

►加工制造◀

螺旋焊管成形过程的有限元分析

李 宏*

张见明

(江汉石油管理局沙市钢管厂) (清华大学工程力学系)

摘要 根据螺旋焊管成形过程中板的变形特征, 以及焊管管壁的层间剪切残余应力, 提出了一种特殊的单元划分方案。这种方案能在保证一定精度的情况下, 大大减少单元和节点数, 从而能在微机上用有限元法对螺旋焊管成形过程进行有限元数值模拟。对多种成形工况的计算结果表明: (1) 钢管的残余应力在焊接前两边比中间大, 且自由边比递送边大; (2) 2号辊下压量 h 对残余应力的影响远大于板宽的影响, h 越大, 螺旋焊管成形过程中形成的残余应力越小, 对于管径 $D=1016\text{mm}$ 的钢管, $h=480.4\text{mm}$ 比较合适; (3) 螺旋焊管成形过程中形成的残余应力随板宽的增加而减小。

主题词 螺旋焊管 成形过程 残余应力 有限元分析

引 言

螺旋焊管目前仍然是我国油气长输管线的主要用管, 其成形过程远比矩形板弯曲复杂, 它至少应简化为平行四边形板的弯曲(考虑成形角)。矩形板弯曲模型不能反映成形角对残余应力的影响, 而焊管管壁的层间剪切残余应力主要取决于成形角。现有文献几乎都忽略了对剪切残余应力的研究。这可能是用解析方法不能求出剪切残余应力的缘故。另外, 解析方法不能考虑成形器的外控辊。在生产和本文计算中发现, 3号辊受力很小, 甚至脱空。这时外控辊起主要作用, 特别是4号辊。

基于上述原因, 笔者采用国际上最先进的非线性有限元分析软件(MARC), 尝试对螺旋焊管的成形过程进行数值计算。但是, 即使采用数值方法分析螺旋焊管的成形过程也存在计算量大的问题。该问题包括材料非线性(塑性弯曲)、几何非线性(大变形)和边界条件非线性(接触问题)。若按照有限元分析常规的单元划分方法, 则该问题的计算会因节点太多、计算量太大而不能在微机上进行。

笔者根据成形过程中板的变形特征而采取特殊的单元划分方案, 在保证一定精度的情况下, 大大减少了单元和节点数。通过计算, 得到一些对生产有指导意义的结果。

成形角与钢板的变形特征

螺旋焊管成形各参数如图1所示。钢板宽度 B 、钢管直径 D 及成形角 α , 在不考虑钢板厚度的情况下, 螺距间对缝为零时, 存在下列关系

$$\cos \alpha = B / (\pi D)$$

若考虑钢板厚度, 钢板的上下表面分别形成无缝螺旋圆柱面时, 其成形角不同, 分别为

$$\cos \alpha_1 = B / (\pi D_1) \quad \cos \alpha_2 = B / (\pi D_2)$$

其中 D_1 、 D_2 分别为钢管内外直径。由于在实际生产中, 成形角只有一个, 这样, 在钢管的轴向上钢板的上下表面就发生错移。这就是钢管管壁层间产生剪切应力的主要原因。笔者计算了在钢管直径 D 为 1016mm 和钢板厚度 t 为 14.7mm 的情况下, 从 1500mm 到 2000mm 各种板宽 B 的上下表面成形角差 $\alpha_1 - \alpha_2$, 发现 $\alpha_1 - \alpha_2$ 随板宽的增加而

* 李 宏, 高级工程师, 生于1957年, 1982年毕业于华东石油学院机械系机械工程专业, 一直从事螺旋焊管的设备、生产和技术管理工作, 任副厂长兼总工程师。地址: (434001) 湖北省荆州市。电话: (0716) 8302635。

(收稿日期: 2001-06-14; 修改稿收到日期: 2001-07-26)

增加。当 $B = 1500\text{mm}$ 时, $\alpha_1 - \alpha_2 = 0.016\text{rad}$; 当 $B = 2000\text{mm}$ 时, $\alpha_1 - \alpha_2 = 0.024\text{rad}$ 。API X70 材料发生剪切屈服的角应变约为 0.0022rad 。可见, 螺旋焊管在钢管轴向和径向平面内都会剪切屈服。一般情况下, $\alpha_1 - \alpha_2$ 越大, 钢管剪切残余应力也越大。

