

基于有限元模拟的外方内圆管拉拔成形工艺开发

刘升¹ 王伯文² 林希峰¹

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 太钢不锈钢钢管有限公司, 太原 030003)

摘要 为开发外方边长 64 mm、内圆直径 44.4 mm 的外方内圆 316L 不锈钢异形管新品种, 运用大型非线性有限元软件 ABAQUS 对空拔法和固定短芯棒法进行了模拟计算, 得出拉拔模具最优的模角、变形区长度和拉拔力。通过分析得出, 两道次固定短芯棒拉拔法可实现本新工艺。结合现场实验, 测得成品方外边尺寸与模拟结果误差为 0.26%, 内圆径尺寸误差为 0.01%, 模拟结果较吻合。

关键词 外方内圆管 不锈钢 拉拔 有限元法

Development of Drawing Forming Process for Outside-Square Inside-Circular Tube based on Finite Element Simulation

Liu Sheng¹, Wang Bowen² and Lin Xifeng¹

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Stainless Steel Pipe Co Ltd, Taiyuan Steel, Taiyuan 030003)

Abstract In order to develop a new grade of square-circular stainless steel 316L profile tube with outside length 64 mm and inside diameter 44.4 mm, both hollow drawing process and fixed short-plug drawing process have been simulated and calculated by using large scale nonlinear finite element software ABAQUS to get optimal drawing die angles, length of deformation area and drawing force. With analysis it is obtained the new process shall realize by two-pass fixing short-plug drawing method. Combining works test, the simulated results are accuracy, i. e. the error of outside dimensions between measured and simulated is 0.26%, and that of inside dimensions is 0.11%.

Material Index Outside-Square Inside-Circular Tube, Stainless Steel, Drawing, FEM

目前国内通过有限元软件分析管材拉拔工艺^[1]的研究较多, 拉拔工艺可以获得具有良好内外表面质量的矩形截面管材^[2]。本文运用有限元软件建模、分析, 通过修正模具尺寸、模角变化以及单道次和多道次拉拔的截面变化情况, 确定合理的拉拔力, 并在现场试制取得了阶段成功。

1 弹塑性有限元模型的建立以及参数的设定

外方内圆坯料的生产工艺流程为: 冶炼→管坯→管坯表面车光→6 000 t 挤压机成形→酸洗去除表面玻璃粉→毛管修磨→外方内圆管拉拔, 采用空拔^[3]和短芯棒拉拔^[4]。

1.1 有限元计算基本原理和建立的几何模型

本文主要采用虚功方程, 即为: $\delta U = \Delta V$ (1)

式中: U - 虚应变能; V - 外力所做的虚功。

对于拉拔等金属塑性成形问题, 由于其高度非线性难以收敛, 常采用引入收敛因子的修正 Newton-Raphson 法; 在有限元软件 ABAQUS 中运用增量加载法的修正 Newton-Raphson 算法进行非线性问题求解^[5], 其迭代公式为:

$$\begin{cases} \Delta u^n = -(k_T^n)^{-1} \phi^n = (k_T^n)^{-1} (R' - P^n) \\ k_T^n = \left(\frac{\partial \phi}{\partial u} \right)^n = \left(\frac{\partial P}{\partial u} \right)^n \\ u^{n+1} = u^n + \lambda_n \Delta u^n \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δu - 位移增量; k_T^n - 第 n 次迭代的切线刚度; ϕ - 质点位移; R' - 增量载荷; P - 外力载荷; λ_n - 收敛因子, $\lambda_n > 0$ 。

外方内圆管坯料的外方边长 64 mm, 内圆直径 44.4 mm, 长 6 000 mm, 拉制成成品和固定短芯棒二次拉拔中一道次模具的尺寸如图 1 所示。有限元模型中, 坯料选择为弹塑性体, 而模具以及芯棒选择为刚体; 所有材料均为各向同性。由于拉拔工艺还没有完全确定, 因此采用预定工艺: (1) 采用空拔一道次成形; (2) 采用固定短芯头两道次拉拔成形。

