

# 核电用 TP304 不锈钢方管成型方法研究

王伯文<sup>1</sup>, 康喜唐<sup>1</sup>, 陈洪琪<sup>2</sup>, 张丙静<sup>1</sup>, 拓雷锋<sup>1</sup>

(1. 山西太钢不锈钢钢管有限公司, 山西 太原 030003; 2. 天津钢管集团股份有限公司, 天津 300301)

**摘要:** 通过变形力计算、有限元模拟分析、工艺试验等方法, 对一种应用在 AP1000 核反应堆上的 TP304 不锈钢方管的成型方法进行了研究, 开发出一种热挤压荒管在定径定壁后, 经第 1 道次空拔、第 2 道次衬拉, 最终制成方管的成型工艺, 并确定了各项工艺参数。研究表明: 采用固定模拉拔法生产核电用 TP304 不锈钢方管是可行的, 且成品材质性能均匀一致, 尺寸精度高。

**关键词:** AP1000 反应堆; 不锈钢; 方管; TP304; 固定模拉拔; 模具设计; 成型工艺

**中图分类号:** TG306; TG142.71 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2013)02-0027-05

## Research on Formation Process for TP304 Stainless Steel Square Pipe for Nuclear Power Service

WANG Bowen<sup>1</sup>, KANG Xitang<sup>1</sup>, CHEN Hongqi<sup>2</sup>, ZHANG Bingjing<sup>1</sup>, TUO Leifeng<sup>1</sup>

(1. Shanxi Taigang Stainless Steel Pipe Co., Ltd., Taiyuan 030003, China;

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

**Abstract:** The formation process for the TP304 stainless steel square pipe as applied to the AP1000 nuclear reactor is studied by means of such methods as deformation force calculation, finite element analysis, and technology testing, etc. As a result, a new formation process for the said pipe is developed, and the operation steps are: with the first pass, the hot-extruded blank pipe as sized is sink drawn, and with the second pass, the pipe is drawn with a mandrel, and finally it is turned into a square pipe as required. Moreover, all the parameters of the formation process are determined. The study shows that it is practical to employ the fixed-die drawing process to produce the TP304 stainless steel square pipe for nuclear power service, and that the finished product is in possession of material property homogeneity and high dimensional accuracy.

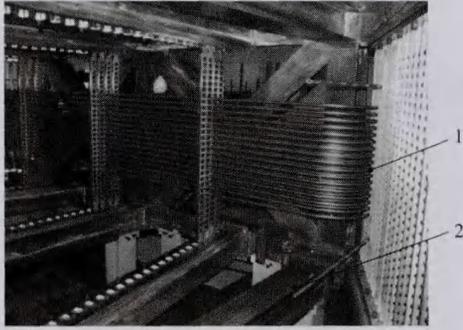
**Key words:** AP1000 reactor; stainless steel; square pipe; TP304; fixed-die drawing; die design; formation process

AP1000 反应堆是美国西屋电气公司开发的两环路第三代压水式核电反应堆系统, 是目前较为先进的反应堆设计。本文所述产品为 AP1000 反应堆余热排出换热器支撑(核 I 级部件支撑)用 TP304 不锈钢方管, AP1000 反应堆余热排出换热器内部结构如图 1 所示, 所用 TP304 不锈钢方管根据 ASME SA 479M 标准及用户采购规范进行制造, 在普通 TP304 不锈钢基础上控制 N 和 Co 元素含量以

满足核电材料的特殊要求。

该 TP304 不锈钢方管的外形尺寸及公差见图 2 和表 1, 与常见的等壁厚方管相比, 其工艺特点为: ①为保证管体材质性能均匀一致, 设计方要求采用无缝钢管热挤压+冷加工成型工艺, 排除了异型钢管生产通常采用的板材成型+焊接工艺; ②产品外形尺寸较大, 冷加工所用圆管外径超过 240 mm, 所需变形力大; ③对单边平面度及管体弯曲度要求高, 对冷加工精度要求很高; ④最终成品管要求经固溶退火处理, 但高温热处理对产品外形造成影响。

