

CPE 顶管机组热轧 HRSG 用超长薄壁管的开发

王奎¹, 汪浩¹, 彭福本¹, 张万超¹, 王志健¹, 郑臻²

(1. 常州常宝精特能源管材有限公司, 江苏 常州 213200;

2. 江苏常宝钢管股份有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 根据 CPE 顶管机组的特点, 介绍了热轧 HRSG 用超长薄壁管的生产工艺流程及技术控制难点, 并从壁厚均匀性与拉凹缺陷控制、内表面质量、性能控制等方面提出具体的解决方案。实践证明: 通过优化变形分配、顶管孔型, 控制芯棒尺寸及其温度, 可有效减少拉断事故的发生, 并控制拉凹缺陷的产生, 实现顶管轧制 3.0~3.3 mm 壁厚 HRSG 用薄壁管的稳定生产; 通过除鳞后、张力减径前的中频补热及张力减径后的冷却速率控制, 可稳定地控制热轧小直径 HRSG 用超长薄壁管的性能。

关键词: CPE 顶管机组; HRSG 用管; 热轧; 薄壁; 技术难点

中图分类号: TG335.71 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2015)05-0037-05

Development of HRSG-purposed Extra-long/Light-wall Steel Pipe as Hot-rolled with CPE Push Bench Mill

WANG Kui¹, WANG Hao¹, PENG Fuben¹, ZHANG Wanchao¹, WANG Zhijian¹, ZHENG Zhen²

(1. Changzhou Changbao Jingte Energy Tubular Co., Ltd., Changzhou 213200, China;

2. Jiangsu Changbao Steel Tube Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: Described on the basis of characteristics of the CPE push bench mill are the manufacturing process flow and the technical control-related difficulties for the hot-rolled HRSG-purposed extra-long/light-wall pipe. Also proposed here are the countermeasures against the problems concerning control of wall thickness homogeneity and drawing-caused concave defect, inner surface quality, and property control, etc. Relevant operation result shows that drawing-caused pipe breaking failure rate can be greatly reduced, and occurrence of drawing-caused concave defects can also be well prevented by means of optimizing deformation distribution, mill pass, and properly controlling of mandrel size and temperature so as to ensure consistent production of the 3.0~3.3 mm HRSG-purposed light-wall pipes. Moreover, the properties of the said small-sized pipe can also be consistently controlled by means of such techniques as the post-descaling/before stretch-reducing medium-frequency induction heat making-up, and control of the post-stretchreducing cooling velocity.

Key words: CPE push bench mill; HRSG-purposed pipe; hot-rolling; light-wall; technical difficulties

随着锅炉参数的不断提高, 超长锅炉管的使用长度已达到 26 m^[1]。热回收蒸汽发生器(HRSG)用超长锅炉管常规钢种有 SA210C、SA210A1、T11、T22 等, 常用规格有 $\Phi 38.1$ mm \times 2.40 mm、 $\Phi 38.1$ mm \times 2.67 mm、 $\Phi 50.8$ mm \times 2.67 mm 等。由于热轧壁厚 $<$ 3.5 mm 的规格有较大难度, 加上用户对管

体内外表面的苛刻要求, 国内钢管厂主要以冷加工形式生产这些钢管; 但随着国内环保意识的增强, 冷加工新上项目的审批难度大。CPE(Crossroll Piercing and Elongation)顶管机组生产工序少, 不需要酸洗、润滑及脱脂、清洗等工序, 避免了废酸的治理, 同时也不需要中间退火等工序, 工序能耗和生产成本低^[2-4], 具备生产中薄壁钢管的优势。在欧洲, 超长 HRSG 用管均采用热轧供货。相比冷加工, 热轧的效率、交货周期、成本优势明显。

