

基于 ANSYS/LS-DYNA 的工程车辆轮辐冲压 工艺优化

李昊, 王强

(济南大学 机械工程学院, 济南 250022)

摘要: **目的** 解决工程车辆轮辐在现有冲压工艺下壁厚的过度减薄问题。**方法** 基于 ANSYS/LS-DYNA 软件, 建立 26.5X24 型轮辐有限元分析模型, 通过分析塑性变形, 探索轮辐壁厚过度减薄的原因。通过正交试验, 分析工艺孔直径和相对模具间隙对壁厚减薄的影响规律。通过改变冲压顺序, 对原有工艺进行改进。**结果** 当工艺孔直径为 200 mm, 相对模具间隙为 1.75 时, 轮辐的最大减薄率由原先 31.30%降低至 6.09%, 工艺孔直径对应的极差值远大于模具间隙对应的极差值。保持相同的工艺参数, 通过改进工艺, 最大壁厚减薄率由 6.09%降至 2.61%。**结论** 工艺孔直径是影响壁厚减薄的主要因素。增大轮辐工艺孔直径或合理安排拉深工艺顺序, 均可有效抑制壁厚减薄, 且在最优的因素水平下, 采用先拉深后翻边的冲压工艺与增大工艺孔直径相比, 抑制减薄的效果更好。

关键词: 轮辐; 壁厚减薄; 数值模拟; 正交试验; 厚板拉深; 冲压工艺

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.007

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0034-06

Stamping Process Optimization of Engineering Vehicle Disk Based on ANSYS/LS-DYNA

LI Hao, WANG Qiang

(School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve the problem of over thinning of engineering vehicle's spoke in existing stamping process. A FEM model of 26.5X24 spoke was established based on ANSYS/LS-DYNA software to explore cause of spoke's over thinning by analyzing plastic deformation. By performing orthogonal test, law of influence of auxiliary hole diameter and relative die on wall thinning was analyzed. Besides, stamping order was changed to improve the existing process. When auxiliary hole diameter of the blank was 200 mm and relative tool gap was 1.75, the maximum thinning rate of spoke decreased from 31.30% to 6.09%, and range value of auxiliary hole diameter was far greater than that of tool gap. Provided with the same process parameters, the maximum wall thinning rate decreased from 6.09% to 2.61% by improving process. The auxiliary hole diameter is the main factor affecting wall thinning, which can be effectively restrained by increasing auxiliary hole diameter of spoke or performing drawing process in reasonable order. In addition, new stamping process has better effects in restraining thinning of spoke provided with the optimal factors and levels.

KEY WORDS: spoke; wall thinning; numerical simulation; orthogonal test; thick blank drawing; stamping process

