

高压锅炉用内螺纹无缝钢管的研制

杨 迅, 王 斌, 肖功业, 梅 丽, 郑明浩, 赵庆权

(天津钢管集团股份有限公司, 天津 300301)

摘 要: 介绍了高压锅炉用冷拔内螺纹无缝钢管的技术条件和工艺过程, 分析讨论了内螺纹管螺纹高度、内螺纹凸肋侧边刮伤和塌陷畸变、润滑条件等的控制要点。试验分析表明: 通过自主设计拔制内、外模, 采用连轧荒管作原料管, 经 1 道次冷拔精整壁厚+1 道次冷拔直接成型内螺纹管的工艺流程, 开发的 8 头 $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 15CrMoG 高压锅炉用内螺纹管符合 GB/T 20409—2006 标准要求的技术条件。

关键词: 高压锅炉管; 内螺纹管; 15CrMoG; PQF 三辊连轧; 冷拔; 热处理; 拉拔模设计

中图分类号: TG335.71 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2013)05-0031-04

Development of Multi-ribbed Seamless Steel Tubes for High-pressure Boiler

YANG Xun, WANG Bin, XIAO Gongye, MEI Li, ZHENG Minghao, ZHAO Qingquan

(Tianjin Pipe (Group) Corporation, Tianjin 300301, China)

Abstract: The technical conditions and process procedure of the cold drawn multi-ribbed seamless steel tubes for high-pressure boiler are described and the control points such as rib height, side scratches and collapse distortion of convex ribs and also the lubrication conditions are analyzed and discussed. The test and analysis show that, with the independently designed inner and outer drawing dies, using the mandrel mill rolled shell as the mother pipe, the $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 15CrMoG multi-ribbed seamless steel tubes with 8 ribs produced through the process procedure of one pass cold drawing and wall thickness finishing plus one pass cold drawing to form the multi-ribbed tubes, which is developed for high-pressure boiler, fully meet the technical conditions required by the standard GB/T 20409—2006.

Key words: high-pressure boiler; multi-ribbed tube; 15CrMoG; PQF three roll mandrel rolling; cold drawing; heat treatment; drawing die design

内螺纹无缝钢管(简称内螺纹管)是指一种内壁加工成螺旋型凹槽的无缝钢管。目前我国自行设计或国外引进的 300 MW、600 MW 及以上大容量亚临界和超临界火电锅炉中,膜式水冷壁普遍采用内螺纹管。与通常的光管相比,内螺纹管能有效地防止水与管壁之间形成蒸汽膜,增加钢管内流动的扰动,使管壁温度更加均匀,既避免钢管烧坏,又提高了锅炉的传热效率^[1-3]。内螺纹管的螺纹头数根据需要有 4 头、6 头、8 头不等,主要材质有 20G、SA210C、T2、T12、12Cr1MoVG、15CrMoG、T22、

T23 等,我国每年需用内螺纹管 2.5~3.0 万 t。

为适应大容量亚临界及超(超)临界锅炉发展的需求,天津钢管集团股份有限公司(简称天津钢管)采用 $\Phi 150 \text{ mm}$ 连铸管坯,由 $\Phi 168 \text{ mm}$ PQF 三辊连轧管机组提供 $\Phi 76 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 荒管,通过自主设计拉拔模,成功开发出 15CrMoG 材质 8 头 $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 高压锅炉用内螺纹管,本文将对研制过程进行介绍。

1 内螺纹管的技术要求

高压锅炉用内螺纹管除应达到光管的通用技术要求外,还应根据 GB/T 20409—2006《高压锅炉用内螺纹无缝钢管》标准要求或各锅炉制造厂采购规

杨 迅(1957-),男,高级工程师,从事钢管生产技术与培训管理工作。

范,对其尺寸及螺纹参数偏差都有不同的规定。如天津钢管冷轧不锈钢厂开发的 15CrMoG 材质 8 头

Φ51 mm×5.7 mm 高压锅炉用内螺纹管,其技术要求见表 1。

表 1 Φ51 mm×5.7 mm 内螺纹管技术要求^[4]

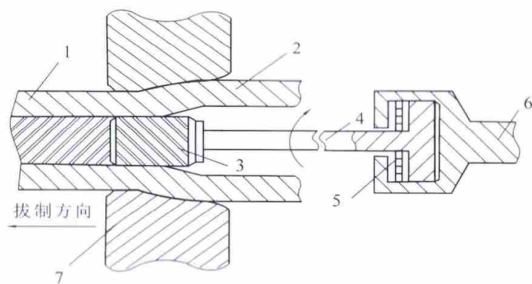
标准	D/mm	C/mm	E/mm	F/mm	I/mm	J/mm	K/(°)	M/mm	N/mm
GB/T 20409	51.00±0.25	38.35±0.25	35.35	5.70~6.95	4.78	1.1±0.3	55±15	26.1±3.2	208.8±25.6
标准	Q/(°)	T/mm	U/mm	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	断后伸长率/%	正火温度/°C	回火温度/°C	
GB/T 20409	30	8.28±1.30	17.80	440~640	≥235	≥21	930~960	680~720	