王伯文(1984-), 男, 硕士, 工程师, 从事不锈钢和镍基合金无缝钢管产品的开发工作。



1 — 换热器管道 2 — TP304 不锈钢方管

图1 AP1000 反应堆余热排出换热器内部结构

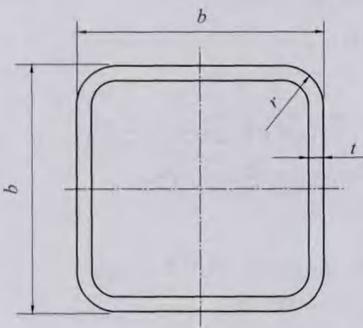


图2 TP304 不锈钢方管外形尺寸

表1 TP304 不锈钢方管外形尺寸及公差要求

项目	$b/$ mm	$t/$ mm	$r/$ mm	长度/ mm	平面度/ ( $\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$ )	弯曲度/ ( $\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$ )	表面粗 糙度/ $\mu\text{m}$
尺寸	203.2	12.7	32	1 400~3 150			
公差	$\pm 2$	$(0, \pm 0.6)$	$\pm 0.5$	$(\pm 5, \pm 20)$	$\leq 1$	$\leq 0.2$	$\leq 6.3$

## 1 变形工艺分析

大直径异型不锈钢无缝钢管的生产方法有热挤压、冷轧、滚模拉拔、固定模拉拔等。由于对该核电用不锈钢方管的尺寸精度要求较高，采用直接热挤压至成品管的方法不适用(热挤压管的壁厚精度在 $\pm 0.5$  mm以上，且表面粗糙度较高)；而滚模拉拔适用于拔制带棱角的异型管，对于此大圆弧角方形截面管也不适用；因此，最终确定采用圆管定径定壁后经固定模拉拔至最终尺寸的固定模拉拔方法进行生产<sup>[1]</sup>。

相对于其他生产工艺，固定模拉拔存在拉拔力较大，产品表面容易拉伤等问题；如何通过工艺与模具设计解决这些问题，是TP304不锈钢方管研发工作的重点和难点。

在圆管空拔至方管的过程中，金属质点的运动主要是横向移动，靠拉拔外模给予的径向压力实现。圆管空拔时，若管体受到的径向均布压力 $q$ 超过临界压力 $q_k$ ，管壁将发生塑性弯曲，即失稳，设计成品截面形状将被破坏。临界压力 $q_k$ 可按式<sup>[2]</sup>计算：

$$q_k = \frac{(N^2 - 1)S\sigma_s}{R[1 + (4\sigma_s R^2)/(E_t S^2)]} \quad (1)$$

式中  $N$  —— 边数，为大于等于2的整数；

$S$  —— 圆管壁厚，mm；

$\sigma_s$  —— 圆管屈服强度，MPa；

$R$  —— 圆管半径，mm；

$E_t$  —— 圆管正切模量，GPa。

根据式(1)计算，如采用圆管一道次空拔至方管的工艺，临界压力 $q_k = 69.2$  kN；而根据试验中拉拔力算得定径段管壁受到径向均布压力 $q = 89$  kN  $>$   $q_k$ ，即难以保证拉拔后各边充满孔型，在试验中也证实了这一点。

由于空拔至方管时边部与角部金属流动速度不同，会造成边部与角部壁厚不同的现象<sup>[3]</sup>。根据试验结果，空拔后方管角部增厚比边部大0.2~0.4 mm。

衬拉对方管的四角支撑性较好，提高了拔制稳定性<sup>[4]</sup>，但采用圆管1道次带内模衬拉至成品的工艺，由于圆变方变形与减壁变形同时进行，拉拔力过大，会导致拉拔头断裂，如图3所示。



图3 圆管衬拉至方管时拉拔力过大导致拉拔头断裂

综合以上分析，最终决定采用圆管定径定壁后，1道次空拔至较大尺寸方管，加1道次衬拉至最终尺寸的工艺。

## 2 第1道次空拔变形设计

对于异型管空拔变形过程，周边压缩系数是最关键的参数，其表示拉拔前圆管周长与成品管周长

的关系, 只有将周边压缩系数控制在一个适当范围才能保证空拔后产品截面形状。周边压缩系数  $\eta$  可根据下式计算:

$$\eta = \pi D_0 / L_n \quad (2)$$

式中  $D_0$  —— 圆管直径, mm;