工程车辆载重量大, 行驶路况恶劣, 车轮常受到较大的载荷, 因此, 对工程车辆车轮的承载能力提出了较高要求。作为车轮的核心部件, 轮辐成形采用厚

板冲压工艺, 其壁厚的均匀程度自然影响到整个车轮的力学性能及寿命。目前生产的工程车辆轮辐, 存在着不同程度的壁厚过度减薄问题。

收稿日期: 2017-05-03

作者简介: 李昊 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密成形技术。

通讯作者: 王强 (1963—), 男, 教授, 主要研究方向为塑性成形工艺与装备。

近年来,国内外学者对轮辐壁厚的减薄问题进行了研究,提出了工艺优化与改进措施。高蔚然等^[1]采用 AUTOFORM 软件对轮辐壁厚减薄进行了数值模拟,对反拉深件和成形件提出了最小厚度的要求。安小军等^[2]采用 ANSYS/LS-DYNA 软件分析了圆形板料在拉深方向的最大应力和板料厚度的变化规律,分析了不同加载方式对板料成形质量的影响。杜勇等^[3]通过有限元分析得到了旋压工艺参数对轮毂内径与壁厚偏差的影响规律。夏琴香等^[4]对不锈钢/铝/不锈钢复合板拉深工艺进行了数值模拟,给出了有利于减小最大减薄率的工艺参数优化组合。黄少东等^[5]通过数值模拟的方法对筒形件的成形进行了正交试验设计。钟茂莲^[6]运用 Dynaform 对高强度汽车钢板冲压成形的主要问题进行研究,并提出了相应的模具对策。陈文琳等^[7]提出了多道次拉深挤切复合成形的工艺方案,设计出了集落料、拉深、修边、整形于一体的复合成形模具。姜志远等^[8]进行了 B550CL 高强钢轮辐反拉深-翻边复合成形损伤开裂研究,发现材料的损伤和壁厚减薄在翻边区域较为严重。尚东等^[9]针对汽车高强钢大通孔车轮轮辐成形工艺进行优化仿真,通过改变模具结构和参数降低了轮辐成形后的减薄量。ABE Y 等^[10]采用 6 道次轮辐冲压工艺,使轮辐底部与法兰圆角处壁厚增加 15%与 10%,提高了钢制轮辐的折弯刚度并减轻了轮辐的质量。MORI K 等^[11]研究了 2 道次镁铝合金杯形件拉深小半径圆角的方法。ABE Y 等^[12]对多道次薄板金属轮辐壁厚减薄分布情况进行了优化,发现优化拉深速率与凸模圆角半径可减小轮辐壁厚减薄。TAN C J 等^[13]采用拼焊板成形,改善了高强板冲压零件圆角部位的减薄问题。ZEIN H 等^[14]运用 ABAQUS 软件对薄板金属深拉深过程中的减薄及回弹问题进行了预测。陈继平等^[15]研究了摩擦因数对圆筒形件拉深成形性能的影响,并给出了不同条件下摩擦因数的参考值。王筱冬^[16]研究了工艺参数对薄板轮辐壁厚变化的影响,得出在一定范围内,增加模具间隙可使拉深件的最大、最小壁厚都呈现先升后降的趋势。

1 26.5X24 型轮辐冲压工艺与产品缺陷

分析对象为 26.5X24 型工程车辆车轮轮辐,车轮

由轮辐与轮辋通过焊接而成,其结构见图 1—2。轮辐采用 11.8 mm 厚板冲压成形,外径为 601 mm,通常采用二次拉深成形工艺(见图 3),生产出的成品件在 R20 圆角处出现了较为严重的减薄现象(见图 4)。该缺陷极大降低了轮辐的疲劳强度,缩短了轮辐的使用寿命。

