

铣削内螺纹表面的残余应力仿真分析

张莹莹,金成哲,逢迪

沈阳理工大学机械工程学院

摘要: 螺纹连接应用广泛于各个领域,其表面残余应力严重影响工件表面质量和工件使用寿命,因此对铣削内螺纹加工表面的残余应力研究尤为重要。为研究不同铣削参数对45钢在铣削内螺纹过程中螺纹表面残余应力的影响,利用有限元分析软件建立3D铣削内螺纹的仿真模型,研究铣削过程中内螺纹表面残余应力与切削参数之间的变化规律。采用单因素控制变量法,在保证其它两个切削参数不变的情况下,分析当前切削参数对残余应力的影响。研究结果表明,铣削内螺纹时,应在合理范围内选取较小的切削速度、进给量和切削深度,以降低被加工材料表面残余应力,减小表层金属塑性变形范围,延长工件使用寿命。

关键词: 内螺纹;铣削;残余应力;仿真

中图分类号: TG506;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.08.014

Simulation Analysis of Residual Stress of Internal Thread Surface by Milling

Zhang Yingying, Jin Chengzhe, Pang Di

Abstract: Threaded connection is widely used in various fields, the residual stress on the surface seriously affects the surface quality and service life of the workpiece. Therefore, it is very important to study the residual stress on the surface of milling internal threads. In order to study the influence of different milling parameters on the residual stress of 45 steel thread surface during milling internal thread, by using finite element analysis software, the simulation model of 3D milling internal thread is built, and the variation of residual stress on internal thread surface and cutting parameters during milling is studied. Single factor control variable method is used, while keeping the other two cutting parameters is unchanged, the influence of current cutting parameters on residual stress is analyzed. The results show that when milling internal threads, a small cutting speed, feed and cutting depth should be selected within a reasonable range to reduce the residual stress on the surface of the processed material, reduce the plastic deformation range of surface metal, increase the service life of the workpiece.

Keywords: internal thread; milling; residual stress; simulation

1 引言

在航空航天、船舶和车辆等机械设计制造领域中,螺纹零件扮演着紧固与连接的重要角色。随着机械制造业的快速发展,内螺纹的加工方式从主流的攻丝加工逐渐过渡到铣削加工,铣削加工螺纹具有更好的通用性、更高的切削效率和表面质量等优势^[1]。经过机械切削后卸载、冷却和弹性恢复,会引起工件残余应力趋于平衡,从而导致已加工表面逐步产生微小形变,甚至产生表面微裂纹,严重时影响工件表面质量和工件使用寿命。所以对铣削加工内螺纹加工表面残余应力的研究尤为重要。

国内外很多学者对工件加工表面残余应力做了很多研究。李庆华等^[2]针对刀具对切削工件表面残余应力的影响做了研究,得出无织构刀具在较高切削速度下可使工件表面获得残余压应力,从而提

高工件寿命;郑耀辉等^[3]对2024铝合金铣削加工表面残余应力进行了仿真研究,得出了最优切削参数下的最小表面残余应力;牛赢等^[4]对钛合金纵扭超声铣削残余应力进行了试验研究,提出采用乳化液作为切削液能够提高加工表面残余压应力值;董情焱^[5]对45钢铣削工艺参数对加工表面残余应力的影响做了仿真研究,分析得出切削深度对工件表面残余应力的影响较小;Yixuan Feng等^[6]提出了一种超声振动辅助铣削后残余应力的解析预测模型,得出铣削的轴向深度越大,压缩残余应力越小,较高的超声振动幅度和较高的主轴旋转频率都会产生更大的压缩残余应力;Amir Mahyar Khorasani等^[7]通过神经网络对精密加工中的表面轮廓进行建模,认为提高切削速度和切削液压力范围可以提高螺纹牙顶的表面质量;Jiann-Cherng Su等^[8]提出了一种预测铣削产生残余应力的模型,通过改变切削参数,可以预测因铣削而产生的表面和里层残余应力分布,使用该建模方法可以很好地预测残余应力的大

小和轮廓; Xiaohui Jiang 等^[9]建立了新模型, 定量分析切削力和温度对残余应力产生的影响; Ronghua Zhu 等^[10]结合槽铣削方法, 在试样表面通过加工槽来释放残余应力, 并用光学方法测量释放的位移场, 用有限元方法确定残余应力; Borja Coto 等^[11]认为在极端条件下工作零件的残余应力非常重要, 分析并验证了 4340 钢在不同切削参数下表面残余应力的变化, 得出进给量增大时会产生更大的拉伸残余应力, 切削速度增大时会产生较小的拉伸残余应力。