注: D—外径, C—螺纹根部内径, E—最小内径, F—最小壁厚, I—螺纹顶宽(周向), J—螺纹高度, K—螺纹侧面角度, M—螺纹节距, N—导程, Q—螺纹升角, T—螺纹顶宽(轴向), U—螺纹顶部(轴向)槽宽。

2 内螺纹管成型设备、原理及生产工艺

2.1 内螺纹管成型设备及原理

内螺纹管的生产需要在带有旋转芯杆的冷拔机上完成。为此,天津钢管冷轧不锈钢厂对原有的 LB50 单线双链冷拔机进行了改造,主要是将原来的固定芯杆改造成旋转芯杆,如图 1 所示。拔制过程中,由于内模上存在螺纹沟槽,沟槽的前沿侧边将承受与之接触的管料内壁凸肋前沿侧边的挤压,在沟槽受力侧的法向上产生挤压力,此力的切向分力将驱动内模和连杆旋转。只有当内模螺纹沟槽的螺纹升角大于一定数值时,沟槽受力侧边所受的切向分力才足以克服内模和连杆所受的旋转阻力而使其发生旋转。管料在小车拖动下,减径减壁前进,内表面受内模的旋转作用,形成内螺纹^[5-8]。



1—内螺纹管 2—原料管 3—内模 4—芯杆
5—压力轴承 6—连接杆 7—外模

图 1 带有旋转芯杆的内螺纹管成型用冷拔机成型原理示意

2.2 内、外模设计

内模是内螺纹管拔制最关键的工具,其主要参数包括:内模直径、长度、凹槽宽度、侧边夹角、侧边倒角、端头倒角及各项参数的公差范围,同时需满足硬度、光洁度等成品模具的技术要求。最终确定内模材质为 Cr12MoV,采用锻造钢坯经数控

车床机加工、盐浴淬火、专用机床抛光等工序,得到高精度、高硬度(64~68 HRC)、高表面光洁度的成品模具。内模经过机加工、热处理、抛光等工序达到较高的表面光洁度,可使加工后的钢管具有较好的表面质量,使用寿命长,产品的综合加工成本较低。

由于内螺纹管拔制对螺纹高度有一定要求,而且拔制阻力很大,因此采用的外模为内锥型模,锥角的大小直接影响到拔制力的大小和内螺纹管的螺纹高度。在试拔过程中,外模的锥角越大,减壁量越大,但对提高螺纹高度作用不明显。经过多次实验,取锥角值为 11°;定径段比一般锥型外模长,以利于螺纹高度的形成;外模材质选用硬质合金 YG8,其表面硬度和光洁度很高,可降低拔制力,提高钢管外表面质量^[9]。

2.3 内螺纹管生产工艺

天津钢管 Φ168 mm PQF 三辊连轧管机组轧制的荒管表面质量和壁厚均匀度较好,为减少加工道次,简化工艺,降低生产成本,拔制工艺采用 1 道次冷拔精整壁厚+1 道次冷拔直接成型内螺纹管,工艺流程如下:

荒管退火(Φ76 mm×9 mm)→矫直→探伤→打头→酸洗磷化皂化→冷拔定壁(Φ76 mm×9 mm→Φ68 mm×8 mm)→中间退火→矫直→超声波探伤→涡流探伤→酸洗磷化皂化→内螺纹管成型拔制(Φ68 mm×8 mm→Φ51 mm×5.7 mm)→保护气氛正火+回火→矫直→切头尾→成品检验→包装入库。

3 试验分析

3.1 化学成分

本项目用钢采用电弧炉+钢包精炼+真空脱气的工艺冶炼,S、P 以及其他有害元素的含量低,钢水纯净度好。内螺纹管化学成分见表 2。

表2 15CrMoG 内螺纹管化学成分(质量分数)

项目	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P
分析结果	0.14	0.60	0.23	0.99	0.46	0.003	0.007
GB/T 20409	0.12~0.18	0.40~0.70	0.17~0.37	0.80~1.10	0.40~0.55	≤0.020	≤0.025