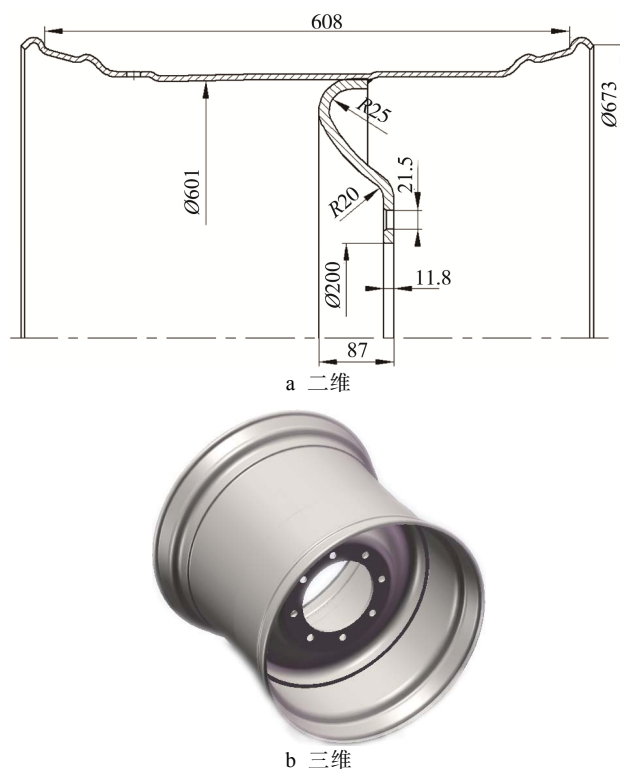


图 1 车轮

Fig.1 Schematic diagram of wheel

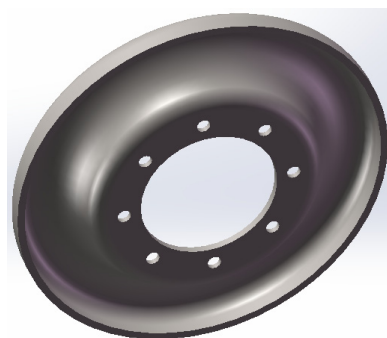


图 2 轮辐

Fig.2 Schematic diagram of spoke

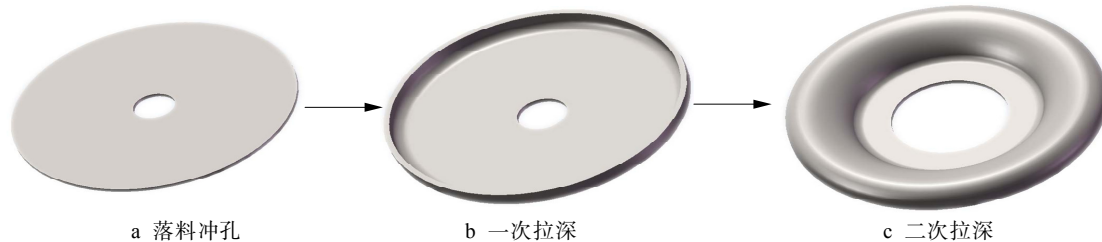


图 3 轮辐成形现有工艺

Fig.3 Schematic diagram of present stamping process for spoke



图4 轮辐壁厚减薄
Fig.4 Wall thinning of spoke

2 冲压过程中的壁厚减薄分析

2.1 有限元分析模型

板料选择 Q420 钢, 弹性模量为 206 GPa, 密度为 7850 kg/m^3 , 泊松比为 0.28; 凸模、凹模选择 Cr12MoV, 弹性模量为 210 GPa, 密度为 7900 kg/m^3 , 泊松比为 0.3。基于现有的生产工艺, 对前后 2 次拉深分别进行了三维几何建模 (见图 5)。板料直径为 700 mm, 一次拉深时, 凸模外径尺寸为 576 mm。二次拉深的模具单边间隙均为 1.1 倍板厚。拉深工艺过程中, 板料与模具之间存在接触, 因此, 三维有限元模型中的接触定义为面-面接触, 摩擦因数设置为 0.05。在一次拉深成形过程中, 凸模匀速下行, 速度为 28.9 mm/s, 行程为 57.8 mm。对于第 2 次拉深,

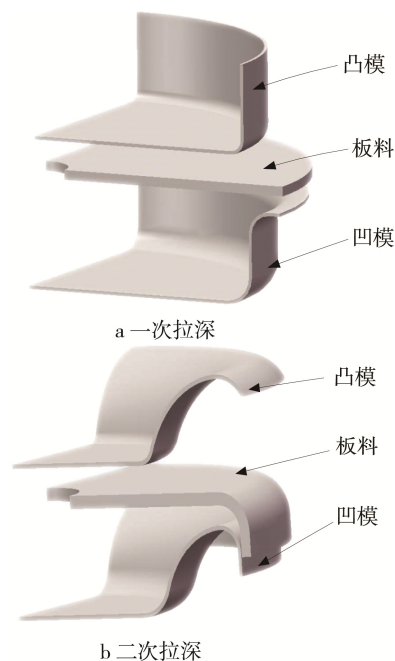


图5 现有工艺几何建模
Fig.5 Geometrical models of existing drawing stages

凸模匀速下行, 速度为 25.37 mm/s, 行程为 76.1 mm。

2.2 结果与分析

通过对轮辐一次拉深过程的数值模拟, 得到的不同行程时的等效应力见图 6。可以看出, 成形后的工件在 R25 圆角处壁厚出现一定程度的减薄, 且板料边缘部分向中心收缩。

