

超超临界机组用 Sanicro25 大口径钢管制造工艺

李永清, 秦瑞廷, 云雪峰, 刘正伟, 杜春锦, 雷丙旺

(内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古自治区 包头 014030)

摘要: 针对先进超超临界发电机组用 Sanicro25 大口径厚壁无缝钢管的需求, 内蒙古北方重工业集团有限公司利用 3.6 万吨垂直挤压机试制了规格为 $\Phi 500 \text{ mm} \times \Phi 335 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ 的大口径厚壁钢管, 钢管表面质量良好。大口径厚壁钢管试样经温度为 1180°C 、时间分别为 30 和 60 min 的固溶处理后的综合性能均较佳, 性能指标相当, 屈服强度分别 347.5 和 345.5 MPa, 抗拉强度分别为 735 和 730 MPa, 冲击功分别为 110 和 102 J, 晶粒度分别为 4.5 和 4.0 级, 力学性能超出了小口径管标准的要求。大口径厚壁管的纵向力学性能和冲击性能达到了交货态小口径管的水平, 但横纵向冲击性能相差较大, 主要原因是钢管挤压后沿纵向纤维方向的抗裂纹扩展能力更强。

关键词: Sanicro25 钢; 超超临界机组; 大口径厚壁管; 力学性能; 固溶处理

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.03.030

中图分类号: TG376.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 03-0243-05

Manufacturing process of large-diameter Sanicro25 steel pipe for USC

Li Yongqing, Qin Ruiting, Yun Xuefeng, Liu Zhengwei, Du Chunjin, Lei Bingwang

(Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp. Ltd., Baotou 014030, China)

Abstract: For the demand for large-diameter thick-walled seamless pipes of Sanicro25 steel for advanced ultra supercritical units (USC), a trial production of large-diameter thick-walled pipes with the specifications of $\Phi 500 \text{ mm} \times \Phi 335 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ was conducted by Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp. Ltd. using a 36,000-ton vertical extruder. The surface quality of the steel pipes was excellent. Specimens extracted from the large-diameter thick-walled steel pipes were subjected to solution treatment at 1180°C for 30 and 60 min respectively, both of which demonstrated favorable comprehensive properties. Comparable performance indicators were achieved, including the yield strengths of 347.5 and 345.5 MPa, the tensile strengths of 735 and 730 MPa, the impact energies of 110 and 102 J, and the grain sizes of 4.5 and 4.0 grades. The mechanical properties exceed the requirements specified for small-diameter pipe standards. The longitudinal mechanical properties and impact property of the large-diameter thick-walled pipes matched those of as-delivered small-diameter pipes. However, a significant discrepancy was observed between transverse and longitudinal impact properties, which was attributed to the enhanced crack propagation resistance along the longitudinal fiber direction in steel pipe after extrusion.

Key words: Sanicro25 steel; ultra supercritical units; large-diameter thick-walled pipe; mechanical properties; solution treatment

世界各国的火力发电机组参数均在由超临界向超超临界, 甚至更高的参数方向发展。目前, 世界范围内的先进超超临界机组蒸汽参数已达到了 $600^\circ\text{C}/28 \text{ MPa}$ 以上, 我国于 2010 年 7 月确立了开展 700°C 先进超超临界燃煤火力发电技术研发的计划。随着机组蒸汽参数的提高, 对锅炉高温部件用材也提出了更高的要求^[1-3]。

Sanicro25 ($22\text{Cr}-25\text{Ni}-3.5\text{W}-3\text{Cu}$) 钢是一种新型奥氏体耐热钢, 表现出优异的持久强度和耐氧化

腐蚀能力, 成为 600°C 以上超超临界机组中过/再热器管的候选材料之一, 可大幅提高燃煤效率、降低二氧化碳排放、减少环境压力^[4-7]。Sanicro25 钢已经于 2004 年在德国和丹麦的火电机组中进行了试运行, 至今运行状况良好, 国内的哈尔滨锅炉厂有限责任公司也引进了该材料的锅炉用管^[8-10]。

为了适应国内对超超临界 1000 MW 级锅炉部件的要求, 内蒙古北方重工业集团有限公司与相关单位共同承担了 Sanicro25 钢大口径厚壁无缝钢管的开发研究, 该研究在国内 Sanicro25 大口径厚壁钢管制造尚属首次。由于大口径厚壁管需采用大型钢锭制造, 其成分偏析、结晶状态、凝固质量等与较小钢锭 (或铸坯) 存在较大差别; 另外, Sanicro25 钢的