%

3.2 内螺纹管表面质量、尺寸及螺纹参数

对拔制的 15CrMoG 材质 8 头 $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 高压锅炉用内螺纹管的表面质量进行检验, 钢管表面未见裂纹、折叠、结疤、凹坑、直道、划痕等缺陷, 成型良好, 满足锅炉制造要求。 $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 内螺纹管内表面形貌如图 2 所示, 实测参数如图 3 所示, 测量结果见表 3。测量时, 内外径在相互垂直的方向测量, 壁厚沿顺时针 3、6、9、12 点的位置测量。由测量结果可以看出: 该内螺纹管的基本螺纹参数满足 GB/T 20409—2006 标准要求。

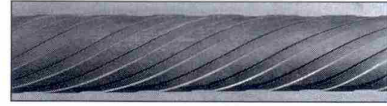


图2 $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 内螺纹管内表面形貌

3.3 热处理及室温力学性能

参照 GB 5310—2008《高压锅炉用无缝钢管》中关于 15CrMoG 的热处理要求, 采用氮氢保护气氛辊底式热处理炉进行 $940 \text{ }^\circ\text{C} \times 30 \text{ min}$ 正火+ $700 \text{ }^\circ\text{C} \times$

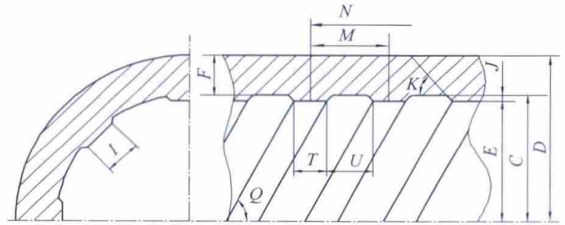


图3 $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 内螺纹管剖面测量参数示意
(图中所示符号含义见表1注释)

表3 $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 内螺纹管参数测量结果及标准要求

参数	D/mm	C/mm	E/mm	F/mm	I/mm	J/mm
测量结果	51.08~51.18	38.24~38.44	35.80	6.30~6.60	4.60~5.20	1.03~1.22
GB/T 20409	51.00±0.25	38.35±0.25	35.35	15.70~6.95	4.78	1.1±0.30
参数	K/(°)	M/mm	N/mm	Q/(°)	T/mm	U/mm
测量结果	60~67	25.4~28.3	203.2~225.4	30	7.95~8.98	17.80
GB/T 20409	55±15	26.1±3.2	208.8±25.6	30	8.28±1.30	17.80

70 min 回火处理, 钢管内、外表面氧化脱碳得到有效控制。拉伸试样按 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》标准分别在钢管上切取纵向去肋的条形试样, 标距为 50 mm, 室温力学与工艺性能测量结果见表 4。

表4 $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 内螺纹管室温力学与工艺性能

试样号	R_m /MPa	R_{el} /MPa	断后伸长率/%	压扁
1	505	372	35.5	无裂纹
2	500	368	34.0	无裂纹
GB/T 20409	440~640	≥235	≥21	不允许裂缝或裂口

4 讨论

内螺纹高度是内螺纹管的主要尺寸参数之一,

拔制时, 管料沿拔制方向的延伸变形是管料的主要变形, 内螺纹凸肋处的壁厚也将参与延伸变形而被拉薄。生产经验已证明, 减壁量与内螺纹高度成正比(图 4); 因此, 足够的减壁量是获得足够内螺纹高度的基本条件, 而减径量对螺纹高度的贡献不大。通常采用增大原料管的壁厚来实现大减壁量, 从而增加内螺纹高度, 但减壁量受拉拔应力的限制不可能很大, 否则管坯和内模可能被拉断。

本项目中对内螺纹管壁厚执行正公差(最小壁厚 5.7 mm), 生产时最小壁厚按 $F+10\%F$ 控制, 即 6.27 mm。参照图 4 中减壁量与内螺纹高度成正比, 可推算出内螺纹管成型前的钢管壁厚约为 8 mm, 此壁厚值正好与实际生产中内螺纹管成型前的原料管壁厚是一致的, 说明拔制 $\Phi 51 \text{ mm} \times 5.7 \text{ mm}$ 内螺纹管所用管料的几何尺寸是合理的。