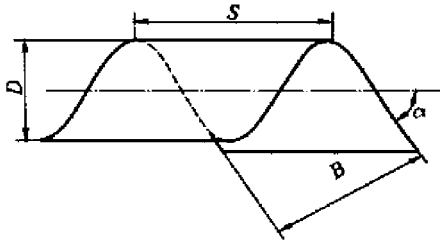


图1 螺旋焊管的成形参数

S —螺距; B —钢板宽度; D —钢管直径; α —成形角

钢板的变形特征除了上述层间剪切变形外, 另一个显著的特征是在垂直于钢管轴线方向上的塑性弯曲变形大, 而在平行于钢管轴线方向上, 变形较小。

计算模型

1. 成形器辊轮的处理

计算模型如图2所示。为了减少计算量, 同时由于滚动摩擦力相对较小, 计算将1、2、3号辊简化为3个平行排列表面无摩擦的半圆柱刚体; 4到11号外控辊简化为一个内表面无摩擦的开口圆筒。

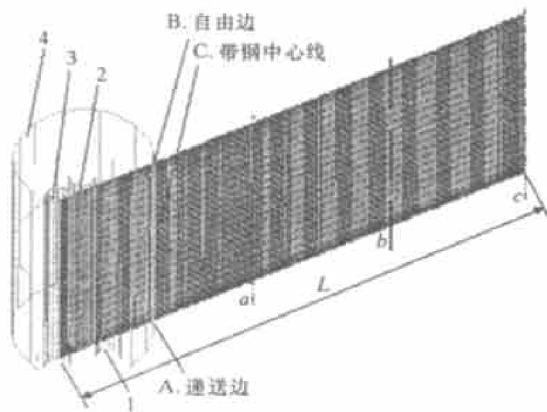


图2 计算模型

1—1号辊; 2—2号辊; 3—3号辊; 4—4号至11号辊

2. 单元选择

板形材料的有限元分析一般选用板壳单元。由于板壳单元有直法线假设^[1,2], 不能很好地反映层间剪切变形, 本文计算选用三维实体单元。又由于MARC软件在处理接触边界条件时, 采用的是线性位移的约束方程, 低阶单元比高阶单元更能较好的模拟大扭曲变形, 所以本文采用8节点六面体线性单元。

3. 网格划分

为了能够模拟钢管成形的全过程, 同时尽量减少计算量, 对一次成形只计算一个螺距长度。

用实体单元划分板形材料, 一个难点是只有用很大数量的单元和节点, 才能保证单元的形状良好。但这样一来, 特别是在3种非线性都存在的情况下, 其计算量将大大超过一台微型计算机(Piii600)的计算能力。在螺旋焊管成形中, 板材变形的显著特点是在垂直于钢管轴线方向上的塑性弯曲变形大, 而在平行于钢管轴线方向, 相对变形较小。由于线性单元所描述的位移是分段线性的, 在相对变形较小的方向, 即使将单元划分得很粗, 也不会降低精度。因此, 在钢管轴线方向将板宽仅划分20等份, 然后将边界单元细分。而在钢板边缘线方向, 将单元划分得相对较细, 使得单元在该方向的长度几乎是其在钢管轴线方向的五分之一。这样得到3600个细长的平行六面体单元, 节点数7500, 自由度数22500(见图2), 从而使该问题在微机求解成为可能。计算表明, 采用这种方式划分单元是可行的。

计算过程及结果

1. 计算过程

一次完整的计算分为4个工况步。第一工况步是2号辊下压到离钢管中心线预定的高度 h , 然后固定在该处; 第二到第四工况步是分别在钢板的 a 、 b 、 c 处给定位移向成形器递送。若直接在 c 处给定位移递送, 将会在开始时, 由于 c 线到成形器的距离太远, 使钢板容易接近屈曲状态, 方程的性态变得奇异, 因而不能计算。

2. 计算内容及结果

笔者计算了1520、1620和1820mm 3种板宽的API X70板材的弯曲成形过程。在每种板宽情况下, 2号辊的下压位置又分3种情况, 共分9次计算。每次计算约7天完成。3种板宽的成形参数见表1。