收稿日期: 2025-02-21; 修订日期: 2025-03-16

作者简介: 李永清 (1973-), 男, 正高级工程师

E-mail: yqllyq123@163.com

变形温度范围窄、热塑性低，这些问题给钢管的成形和改性提出重大挑战。

1 工艺过程

结合 P91 等厚壁钢管的制造经验，制定本研究的工艺路线如下：钢锭—加热—闭式镦粗+反挤压冲孔制坯—空冷—坯料加工—坯料加热—垂直挤

压—空冷—固溶处理^[11-13]。

1.1 制坯

将坯料入炉加热，加热至设定温度后，在闭式镦粗筒中进行 1.5 万吨镦粗，用 $\Phi 330\text{ mm}$ 的穿孔针穿孔，坯料成形后空冷。在加热时，表面温度高于心部，在转运过程中，表面温降后，达到与心部相近的温度，穿孔后的空心坯底面无裂纹。制作的坯料如图 1 所示。

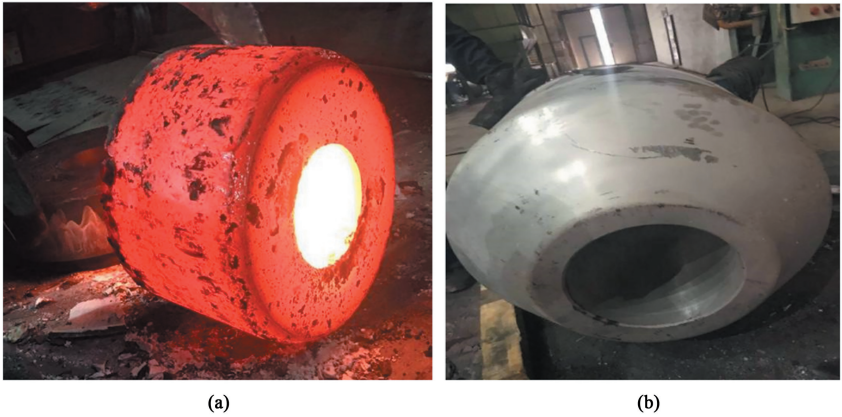


图 1 坯料照片
(a) 制坯后的坯料 (b) 机械加工后的坯料
Fig. 1 Photos of blank
(a) Formed blank (b) Machined blank

1.2 挤压工艺

本研究采用 3.6 万吨垂直挤压机的热挤压工艺，为实现低温挤压，在挤压前对挤压模具进行了结构优化，挤压工艺参数见表 1。

表 1 挤压工艺参数

Table 1 Parameters of extrusion process

锭重/t	钢管外径/ mm	钢管内径/ mm	钢管长度/ mm	挤压力/ 万吨	挤压比
3.8	$\Phi 500$	$\Phi 335$	3000	2.57	5.8

试制过程中增大了挤压比，降低挤压温度，增大了变形量和变形组织的改变效果，保证获取优良表面质量的厚壁不锈钢管，如图 2 所示。

2 显微组织及晶粒度

将挤压获取的大口径厚壁管进行固溶处理，固溶温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 30 min 。获取的金相组织如图 3 所示，其组织为奥氏体+碳化物，晶粒度级别 4.0 级的占比为 70%，2.0 级的占比为 30%。



图 2 挤压获得的厚壁钢管
(a) 挤压后的钢管 (b) 冷却后的钢管
Fig. 2 Extruded thick-walled steel pipe
(a) Extruded steel pipe (b) Cooled steel pipe

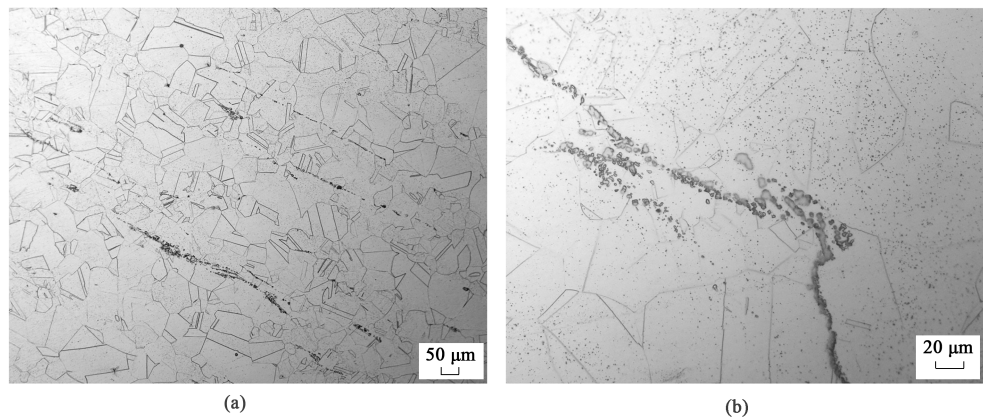


图 3 大口径厚壁管显微组织
(a) 低倍 (b) 高倍
Fig. 3 Microstructures of large-diameter thick-walled pipe
(a) Low magnification (b) High magnification