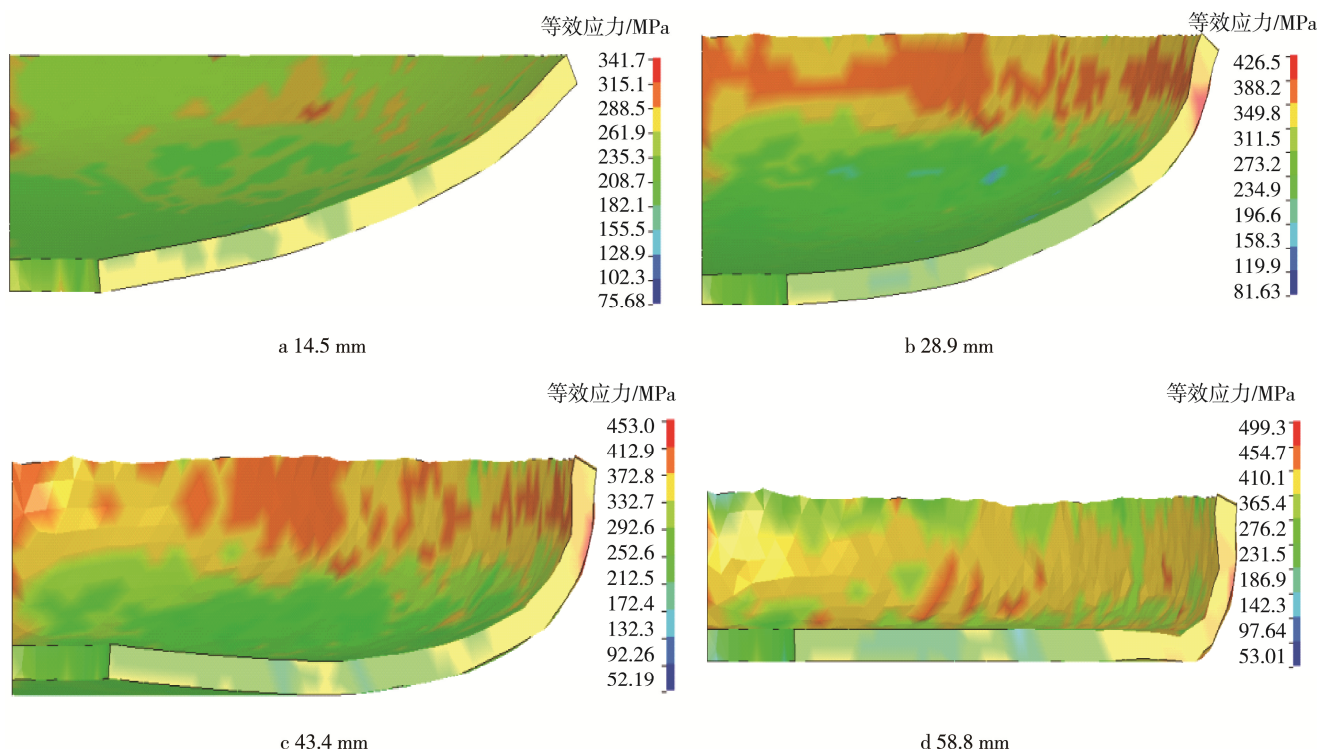


图6 一次拉深过程中不同行程下的等效应力
Fig.6 Equivalent stress diagram in one-time drawing

通过对轮辐第2次拉深的有限元分析,得到了不同行程下的等效应力见图7,可以看到塑性变形区位置的变化。板料在成形过程中,外缘端部有短距

离的上移。在拉深结束后,板料在R20圆角部位出现了明显的减薄,这一现象与图4中的轮辐样件的减薄相吻合。

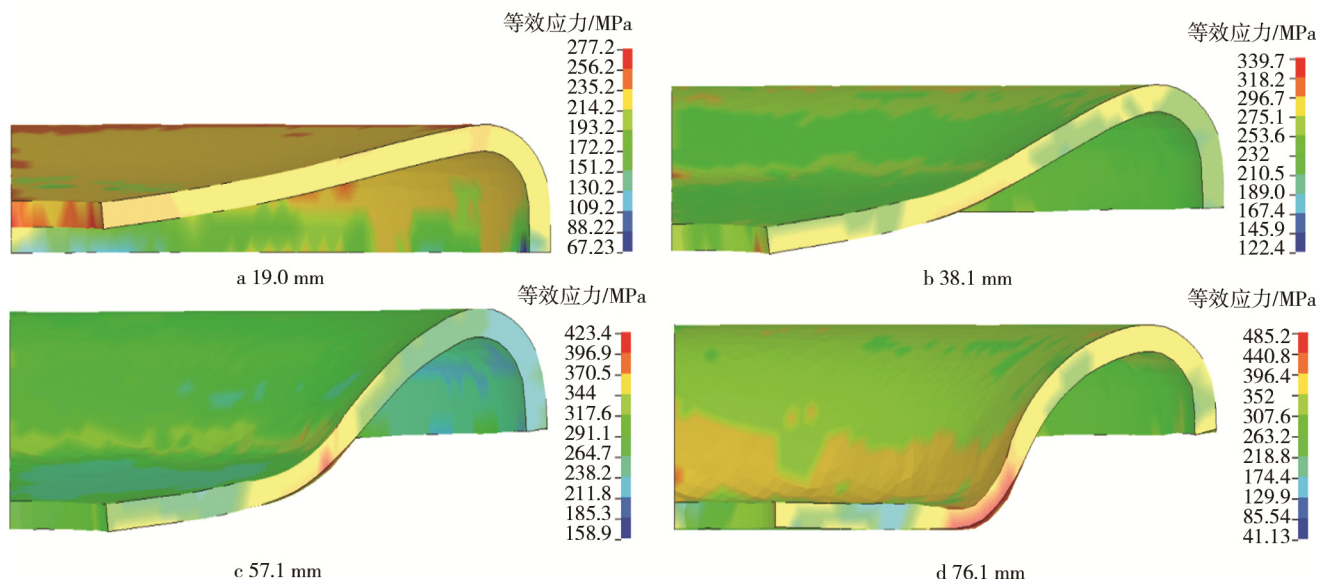


图7 二次拉深过程中不同行程下的等效应力

Fig.7 Equivalent stress diagram in the two-time drawing of different displacement