图3给出了板宽 $B = 1520\text{mm}$ 、2号辊下压位置 $h = 475.4\text{mm}$ 工况下, 递送边、自由边以及带钢中心线上的 A 、 B 、 C 点的Von Mises等效应力在成形过程中随时间的变化曲线(由于递送速度是匀速的, 所以这里时间用带钢长度表示)。最大应力出现在该3点正处在2号辊底下时, 其值为424.30MPa。可以看出, 在过了4号辊以后, 各点

的应力是平稳的。其它工况的曲线形式相同。

表1 3种板宽的成形参数

板宽 B (mm)	板厚 t (mm)	管径 D (mm)	板长 L (mm)	成形角 α (°)	2号辊下压位置 h (mm)		
1520	14.7	1016	3800	61.1052	475.4	-477.9	-480.4
1620	14.7	1016	3900	59.0030	475.4	-477.9	-480.4
1820	14.7	1016	4100	54.3502	475.4	-477.9	-480.4

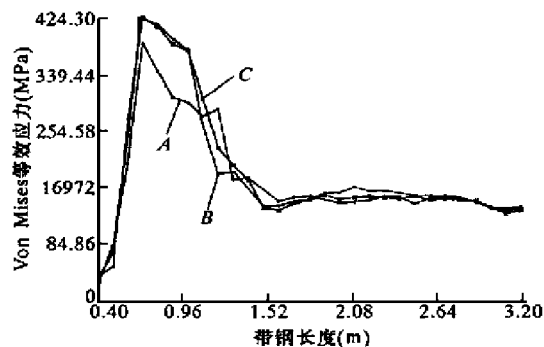


图3 A、B、C点应力随时间变化曲线

图4给出了板宽 $B=1520\text{mm}$ 、2号辊下压位置 $h=475.4\text{mm}$ 工况下, 成形一周后, Von Mises 等

效应力在递送边上(横坐标的起点和终点离板未成形前的左下点的距离为 700mm 和 3200mm) 的分布曲线。

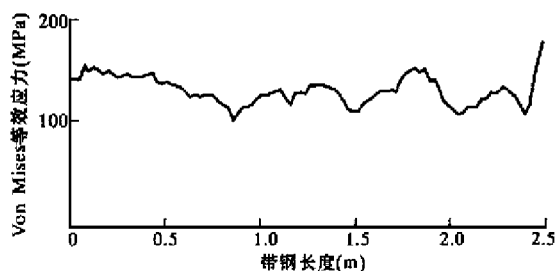


图4 Von Mises 等效应力在递送边上的分布曲线

图中值得注意的是 Von Mises 等效应力是一标量, 不随坐标方向变化, 该应力在递送边上的分布比较均匀。其它所有工况下, 应力的分布形式基本相同, 只是大小不一样。

表2给出了各种工况下, 成形一周后, 3条平行线上的最大 Von Mises 等效应力。该表是本文计算的主要结果。

表2 各种工况下3条平行线上的最大 Von Mises 等效应力 (MPa)

2号辊位置 h (mm)	板宽 $B=1520\text{mm}$			板宽 $B=1620\text{mm}$			板宽 $B=1820\text{mm}$		
	475.4	477.9	480.4	475.4	477.9	480.4	475.4	477.9	480.4
递送边	187.2	164.8	141.9	162.3	142.4	122.6	145.1	123.8	107.5
自由边	243.5	143.6	144.8	225.6	223.7	145.5	204.7	108.2	104.8
带钢中心线	221.7	122.3	48.3	216.7	177.8	33.4	241.9	126.7	25.3

结 论

(1) 钢管的残余应力在焊接前两边比中间大, 且自由边比递送边大。自由边和递送边都是焊接部位, 两边的残余应力在焊接后成为焊接残余应力, 因此, 钢管的残余应力主要是焊接残余应力。

(2) 2号辊下压量对残余应力的影响远大于板宽对残余应力的影响。2号辊下压量越大, 螺旋焊管成形过程中形成的残余应力越小。但2号辊下压量过大, 钢板将接触不到外控辊, 螺旋焊管的尺寸精度将不能保证, 生产不稳定。保留一定大小的残余应力对稳定生产是必要的^[3]。螺旋焊管的成形残余应力对2号辊的下压量 h 极为敏感, 选择合适的 h 既是稳定生产又是使螺旋焊管的成形残余应力尽量小的关键。按照本文的计算结果, 对于管径 $D=1016\text{mm}$ 的钢管, $h=480.4\text{mm}$ 比较合适。