王奎(1984-), 男, 助理工程师, 从事无缝钢管生产工艺技术研究与质量管理工作。

1 生产工艺流程

常州常宝精特能源管材有限公司(简称常宝能源)Φ114 mm CPE 顶管机组生产热轧 HRSG 用超长薄壁管的工艺流程为:管坯检验→管坯锯切→环形炉加热→二辊锥形辊穿孔机穿孔→缩口→顶管→松棒→脱棒→热锯→再加热炉加热→除鳞→中频感应加热炉补热→张力减径→冷床冷却→冷锯→矫直→探伤→表面检验→锯切→尺寸检验→喷标→打包入库^[5-6]。

2 主要技术难点及解决措施

2.1 壁厚均匀性与拉凹缺陷控制

生产薄壁管的关键在于控制顶管过程中的各个环节和影响因素。在轧制过程中,由于工具形状、金属温度、摩擦效果等因素的不稳定和均匀性,以及不同变形区之间的相互制约,一直存在不均匀变形^[7]。轧制 HRSG 用超长薄壁管时,在多重不均匀变形因素的共同影响下,极易造成壁厚不均匀,

甚至出现拉凹、拉断现象^[8]。若要解决上述问题,需从以下几个方面入手。

2.1.1 变形分配

CPE 顶管机组生产热轧 HRSG 用超长薄壁管的主要工序是穿孔、顶管和张力减径,而合理分配 3 道次的延伸,对轧制 HRSG 用超长薄壁管极为重要:①设计穿孔延伸小,毛管壁厚大,对控制毛管运输过程中的温度下降有利,但顶管变形压力大;②设计穿孔延伸大,毛管壁厚小,顶管变形压力小,但毛管运输过程中温度下降不均严重;③设计张力减径延伸小,荒管直径变小,对减小钢管切头尾有利,但由此带来芯棒直径小对顶管不利;④设计张力减径延伸大,荒管直径变大,可以采用大直径芯棒,对顶管有利,但对减少钢管切头尾不利。

通过生产中的多次探索,常宝能源找到了一套适合于 HRSG 用超长薄壁管的变形分配工艺。生产 Φ38.1 mm×2.67 mm×23 m 2 倍尺 SA210A1 热轧 HRSG 用超长薄壁管的变形分配见表 1。

表 1 生产 Φ38.1 mm×2.67 mm×23 m 2 倍尺 SA210A1 热轧 HRSG 用超长薄壁管的变形分配

芯棒 直径/mm	穿孔				顶管				
	毛管 外径/mm	毛管 壁厚/mm	毛管 长度/mm	延伸 系数	顶管 外径/mm	顶管 壁厚/mm	芯棒 直径/mm	延伸 系数	荒管 长度/mm
100	138	15.0	2.61	2.26	107.0	3.25	100	5.47	14.29
97	137	15.5	2.56	2.21	104.3	3.27	96	5.78	14.80

芯棒 直径/mm	张力减径			切头尾			
	减径 外径/mm	减径 壁厚/mm	减径 长度/mm	延伸 系数	减径 率/%	切头尾 质量/kg	切损 率/%
100	38.4	2.72	49.17	3.52	64.93	8.04	7.57
97	38.4	2.72	49.21	3.40	63.60	8.02	7.84

注:管坯直径均为 130 mm,投料长度均为 1 170 mm。

2.1.2 顶管孔型

轧制薄壁管在顶管延伸后期,随着壁厚的减小,钢管温度下降较快,塑性变差^[9],孔型设计时要考虑降低单道次延伸率、减少单道次压下量,倒数第 1~3 机架辊底压下量控制在 0.7 mm 以内为宜。

生产薄壁管时,对芯棒表面质量、尺寸精度的要求较为苛刻,为了延长芯棒使用寿命,制定了 Φ100 mm、Φ97 mm、Φ94 mm 芯棒 3 种轧制工艺,芯棒可顺改使用,从而降低成本。生产 Φ38.1 mm×2.67 mm 规格热轧 HRSG 用超长薄壁管时,Φ100 mm、Φ97 mm 芯棒顶管孔型的设计方案见表 2~3。