1.2 钢管成分、接触条件和摩擦属性

拉拔外方内圆管的坯料采用 316L 钢种, 其化学成分和力学性能如表 1 所示。

由于外方内圆管拉拔工艺中变形是多重非线性耦合问题, 因此本文对材料建立适合于金属大变形的

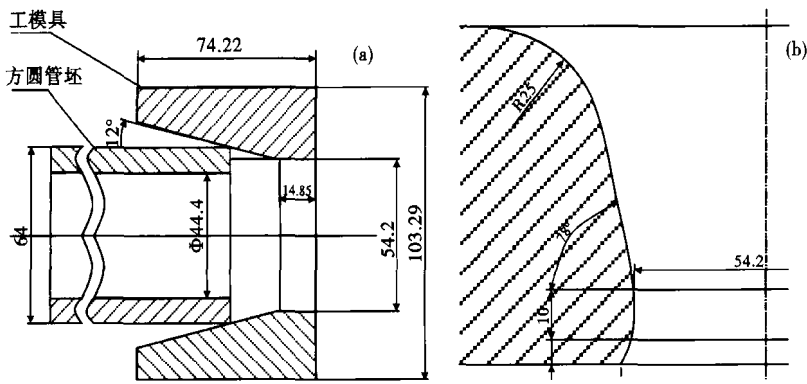


图1 (a)外方内圆管和(b)固定短芯棒拉拔模具尺寸

Fig.1 Dimensions of square-circular tube (a) and Drawing die with fixing short-plug (b)

式中: c_{ijkl} - 材料的模张量; E - 弹性模量; ν - 泊松比; H - 加工硬化速率; α' - 常数,塑性态为1,弹性态为0; δ_{ik} 、 δ_{jl} - 为 Kronecker 数相; τ'_{ij} 、 τ'_{kl} - 为欧拉应力 τ_{ij} 和 τ_{kl} 的有效应力分量。

本文选取有限元 ABAQUS 软件中的修正库伦摩擦模型^[9]:

$$f = -\mu f_n \frac{2}{\pi} \arctan \frac{V_r}{k} \quad (4)$$

式中: μ - 摩擦系数; f_n - 法向接触力; V_r - 接触点处内管与模具表面的相对滑动速度; k - 常数, $k = 10^{-2} \sim 10^{-4}$ 。

Cauchy-Truesdell 型本构模型^[6-8],其表达式如下:

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = c_{ijkl} d_{ij} \\ c_{ijkl} = \frac{E}{1+\nu} \left[\delta_{ik}\delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu}\delta_{ij}\delta_{kl} - \alpha' \frac{\tau'_{ij}\tau'_{kl}}{\frac{3}{2}\tau'^2 - 1 + \frac{2}{3}H^{1+\nu}} \right] \end{cases} \quad (3)$$

1.3 边界条件与载荷的设置

在 ABAQUS 中建立外方内圆管拉拔三维有限元模型,外模具和固定短芯棒均选择为解析刚体,限制其中心参考点的径向和轴向的 6 个自由度。

表1 316L 化学成分、力学性能和 300 K 时的物理参数

Table 1 Chemical composition, mechanical properties and physical coefficient at 300 K, steel 316L

化学成分/%									密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	伸长率/ %	弹性模 量/MPa	泊 松比	摩擦 系数	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co								
≤ 0.03	≤ 0.75	≤ 2.00	≤ 0.03	≤ 0.01	16.00 ~ 11.00 ~ 18.50	~ 2.00 ~ 14.00	2.50	≤ 0.10	8 000	255	600	40	19 500	0.26	0.1	0.3

拉拔过程中载荷情况较为简单,一方面定义坯料在一个恒定的速度场中运动,确保拉拔速度;另一方面选取坯料头部截面作为边界面定义材料拉拔力,建立一条曲线,使得拉拔力可以在此范围内变化,从而可以求出较优的拉拔力。

