

基于 ANSYS 的拉丝过程有限元仿真研究

梁瑞,马春翔

(上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240)

摘要:为了研究拉丝过程中影响拉拔力的因素,基于有限元软件 ANSYS,通过正交试验研究在传统拉丝和超声波拉丝下模具的入口角度、定径带长度、出口角度对拉拔力的影响。结果表明,不管是传统拉丝,还是超声波拉丝,随着模具入口角度的增大,拉拔力先急剧减小,然后趋于稳定,当模具入口角度为 13°时拉拔力最小;随着定径带长度的增加,拉拔力也不断增加,当模具定径带长度为 0.3 mm 时拉拔力最小;出口角度的变化对拉拔力几乎没有影响。加入超声波后,平均拉拔力有明显降低。

关键词: 钢丝; 拉丝; 拉拔力; 有限元仿真; ANSYS; 超声波

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1671-5276(2020)02-0126-04

Finite Element Simulation of Drawing Process Based on ANSYS

LIANG Rui, MA Chunxiang

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper aims at investigating the factors having influence on the drawing force during the drawing process. Based on the finite element software ANSYS, the effects of the inlet angle, the aperture length and the exit angle on the drawing force under the traditional drawing and ultrasonic drawing are studied by orthogonal experiment. The results show that, regardless of the traditional drawing or ultrasonic drawing, the drawing force decreases sharply with the increase of the inlet angle of the mold, and then tends to be stable. When the inlet angle of the mold is 13 degrees, the drawing force is minimum. As the aperture length increases, the drawing force also increases. When the aperture length is 0.3 mm, the drawing force is minimum. The change of the outlet angle has little effect on the drawing force. After the addition of ultrasonic waves, the average drawing force is significantly reduced.

Keywords: steel wire; drawing; drawing force; finite element simulation; ANSYS; ultrasonic

0 引言

拉丝是丝材生产的主要方式,在钢丝的拉丝加工过程中,需要进行模具的设计,其中模具的入口角度、定径带长度、出口角度和拉丝的拉拔力与质量有密切关系。超声波拉丝是超声波在塑性加工中的一个运用,前人的研究表明,加入超声波后,平均拉拔力明显降低,拉拔质量明显提高,传统拉丝工艺难以加工的材料可以在超声波拉丝工艺中加工,因此受到了国内外各界的广泛关注^[1-2]。用实验的方法进行研究需要大量的成本,而有限元仿真可以节省物力、人力和时间,已经成为非常重要的研究手段^[3]。

丝过程的仿真必须进行一定的合理简化与假设:1) 拉丝模由硬质合金制成,相对于要加工的钢丝硬度非常高,所以假设拉丝模为刚体^[4];2) 拉丝模和钢丝之间的摩擦符合库仑定律^[5];3) 不考虑温度对拉丝的影响;4) 钢丝为均匀连续的各向同性材料,且满足体积不变定律^[6]。

1 建立有限元模型

1.1 建立三维模型

根据某企业中的一个具体拉丝产品建立三维模型,模型尺寸如图 1 所示。由于模型是对称的,取实体的 1/4 进行仿真^[4]。

1.2 简化与假设

拉丝过程非常的复杂,而 ANSYS 计算能力有限,对拉

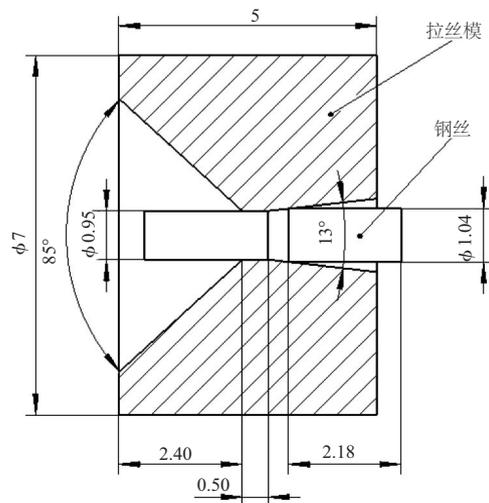


图 1 拉丝模型的二维剖视图

第一作者简介:梁瑞(1990—),男,云南曲靖人,硕士研究生,研究方向为超声波拉丝的有限元仿真。

1.3 建立材料模型

钢丝的弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3,密度为 7.81×10^{-6} kg/mm³,拉丝模和钢丝之间的摩擦因数为 0.05。材料采用 MISO 多线性等向强化模型^[7]。