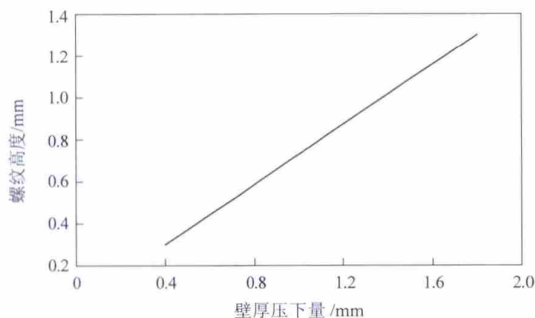


图4 壁厚压下量与螺纹高度的正比关系

在拔制过程中，内、外模的轴向相对位置一旦产生相对位移，内模对变形区也随之产生相对位移，内螺纹凸肋边便会被刮伤，因此应提高芯杆的刚度，减小芯杆弹性变形。另外，内模的转动扭矩越大，内模沟槽与管内壁凸肋侧边之间压力也越大。当压应力超过金属表面压应力极限时，就会产生凸肋塌形畸变；因此，为了减少转动阻力，应提高冷拔设备芯杆旋转装置的刚度和加工精度，尽量避免小车、外模和拉杆尾座偏离拔制中心线等影响内模位置的因素出现^[10]。

由于拔制内螺纹管变形量较大，因此为了保证内螺纹管顺利拔制，原料退火是必要的，同时更要注重酸洗、润滑工艺的合理性，以改善芯头的润滑状态。实际生产中，钢管采用 H_2SO_4 酸洗，去掉内外表面的氧化铁皮，磷化、皂化使钢管具有稳定可靠的润滑层，增加芯头旋转的稳定性，这无疑是保证钢管顺利拔制而不产生内、外表面缺陷的关键环节之一。

内螺纹管内表面的质量控制十分重要。在人工无法对内螺纹管内表面进行有效检测的情况下，目前普遍采用对第1冷拔道次钢管进行超声波和涡流探伤来代替内螺纹管的成品探伤，因此需要对拔制过程严格控制，保证内模的表面光洁度在 $Ra1.6$ 以上，硬度 $64\sim 68$ HRC，在拔制过程中逐支检查内模的表面工作状况，以此来判断成品内螺纹管内表面质量情况；需严格工艺纪律，在制造过程中进行挂牌管理办法，进行质量跟踪。

5 结论

(1) 通过改造原有冷拔设备，自主设计拉拔

模，利用 $\Phi 168$ mm PQF 三辊连轧管机组提供的荒管，经两道次冷拔成型的高压锅炉用内螺纹管，其尺寸、螺纹参数及表面质量均达到内螺纹管技术要求及锅炉制造要求，说明该内螺纹管的制造工艺是正确的。

(2) 内螺纹管的工模具设计合理。在稳定拔制过程中，影响内螺纹管质量的内螺纹高度、螺纹底边及侧边畸形等关键参数得到有效控制，今后仍需不断完善生产工艺，进一步优化内、外模结构，提高产品质量及稳定性。

(3) 采用氮氢保护气氛辊底式热处理炉对钢管进行 $940\text{ }^\circ\text{C}\times 30\text{ min}$ 正火+ $700\text{ }^\circ\text{C}\times 70\text{ min}$ 回火，使内螺纹管的室温力学与工艺性能良好，内外表面氧化脱碳得到有效控制，满足 GB/T 20409—2006 标准要求。

6 参考文献

- [1] 李祥苓, 林西奎, 张文鹏, 等. 大型超(超)临界压力锅炉选型分析[J]. 中国电力, 2005, 38(1): 37-41.
- [2] 金炜忠. 超超临界锅炉用优化内螺纹冷拔无缝钢管的生产[J]. 钢管, 2009, 38(6): 38-42.
- [3] 姜正义. 内螺纹凸筋管螺旋升角的探讨[J]. 钢管, 1991, 20(1): 42-45.
- [4] GB/T 20409—2006 高压锅炉用内螺纹无缝钢管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [5] 谢晖. 冷拔内螺纹无缝钢管的试制[D]. 长沙: 中南大学, 2005: 12-15.
- [6] 彭孙鸿, 邓尔康, 刘彩玲, 等. T2 钢内螺纹管的研制[J]. 特殊钢, 1999, 20(6): 48-50.
- [7] 曹建军, 邓丕安, 李旭升. 锅炉用冷拔内螺纹无缝钢管的试制[J]. 轧钢, 2006, 23(1): 26-29.
- [8] 彭孙鸿, 邓尔康, 刘彩玲, 等. SA-213 T2 钢内螺纹管的性能研究[J]. 钢管, 2000, 29(2): 19-21.
- [9] 天津钢管集团股份有限公司. 适于生产高压锅炉用内螺纹钢管的模具: 中国, 200720098297.5[P]. 2008-12-10.
- [10] 孟晓峰, 康达昌, 高西成, 等. 内螺纹管拉拔的凸肋畸变原因和减小畸变的措施[J]. 材料科学与工艺, 1999, 7(2): 77-81.

(收稿日期: 2013-06-08)