2 模拟结果分析和工艺确定

2.1 空拔工艺

空拔模拟结果如图 2。空拔时模拟了不同模角,即不同的拔模斜度下拉拔力和内径椭圆度的情况,结果如表 2 所示。分析可得:

(1)拉拔斜度为 12°时,平稳拉拔时所需拉拔力最小,椭圆度也在接受的范围之内,此时加工的内孔最大的尺寸为 31 mm;

(2)拉拔斜度为 2°时,得到最小的椭圆度,此时内孔的变化很均匀,但是模具制造成本太高,所需的平稳拉拔力也较大,可以成形的最大内径为 33 mm,也达不到工艺所需要的 37.4 mm;

(3)变形区越大,模拟所得到的内径

尺寸也越大,内径的变形程度也越来越不均匀,椭圆度也逐渐增大;

(4) $\square 64 \text{ mm} / \circ 44.4 \text{ mm} \rightarrow \square 54.2 \text{ mm} / \circ 37.8 \text{ mm}$ 由空拉工艺难以实现。

2.2 固定短芯棒拉拔工艺

固定短芯棒拉拔成形,通过一道次拉拔难以获得最终的成品尺寸,但是采用两道次拉拔以后就可

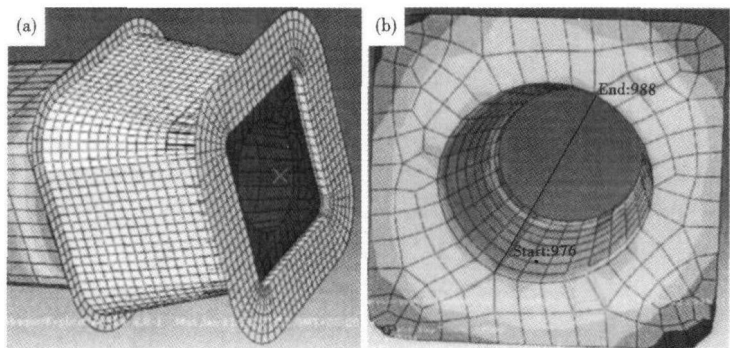


图2 外方内圆钢管空拔模拟结果:(a)空拔模拟成形图;(b)空拔完成后内径的测量

Fig.2 Simulated results of hollow drawing square-circular tube: (a) schematics of hollow drawing simulation; (b) measuring inside diameter of tube after hollow drawing

以获得所需要的成品的尺寸(图 3)。固定短芯棒拉拔成形的网格划分,模拟的结果如图 4 所示。

通过大量的模拟运算和比较分析,确定了工模具的拉拔模角为 12°;变形区长度:一道次衬拉成形时的最佳变形区长度为 50 mm;两道次衬拉成形的最佳变形区长度是 46 mm。

确定可以通过固定短芯棒拉拔法实现外方内圆管的成形后,分别作了两种工艺的预定:第 1 种是一次拉拔成形,即 $\square 64/\circlearrowleft 44.4 \rightarrow \square 54.2/\circlearrowleft 37.8$;第 2 种是通过多次拉拔成形,即两道次拉拔成形 $\square 64/\circlearrowleft 44.4 \rightarrow \square 59/\circlearrowleft 41 \rightarrow \square 54.2/\circlearrowleft 37.8$ 。通过 ABAQUS 有限元软件计算结果如表 3 所示。

坯料进入模具之前倒圆角偏大一个毫米比较好;模具倒角是 4 mm,那么坯料的倒角需要加工到 5 mm,如此既有利于坯料的拉拔,又不会对模具造成较大的磨伤,且加工完成后误差基本控