3 大口径厚壁管力学性能测试

3.1 大口径厚壁管横向力学性能检测

对挤压后的大口径厚壁管横向取样，并将厚壁管试样分别在 1180、1200 和 1220 ℃ 下进行固溶处理，保

温时间分别为 30 和 60 min，力学性能检测结果见表 2 和表 3。由于大口径厚壁管的力学指标无相关标准，而该材质的小口径管已纳入标准并工程化应用，为了衡量其指标水平，将其与小口径管的标准 ASME SA-213/SA-2BM^[14] 进行比较。

表 2 不同固溶温度下保温 30 min 后大口径厚壁管试样和小口径管的标准的力学性能对比

Table 2 Comparison of mechanical properties between large-diameter thick-walled pipe specimen after holding for 30 min at different solution temperatures and standard of small-diameter pipe					
固溶温度/℃	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A /%	冲击功 A_{kv} /J	晶粒度
1180	347.5	735.0	46.5	110	4.5 级
1200	340.5	727.5	45.0	115	4.0 级占比为 90%，2.0 级占比为 10%
1220	338.5	717.5	47.0	108	3.0 级占比为 70%，6.0 级占比为 30%
标准值	≥310	≥655	≥35	40	—

表 3 不同固溶温度下保温 60 min 后大口径厚壁管试样和小口径管的标准的力学性能对比

Table 3 Comparison of mechanical properties between large-diameter thick-walled pipe specimen after holding for 60 min at different solution temperatures and standard of small-diameter pipe					
固溶温度/℃	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A /%	冲击功 A_{kv} /J	晶粒度
1180	345.5	730	45	102	4.0 级
1200	346.0	725	46	116	4.5 级 60%，3.0 级 40%
1220	320.5	713	48	100	2.0 级 80%，4.0 级 20%
标准值	≥310	≥655	≥35	40	—

从表 2 可看出，随着固溶温度的升高（由 1180 ℃ 到 1220 ℃），晶粒度级别整体呈下降趋势，表明晶粒逐渐粗化。屈服强度从 347.5 MPa 降至 338.5 MPa，抗拉强度从 735.0 MPa 降至 717.5 MPa，强度略有降低；伸长率稳定在 45%~47%，总体略有提升。冲击功基本相当，在 1200 ℃ 时略高。综合来看，固

溶温度为 1180 ℃、保温 30 min 时大口径厚壁管试样的力学性能和晶粒度最佳。固溶温度为 1180 ℃ 时，屈服强度较标准高出 37.5 MPa，抗拉强度高出近 80 MPa，伸长率高出约 11.5%，室温冲击高出约 83 J。

从表 3 可看出，保温 60 min 时，随着固溶温度

的升高（由 1180 ℃ 到 1220 ℃），晶粒度级别整体呈下降趋势，表明晶粒随着温度的升高逐渐粗化。屈服强度和抗拉强度在 1180 和 1200 ℃ 时变化不大，1220 ℃ 时略有降低；伸长率在 1180 和 1200 ℃ 时变化不大，1220 ℃ 时略有提升。冲击功在 1180 和 1220 ℃ 时变化不大，1200 ℃ 时略有增加。综合来看，固溶温度为 1180 ℃、保温 60 min 时大口径厚壁管试样的力学性能和晶粒度最佳。

由表 2 和表 3 对比可知，相同固溶温度时，随着固溶时间延长，大口径厚壁管试样的屈服强度和抗拉强度变化不明显，甚至略有下降趋势；冲击功变化不明显；晶粒度呈粗化趋势。以上各项性能指标均超出小口径管标准值。因此，固溶温度为 1180 ℃、固溶时间为 30 min 时大口径厚壁管试样的效果较好。

3.2 大口径厚壁管的纵向力学性能

小口径管因直径小、壁厚薄，无法进行横向力学性能检测，为将大口径厚壁管的纵向力学性能与小口径管进行比较，取等壁厚的大管试样进行固溶处理，处理后检测其纵向力学指标，与某厂进口的交货态小口径管（直径为 Φ50 mm）小口径管及小口径管标准 ASME SA-213/SA-213M^[14] 进行比较，进一步评价大管的性能水平。