根据数值模拟得到成形件及样件截面的尺寸,测得的数值模拟与实际轮辐壁厚减薄率曲线见图8,有限元模拟结果与轮辐样件壁厚减薄实测结果基本一致。采用现有工艺进行板料的拉深成形,会导致轮辐底部R20圆角部位出现严重减薄,且减薄率高达31.30%。这反映了该工艺方案存在一定的缺陷,需进行优化与改进。

结合轮辐塑性变形区与减薄率曲线可以推断,板料在拉深成形的过程中,凹模R25圆角部分限制了处在凹模外的板料向中心的流动,所以第2次拉深工艺的本质是拉深与胀形的复合成形,由此导致了轮辐底部R20圆角处出现严重的壁厚减薄。

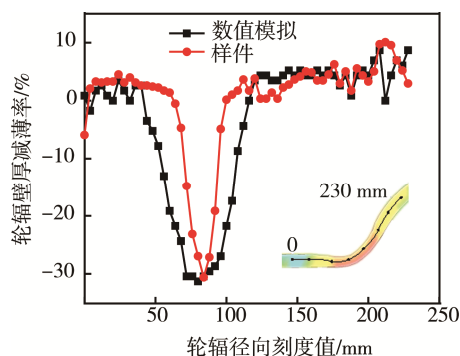


图8 数值模拟与轮辐样件壁厚减薄率曲线对比

Fig.8 Comparison of wheel wall thinning rate between simulation result and production sample

