

滚轮参数对滚压件残余应力的数值模拟与研究

■ 崔静伟, 张旭, 钞仲恺, 杜晓宇

表面工程是21世纪工业发展的关键技术之一, 最大的优势是能够制备出优于本体材料性能的表面功能薄层, 赋予材料防腐蚀、耐磨损、抗疲劳等性能。滚压加工作为表面工程加工常见的方法之一, 它是利用金属在常温状态的冷塑性特点, 通过滚压工具对工件表面施加一定的压力, 使工件表层金属产生塑性流动, 来改善和提高工件的最终表面质量和性能, 具有光整和表面强化的双重作用。在工件表层形成残余压应力能使工件的疲劳强度大大提高、疲劳寿命成倍增长, 同时有利于提高工件的抗应力腐蚀能力。因此, 光整滚压加工在满足工件表面光整加工的同时, 使工件表层形成残余压应力层阻碍工件表面疲劳微裂纹的生成和扩展, 对工件是十分有利的。而滚压件残余压应力的大小和滚压硬化层的深度跟滚轮的参数有一定关系。这是因为在滚压加工中, 滚轮作为滚压工具对工件施加滚压力, 并直接与滚压件进行接触。故滚轮的参数将直接影响滚压力大小及滚压工件残余应力的分布情况。因此, 滚轮参数对于塑性变形过程和光整滚压加工的最后结果, 如冷作硬化程度和深度, 及对表面使用性能有着很大

的影响。

目前, 滚压加工所选用的滚轮尚无标准, 关于滚轮参数对滚压件残余应力关系的资料也比较少, 因此本文使用有限元软件MSC.Marc, 对不同的滚轮参数的滚压加工过程进行数值模拟, 并对仿真的结果进行分析, 得出滚轮参数对滚压加工后工件残余应力分布规律。

1. 滚压工艺中滚轮的选择

在滚压加工工艺中, 滚轮是滚压加工的主要工具之一, 也是使滚压工艺取得良好效果的一个重要影响因素。根据生产经验, 用带有圆柱形狭带的滚轮来进行滚压可使被加工零件达到良好的滚压效果, 其滚轮的形状如图1所示。其滚轮参数包括滚轮的直径 d 和狭带的宽度 b 、型面的圆弧半径 R , 这些参数都不同程度地影响着滚轮与工件之间接触面积的大小, 对滚压加工后工件的残余应力分布将产生直接影响。

2. 不同参数滚轮对滚压效果的数值模拟

本文采用有限元软件MSC.Marc, 对滚轮滚压筒形工件的外圆表面的加工过程进行数值模拟。定义滚轮、主轴为刚体, 选

用工件的材料为铝材, 弹性模量 $E=70\text{GPa}$, 泊松比 $\mu=0.3$, 密度 $\rho=2700\text{kg/m}^3$, 网格划分方式为八节点六面体单元。滚压加工件为筒形件, 其工件长度、壁厚、内径分别为4mm、0.5mm、5mm; 芯模直径为5mm, 主轴转速为1200r/min。根据滚压加工的摩擦工况, 设定摩擦因数为0.05。为便于模拟结果的分析与处理, 该模型采用工件和芯模保持静止, 而滚轮进行旋转运动的方式来实现工件与滚轮之间的相对运动。为实现滚轮的公转(绕主轴转动)和自转(绕自身轴转动), 滚轮设有主控制节点和辅助控制节点。建立的三维模型如图2所示。针对不同的滚轮参数变化对滚压件残余应力模拟结果的影响, 在改变某个滚轮参数值时, 其他各参数保持不变。运用有限软件MSC.Marc依次模拟滚轮直径 d 、滚轮狭带宽度 b 、滚轮圆弧半径 R 对滚压件残余应力的影响情况。

通过有限元数值模拟, 该滚压仿真模型实现了滚压变形的效果。滚压件的表面形成了一定的残余压应力和硬化层, 滚压件的尺寸和形状的变化都被实际的滚压试验所验证。因此, 所建立的仿真模型能够真实反映实际的滚

压变形情况。在给定的工件和工艺参数下,通过不断改变滚轮的参数(滚轮直径 d 、滚轮狭带宽度 b 、滚轮圆弧半径 R),发现滚轮参数与滚压件的塑性变形过程和残余应力的分布紧密相关。

(1) 滚轮直径对滚压残余应力分布的影响 在滚压力量为0.01mm,滚轮狭带宽度为0.4mm,圆弧半径0.2mm,摩擦因数为0.05,滚轮直径分别为2mm、5mm、8mm时进行滚压数值模拟,图3、图4分别显示滚轮直径为2mm、5mm、8mm时,滚压后工件的等效应力和工件纵截面沿层深的残余应力云图。图5为滚压件径向残余应力层深分布情况。