(3) 螺旋焊管成形过程中形成的残余应力随板

宽的增加而减小。尽管减小的幅度很小, 但这一结果仍与第二节中的分析结果相反。由于条件的限制, 笔者在板厚方向只划分了一层线性六面体单元, 这种划分实际上与用厚壳单元是等价的, 即在板厚方向上的剪切变形是线性的, 因而对层间剪切变形的模拟不很精确。总之, 对这一结论尚需在更好的硬件环境下谨慎地做进一步的分析计算。

(4) 由于软硬件条件的限制, 本文的计算没有考虑焊接过程, 只对螺旋焊管的生产过程做了全面的模拟分析。

参 考 文 献

- 1 谢贻权, 何福保. 弹性和塑性力学中的有限单元法. 北京: 机械工业出版社, 1988: 79~135
- 2 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1997: 130~145
- 3 韩书高. 螺旋焊管的弹塑性弯曲成形. 焊管通讯, 1985, 23(8): 10~21

(本文编辑 赵连禄)

Subject Concept Terms fracturing equipment overpressure protection monitoring apparatus

Deng Xiangming (*Dept. of Mechanical & Electronics, Xinjiang Petroleum Institute, Urumchi*), Cui Pingzheng. **3D concurrent aided design of superhigh- pressure pipeline test device.** *CPM*, 2001, 29(9): 24~ 26

This article introduces mainly the 3D concurrent aided design of a test device of superhigh- pressure pipelines used for pipeline construction in Xinjing Oilfield. 3D solid model of component parts and assembly is set up, on which the simulating results are based, and then assembly drawing and parts parts drawing are drawing are obtained. By using the 3D concurrent aided design method, both the work efficiency and comprehensive quality of the design are improved.

Subject Concept Terms pipeline pressure test device 3D model CAD concurrent design

Xia Jinming(*Huazhong Univeristh of Science and Technology, Wwhan*), Li Hong. **Design of pipe chamfering machine.** *CPM*, 2001, 29(9): 27~ 29

Based on the typical structure of a pipe chamfering machine, this article expounded the machine' s overall arrangement scheme, selection of power drive mode and thpe of the clamp device, and design of slave cutting head and control mechanism. It is indicated that, as for a pipe chamfering machine for use in the manufacturing of high quality steel pipes, the arrangement scheme of pipe translation with headstock shoule be adopted, also side- holding type clamp device and redial floating cutting head and PLC control shoule be used.

Subject Concept Terms steel pipe chamfering machine structural design

Li Hong(*Shashi Steel Pipes and Tubes Plant, Jingzhou City, Hubei Province*), Zhang Jianming. **Finite element analysis of forming process of spiral welded pipes.** *CPM*, 2001, 29(9): 30~ 32

According to the deformation characteristic of the plate in the forming process of spiral welded pipes, andin cosideration of shearing residual stress in the pipe wall, a special element classification scheme is put forward. By using this scheme, the numbers of the elements and nodes can be reduced greatly with the accuracy assured; therefore the forming process of the pipe can be simulated on computers with finite element method. The results of calculation of several forming conditions show that, (1) the residual stress in the middle of the pipe is larger than that on two sides; (2) the pressing depth of the No. 2 roller has greater effect on the residual stress than the plate width; (3) the residual stress produced in the forming process decreases with the increase of the plate width.

Subject Concept Terms spiral welded pipe forming process residual stress
finite element analysis

Ma Zhifeng(*physics Dept. of Zhanjiang Teachers College, Zhanjiang City, Guangdong province*). **Technology optimization for machining large- size spherical cambered surface with numerical- controlled lathe.** *CPM*, 2001, 29(9): 33~ 34

To avoid biggish shape error of curved surface in machining lareg- size spherical cambered surface with numerical- controlled lathe, the process technology is optimized. In programming for the optimum techology, by taking the durability of the cutter as the optimized object, the cutter' s duradility vs cutting speed curve is established. The cutting speed can be regulated retionally according to the ' hump' pattern of the curve, thereby the wear of the cutter can be effectively reduced and its durability can be improved.

Subject Concept Terms numerical- controlled lathe spherical surface cambered surfacema-
chining technology optimization

Huang Zhiqiang (*Dept. of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum Institute, Nanchong City, Sichuan Province*), Li Qin, Wang Xia, et al. **Surface strengthening and structural modification of crosshead and**