对铣削加工中的残余应力进行研究分析, 虽取得了一定的成果, 但对于铣削内螺纹加工表面的残余应力研究还处于起步阶段。因此, 本文在诸多学者研究的基础上, 利用有限元分析软件对 45 钢进行铣削内螺纹仿真, 研究内螺纹铣削加工表面残余应力和热应力的变化, 并建立单因素仿真试验, 研究切削参数对铣削内螺纹加工表面残余应力的影响, 得出切削参数对铣削内螺纹表面残余应力影响的变化规律。

2 建立有限元模型

基于 UG 软件建立了铣刀与工件的三维模型, 通过 DEFORM-3D 有限元分析软件进行铣削内螺纹的仿真分析。工件材料为 45 钢, 工件对应圆心角 20°, 内孔直径 96.75mm, 外壁直径 106mm, 轴向高度 12mm。选用六齿螺纹铣刀盘与三角形刀片, 刀具材料为 WC 硬质合金。铣刀盘参数: 最大外径 56mm, 轴向高度 40mm; 刀片参数: 边长 16mm, 刀尖圆弧半径 0.25mm, 轴向高度 3mm, 前角 10°, 后角 7°。材料的 J-C 本构模型相关参数如图 1 所示。

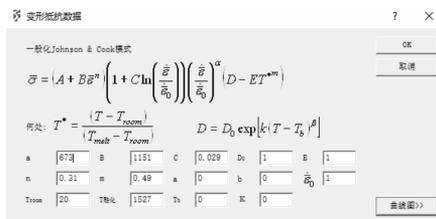


图 1 J-C 本构模型相关参数

刀具及工件的网格划分选择具有 4 个等效节点的四面体网格。将铣刀划分为 40000 个网格, 将刀片按照如图 2a 所示 1 : 0.1 : 0.03 比例细化, 且最大网格与最小网格比例为 2。工件被划分为 80000 个相对网格, 将工件按照如图 2b 所示 1 : 0.01 比例细化, 最大网格与最小网格比例为 6。划分后的刀具与工件网格如图 2 所示。刀具类型选为刚体, 工件类型选为弹塑性体, 并选择剪切摩擦模型。

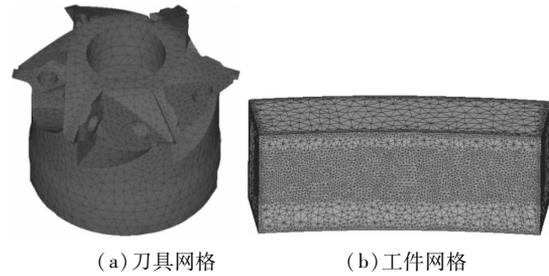


图 2 刀具与工件单元网格划分

3 单因素试验

试验选择单因素控制变量法, 在保证其它两个切削参数不变的情况下, 准确分析当前切削参数对残余应力的影响, 铣削内螺纹仿真分析方案见表 1。

表 1 内螺纹铣削残余应力仿真方案

仿真编号	切削速度 v (m/min)	每齿进给量 f_z (mm/z)	背吃刀量 a_p (mm)
1	70	0.06	1.40
2	80	0.06	1.40
3	90	0.06	1.40
4	80	0.04	1.40
5	80	0.06	1.40
6	80	0.08	1.40
7	80	0.06	1.20
8	80	0.06	1.40
9	80	0.06	1.60

模拟控制参数如图 3 所示, 选取步数 100000 步, 每 50 步保存一次, 时间步长选取 0.000025。牛顿-拉弗森迭代法对于弹塑性体工件材料具有较好的收敛性, 因此选择牛顿-拉弗森迭代法^[12]。



图 3 模拟参数设置

设置好所需参数后, 根据产生的数据文件生成内螺纹铣削仿真模型。提交运算, 开始模拟铣削仿真过程, 运行效果如图 4 所示。完成切削仿真后, 由于残余应力需要进行冷却回弹, 所以需将工件置于室温 20°C 中静置一段时间。

仿真结束后进入后处理阶段, 选择切面选项, 剖开工件截面 (见图 5)。随后选择点数据追踪选项, 在牙底处布置 7 个测点, 且测点与 y 轴平行, 测点放置位置如图 6 所示。因此, 残余应力数值为 y 向应力值。