通过分析滚压件在不同直径的滚轮滚压后的等效应力云图,结果表明,在滚压力量相同的情况下,滚柱直径加大,滚压力增大,工件的塑性变形增大,工件的变形量和变形区增大。随着滚轮直径由2mm增大为5mm时,工件表面的残余压应力变大,硬化层深度增加,但是随着滚轮直径增大至8mm时,工件表面的残余压应力有所减小,硬化层深度也有所改变。这是因为滚轮直径增大,虽然滚压力变大,但是滚轮与工件的接触面积也变大,而单位滚压力却减小,因而工件表面的残余压应力变小,形成的硬化层深度减小。因此,在滚压加工中,对于一定尺寸的工件,选择滚轮直径过大或过小都不好。滚轮直径较小时,滚压力小,可明显降低滚压件表面粗糙度值,但是未形成明显的强化层;滚轮直径过大时,反而会降低单位滚压力,也会使滚压件表面的强化层变薄。

(2) 滚轮狭带宽度对滚压残余应力分布的影响 在滚压力量为0.01mm,滚轮直径为5mm,圆弧半径为0.2mm,摩擦因数为0.05,滚轮狭带宽度为0.5mm、0.8mm、1.1mm时进行数值模拟,图6、图7分别显示滚轮狭带宽度为0.5mm、0.8mm、1.1mm时,滚压后工件的等效应力和工件纵截面沿层深的残余应力云图,图8为不同狭带宽度参数下滚压件径向残余应力层深分布情况。

比较在不同狭带宽度的滚轮

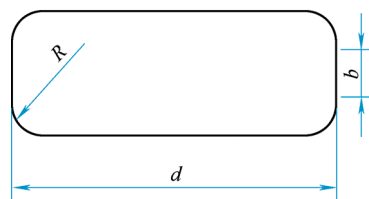


图1 滚轮的形状

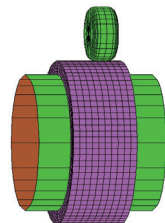


图2 滚压成形有限元模型

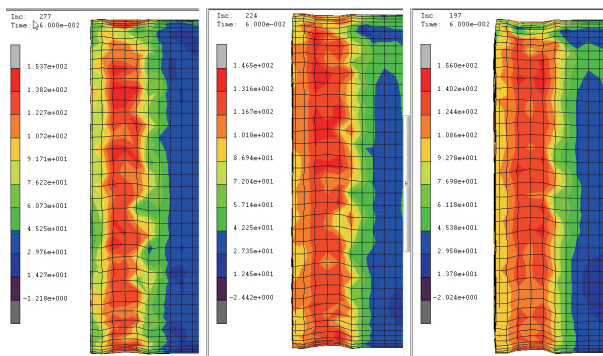


图3 滚轮直径为2mm、5mm、8mm时，滚压件的等效应力分布云

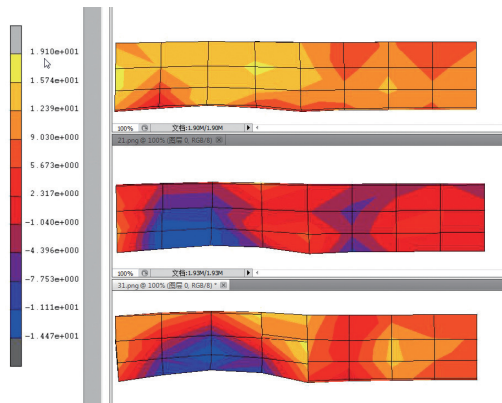


图4 滚轮直径为2mm、5mm、8mm时，滚压件径向残余应力分布云

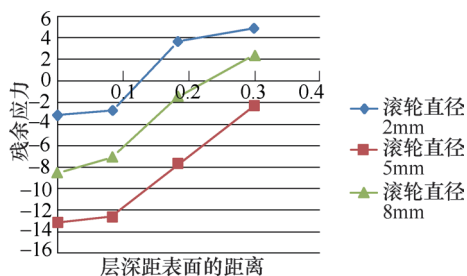


图5 滚轮直径为2mm、5mm、8mm时，滚压件径向残余应力层深分布情况

滚压后工件的等效应力云图，结果表明：随着狭带宽度的增加，滚轮与工件的接触面积变大，工件的塑性变形面积变大，有利于提高加工效率。狭带宽度较小为0.1mm时，工件表面的残余压应力很小，强化层比较浅，随着滚轮狭带宽度增加至0.4mm时，工件表面的残余压应力增加，并形成较深的硬化层，当宽度继续增加为0.7mm时，工件表面形成残余压应力的范围增加，但是硬化层的深度变浅。所以狭带宽度不应取得过大或过小。