表 2 外方内圆管空拔计算结果

Table 2 Calculated results of hollow drawing square-circular tube

内径号	拉拔斜度(内径计算值/mm)					
	6°	12°	20°	2°	10°	16°
1	33.342 2	32.089 1	29.454 4	33.883 6	33.021 1	31.194 6
2	32.966 5	31.772 7	29.058 3	33.605 6	32.576 5	30.883 5
3	32.950 1	31.856 4	29.011 9	33.609 3	32.912 3	30.766 7
4	33.152 5	32.152 6	29.220 0	33.704 1	33.152 5	31.187 3
5	33.347 0	32.409 7	29.393 3	33.715 4	32.939 4	30.667 1
6	33.765 9	32.758 2	29.932 5	33.955 7	32.476 3	30.986 5
7	33.474 1	32.409 9	29.608 9	33.827 2	32.935 6	31.146 7
8	33.215 7	32.116 9	29.357 4	33.738 1	32.826 7	31.214 2
9	32.986 9	31.747 9	29.089 2	33.607 1	32.898 9	31.204 3
10	32.935 2	31.642 8	28.849 4	33.584 9	32.956 4	30.567 8
11	33.134 0	31.827 0	28.802 8	33.699 6	33.246 9	30.099 7
12	33.375 5	32.129 5	28.850 4	33.815 0	32.635 8	30.968 5
13	33.521 5	32.329 9	28.983 6	33.865 9	32.787 1	31.098 1
14	33.489 7	32.274 4	29.212 8	33.910 7	32.891 4	30.994 3
最大内径/mm	33.765 9	32.758 2	29.932 5	33.955 7	33.246 9	31.214 2
最小内径/mm	32.935 2	31.642 8	28.802 8	33.584 9	32.476 3	30.099 7
椭圆度/%	2.460 1	3.404 9	3.774 1	1.092 0	2.317 8	3.570 4
拉拔力/TN	≥80	≥45	≥100	≥120	≥70	≥90

制在 0.1 mm 精度范围之内。

拉拔力计算是考虑了整个截面上的平均拉拔力,模拟结果表明计算时在模具角接触处的应力比

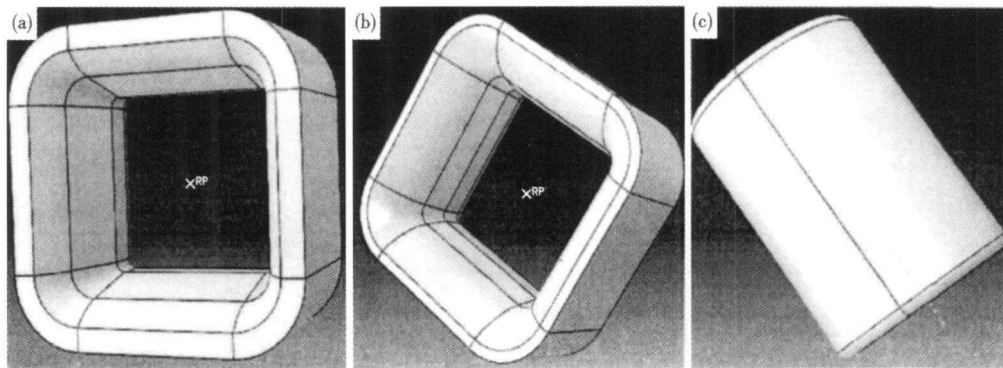


图 3 外方内圆钢管固定短芯棒拉拔模具图:(a)一道次拉拔;(b)二道次拉拔;(c)短芯棒

Fig. 3 Schematics of dies for fixing short-plug drawing square-circular tube: (a) for first pass drawing; (b) for second pass drawing; (c) short-plug