3 冲压工艺优化与改进

3.1 现有冲压工艺的参数优化

在现有的冲压工艺中,落料冲孔后的中心孔起到为后续成形定位的作用,称为工艺孔,其直径大小必然会对壁厚减薄产生影响,模具间隙是模具设计的重要参数。采用正交试验设计的方法,以工艺孔直径、相对模具间隙为自变量,轮辐壁厚最大减薄率与R20圆角附近壁部平均减薄率为目标函数,设计2因素3水平正交试验,水平1—3的工艺孔直径分别为 $\Phi 100$, $\Phi 150$, $\Phi 200$ mm,相对模具间隙分别为1.25, 1.5, 1.75。相对模具间隙是单边间隙与板厚的比值。利用ANSYS/LS-DYNA进行板料成形数值模拟,结果见表1。

根据表中的正交试验结果,进行了极差分析。经计算,工艺孔直径影响轮辐壁厚最大减薄率与壁部平均减薄率的极差 R_j 值分别为53.91与28.16,相对模具间隙影响轮辐壁厚最大减薄率与壁部平均减薄率的极差 R_j 值分别为6.96与5.55。显然,不论针对轮辐壁厚最大减薄率还是壁部平均减薄率,工艺孔直径所对应的极差数值均远大于相对模具间隙对应的极差数值。说明工艺孔直径是影响轮辐壁部减薄的主要因素。此外,第9组因素水平组合下轮辐壁厚最大减薄率与R20圆角附近壁部平均减薄率最小,为最优方案。在该因素水平组

合下进行轮辐拉深成形可有效降低成形过程中的胀形成分,能极大抑制轮辐壁厚减薄缺陷。

表 1 正交试验安排及模拟结果

Tab.1 Orthogonal test arrangement and simulation results

序号	工艺孔直径/mm	相对模具间隙	轮辐壁厚最大减薄率/%	壁部平均减薄率/%
1	Φ100	1.5	26.09	11.91
2	Φ200	1.25	9.57	1.54
3	Φ150	1.5	11.30	1.87
4	Φ150	1.75	11.30	1.57
5	Φ100	1.75	25.22	7.79
6	Φ150	1.25	13.91	1.97
7	Φ100	1.25	26.09	12.58
8	Φ200	1.5	7.83	1.40
9	Φ200	1.75	6.09	1.18

3.2 冲压工艺的改进

由于现有工艺在第 2 次拉深过程中不可避免的存在胀形成分,这是产生壁厚减薄的重要因素,因此,提出了先拉深后翻边的新工艺方案,其成形过程见图 9。

为验证新工艺对抑制壁厚减薄的有效性,采用 ASNSYS/LS-DYNA 软件进行模拟。模具材料参数、凸模下行速度及行程均按照前述现有工艺进行设置,一次拉深几何模型见图 10a,压边圈固定不动且模具形状尺寸依轮辐形状尺寸而定。翻边几何模型见图 10b,挡板与凹模夹住板料固定不动,凸模下行进行翻边成形。

为更好地反映出新工艺对板料成形的影响,分别选取第 7 组(最差因素水平组合)与第 9 组(最优因素水平组合)因素水平参数进行数值模拟,绘制出相应的轮辐壁厚减薄率曲线见图 11,2 组试验条件下最大减薄率与 R20 圆角附近壁部平均减薄率的数据对比见表 2。可以看出,工艺改进后轮辐壁厚减薄率较