$L_n$  —— 拉拔后截面周长, mm。

根据现有生产经验, 对于小直径圆管变方管拉拔,  $\eta$  一般取 1.06~1.14<sup>[2]</sup>。

第 1 道次空拔变形的周边压缩系数设为  $\eta_1$ 。为选取最优化的  $\eta_1$  值, 采用 Pro/E 软件建立拉拔件和拉拔模模型, 采用 MARC 有限元软件对拉拔变形过程进行模拟(图 4)。取  $\eta_1$  从 1.00 至 1.20, 间隔 0.01 共 21 个数值, 分别模拟拉拔后产品截面形状<sup>[5]</sup>。模拟结果表明:  $\eta_1 < 1.08$  时方管四角无法完全充满孔型,  $\eta_1 > 1.15$  时方管四边会产生内凹。在两种周边压缩系数情况下, 拉拔模孔型充满情况如图 5 所示。最后选取  $\eta_1 = 1.10$ , 经过试验证实此  $\eta_1$  值合适。

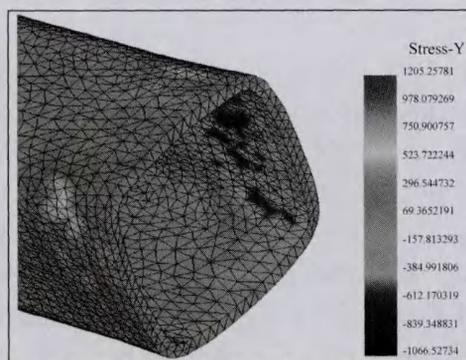


图 4 MARC 有限元软件模拟空拔变形过程

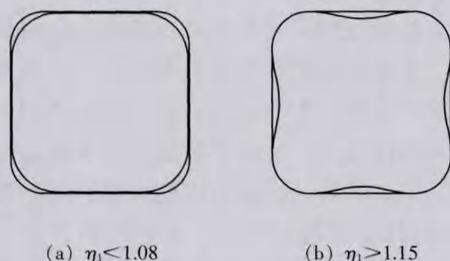


图 5 周边压缩系数  $\eta_1$  不同时拉拔模孔型充满情况

根据成品管尺寸算出第 1 道次空拔后方管尺寸:  $\square 225 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm}$ , 四角圆弧  $r_1 = 38 \text{ mm}$ 。计算得出所需圆管的外径为 265 mm。

### 3 第 2 道次衬拉变形设计

第 2 道次衬拉最重要的参数为减壁量。如果没有减壁, 在管壁与芯棒接触之前就会出现管壁失稳, 由于不锈钢钢管的弹性恢复, 失稳情况不可能得到完全纠正。通常小尺寸异型管拉拔减壁量取 0.05~0.30 mm<sup>[2]</sup>, 经试验证实该取值对本产品来说过小, 会导致拔制后各边平面度较差(图 6)。对于不锈钢钢管, 增大减壁量可消除第 1 道次空拔过程中产生的不均匀壁厚增加; 同时会加大变形延伸系数, 保证成品管晶粒度  $\geq 4$  级的要求。



图 6 减壁量过小导致衬拉后方管四边平面度较差

但减壁量大会导致出现拉拔力增大的问题。在一次试验中设计减壁量为 1.2 mm, 发生了拉拔头断裂、芯棒在管内卡死的情况。经过反复试验, 最终设定减壁量为 0.5 mm, 延伸系数为 1.173。相对于较大的产品尺寸, 小减壁量对拉拔模具加工精度提出了更高要求。

同时, 第 2 道次周边压缩系数  $\eta_2$  也是需要考量的参数,  $\eta_2 = (\text{衬拉前方管周长}) / (\text{衬拉后方管周长})$ 。 $\eta_2$  值太大, 金属在孔型入口处就已充满, 并使平面部分起皱, 导致内模不能进入定径带而拔出废品;  $\eta_2$  值太小, 内模无法进入管内, 拉拔过程无法实现。根据试验结果, 选取  $\eta_2 = 1.10$ 。

综上所述, 得出全部变形工艺如下: 热挤压荒管尺寸  $\Phi 311 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ ; 经三辊冷轧机冷轧至圆管尺寸  $\Phi 265 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm}$ , 延伸系数 2.029; 第 1 道次空拔后方管尺寸  $\square 225 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm}$ , 四角圆弧  $r_1 = 38 \text{ mm}$ ; 最终尺寸  $\square 203.2 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ , 四角圆弧  $r_2 = 32 \text{ mm}$ 。TP304 不锈钢成品方管如图 7 所示。