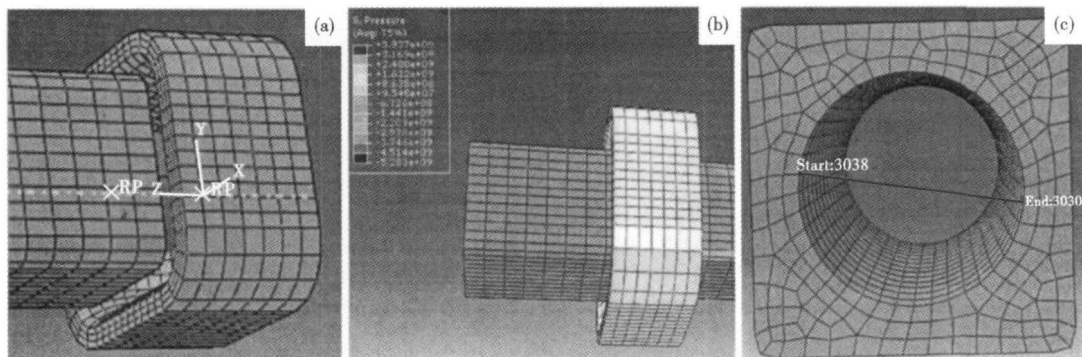


图 4 外方内圆管固定短芯棒拉拔模拟结果:(a)一道次拉拔网格划分;(b)二道次拉拔成形应力;(c)成形后内径测量

Fig. 4 Simulated results for fixing short-plug drawing square-circular tube: (a) first pass drawing grid pattern; (b) second pass drawing forming stress; (c) schematic of inside diameter measurement of finished deformed tube

较大;两次拉拔成形工艺计算的结果比一次拉拔成形工艺得到的结果更加准确。本模型中,结果获得的最终拉拔力是一个范围区间,同时也是拉拔成形时的最小拉拔力。

2.3 固定短芯棒拉拔工艺现场试制结果

现场的试制结果分析的最优相关参数:模具模角 12°, 过度圆弧半径为 25 mm, 一道次变形区长度为 46 mm, 二道次变形区长度为 45 mm, 摩擦系数为 0.1, 拉拔速度为 0.3 m/s, 拉拔力为 114 TN。

根据图 5 所示,通过有限元模拟仿真计算的结果比较准确,通过超声波测厚仪对现场成品的尺寸进行了测量,成品的内圆径尺寸测量后的算术平均值为 37.7 mm,模拟计算所得到的内径误差为 0.26%;外方形边尺寸测量后去算术平均值为 54.19 mm,模拟计算所得到的外方形边长尺寸误差为 0.01%。

3 结论

(1) 空拔法难以控制内径的尺寸精度,无法满足本新工艺的完成;固定短芯棒拉拔法可以完成本工艺,采用两道次的衬拉法所获得的精度高于一道次衬拉法。

(2) 模拟计算与现场实测所得的内径误差为 0.26%,外方形边尺寸计算与实测误差为 0.01%,模拟与实际结果比较吻合。

(3) 外方内圆管拉拔模具存在最优模角和最佳变形区长度,此时所需的拉拔力最小,有利于管材外形尺寸控制和表面质量。

参考文献

- 1 杨晓静,孙方宏,张志明,等. 基于有限元模拟的空拔铜管拉拔参数的优化. 中国有色金属学报,2008,18(12):2245
- 2 权国政,周杰,佟莹. 铝合金圆管两道次拉拔成矩形管的有限元模拟. 机械工程材料,2008,32(7):70
- 3 马怀亮. 金属塑性加工学-挤压拉拔与管材冷轧. 北京:冶金工业出版社,2004
- 4 Alexandrov N. Analytical Treatment of Tube Drawing With a Mandrel. Journal of Mechanical Engineering Science,2001,215(5):581