2.1.3 芯棒尺寸均匀性

芯棒作为顶管过程中最重要的工模具,其外径尺寸精度直接影响荒管管体纵向壁厚均匀性,并最终反映在成品管的壁厚上。另外,局部尺寸不均还会增加变形的不均匀性,增加拉断事故发生的概率。在生产薄壁管时,一般要将芯棒尺寸极差控制在 <0.2 mm。主要采取以下措施控制芯棒尺寸的均匀性:

(1) 控制同组芯棒的尺寸差。每一组芯棒有 19 支左右,每一支芯棒直径大小不一,生产出来的荒管壁厚就会不同,导致同一批钢管壁厚偏差大;因此,通过定尺投料,对比成品长度差,剔除

表2 $\Phi 100$ mm 芯棒顶管 AO11+4 孔型设计方案

孔型号	椭圆度	孔型短半轴 B/mm	孔型长半轴 A/mm	轧辊直径/mm	释放弧半径 R/mm	偏心距/mm	单机架减径率/%
AO1100	1.0576	54.40	57.53	410	61.24	6.84	1.891
AO1101	1.0455	53.80	56.25	360	59.05	5.25	1.103
AO1104	1.0289	53.50	55.05	360	56.73	3.23	0.558
AO1104	1.0280	53.30	54.79	360	56.41	3.11	0.374
AO1104	1.0259	53.20	54.58	360	56.07	2.87	0.188

表3 $\Phi 97$ mm 芯棒顶管 B05+4 孔型设计方案

孔型号	椭圆度	孔型短半轴 B/mm	孔型长半轴 A/mm	轧辊直径/mm	释放弧半径 R/mm	偏心距/mm	单机架减径率/%
BOT500	1.0709	54.40	58.26	410	63.00	8.60	2.770
B0501	1.0541	53.50	56.39	360	59.78	6.28	1.654
B0504	1.0461	52.90	55.34	360	58.13	5.23	1.121
B0504	1.0460	52.40	54.81	360	57.57	5.17	0.945
B0504	1.0458	52.00	54.38	360	57.11	5.11	0.763
B0504	1.0350	51.80	53.61	360	55.62	3.82	0.385

尺寸偏大或偏小的芯棒。

(2) 控制同一支芯棒沿长度方向的尺寸差。由于芯棒头部温度高、磨损快，芯棒沿长度方向的尺寸差会导致荒管沿长度方向壁厚偏差大；因此，重点控制芯棒头部 4 m 范围与其他部位的尺寸差异。

(3) 对于尺寸偏差超标的芯棒，有针对性地进行修磨、轧制，缩小整组芯棒的尺寸差异。

(4) 芯棒在使用过程中，头部与毛管接触时间长、温度高，而尾部温度较低，需对芯棒采取头部局部冷却、尾部补热、控制节奏等手段，保证芯棒尺寸的一致性。

2.1.4 芯棒温度控制

轧制薄壁管时，由于顶管后荒管壁厚薄，温度损失快，荒管对芯棒传热不足，因此芯棒温度比生产中厚壁管时低。芯棒温度低，会导致轧制过程中荒管温度下降快，钢管塑性变差。一般采取以下措施控制芯棒温度：

(1) 保证较高的芯棒温度。设置较高的芯棒投入温度，保证轧制过程中芯棒温度在 500~550 $^{\circ}\text{C}$ ，结合轧制节奏，减少芯棒投用支数，一般控制在 19 支左右。

(2) 对芯棒尾部进行局部补热。与荒管尾部 2 m 接触的芯棒部位和高温荒管接触的时间最短，另外还要向没有包荒管部位传递热量，因此温度相对较低；在顶管轧制后期荒管与该部分接触时，钢管温度降低、塑性变差，易产生尾部拉凹、拉断事故，需对该部分进行局部补热。