### 4 拉拔模设计

#### 4.1 第 1 道次空拔

为提高拉拔过程的稳定性, 第 1 道次空拔模采用弧形模<sup>[6]</sup>。

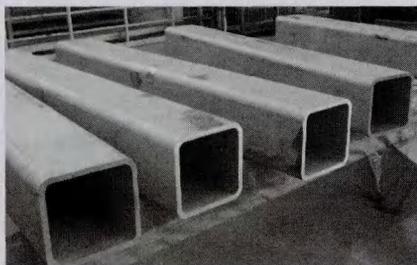
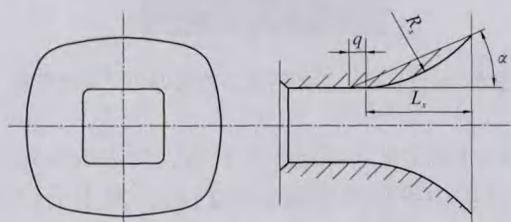
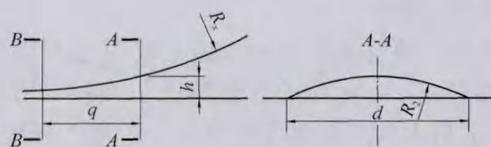


图7 TP304 不锈钢成品方管

在第1道次拔制时,圆管进入模孔时圆周上各点并非同时与模壁接触,为减少沿周长上变形的不同步性,设计拉拔模入口时应尽量增加初始接触面积,以避免截面变形过程出现失稳。空拔弧形模参数如图8(a)所示,其入口锥是由4个二次曲面组成的喇叭口<sup>[7]</sup>,二次曲面与定径带方柱体的表面相交形成过渡区,入口锥曲面参数如图8(b)所示。



(a) 空拔弧形模参数



A-A — 入口锥入口平面 B-B — 入口锥出口平面

(b) 入口锥曲面参数

图8 空拔弧形模及其入口锥曲面参数设计

空拔弧形模的弧边相对于定径带的高度  $h$  可由下式计算:

$$h = R_2 - [R_2^2 - (d/2)^2]^{1/2} \quad (3)$$

入口锥面任意截面的弧方形弧边的曲率半径  $R_x$  按下式<sup>[2]</sup>计算:

$$R_x = [(R_2 - R_1)(q + L)q/L_x] - R_1 - [(R_2 - R_1)q/L] \quad (4)$$

式中  $R_2$  —— 入口锥入口平面弧边曲率半径, mm;

$d$  —— 弧边宽度, mm;

$R_1$  —— 入口锥出口平面弧边曲率半径, mm;

$q$  —— 弧边与定径带相贯线宽度, 取 2~7 mm;

$L$  —— 入口锥长度, mm;

$L_x$  —— 截面与入口平面距离, mm;

$\alpha$  —— 入口锥角, ( $^\circ$ )。

对于圆变方变形,当入口锥角  $\alpha$  过大时,轴向延伸小,容易出现边部过充满和平面凹陷的缺陷<sup>[2]</sup>;根据有限元计算结果,设计了  $45^\circ \rightarrow 12^\circ$  渐变入口锥角。为使四边圆滑过渡,设计了“舌形”过渡带,同时打磨连接部至圆滑无棱角,如图9所示。



图9 圆变方拉拔模“舌形”过渡带

在模具材质选择上,先后试验了硬质合金 YG8, 工具钢 Cr12MoV、T8A 等。碳化钨硬质合金模硬度高,抗磨性好,但价格昂贵;与硬质合金相比,钢模成本低易加工,但容易产生拉毛缺陷,需经常打磨<sup>[8]</sup>。由于此管拉拔力较大,在试验中钢模磨损很快,每根拉拔后都需打磨外模过渡段和定径段,每个模具寿命仅为 3~8 根管,成本反而高于硬质合金模。最后选择了 YG8 外模+钢质模套+T8A 内模的材质。

#### 4.2 第2道次衬拉

对第2道次方管衬拉,由于周长方向为不均匀变形,且接触面较大,如何减小拉拔力是模具设计的重点。有限元模拟在优化模具设计,计算最小拉拔力方面,发挥了重要作用。通过模拟不同变形段参数设计的拉拔力,选取了拉拔力最小最稳定的模具设计,节省了实际试验所需的大量时间和成本。

在外模的入口处设计了  $12^\circ$  的锥角,且入口处宽度为 233.9 mm,大于方管外部的宽度 225 mm,保证了第1道次圆变方后的方管能够较平缓的进入外模定径带。