图 9 轮辐成形新工艺

Fig.9 Schematic diagram of new process for spoke stamping

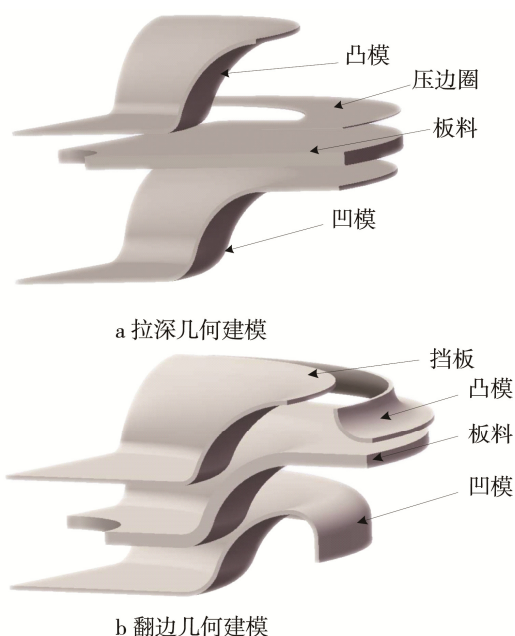


图 10 新工艺几何建模

Fig.10 Advanced geometrical model

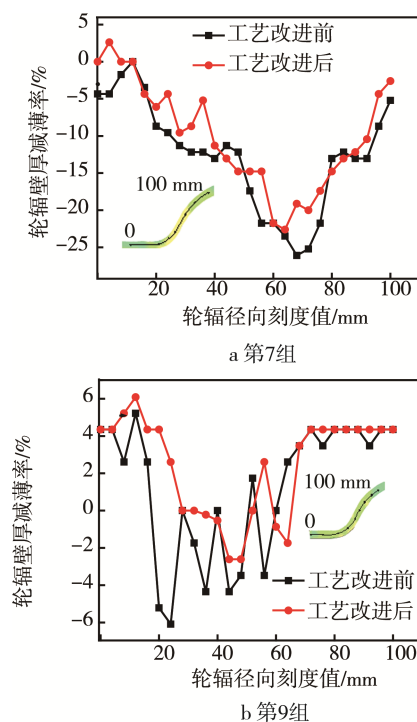


图 11 最差与最优配比下工艺改进前后轮辐壁厚减薄率曲线对比
Fig.11 Comparison of wall thinning rate based on advanced and present process in two extreme situations

表 2 最大减薄率与轮辐 R20 圆角壁部平均减薄率
Tab.2 The maximum thinning rate and average thinning rate at the R20 corner of spoke

试验序号	最大减薄率/%		平均减薄率/%	
	现有工艺	新工艺	现有工艺	新工艺
7	26.09	22.61	12.58	10.10
9	6.09	2.61	1.18	0.31

改进前有明显降低,表明新工艺对抑制轮辐壁厚减薄有着显著的效果。

4 结论

基于 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了 26.5X24 型轮辐有限元分析模型,通过数值模拟,得出以下结论。

- 1) 轮辐现有冲压工艺中二次拉深的本质是拉深与胀形的复合成形,胀形是导致轮辐壁厚减薄的主要原因。
- 2) 在轮辐的成形过程中,板料的工艺孔直径与相对模具间隙对轮辐壁厚减薄有着重要的影响,且工艺孔直径与相对模具间隙越大,越有利于抑制轮辐壁厚的减薄。轮辐工艺孔直径为影响壁部减薄的主要影响因素。
- 3) 采用先拉深后翻边的冲压新工艺,可有效降低轮辐壁厚减薄率。

参考文献:

[1] 高蔚然,方刚,张小格. 钢制车轮轮辐冲压成形的有限元模拟[J]. 冲压, 2010, 45(3): 45—49.
GAO Wei-ran, FANG Gang, ZHANG Xiao-ge. The Finite Element Simulation of Stamping Process for Steel Wheel Spoke[J]. Stamping, 2010, 45(3): 45—49.

[2] 安小军,谢桂兰,刘新. 基于 ANSYS /LS-DYNA 的板料拉深数值模拟研究[J]. 现代制造工程, 2007(1): 66—69.
AN Xiao-jun, XIE Gui-lan, LIU Xin. Numerical Simulation of Sheet-metal Deep Drawing with ANSYS /LS-DYNA[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007(1): 66—69.

[3] 杜勇,田野,刘雨生,等. 工艺参数对汽车轮毂内径与壁厚偏差的影响[J]. 精密成形工程, 2016, 8(3): 45—51.
DU Yong, TIAN Ye, LIU Yu-sheng, et al. Process Parameters Impact on the Automotive Hub Inner Diameter and Wall Thickness Deviation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(3): 45—51.