2.1.5 芯棒润滑控制

芯棒润滑不均匀容易造成薄壁管轧制产生内表面拉凹情况。针对薄壁管生产，采用低浓度、多道次喷涂，改善润滑均匀性控制管壁拉凹缺陷。

(1) 芯棒润滑低浓度、多道次喷涂。润滑剂浓度一般固定在 27%，多道次布置。

(2) 改善润滑均匀性。采用周向 6 喷嘴等分布置，喷出溶液呈扇形，喷涂方向与芯棒轴向垂直，实现芯棒表面均匀全覆盖。

(3) 轧制薄壁管，芯棒在线定期轧制，可以更好地保障芯棒表面状态稳定。但由于常宝能源采用的是离线轧制，不具备在线轧制条件，要求每轧制 1 000 支钢管更换 1 组芯棒。

2.1.6 再加热温度均匀性

生产 HRSG 用超长薄壁管时，张力减径采用强张力减径减壁，平均张力系数在 0.6 左右，机架间拉应力较大^[10]。再加热炉炉压偏低会导致步进梁温度高于炉气温度，与步进梁接触的钢管温度高于其他区域钢管的温度；同时，在高温情况下，和步进梁接触的钢管与步进梁相对摩擦，会导致一定量的壁厚减薄，在强张力减径的作用下，造成壁厚拉薄。

通过控制烧嘴开度及加热炉炉压，避免炉底温度过高，采用快速步进，避免荒管长时间高温加热，可有效避免因局部温度过高造成的拉凹现象。

2.1.7 其他

轧制薄壁管时，需对芯棒预热温度和出炉节

奏、机架冷却水、机架更换频次以及芯棒回炉保温等进行严格控制。

2.2 表面质量控制

ASME SA 450/SA 450M—2013《碳钢、铁素体合金钢和奥氏体合金钢管通用要求》^[11]中对涡流刻伤要求“钻孔直径 ≤ 0.8 mm”，超声波探伤按 L4 等级。HRSG 用超长薄壁管公称壁厚均在 2.7 mm、3.0 mm 左右，样伤深度浅；因此，控制内外表面缺陷难度很大。