采用锥形外模和柱形内模,外模定径带长度 25 mm,内模前端倒角  $5 \times 45^\circ$ ,角部倒角  $7 \times 45^\circ$ ,定径段长度 100 mm,如图10所示<sup>[9]</sup>。

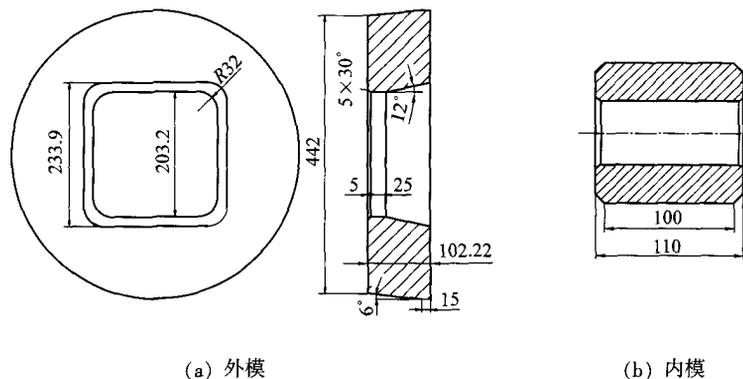


图 10 TP304 不锈钢方管衬拉内外模设计

## 5 结论

(1) 对于核用电大尺寸异型管, 采用固定模拉拔成型工艺是可行的, 与焊接成型管相比, 其成品材质性能均匀一致, 且省去了焊缝的检验过程。

(2) 对于固定模拉拔大尺寸方管, 相对于直接衬拉成型和直接空拔成型, 1 道次空拔+1 道次衬拉工艺对于减小拉拔力, 提高成品尺寸精度具有较好的效果。

(3) 对于边长 200 mm 左右方管的拉拔工艺, 周边压缩系数 1.06~1.14 是适用的。

(4) 对于边长 200 mm 左右的方管拉拔, 0.05~0.30 mm 的减壁量是不够的, 应增加到 0.8~1.0 mm。考虑到拉拔头焊接强度限制, 更大的减壁量也是不必要的。

## 6 参考文献

[1] Qi Hongyuan, Zhu Hengjun. Special-shaped tube drawing forming and conform al optimization of die cavity[J].

Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(A02): 240-245.

[2] 李连诗. 异形管制造方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 23-26, 27-28, 34.

[3] 李纪龙, 杜长春, 李萍. 方管旋压缩径工艺研究[J]. 精密成形工程, 2012, 4(6): 12-15.

[4] 王连忠, 任学平. 异型材拉拔模具设计的变分方法[J]. 北京科技大学学报, 1997, 19(3): 273-276.

[5] 蒋义明. 冷拔钢管成型过程的非线性有限元分析[D]. 天津: 天津理工学院, 2004.

[6] 张立龙. 方、矩形管孔型设计方法[J]. 焊管, 1996, 19(2): 45-48.

[7] 齐红元, 朱衡君. 异型挤压模腔纵向曲线与共形映射[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 152-155.

[8] 马怀宪. 金属塑性加工学: 挤压、拉拔与管材冷轧[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 23-44.

[9] 陈隆彬, 万锐, 梁宏, 等. 八方管拉拔成型工艺探索[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(1): 85-86.

(收稿日期: 2012-07-26; 修定日期: 2012-12-11)

## ● 信息

### 衡阳华菱钢管有限公司成功开发出 $\Phi 146.05$ mm HSM-1 特殊螺纹套管

2013年2月27日, 衡阳华菱钢管有限公司(简称华菱衡钢)顺利生产出  $\Phi 146.05$  mm 非 API 规格 HSM-1 特殊螺纹套管接箍。2012年年底, 华菱衡钢与俄罗斯石油公司签订了总计1万多吨的  $\Phi 146.05$  mm(5.75 in)和  $\Phi 168.28$  mm(6.625 in)两种规格的 HSM-1 特殊螺纹套管供货合同, 其中  $\Phi 146.05$  mm 为非 API 规格。经过不断攻关, 华菱衡钢在 HSM-1 特殊螺纹原有规格的基础上成功开发了  $\Phi 146.05$  mm 规格, 并设计、制作了相应的测量工具。

此次  $\Phi 146.05$  mm 非 API 规格 HSM-1 特殊螺纹的成功开发, 是华菱衡钢在激烈的市场竞争中以用户需求开发新产品的重要体现。

(衡阳华菱钢管有限公司 许莹)