根据大口径厚壁管试样经固溶工艺处理后的结果，考虑壁厚增加的影响，对等壁厚试样采用 3 种温度（1180、1200 和 1220 ℃）进行固溶处理，固溶处理时间均为 60 min。

分别在大口径厚壁管的近内壁、1/2 壁厚和近外壁处各取 2 个试样，进行拉伸冲击试验，并在某厂进口的小口径管（直径为 Φ50 mm）上沿纵向取拉伸冲击试样，检测结果见表 4。

表 4 大口径厚壁管纵向力学性能试验结果

Table 4 Test results of longitudinal mechanical properties for large-diameter thick-walled pipes

固溶温度/℃	取样位置	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A /%	冲击功 A_{kv} /J	晶粒度
1180	近内壁	370.0	733	49	230	3.0 级占比为 80%，2.0 级占比为 20%
	1/2 壁厚	370.0	734	51	240	3.0 级占比为 80%，2.0 级占比为 20%
	近外壁	370.5	741	52	228	4.0 级
1200	近内壁	371.0	721	52	230	4.0 级 70%，2.0 级 30%
	1/2 壁厚	356.0	713	53	223	4.0 级 70%，2.0 级 30%
	近外壁	363.0	730	51	231	4.0 级 90%，2.0 级 10%
1220	近内壁	362.0	718	54	221	2.0 级
	1/2 壁厚	359.0	712	57	215	3.0 级 80%，2.0 级 20%
	近外壁	366.0	731	54	213	2.0 级 70%，4.0 级 30%
交货态小口径管		363.0	772	49	181	—
标准值		≥310	≥655	≥35	40	—

钢管在挤压过程中，金属在壁厚方向的变形量存在差异性，近外壁和近内壁的应变量大，剪切变形剧烈，1/2 壁厚的应变量较小。外壁的晶粒细化明显，近内壁和 1/2 壁厚的晶粒基本相当。屈服强度和强拉强度在整个壁厚位置变化较小，近外壁的强度最高。冲击功在整个壁厚位置的波动范围较小。

大管试样纵向与横向对比，纵向试样冲击功显著高于横向，因挤压流变形成纤维组织，纵向抗裂纹扩展能力更强。纵向试样的屈服强度和抗拉强度略高于横向，说明钢管经过挤压变形，强度受横纵向的影响较小。

为直观比较，将不同固溶工艺的大口径厚壁管的平均力学性能和小口径管的平均性能进行比较，如表 5 所示。

表 5 小口径管和大口径厚壁管纵向力学性能对比结果

Table 5 Comparison results of longitudinal mechanical properties between small-diameter pipes and large-diameter thick-walled pipes

固溶工艺	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A /%	冲击功 A_{kv} /J
1180 ℃/60 min	370	736	50	233
1200 ℃/60 min	363	721	52	228
1220 ℃/60 min	362	720	54	229
小口径管	363	772	49	181
标准值	≥310	≥655	≥35	40

从表 5 来看，固溶温度为 1180~1220 ℃ 的大口径厚壁管的力学性能均优于标准值，随着固溶温度的升高，屈服和抗拉强度略有降低，伸长率和断面

收缩率略有提升,冲击功的变化并不明显,表明在固溶温度为 $(1200\pm 20)^{\circ}\text{C}$ 时均可获取良好的力学性能,且优于标准值。大口径厚壁管的抗拉强度略低于小口径管,伸长率和冲击功优于小口径管。

4 结论

(1) 通过闭式镦粗、穿孔和垂直挤压等工艺流程,获得了规格为 $\Phi 500\text{ mm}\times\Phi 335\text{ mm}\times 3000\text{ mm}$ 的 Sanicro25 大口径厚壁奥氏体不锈钢无缝钢管,钢管表面无裂纹等缺陷。

(2) 大口径厚壁管在固溶处理温度为 1180°C 、固溶时间为30和60 min时的综合性能均较佳,性能指标相当,屈服强度分别347.5和345.5 MPa,抗拉强度分别为735和730 MPa,冲击功分别为110和102 J,晶粒度分别为4.5和4.0级。

(3) 大口径厚壁管的纵向力学性能和冲击功达到了小口径管的水平,但横纵向冲击性能相差较大,主要原因是钢管挤压后沿纵向纤维方向的抗裂纹扩展能力更强。

参考文献:

- [1] 朱传志,袁勇,尹宏飞,等.超超临界机组用 Sanicro25 耐热钢研究进展[J].材料导报,2017,31(13):78-84.
Zhu C Z, Yuan Y, Yin H F, et al. Research progress of austenitic heat resistant steel Sanicro25 used in ultra supercritical unit [J]. Materials Reports, 2017, 31 (13): 78-84.
- [2] 刁旺战,王萍,欧海燕,等.先进超超临界锅炉用钢 Sanicro25 焊接接头性能的试验研究[J].锅炉制造,2017(1):51-53,62.
Diao W Z, Wang P, Ou H Y, et al. Study on welding process performance of sanicro25 welded joints for A-USC boiler [J]. Boiler Manufacturing, 2017 (1): 51-53, 62.
- [3] 王斌,梁军,荆洪阳,等.焊接材料对 Sanicro25/T92 异种钢接头组织及力学性能的影响[J].焊接技术,2016,45(6):27-30,98.
Wang B, Liang J, Jing H Y, et al. Study on the microstructure and properties of welding consumables of Sanicro25/T92 dissimilar welded joint [J]. Welding Technology, 2016, 45 (6): 27-30, 98.
- [4] 王崇斌,诸育枫,王煜,等.700 $^{\circ}\text{C}$ 超超临界机组锅炉过热器选材分析[J].发电设备,2016,30(3):168-172.
Wang C B, Zhu Y F, Wang Y, et al. Materials selection for boiler superheater of 700 $^{\circ}\text{C}$ ultra supercritical units [J]. Power Equipment, 2016, 30 (3): 168-172.
- [5] 敬仕煜,何小明,张玮,等.650 $^{\circ}\text{C}$ 先进超超临界锅炉高温部件选材探讨[J].发电设备,2023,37(5):310-316.
Jing S Y, He X M, Zhang W, et al. Discussion on material selection of high-temperature components for 650 $^{\circ}\text{C}$ advanced ultra-supercritical boilers [J]. Power Equipment, 2023, 37 (5): 310-316.
- [6] 王永发. Sanicro25 高温时效及与 T92 焊接接头组织性能研究[D].天津:天津大学,2016.
Wang Y F. Study on High Temperature Aging Property of Sanicro25 and Microstructures and Properties of Sanicro25/T92 Welded Joints [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [7] 张显.超超临界锅炉用奥氏体耐热钢 Sanicro25 的性能[J].发电设备,2015,29(6):439-442.
Zhang X. Properties of austenitic heat-resistant steel Sanicro25 for ultra-supercritical boilers [J]. Power Equipment, 2015, 29 (6): 439-442.
- [8] 陈亮,卢征然.700 $^{\circ}\text{C}$ 超超临界锅炉高温过热器再热器用 Sanicro25 新材料焊接工艺研究[J].锅炉技术,2015,46(5):49-53.
Chen L, Lu Z R. Research on welding process of Sanicro25 alloy for high-temperature superheaters and reheaters in 700 $^{\circ}\text{C}$ ultra-supercritical boilers [J]. Boiler Technology, 2015, 46 (5): 49-53.
- [9] 栗清振.材料创新让燃煤锅炉实现最佳燃煤效率[N].中国电力报,2015-07-02(6).
Li Q Z. Material innovation enables coal-fired boilers to achieve optimal coal combustion efficiency [N]. China Electric Power News, 2015-07-02 (6).
- [10] 赵博.W含量对 Sanicro25 钢组织和性能的影响[D].昆明:昆明理工大学,2013.
Zhao B. The Effect of W Content on the Microstructure and Properties of Sanicro25 Steel [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [11] 翟月雯.P91合金钢晶粒演化特征研究与厚壁管热挤压工艺数值模拟[D].北京:中国机械科学研究总院集团有限公司,2013.
Zhai Y W. A Study on Grain Evolution Characteristics of P91 Steel and Numerical Simulation of Hot Extrusion of Thick Wall Tube [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., 2013.
- [12] 刘海江,雷丙旺,胡永平,等.大长径比管坯挤压工艺数值模拟及试制[J].塑性工程学报,2023,30(12):24-30.
Liu H J, Lei B W, Hu Y P, et al. Numerical simulation and trial production of extrusion technology for pipe billet with large length to diameter ratio [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (12): 24-30.
- [13] 贾晓斌,秦瑞廷,涂明金,等.挤压316H奥氏体不锈钢大口径管材的晶粒度控制[J].金属热处理,2024,49(4):168-174.
Jia X B, Qin R T, Tu M J, et al. Grain size control of extruded 316H austenitic stainless steel large-diameter pipes [J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49 (4): 168-174.
- [14] ASME SA-213/SA-213M,锅炉、过热器和换热器用铁素体和奥氏体合金钢无缝钢管规范[S].
ASME SA-213/SA-213M, Specification for seamless ferritic and austenitic alloy - Steel boiler, superheater, and heat-exchanger tubes [S].