素 Ni 和 Mn 等能改善钢的低温韧性,使韧-脆转变温度降低。

按以上思路设计的 09MnNiD 钢的化学成分见表 1,除标准要求成分外,还控制有害元素含量,钢中有害元素含量要求:As $\leq 0.025\%$,Sb $\leq 0.010\%$,Bi $\leq 0.010\%$,Sn $\leq 0.025\%$,Pb $\leq 0.025\%$,且(As+Sb+Bi+Sn+Pb) $\leq 0.050\%$,[H] $\leq 2 \times 10^{-6}$,[O] $\leq 30 \times 10^{-6}$ 。

2 钢的性能要求

根据 GB 150.2-2011 标准,壁厚 ≤ 8 mm 09MnNiD 钢管的力学性能如表 2,而对于壁厚 > 8 mm 钢管的力学性能没有明确。用户实际订货时,壁厚 > 8 mm 钢管力学性能也要满足表 2 要求。

3 生产实践

3.1 工艺流程

(1)管坯:20 t 电弧炉+二次精炼(LF)+真空脱气(VD)→模铸 3 t 方钢锭→轧制 $\Phi 270$ mm 圆管坯→管坯检查。

(2)成管: $\Phi 270$ mm 管坯加热→穿孔成 $\Phi 297$ mm \times 39 mm 毛管→顶管机轧管成 $\Phi 262$ mm \times 20 mm 荒管→冷却→再加热炉→减径 $\Phi 219$ mm \times 20 mm 钢管→冷床冷却→取样检验→超声探伤+涡流探伤→精整、包装入库。

成管流程中,荒管经冷却到一定温度后送入再加热炉中加热,奥氏体后减径及冷却,即在减径工序前进行在线常化。

3.2 冶炼生产

钢材要获得良好的低温冲击韧性,前提是提高钢水的洁净度以及降低夹杂物的含量。获得清洁钢不仅要有二次精炼设备,还必须从造渣、搅拌、耐火

材料、精炼渣成分诸方面进行全面控制^[9]。因此,主要采取措施有:①选用优质耐火材料;②控制初炼钢水终点 C $\leq 0.04\%$ 、终点 P $\leq 0.008\%$ 和加 Al 预脱氧,保证钢质洁净度;③LF 工序到位后喂入一定量 Al 线,在 LF 精炼中继续进行沉淀脱氧,并采用 Al 粉、CaSi 粉渣面扩散脱氧^[10],以及脱硫至 S $\leq 0.005\%$;④VD ≤ 67 Pa,保持 ≥ 15 min,软吹时间 15~30 min 为宜,促进钢中的夹杂物及气体排除。⑤模铸钢过热度 ≤ 45 °C,保护浇注,防止二次氧化。

3.3 圆钢轧制

钢锭红送过程中采用保护罩,防止降温过快。钢锭热装加热,钢锭加热温度(1 280 \pm 40) °C,保温时间 100~120 min,轧制 $\Phi 270$ mm 圆钢。终轧温度 ≥ 880 °C,轧制完成后入坑缓冷,入坑温度 ≥ 600 °C,出坑温度 ≥ 200 °C。管坯依据 GB/T 6402-2008 标准 $\Phi 6.0$ mm 超声探伤合格。

3.4 钢管轧制

管坯加热在环形加热炉加热,加热温度为(1 270 \pm 20) °C。大变形量轧制不仅在原始奥氏体晶界处产生再结晶核心,而且在晶内的形变带畸变能相当高,也是形成再结晶核心的有利位置^[11]。故采用锥形辊穿孔机大变形量轧制,并做好工磨具表面质量检查、加强润滑、控制轧制节奏,顶管轧制完成后荒管稳定控制温度 $> 1 000$ °C。

3.5 在线常化处理

通过安德鲁斯公式计算 09MnNiD 钢的 Ac₁ 为 710 °C,Ac₃ 为 860 °C。从表 2 可知,870 °C 正火的钢管冲击值分别为 29 J/31 J/142 J,3 个冲击值中有 2 个值不满足要求,且极差达 113 J。890 °C、910 °C 和 930 °C 正火的冲击值都满足要求,但是 890 °C 和 910 °C 正火处理的冲击值较稳定,冲击功极差分别为 17 J 和 19 J,而 930 °C 正火后冲击功极