表 3 外方内圆管固定短芯棒拉拔计算结果/mm

Table 3 Calculated results of fixing short-plug drawing square-circular tube/mm

内径号	工艺一:两道次衬拉成形				工艺二:一次衬拉成形	
	□64/□44.4→□59/□41		□59/□41→□54.2/□37.8		□64/□44.4→□54.2/□37.8	
	外径	内径	外径	内径	外径	内径
1	59.060 6	40.841 8	54.200 1	37.707 3	54.188 3	37.653 5
2	59.071 8	40.823 6	54.193 7	37.710 2	54.192 5	37.654 3
3	59.065 5	40.809 9	54.179 9	37.702 7	54.192 4	37.659 3
4	59.031 2	40.798 1	54.183 6	37.697 7	54.188 0	37.668 6
5	59.071 0	40.816 6	54.179 6	37.695 8	54.189 3	37.676 5
6	59.063 8	40.799 0	54.197 4	37.694 3	54.202 4	37.677 2
7	59.071 6	40.801 6	54.185 1	37.696 3	54.203 1	37.676 7
8	59.068 2	40.805 6	54.180 6	37.698 5	54.192 2	37.675 0
9	59.068 1	40.823 5	54.210 3	37.701 7	54.192 9	37.667 5
10	59.061 5	40.831 3	54.201 0	37.704 5	54.188 7	37.662 7
11	59.068 0	40.829 3	54.191 4	37.707 7	54.210 2	37.660 3
12	59.081 4	40.816 9	54.194 6	37.702 4	54.205 1	37.660 2
13	59.033 6	40.810 2	54.186 4	37.697 7	54.188 5	37.665 5
14	59.029 9	40.820 7	54.185 3	37.693 9	54.196 8	37.670 0
15	59.018 4	40.836 7	54.202 4	37.692 0	54.194 3	37.680 1
16	59.079 3	40.835 2	54.200 0	37.692 6	54.198 2	37.679 7
17	59.068 7	40.817 6	54.203 6	37.692 2	54.202 3	37.675 4
18	59.070 7	40.830 2	54.200 7	37.695 4	54.200 9	37.677 6
19	59.081 4	40.842 0	54.199 8	37.699 6	54.196 4	37.665 1
20	59.059 4	40.846	54.195 9	37.704 5	54.199 3	37.659 1
拉拔力/TN	≥114.381		≥139.505		≥182.744	

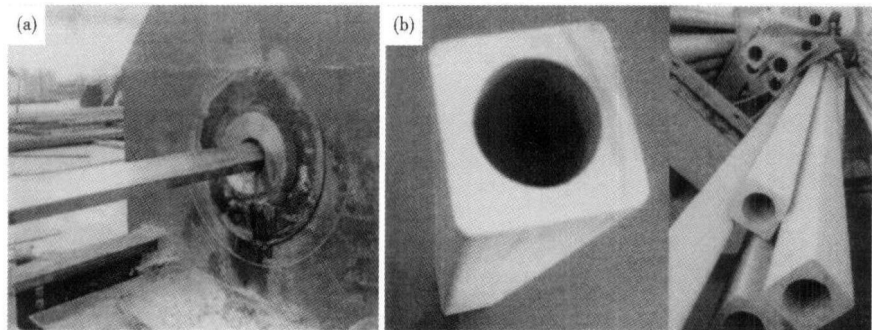


图 5 外方内圆钢管拉拔设备(a)和钢管成品(b)

Fig. 5 Equipment for drawing (a) and finished products (b) of square-circular tube

- 5 郑新,陆晓峰. 基于有限元模拟的 20/316L 复合管拉拔成形分析. 塑性工程学报,2010,17(2):154
- 6 Brucker M, Keller D, Reissner J. Computer Aided Drawing of Profiles From Round and Square Bar. Ann CIRP,1988,37:247
- 7 Bour C R, Webster Jr W D. Direct Upper-bound Solution and Finite Element Approach to Round-to-square Drawing. Trans ASME,1985,107:254
- 8 Zienkiewicz O C(英), Taylor R L(美). 有限元方法(第5版)第2卷-固体力学. 庄茁,岑松译. 北京:清华大学出版社,2006
- 9 刘建生,陈慧琴,郭晓霞. 金属塑性加工有限元模拟技术与应用. 北京:冶金工业出版社,2003

刘升(1984-),男,硕士,助理工程师,轧制工艺研究。

收稿日期:2010-12-25