(3) 滚轮型面圆弧半径对滚压残余应力分布的影响 在滚压量为0.01mm，滚轮直径为5mm，滚轮狭带宽度为1.2mm，摩擦因数为0.05，滚轮型面圆弧半径为0.1mm、0.3mm、0.5mm时进行数值模拟，图9、图10分别显示滚轮狭带宽度为0.5mm、0.8mm、1.1mm时，滚压后工件的等效应力和工件纵截面沿层深的残余应力云图，图11为不同狭带宽度参数下滚压件径向残余应力层深分布情况。

通过不同圆弧滚轮滚压过程数值模拟，结果表明，圆弧半径愈小，滚轮与工件的接触面积较大，工件的塑性变形面积较大，工件残余应力大，滚压强化效能愈大，在工件滚压后的表面强化层愈深。随着圆弧半径的增加，工件表面的残余应力和硬化层的深度逐渐变小。这是因为当滚压表面的强化层一定时，滚柱的圆弧半径越小，滚压时的滚压力要求较低。所以在相同的滚压量下，圆弧半径小的滚轮对滚压后的工件表面形成的强化层较深。但是，滚柱的圆弧半径较大时，

滚压后滚压件表面所得到的表面粗糙度就愈高，工件的表面质量较好。对于滚压带槽和圆弧的滚

压件，滚轮的圆弧半径还决定于滚压件。因此，滚轮圆弧半径的选择要根据实际生产要求决定。

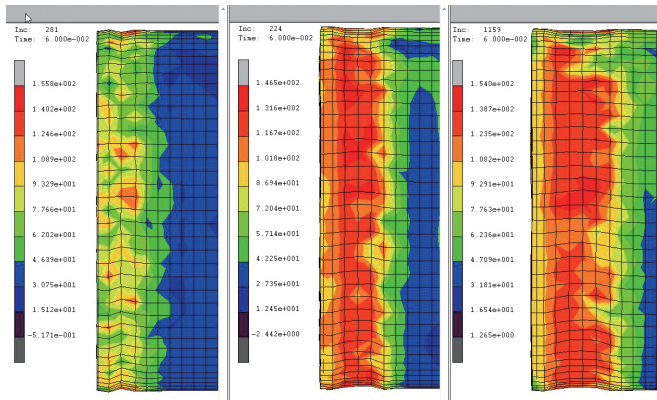


图6 滚轮狭带宽度为0.5mm、0.8mm、1.1mm时，滚压件的等效应力分布云图

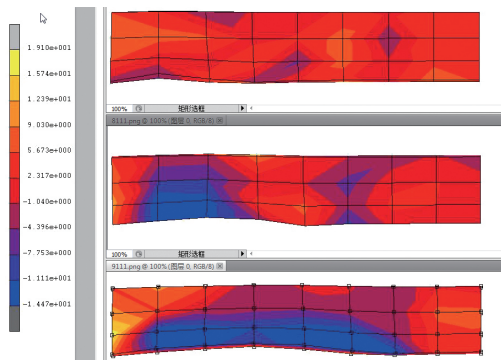


图7 滚轮狭带宽度为0.5mm、0.8mm、1.1mm时，滚压件径向残余应力分布云图

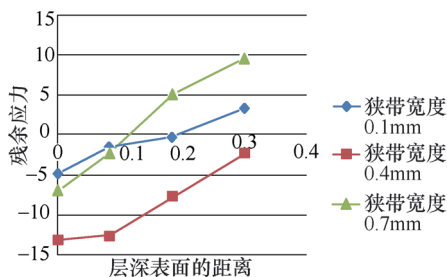


图8 滚轮狭带为2mm、5mm、8mm时，滚压件径向残余应力沿层深分布情况

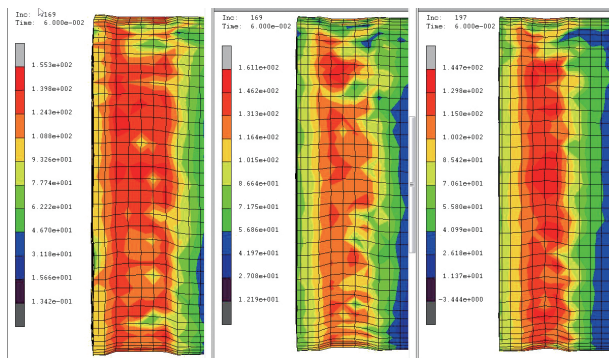


图9 滚轮圆弧半径为0.1mm、0.3mm、0.5mm时，滚压件的等效应力分布云

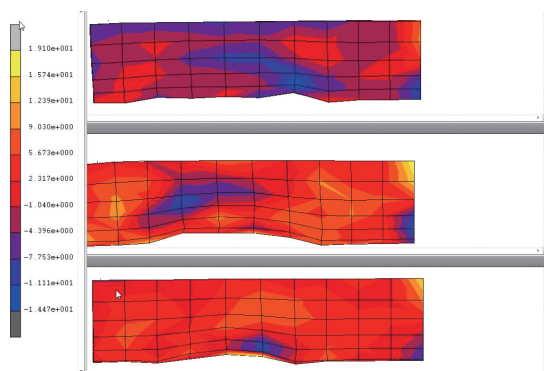


图10 滚轮圆弧半径为0.1mm、0.3mm、0.5mm时, 滚压件径向残余应力分布云

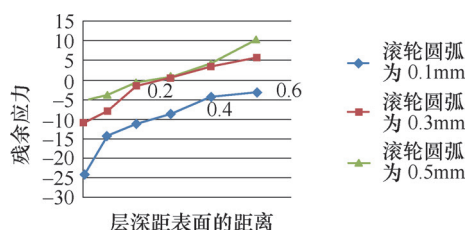


图11 滚轮圆弧半径为0.1mm、0.3mm、0.5mm时, 滚压件径向残余应力沿层深分布情况

3. 结语

(1) 通过数值模拟, 探讨了滚轮结构参数(滚轮直径, 滚轮狭带宽度、滚轮型面圆弧半径)对滚压后工件的残余应力分布的影响规律, 为滚压实际生产中, 节约生产成本, 选取合适的滚轮提供了有力的依据。

(2) 在滚压量相同的情况下, 滚轮直径加大, 滚压力增大, 工件的塑性变形增大, 工件表面的残余压应力增加, 形成显著的硬化层, 但是随着滚轮直径继续增大, 工件表面的残余压应力有所减小, 硬化层深度也有所改变。因此, 在滚压加工中, 对于一定尺寸的工件, 选择滚轮直径过大或过小都不好。滚轮直径较小时, 未形成明显的强化层; 滚轮直径过大时, 反而会降低单位滚压力, 也会使滚压件表面的强化层变薄。

(3) 滚轮的狭带宽度对滚压后工件的滚压效果有显著的影响。滚轮狭带宽度增加, 滚轮与