1.4 定义单元类型

根据实际情况,钢丝选用的单元类型为 SOLID185;目标面单元类型为 TARGET170,接触面单元类型为 CONTA174^[8]。

1.5 划分网格

对钢丝划分网格时,采用扫掠的方式进行网格划分,任何单元的任何边长 ≤ 0.1 mm,网格划分如图 2 所示。钢丝有限元模型共有单元 1 550 个,节点 2 142 个。

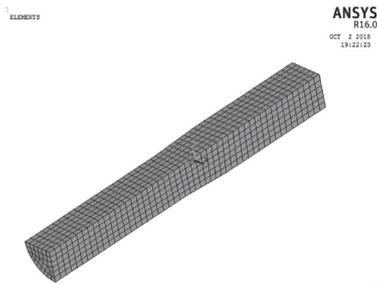


图 2 网格划分

1.6 定义接触对

拉丝加工中的接触属于刚体与柔体接触,又属于面和面接触^[9]。

1.7 约束条件

不加超声波时,拉丝模的所有自由度为 0;加超声波后,拉丝模和钢丝只有沿轴向的自由度,其他方向的自由度被约束。

1.8 添加载荷

不加超声波时,拉丝模的所有自由度为 0,只需在钢丝的前端面上添加位移载荷。拉丝速度设定为 $V = 100$ mm/s,仿真开始时钢丝在轴向的速度为 0,如果第 1 个载荷步的速度就设为 100 mm/s 的高速,由于速度突然跳跃太大,最后仿真的结果完全失真。钢丝前端面从 0 移动到 0.5 mm 的过程,速度从 0 开始进行匀加速加载。

$$V = at \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{2} at^2 \quad (2)$$

其中:速度 $V = 100$ mm/s;位移 $S = 0.5$ mm。通过式(1)、式(2)可以求出钢丝前端移动到 0.5 mm 时的时间 $t = 0.01$ s,加速过程的加速度 $a = 10000$ mm/s²。

超声波是正弦波,但为了添加方便,减少计算量,采用同频率、同振幅、同相位的三角波来代替^[10],超声波的频率为 20 kHz^[4],振幅为 0.008 mm。

不加超声波和加超声波的区别在拉拔到 0.5 mm,即

进入正常拉拔状态以后,不加超声波则拉丝模固定不动,加了超声波则拉丝模要以超声波的频率和振幅振动。钢丝前端面从 0 mm 移动到 0.5 mm 的过程,每隔 0.001 s 添加 1 个载荷步,共 10 个载荷步。仿真拉拔过程有 11 个载荷步。本次仿真采用的是瞬态动力学分析的完全法,使用“同步加载,多步求解”的方法^[4],具体的载荷加载如表 1 所示。

表 1 载荷加载表

载荷步	时间/s	钢丝位移/mm	超声波拉丝模位移/mm
1	0.001	0.005	0
2	0.002	0.020	0
3	0.003	0.045	0
4	0.004	0.080	0
5	0.005	0.125	0
6	0.006	0.180	0
7	0.007	0.245	0
8	0.008	0.320	0
9	0.009	0.405	0
10	0.010	0.500	0
11	0.010 012 5	0.501 25	0.008
12	0.010 037 5	0.503 75	-0.008
13	0.010 062 5	0.506 25	0.008
14	0.010 087 5	0.508 75	-0.008
15	0.010 112 5	0.511 25	0.008
16	0.010 137 5	0.513 75	-0.008
17	0.010 162 5	0.516 25	0.008
18	0.010 187 5	0.518 75	-0.008
19	0.010 212 5	0.521 25	0.008
20	0.010 237 5	0.523 75	-0.008
21	0.010 262 5	0.526 25	0.008

2 求解

在软件中操作时,先定义一次求解设置,再定义一次载荷,最后存储 1 个载荷步,所有载荷步都定义好以后,一次性计算所有载荷步。

3 结果分析

钢丝的前部分轴向应力均匀,各个节点的应力差异很小,可认为应力是相同的。轴向应力乘以横截面就是拉拔力,该部位为拉丝完成的部分,横截面不变,即轴向应力和拉拔力有一个准确的对应关系,为了直观展示研究结果,所有结果均查看轴向应力的大小和变化。