[4] 夏琴香,熊盛勇,潘兴毅,等. 不锈钢/铝/不锈钢复合板拉深工艺及有限元数值模拟[J]. 精密成形工程, 2016, 8(2): 37—42.
XIA Qin-xiang, XIONG Sheng-yong, PAN Xing-yi, et al. Deep-drawing Process and Finite Element Numerical Simulation for Stainless Steel/Aluminum/Stainless Steel Composite Sheet[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(2): 37—42.

[5] 黄少东,张志明,赵志翔,等. 基于数值模拟的筒形件成形正交试验法优化设计[J]. 精密成形工程, 2012,

4(5): 44—47.
HUANG Shao-dong, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Zhi-xiang, et al. Orthogonal Experimental Optimization Design for Cylinder Shell Forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(5): 44—47.

[6] 钟茂莲. 高强度汽车钢板冲压成型的主要问题及模具对策[J]. 精密成形工程, 2014, 6(3): 20—24.
ZHONG Mao-lian. Key Problems of High-Strength Steel in Stamping Forming Process and Corresponding Die Countermeasures[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(3): 20—24.

[7] 陈文琳,路遥,彭李静,等. 多道次拉深复合成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2011, 3(1): 23—26.
CHEN Wen-lin, LU Yao, PENG Li-jing, et al. Research on Multi-stage Compound Forming Process of Deep Drawing Parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(1): 23—26.

[8] 姜志远,刘郁丽,杨合,等. B550CL 高强钢轮辐反拉深-翻边复合成形损伤开裂研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(3): 71—75.
JIANG Zhi-yuan, LIU Yu-li, YANG He, et al. Research about Flange Cracking in the High-strength Steel Spokes Forming Process[J]. Material Science & Technology, 2015, 23(3): 71—75.

[9] 尚东,单颖春,刘献栋,等. 汽车高强钢大通风孔车轮轮辐成形工艺优化仿真[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(6): 7—11.
SHANG Dong, SHAN Ying-chun, LIU Xian-dong, et al. Optimization and Simulation on Forming Process of Automotive High-strength Steel Wheel Spoke with Large Vents[J]. Computer Aided Engineering, 2015, 24(6): 7—11.

[10] ABE Y, MORI K, ITO T. Multi-stage Stamping Including Thickening of Corners of Drawn Cup[J]. Procedia Engineering, 2014, 55(637): 148—152.

[11] MORI K, NISHIJIMA S, TAN C J. Two-stage Cold Stamping of Magnesium Alloy Cups Having Small Corner Radius[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(10): 767—772.

[12] ABE Y, MORI K, EBIHARA O. Optimization of the Distribution of Wall Thickness in the Multistage Sheet Metal Forming of Spokes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125/126(1): 792—797.

[13] TAN C J, ABE Y, MORI K, et al. Forming of Tailor Blanks for Increase In Wall Thickness at Corner of Stamped High Strength Steel Products[J]. Steel Research International, 2010, 81(9): 833—836.

[14] ZEIN H, SHERBINY M E, ABD-RABOU M, et al. Thinning and Spring Back Prediction of Sheet Metal in the Deep Drawing Process[J]. Materials & Design, 2014, 53(1): 797—808.

[15] 陈继平,钱健清,李胜祗. 摩擦系数对圆筒形件拉深成形性能的影响[J]. 锻压技术, 2011, 36(5): 36—38.
CHEN Ji-ping, QIAN Jian-qing, LI Sheng-zhi. Influence of Different Coefficients on Deep Drawing Performance of Cylinder Cup[J]. Forging & Stamping Technology, 2011, 36(5): 36—38.

[16] 王筱冬. 工艺参数对拉深件壁厚变化的影响研究[J]. 榆林学院学报, 2015, 25(2): 8—11.
WANG Xiao-dong. Effect of Process Parameters on the Wall Thickness of Components in Drawing Process[J]. Journal of Yulin University, 2015, 25(2): 8—11.