差为 47 J;正火后的显微组织为铁素体 + 珠光体,如图 1,正火处理后大部分铁素体为等轴晶,珠光体呈团块分布,同时随着正火温度的升高,珠光体团更加细小,铁素体逐渐变大。主要原因是正火温度高,钢中碳与合金元素的溶解量增大,导致珠光体转变的孕育期变长,此外奥氏体化温度升高,奥氏体成分更

加均匀且晶粒更粗,这都会使珠光体转变速度变慢,最终实现了珠光体的细化^[4]。从理论上,赫斯洛普(Heslop)和佩奇(Petch)^[12]已经证明了韧性-脆性转变温度和晶粒度尺寸 $d^{-1/2}$ 成反比例。所以获得均匀,细小的晶粒有利于韧性-脆性转变温度降低。

在线常化处理是一种降低产品成本,节约能源

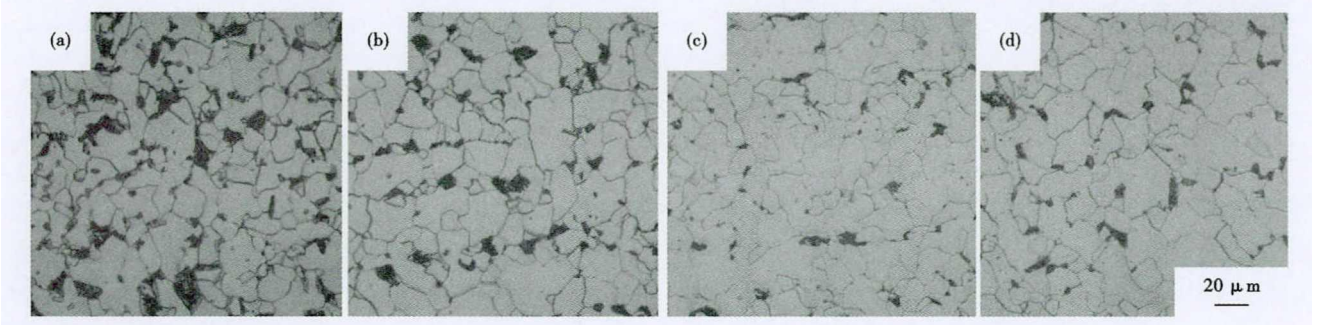


图 1 正火(Φ262 mm × 18 mm)09MnNiD 钢管组织形貌:(a)870 °C,(b)890 °C,(c)910 °C,(d)930 °C

Fig.1 Morphology of microstructure of (Φ262 mm × 18 mm) 09MnNiD seamless steel tube normalized at 870 °C (a) and at 890 °C (b), at 910 °C (c), at 930 °C (d)

的新工艺(见图 2)。它是在毛管延伸变形后将处于 T_1 温度的荒管按常化要求冷却到 Ac_1 下某一温度 T_3 , 然后进行再加热到 Ac_3 以上温度 T_2 并保温一定时间,定减径轧制以及冷却。主要特点是荒管在冷却和再加热过程中,将发生两次组织转变,经过两次相变后晶粒得到细化。

生产中,根据实际生产线装备、生产节奏和产品规格等,对 T_1 、 T_2 、 T_3 和冷却方式都需要进行控制。①如果热轧生产正常,荒管温度 T_1 高于 Ac_3 ,一般大于 1 000 °C。②荒管的再加热温度 T_2 一般控制在 Ac_3 以上 30 ~ 80 °C,结合上述实验室正火实验,890 ~ 930 °C 都可以作为奥氏体化温度,但考虑到再加热采用高温时温度波动大、耗能多及对表面质量不利,故选择 910 °C 为 T_2 的控制目标,保温时间 1.5 min/mm 壁厚。③荒管的 T_3 温度一般控制低于