工件的接触面积变大, 工件的塑性变形面积变大。滚轮的狭带宽度较小时, 滚压件表面的残余压应力很小, 强化层比较浅, 随着滚轮狭带宽度增加, 工件表面的残余压应力增加, 并形成较深的硬化层, 当宽度继续增加时, 滚压件虽形成较大范围的残余压应力区, 但是硬化层的深度变浅。所以对于滚轮狭带宽度的选择, 狭带宽度不应取得过大或过小, 有一个最佳的取值范围。

(4) 在滚压过程中, 滚轮圆弧半径愈小, 滚压强化效能愈大, 滚压件的表面强化层愈深。随着圆弧半径的增加, 工件表面的残余应力和硬化层的深度逐渐变小。但是, 滚轮的圆弧半径较大时, 滚压后滚压件表面所得到的表面粗糙度就愈高, 工件的表面质量较好。因此, 对于滚压件获得滚压强化的效果时, 应选择较小的滚轮半径; 获得较好的光整效果时, 滚压加工中应选择圆弧半径较大的滚轮。

参考文献

- [1]. 施聂杰尔. 精密零件冷压加工 [M]. 袁幼卿, 唐梓荣, 方佩敏, 译. 北京: 机械工业出版社, 1958.
- [2]. 刘荣昌, 薛隆泉, 冯利臻, 等. 曲轴滚压加工的数值模拟 [J]. 内燃机学报, 2008, 26 (3): 283-287.
- [3]. 赵丕承, 等. 冷压光加工 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1965.
- [4]. 王生武, 温爱玲, 金学松, 等. 滚压强化的残余应力的数值仿真及工艺分析[J]. 计算力学学报, 2008, 25 (3): 113-117.
- [5]. 刘洪涛. 精密薄壁回转体零件加工残余应力及变形研究. [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 3-6.
- [6]. 周航, 周旭东, 周宛. 金属零件表面滚压强化技术的现状与展望[J]. 工具技术, 2009, 43 (12): 18-22.
- [7]. 陈火红, 杨剑, 薛小香, 等. 新编Marc有限元实例教程. [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8]. W Beres, et. Finite element based modeling of the low plasticity burnishing process for fatigue property enhancement[C]. Extended abstract presented at 9th USNation-alHCF Conference, Pinehurst, NC, March 2004.
- [9]. Kim W, et al. Fatigue strength and residual stress of groove-rolled products[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 194: 46-51.

作者简介: 崔静伟、张旭、钞仲恺、杜晓宇, 洛阳轴研科技股份有限公司。

MW 20160401