3.1 无超声波时 3 个因素的正交试验

以模具的入口角度、定径带长度、出口角度为 3 个因素,取 5 个水平设计正交试验,选择 $L_{25}(5^6)$ 正交试验表,

只有 3 个因素,所以只用前面 3 列。模具的入口角度有 7°、9°、11°、13°、15°,定径带长度有 0.3 mm、0.5 mm、0.7 mm、0.9 mm、1.1 mm,出口角度有 55°、65°、75°、85°、95°。正交试验排列、试验结果如表 2 所示。

表 2 无超声波的正交试验

试验号	入口角度/ (°)	定径带长度/ mm	出口角度/ (°)	平均应力/ MPa
1	7	0.3	55	370
2	7	0.5	65	390
3	7	0.7	75	395
4	7	0.9	85	400
5	7	1.1	95	405
6	9	0.3	65	340
7	9	0.5	75	355
8	9	0.7	85	375
9	9	0.9	95	375
10	9	1.1	55	380
11	11	0.3	75	340
12	11	0.5	85	350
13	11	0.7	95	350
14	11	0.9	55	370
15	11	1.1	65	375
16	13	0.3	85	340
17	13	0.5	95	340
18	13	0.7	55	350
19	13	0.9	65	360
20	13	1.1	75	375
21	15	0.3	95	340
22	15	0.5	55	350
23	15	0.7	65	360
24	15	0.9	75	370
25	15	1.1	85	375
I	1 960	1 730	1 820	
II	1 825	1 785	1 825	
III	1 785	1 830	1 835	
IV	1 765	1 875	1 840	
V	1 795	1 910	1 810	
K1	392	346	364	
K2	365	357	365	
K3	357	366	367	
K4	353	375	368	
K5	359	382	362	
R	39	36	5	

从入口角度对应的 K1-K5 可以看出随着入口角度的

增大,拉拔力先急剧减小,然后趋于稳定,入口角度为 13°时,拉拔力最小;从定径带长度对应的 K1-K5 可以看出随着定径带长度的增加,拉拔力增加,定径带长度为 0.3 mm 时,拉拔力最小;从出口角度对应的 K1-K5 可以看出随着出口角度的增加,拉拔力没有明显的变化。所以最佳正交组合为入口角度 13°,定径带长度 0.3 mm,出口角度 95°。由极差 R 可知影响拉拔力的顺序为入口角度>定径带长度>出口角度,入口角度和定径带长度对拉拔力的影响很大,出口角度对拉拔力的影响很小。

3.2 加超声波时 3 个因素的正交试验

和没有超声波时的正交试验设置完全一样。在超声波拉拔中,由于拉拔力变化幅度太大,很难读取平均拉拔力的准确数值,所以加入超声波以后,选择最大拉拔力为仿真结果来研究。正交试验排列、试验结果和结果分析如表 3 所示。从入口角度对应的 K1-K5 可以看出随着入口角度的增大,拉拔力先急剧减小,然后趋于稳定,入口角度为 13°时,拉拔力最小;从定径带长度对应的 K1-K5 可以看出,随着定径带长度的增加,拉拔力整体上一一直在增加,定径带长度为 0.3 mm 时,拉拔力最小;从出口角度对应的 K1-K5 可以看出,随着出口角度的增加,拉拔力没有明显的变化,出口角度为 65°时,拉拔力最小。所以最佳正交组合为入口角度 13°,定径带长度 0.3 mm,出口角度 65°。由极差 R 可知影响拉拔力的顺序为入口角度>定径带长度>出口角度,入口角度和定径带长度对拉拔力的影响都很大,而出口角度对拉拔力几乎没有影响。

表 3 有超声波的正交试验

试验号	入口角度/ (°)	定径带长度/ mm	出口角度/ (°)	最大应力/ MPa
1	7	0.3	55	400
2	7	0.5	65	420
3	7	0.7	75	440
4	7	0.9	85	430
5	7	1.1	95	450
6	9	0.3	65	370
7	9	0.5	75	380
8	9	0.7	85	415
9	9	0.9	95	390
10	9	1.1	55	425
11	11	0.3	75	380
12	11	0.5	85	365
13	11	0.7	95	365
14	11	0.9	55	380
15	11	1.1	65	400
16	13	0.3	85	360
17	13	0.5	95	370
18	13	0.7	55	380