Ar_1 以下,但温度低影响在线生产节奏且重新加热时间将延长,故选择 T_3 的控制 在 450 ~ 500 °C。④控制热轧后荒管冷却速度 30 ~ 70 °C/min,使荒管冷却后入步进炉前的组织为铁素体 + 珠光体,不同尺寸钢管要采取控制冷却,对于壁厚 8 ~ 20 mm 钢管采取空冷方式,如果壁厚较厚,可以适当采用风扇加强冷却。⑤再加热后经减定径,并传送到冷床空冷。

4 实物检测结果

按上述流程和工艺生产的代表规格(Φ219 mm × 20 mm)09MnNiD 钢随机抽样进行材料性能评价,检测结果表明,生产钢管的组织为铁素体 + 珠光体,如图 3,钢材的晶粒度 10 级,各项性能指标达到设计要求,满足实际需要。

4.1 化学成分

09MnNiD 无缝钢管的化学成分完全满足 GB 150.2-2011 标准要求,有害元素的实际控制水平完全满足设计要求,而且优于标准要求。其中, [P] 为 0.011%, [S] 为 0.002%, [H] ≤ 0.2 × 10⁻⁶、

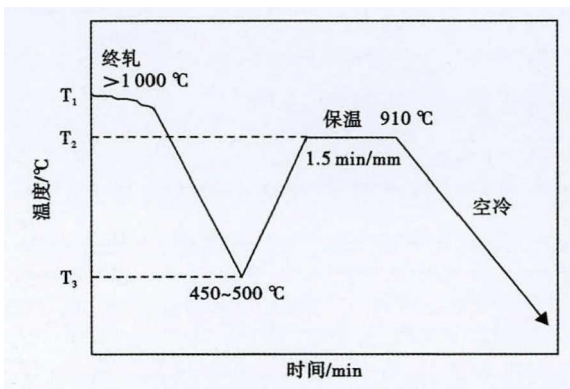


图 2 在线常化工艺示意图

Fig.2 Schematic diagram of online normalization process

表 3 09MnNiD 钢管的力学性能

Table 3 Mechanical properties of 09MnNiD seamless steel tube

项目	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	-70 °C 纵向冲击功(KV ₂)/J
实测值	508/503	356/354	38.0/35.0	275/306/277/306/289/300
标准要求	440 ~ 580	≥280	≥24	≥47

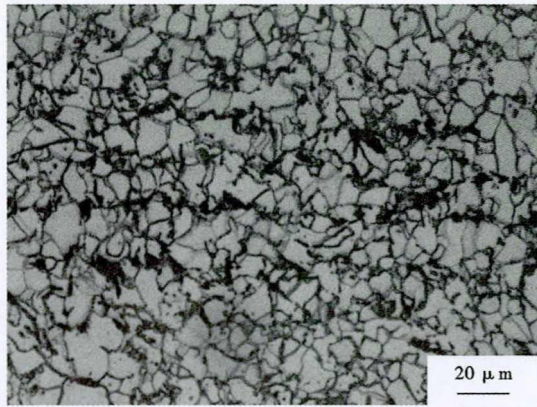


图3 Φ219 mm×20 mm 09MnNiD 无缝钢管的组织形貌
Fig. 3 Morphology of microstructure of Φ219 mm×20 mm 09MnNiD seamless steel tube

表4 Φ219 mm×20 mm 09MnNiD 无缝钢管的非金属夹杂物/级
Table 4 Non-metallic inclusion of Φ219 mm×20 mm 09MnNiD seamless steel tube/rating

项目	A _细	A _粗	B _细	B _粗	C _细	C _粗	D _细	D _粗	D _s
实测1	1.0	0	1.0	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5
实测2	0.5	0	1.0	1.0	0	0	0.5	0.5	0.5
标准要求	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5

4.5 无损检测

精整后的钢管按 GB/T 5777-2008 的规定逐根进行超声波探伤检验,超声波探伤检验级别为 L2。钢管按 GB/T 7735-2004 的规定逐根进行涡流探伤检验,探伤检验级别为 A。经超声和涡流检测合格。