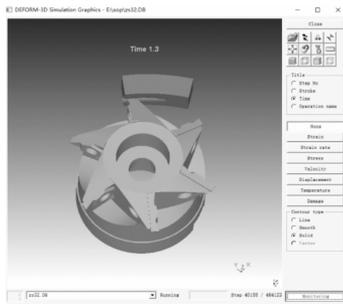


图4 铣削仿真过程

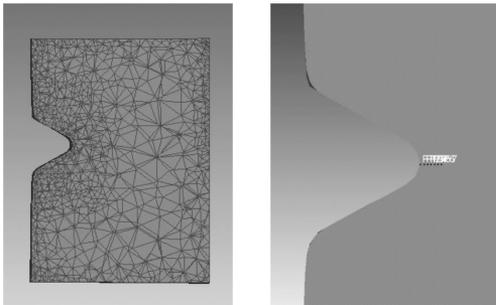


图5 工件剖面

图6 测点布置

4 仿真结果与分析

4.1 切削速度对残余应力的影响

切削速度分别取 $v = 70\text{m/min}$, 80m/min , 90m/min , 每齿进给量 $f_z = 0.06\text{mm/z}$, 切削深度 $a_p = 1.4\text{mm}$ 时, 工件残余应力随切削速度变化的趋势见图7。

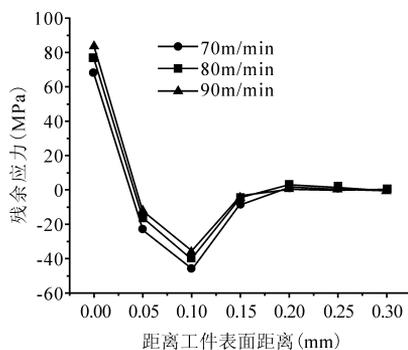


图7 工件表层残余应力随切削速度的变化曲线

如图7所示, 随着切削速度 $v = 70\text{m/min}$ 增至 $v = 90\text{m/min}$ 时, 被加工材料外表面残余拉应力从 $\sigma = 68.2\text{MPa}$ 增至 $\sigma = 83.6\text{MPa}$, 里层最大残余压应力从 $\sigma = -45.4\text{MPa}$ 减至 $\sigma = -36.1\text{MPa}$ 。当距表面深度达到 0.2mm 左右时, 残余应力值趋近于0, 而且随着切削速度增大, 里层残余压应力纵向分布呈减弱趋势。

一方面, 增大切削速度时, 切削温度呈现升高趋势, 在冷却与回弹过程中, 由于表层金属材料散热较快, 里层散热较慢, 从而导致表层与里层温度差增

大, 引起表面金属材料热应力增大, 相比机械应力对表层残余应力的影响, 热应力对表面残余应力的影响占主导作用, 因此表层残余拉应力增大。另一方面, 随着切削速度的增大, 切削力下降, 减小被加工材料受力, 从而使里层残余压应力减小, 残余应力分布层深度降低。

4.2 进给量对残余应力的影响

每齿进给量分别取 $f_z = 0.04\text{mm/z}$, 0.06mm/z , 0.08mm/z , 切削速度 $v = 80\text{m/min}$, 切削深度 $a_p = 1.4\text{mm}$ 时, 工件表层残余应力随每齿进给量变化的趋势见图8。

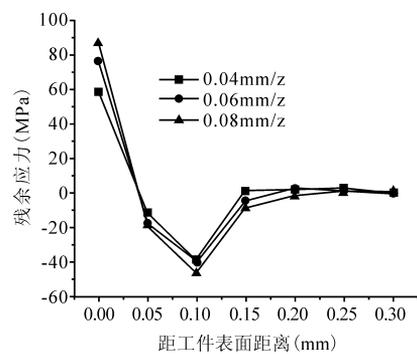


图8 工件表层残余应力随每齿进给量的变化曲线

如图8所示, 随着每齿进给量从 $f_z = 0.04\text{mm/z}$ 增至 $f_z = 0.08\text{mm/z}$ 时, 被加工材料外表面残余拉应力从 $\sigma = 58.5\text{MPa}$ 增至 $\sigma = 87.3\text{MPa}$, 里层最大残余压应力从 $\sigma = -38.6\text{MPa}$ 增至 $\sigma = -46.1\text{MPa}$ 。当距表面深度达 0.25mm 左右时, 残余应力趋近于0, 而且随着每齿进给量增大, 里层残余压应力纵向分布呈扩大趋势。

一方面, 当每齿进给量增大时, 切削温度呈升高趋势, 在冷却与回弹过程中, 由于表层金属材料散热较快, 里层散热较慢, 从而导致表层与里层温度差增大, 引起表面金属材料热应力增大, 因此表层残余拉应力增大。另一方面, 随着每齿进给量增大, 切削力增大, 引起被加工材料受力增大, 从而使里层残余压应力增大, 残余应力分布层深度增加。