对外表面质量的控制，主要是控制与管体接触的工模具表面、输送设备表面质量，以及输送过程中产生的擦碰，在此不作赘述。以下重点对内表面缺陷的控制进行说明。

2.2.1 穿孔过程产生的内表面缺陷控制

(1) 顶头使用控制：逐支监控，减少穿孔顶头粘钢、掉肉、鼻部磨损严重等缺陷造成的内壁缺陷。

(2) 优化加热温度及穿孔调整参数。根据芯棒外径确定毛管内径尺寸，工模具配备与调整参数相对稳定，避免调整不当造成的内折缺陷。

(3) 调整毛管输出升降辊道，降低穿孔小车回退速度，减缓毛管拉回时的跳动。

2.2.2 预穿过程产生的缺陷控制

通过对毛管直度、预穿中心、芯棒直度等关键因素的控制和改善，降低预穿过程造成的内伤缺陷。

(1) 插棒间隙从常规的 6 mm 放大至 8~10 mm，尽量避免预穿过程中芯棒与毛管接触。

(2) 通过穿孔设备中心和轧制中心调整、降低穿孔转速，改善毛管直度。

(3) 通过芯棒辗轧、芯棒热处理与预热温度的均匀性控制，改善芯棒端部直度^[12]。

(4) 芯棒端部台阶倒圆角，上线使用前抛光，减轻芯棒端部与毛管接触后的铲伤程度。

(5) 考虑芯棒预穿时悬臂效果，预穿辊道倾斜布置并可调整。

(6) 控制预穿速度，一般按 1m/s 控制，预穿过程芯棒与毛管同时前进，并尽量减小速度差。

2.2.3 顶管延伸过程产生的缺陷控制

顶管工序总延伸系数较大，单机架压下量也较大^[13]，在顶管过程芯棒与钢管内壁摩擦，芯棒表面粗糙、润滑不足和不均匀是产生钢管内表面缺陷的主要原因^[10]。

(1) 芯棒辗轧质量控制。芯棒辗轧导板及时修磨更换，避免造成芯棒表面划伤。保证芯棒表面无辗轧毛刺，表面粗糙度 R_a 一般要达到 3.2 μm 。

(2) 脱棒后使用芯棒除鳞系统，去除黏附在芯棒表面的氧化皮。

(3) 润滑喷涂的喷嘴周向均匀布置，采用多道交叉涂油的方式，以保证芯棒涂油均匀、全覆盖。减少因润滑不足，芯棒与钢管内壁干摩擦导致的拉伤。

(4) 润滑剂在线多道过滤、沉淀，并制定制度定期清理循环系统的残渣，保证润滑剂清洁度。

2.3 性能控制

ASME SA 210/SA 210M—2013《锅炉和过热器用碳钢无缝钢管》标准^[14]中的 6.1 节要求“热精整管不需要热处理”。常宝能源在初试生产 HRSG 用管阶段，其性能往往达不到要求，尤其是 SA210A1 的硬度值。

HRSG 用超长薄壁管具有小规格、薄壁的特点，这决定了张力减径工序需要大延伸(常宝能源 CPE 顶管机组在生产该系列产品时，其张力减径工序的减径率在 70%左右，总延伸系数在 4.5 以上，张力减径机架使用个数在 20 机架以上)。薄壁管生产时，除鳞造成荒管温降快、多机架轧制也会造成荒管温降大，要保证钢管终轧温度在奥氏体化转变结束温度 A_{c3} 以上，从而保证硬度符合要求是一个难点。

通过摸索，提出了以下性能控制措施：

(1) 降低原料碳含量。在管坯采购时，降低碳含量，从 0.11%~0.17%降低到 0.11%~0.14%。

(2) 提高张力减径工序的开轧温度。张力减径轧制前使用中频加热，对除鳞后荒管进行快速补热。开轧温度控制在 980 $^{\circ}\text{C}$ 以上，终轧温度在 A_{c3} 线以上。

(3) 降低钢管冷却速率。在冷床入口 1.5 m 宽度内加装上下保温罩，控制成品管高温段的冷却速率。

实践证明，采取以上措施可使 HRSG 用超长薄壁管的硬度值稳定控制在内控范围内。

3 生产效果

2014 年 1 月—2015 年 9 月，常宝能源共计入库 HRSG 用超长薄壁管 16 977.4 t，经过持续改善，产品尺寸精度，力学性能，内外表面质量均符

合国家标准，满足用户要求。

3.1 探伤合格率

HRSG 用超长薄壁的无损检验参照 ASTM E 213—2014《金属管材超声波检验的标准操作方法》、ASTM E 309—2011《钢管制品的磁饱和涡流检测实施方法》要求进行，刻伤要求参照 ASME SA 450/SA 450M—2013 标准进行。目前涡流探伤合格率为 97% 以上，超声波探伤合格率为 95% 以上，探伤最终合格率可稳定在 90% 以上。

3.2 几何尺寸

目前，常宝能源 HRSG 用超长薄壁管的外径公差控制在 0.3 mm 左右，壁厚公差在(0~30%)S，完全满足 ASME SA 450/SA 450M—2013 标准及客户要求。 $\Phi 38.1 \text{ mm} \times 2.67 \text{ mm}$ 规格 HRSG 用超长薄壁管的几何尺寸见表 4。

表 4 $\Phi 38.1 \text{ mm} \times 2.67 \text{ mm}$ 规格 HRSG 用超长薄壁管的几何尺寸

项目	外径 公差/mm	椭圆 度/mm	位置	壁厚公差/%
实测值	-0.15~+0.15	≤ 0.30	端部 中切端	0~30(最小) 10~25(平均)
客户要求值	-0.4~+0.4	≤ 0.96		0~30(最小)
标准要求 ^[13]	-0.8~+0.4	≤ 0.96		0~35(最小)