5 结论

(1)采用 20 t EAF 终点 C≤0.04%、终点 P≤0.008% 和加 Al 预脱氧,LF 精炼沉淀脱氧以及脱硫至≤0.005%,VD 精炼极限真空度≤67 Pa 保持≥15 min,软吹时间 15~30 min,模铸钢过热度≤45℃,可以实现 09MnNiD 钢中 [P]≤0.011%, [S]

[O]≤18×10⁻⁶。

4.2 常规性能

常规性能检验结果见表 3。可见,室温下性能满足 GB 150.2-2011 标准要求。

4.3 金相组织

由图 3 可见,钢管的金相显微组织为铁素体+珠光体,晶粒度 10 级,组织均匀且细小。

4.4 非金属夹杂物

在钢管上取样,按 GB/T 10561-2005 中的 A 法评级,其中 A、B、C、D 各类非金属夹杂物的检验结果见表 4。可见,各类非金属夹杂物控制满足 GB 150.2-2011 标准要求。

≤0.002%, [H]≤0.2×10⁻⁶、[O]≤18×10⁻⁶, A、B、C、D 各类非金属夹杂物的级别≤1.0 级。

(2)控制荒管冷却速度 30~70℃/min 冷却到 450~500℃,然后送进在加热炉 910℃ 保温 1.5 min/mm 钢管壁厚,钢管抗拉强度 503~508 MPa,屈服强度 354~356 MPa,显微组织为 F+P,晶粒度 10 级,-70℃ 纵向冲击功 275~306 J。

(3)经在线常化处理的 09MnNiD 钢管,力学性能、表面质量满足要求,按 GB/T 5777-2008 标准 L2 级别和 GB/T 7735-2004 标准 A 级别检验合格。

参考文献

- [1] 黄维,高真凤,张志勤. Ni 系低温钢现状及发展方向[J]. 鞍钢技术, 2013(1): 10-14.
- [2] 秦晓钟. 0.5Ni 低温压力容器用钢[J]. 压力容器, 1992, 9(3): 190-196.
- [3] GB 150-2011. 压力容器 第 2 部分: 材料[S]. 2011.
- [4] 胡昕明, 高强, 乔馨, 等. 正火温度对 09MnNiDR 钢组织性能的影响[J]. 钢铁, 2011, 46(3): 71-74.
- [5] 于雄. 09MnNiDR 钢板正火工艺的研究[J]. 宽厚板, 2015, 21(4): 6-8.
- [6] 高照海, 唐郑磊, 许少普, 等. 09MnNiDR 高韧性低温钢板的试制[J]. 轧钢, 2017, 34(1): 73-76+80.
- [7] 冯路路, 胡锋, 乔文玮, 等. -70℃ 超低温环境用钢 09MnNiDR 的组织性能[J]. 钢铁, 2020, 55(10): 89-95.
- [8] 杨晓峰, 班慧勇, 陈宏, 等. 低温钢的机理及研发和应用进展[J/OL]. 钢结构(中英文): 1-9[2022-01-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1609.TF.20220121.1618.008.html>.
- [9] 马廷温, 王平. 清洁钢发展现状及今后进展[J]. 特殊钢, 1994, 15(2): 1-7.
- [10] 周伟基, 薄永明, 吉海峰, 等. 优化脱氧工艺提高 38CrMOAl 钢连铸成功率[J]. 特殊钢, 2012, 33(5): 40-42.
- [11] 崔文喧, 李文卿, 王有铭, 等. 低碳钢控制轧制中的组织与性能[J]. 北京钢铁学院学报, 1980(4): 47-56+151-153.
- [12] Staff report, Inclusions-Nuclei for Fatigue Cracks[J]. Metal Progress, 1958: 74(2): 120-128.

张银桥(1984-),男,工程师,2009年昆明理工大学(本科)毕业,无缝钢管轧制及热处理工艺技术研究。
E-mail: zhangyinqiao@citicsteel.com

收稿日期: 2022-05-06