4.3 切削深度对残余应力的影响

切削深度分别取 $a_p = 1.2\text{mm}$, 1.4mm , 1.6mm , 切削速度 $v = 80\text{m/min}$, 每齿进给量 $f_z = 0.06\text{mm/z}$ 时, 工件表层残余应力随切削深度变化的趋势见图9。

如图9所示, 随着切削深度从 $a_p = 1.2\text{mm}$ 增至 $a_p = 1.6\text{mm}$ 时, 被加工材料外表面残余拉应力 σ 从 73.5MPa 增至 78.1MPa , 里层最大残余压应力 σ 从 -40.2MPa 增至 -43.1MPa 。当距表面深度达

0.20mm左右时,残余应力趋近于0,而且随着切削深度增大,里层残余压应力纵向分布呈小范围扩大的趋势。

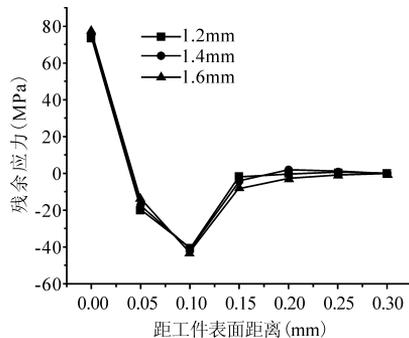


图9 工件表层残余应力随切削深度的变化曲线

一方面,当切削深度增大时,切削温度呈现缓慢升高趋势,引起表层金属材料热应力小幅增大,因此残余拉应力小幅增大;另一方面,随着切削深度的增大,切削力小幅增大,引起被加工材料受力增大,从而使里层残余压应力小幅增大,残余应力分布层深度小幅增加。

5 结语

当切削速度增加时,热应力对表面残余应力的影响作用更大,残余拉应力增大,残余压应力减小,残余应力纵向分布层深度降低。当每齿进给量增加时,表层残余拉应力和残余压应力增大,残余应力纵向分布层深度增加。切削深度对被加工材料表层残余应力的影响较小,当切削深度增加时,表层残余拉应力和残余压应力小幅增大,残余应力纵向分布层深度小幅增加。

通过对铣削内螺纹表面残余应力的仿真分析得到,铣削内螺纹时,应在合理范围内选取较小的切削速度、进给量和切削深度,以降低被加工材料表面残余应力,减小表层金属塑性变形,增加工件使用寿命。

参考文献

- [1] 江爱胜,刘敏,王社权. 高强度材料内螺纹铣削刀具研究[J]. 制造技术与机床,2017(11):79-82,87.
- [2] 李庆华,潘晨,胡恺星,等. 微织构刀具对工件表面残余应力影响的有限元分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(6):5-8.
- [3] 郑耀辉,赵明月,刘娜,等. 2024 铝合金铣削加工表面残余应力仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(7):34-38.
- [4] 牛赢,焦锋,赵波,等. 钛合金 Ti-6Al-4V 纵扭超声铣削残

余应力试验研究[J]. 表面技术,2019,48(10):41-51.

- [5] 董情焱. 45#钢铣削工艺参数对加工表面残余应力影响的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2018.
- [6] Yixuan Feng, Fu-Chuan Hsu, Yu-Ting, et al. Residual stress prediction in ultrasonic vibration-assisted milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5-8):2579-2592.
- [7] Amir Mahyar Khorasani, Ian Gibson, Moshe Goldberg, et al. Investigation on the effect of cutting fluid pressure on surface quality measurement in high speed thread milling of brass alloy (C3600) and aluminium alloy (5083) [J]. Measurement, 2016, 82:55-63.
- [8] Jiann-Cherng Su, Keith A Young, Kong Ma, et al. Modeling of residual stresses in milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(5-8):717-733.
- [9] Xiaohui Jiang, Beizhi Li, Lianfeng Wang, et al. An approach to evaluate the effect of cutting force and temperature on the residual stress generation during milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(5-8):2305-2317.
- [10] Ronghua Zhu, Qi Zhang, Huimin Xie, et al. Determination of residual stress distribution combining slot milling method and finite element approach[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(7):965-970.
- [11] Borja Coto, Virginia García Navas, Oscar Gonzalo, et al. Influences of turning parameters in surface residual stresses in AISI 4340 steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(9-12):911-919.
- [12] 李传民,王向丽,闫华军,等. 金属成形有限元分析实例教程指导[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
第一作者:张莹莹,硕士研究生,沈阳理工大学机械工程学院,110159 沈阳市
First Author: Zhang Yingying, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China
通信作者:金成哲,博士,教授,沈阳理工大学机械工程学院,110159 沈阳市
Corresponding Author: Jin Chengzhe, Professor, School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China