3.3 力学性能

常宝能源生产的 HRSG 用超长薄壁管的各项性能指标良好，均达到 ASME SA 210/SA 210M—2013 标准和客户要求。 $\Phi 38.1 \text{ mm} \times 2.67 \text{ mm}$ 规格 HRSG 用超长薄壁管 SA210A1 的力学性能见表 5。

表 5 $\Phi 38.1 \text{ mm} \times 2.67 \text{ mm}$ 规格 HRSG 用超长薄壁管 SA210A1 的力学性能

项目	屈服 强度/MPa	抗拉 强度/MPa	伸长 率/%	硬度 HRB
实测值	370~400	480~520	45~50	71~75
客户要求值	≥ 255	≥ 415	≥ 30	≤ 79
标准要求 ^[14]	≥ 255	≥ 415	≥ 30	≤ 79

4 结 论

(1) 常宝能源 CPE 顶管机组，通过工艺优化，实现热轧代替冷加工，生产出满足标准要求的 HRSG 用超长薄壁管，且各项指标明显高出用户要

求。

(2) 通过优化变形分配、顶管孔型优化、芯棒尺寸和温度控制，可有效减少拉断事故和拉凹缺陷，实现顶管轧制 3.0~3.3 mm 壁厚 HRSG 用薄壁管的稳定生产。

(3) 通过除鳞后、张力减径前的中频补热，及张力减径后的冷却速率控制，可稳定地控制热轧小直径 HRSG 用超长薄壁管的性能。

(4) 热轧 HRSG 用超长薄壁管的合格率控制稳定，且交货期短、成本低。

5 参考文献

- [1] 赵钦新, 王宇峰, 王学斌, 等. 我国余热利用现状与技术进展[J]. 工业锅炉, 2009(5): 8-15.
- [2] 丁大宇, 郑治平. CPE 工艺生产小直径薄壁无缝钢管的优势[J]. 钢管, 1996, 25(6): 60-62.
- [3] 彭龙洲, 段炜, 余邦键. CPE 工艺的特点及发展趋势刍议[J]. 钢管, 2012, 41(4): 12-17.
- [4] 杨力, 张增全, 高瑞全. 对 CPE 机组生产无缝钢管技术的再认识[J]. 钢管, 2013, 42(3): 55-58.
- [5] 魏贤宇. $\Phi 102 \text{ mm}$ CPE 顶管机组的创新及效果[J]. 钢管, 2008, 37(5): 55-58.
- [6] 康志勇. $\Phi 114 \text{ mm}$ CPE 热轧管机组试生产情况[J]. 钢管, 2004, 33(2): 32-38.
- [7] 李连诗. 钢管塑性变形原理(上)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985.
- [8] 袁文宽, 付乃民, 孙强, 等. 热连轧无缝钢管内表面凹坑、孔洞缺陷的形成分析[J]. 天津冶金, 2004(6): 23-24.
- [9] 王占学. 塑性加工金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [10] 成海涛. 无缝钢管缺陷与预防[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2007.
- [11] ASME SA 450/SA 450M—2013 碳钢、铁素体合金钢和奥氏体合金钢钢管通用要求[S]. 2013.
- [12] 张炎青. 浅析 114 CPE 芯棒轧机设备结构的基本特征[J]. 科技创新与生产力, 2013(5): 97-98.
- [13] 张海军, 翟东生, 石虎珍. CPE 机组生产小规格无缝钢管的优势分析[J]. 冶金设备, 2012(S1): 44-47.
- [14] ASME SA 210/SA 210M—2013 锅炉和过热器用碳钢无缝钢管[S]. 2013.

(收稿日期: 2014-12-23; 修定日期: 2015-09-17)