续表 3

试验号	入口角度/ (°)	定径带长度/ mm	出口角度/ (°)	最大应力/ MPa
19	13	0.9	65	365
20	13	1.1	75	390
21	15	0.3	95	360
22	15	0.5	55	360
23	15	0.7	65	375
24	15	0.9	75	400
25	15	1.1	85	430
I	2 140	1 870	1 945	
II	1 980	1 895	1 930	
III	1 890	1 975	1 990	
IV	1 865	1 965	2 000	
V	1 925	2 095	1 935	
K1	428	374	389	
K2	396	379	386	
K3	378	395	398	
K4	373	393	400	
K5	385	419	387	
R	55	45	11	

13号试验中,钢丝前部分的轴向应力随时间的变化关系如图3所示。从图3可以看出,加入超声波后,平均应力约为180 MPa,大约是没有加超声波时平均拉拔力的一半。

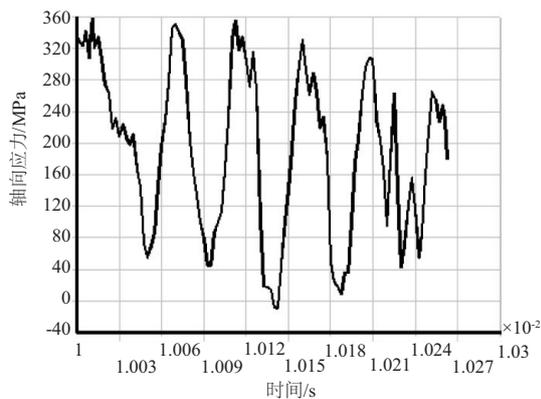


图3 钢丝前部分的轴向应力随时间变化图

4 结语

1) 无论是无超声波拉丝还是有超声波拉丝,模具的入口角度对拉拔力的影响都是随着模具入口角度的增大,拉拔力先急剧减小,然后趋于稳定,当模具入口角度为13°时拉拔力最小。丝材尺寸、丝的材料、拉拔速度等因素不同,可能最佳入口角度不同,应该根据具体情况重新仿真。

2) 无论是无超声波拉丝还是有超声波拉丝,模具的定径带长度对拉拔力的影响都是整体上随着定径带长度的增加,拉拔力也在增加,当模具定径带长度为0.3 mm时拉拔力最小。模具定径带长度过小,会在拉丝过程中损坏模具,所以模具定径带长度应该在保证强度的前提下尽可能小。

3) 无论是无超声波拉丝还是有超声波拉丝,模具的出口角度对拉拔力几乎都没有影响,研究拉拔力以及设计拉丝模具时不用关心出口角度。

4) 加入超声波以后,平均拉拔力相对于没有加超声波之前减少了一半,可见超声波用于拉丝能产生明显的价值。

参考文献:

- [1] 张德远,辛文龙,姜兴刚,等. 超声加工技术研究趋势[J]. 电加工与模具,2016(A01):11-13.
- [2] 曹凤国,张勤俭. 超声波加工技术的研究现状及其发展趋势[J]. 电加工与模具,2005(S1):25-31.
- [3] 翟福宝,林新波,张质良,等. 有限元模拟在金属塑性成型中的应用[J]. 锻压机械,2000(3):46-48.
- [4] 吴振军. 超声波拉丝的建模与仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [5] 谢水生,李雷. 金属塑性成形的有限元模拟技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2008:109-110.
- [6] 齐海群. 超声振动拉丝相关理论及其实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [7] 黄帅,宋仁伯,杨富强,等. 水箱拉丝机拉丝过程的有限元模拟仿真分析[J]. 武汉科技大学学报,2012,35(6):447-451.
- [8] 谢涛,袁江波,齐海群. 超声拉丝有限元仿真研究[J]. 机械设计与制造,2013(3):92-93.
- [9] MASAHIRO H, MASAHIKO J, SUTASN T, et al. Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003,140(1/2/3):30-35.
- [10] AHMADI F, FARZIN M. Finite element analysis of ultrasonic-assisted equal channel angular pressing[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2014,228(1):1859-1868.

收稿日期:2018-11-27