

GH5188 密排孔薄板滚弯成形孔变形特征分析

赵刚要, 金郴柏, 张冉阳, 成一博, 何 龙, 郭正华

(南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

摘 要: 在解决了高温合金 GH5188 密排孔薄板三辊非对称滚弯成形有限元建模中的材料模型、几何模型、网格划分等关键技术问题后, 建立了密排孔薄板三辊非对称滚弯三维有限元模型, 并实验验证了该有限元模型的可靠性。基于获得的仿真结果和理论分析, 提出了密排孔薄板滚弯成形孔变形的定量表征方法, 分析了密排孔薄板三辊非对称滚弯成形过程中孔的变形规律。结果表明: 孔变形后, 外表面孔的扩张量略大于内表面孔的压缩量, 在滚弯过程中孔的变形量有轻微波动, 略有增大; 沿成形件同一轴向的孔的变形量差值极小; 沿成形件同一周向上的孔的变形量是波动变化的, 但差值很小。

关键词: GH5188; 密排孔薄板; 三辊非对称滚弯; 孔变形

中图分类号: TG333.2⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)07-2521-07

新一代航空发动机如 F119 等的主燃烧室火焰筒、加力燃烧室隔热屏、尾喷管隔热屏等冷却构件由大量开孔的回转体零件制造而成。而这些由密排孔薄板滚弯成形的回转体零件在成形过程中孔会发生变形。而孔的成形精度与冷却构件的冷却效果密切相关。因此研究密排孔薄板弯曲成形孔变形特征有重要意义。

目前, 研究者们对板材弯曲成形做了一定的研究。赵刚要等^[1]对高温合金 GH4169 薄壁 W 形圆环多道次滚压成形进行了系统的分析, 进而提出了不均匀变形度的表征方法, 研究获得了摩擦对高温合金复杂截面薄壁圆环多道次滚压成形不均匀变形的影响规律。韩廷状等^[2]对镁合金板材进行不同累积应变的连续弯曲变形及退火处理, 研究了镁合金板材显微组织与力学性能的变化。鲁凯举等^[3]研究了 TC4 钛合金在三点弯曲加载下的超高周期疲劳破坏行为。胡智华等^[4]通过研究型材与滚轮之间的预留间隙等对 2 形型材四轴滚弯中斜弯曲的影响, 有效地解决了 2 形型材滚弯的斜弯曲问题。高亚伟等^[5]研究了 GH5188 钴基高温合金生产加工过程中的组织演变。李光俊等^[6]研究了薄壁纯钛管在不同弯曲半径和不同材料性能下的多缺陷约束数控弯曲成形性能, 发现升高温度可以提高其弯曲抗皱性能。付泽民等^[7,8]提出一种将解析数学模型和有限元模型结合起来的方法来研究三辊滚弯成形过程。利用两模型分别定量求解及模拟分析了内辊下压加载位移量与板料弯曲回弹半径之间的非线性关系。周迟等^[9,10]

基于多道次滚弯成形过程, 推导出了板料在加载和卸载过程中弯矩和曲率的关系, 研究了滚弯道次、板厚对成形力和驱动扭矩的影响规律。王艳等^[11-13]分别建立了三辊对称、三辊非对称和四辊滚弯有限元模型。通过结合三辊对称滚弯模型和回弹理论模型, 分析了工艺参数对板材回弹的影响规律; 通过对比三辊非对称和三辊对称滚弯模型, 分析了变形区应力场、卷制力等的变化规律; 通过四辊滚弯模型, 分析了摩擦力和滚弯道次对滚弯成形的影响。龚发云等^[14]就非对称式三辊弯板机板材滚弯成形时的几何参数展开计算, 利用板材弹复前后曲率半径间的关系, 提出了把上辊进给量与板材成形曲率半径间的指数函数关系作为非对称式三辊弯板机滚弯数学模型的概念。Salem Jamel 等^[15]针对非对称三辊弯曲工艺建立了预测轧辊弯曲力、残余应力和弯曲过程功率的解析模型。研究了工艺参数对轧辊弯曲力、残余应力和弯曲过程功率的影响规律。张志强等^[16,17]设板料变形区的曲率相等, 建立了非对称式三辊卷板机侧辊圆心坐标与滚弯成形半径的关系。Feng 等^[18]研究了三辊非对称滚弯过程中侧辊位置的预测问题。并建立了该成形过程的有限元模型, 计算结果与试验结果吻合较好。

总的说来, 对于板材的滚弯成形, 各方面的研究都很多。但对于特殊结构板材, 例如密排孔薄板, 到目前为止, 对其滚弯成形的研究还未见报道。含有多个开孔的密排孔薄板滚弯成形是一个复杂塑性成形过

收稿日期: 2020-08-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51665041); 江西省自然科学基金青年基金重点项目 (20192ACBL21049); 江西省重大科技研发专项 (20194ABC28001); 江西省教育厅青年科学基金 (GJJ190530)

作者简介: 赵刚要, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83863028, E-mail: gangyaozhao@126.com

程。滚弯过程中极易产生诸如：孔的严重变形，曲率变化不均匀，扭曲、扭转，弯曲回弹等缺陷，导致密排孔薄板滚弯成形精度很难达到要求。因此，研究密排孔薄板三辊非对称滚弯成形过程具有重要价值。

本文针对密排孔薄板三辊非对称滚弯成形工艺过程，采用理论分析、数值模拟和实验研究有机结合的研究方法，建立密排孔薄板三辊非对称滚弯成形有限元模型，基于有限元软件 ABAQUS，并结合三辊非对称滚弯成形实验，对有限元模型的可靠性进行验证。通过数值模拟分析密排孔薄板滚弯成形孔的变形规律。

1 三辊非对称滚弯工艺

板材三辊非对称滚弯成形原理示意图如图 1 所示。在压弯阶段，上辊和下辊夹持板材固定，在侧辊沿倾角 θ 向上位移的作用下使板材弯曲，通过控制侧辊的位移量来控制板材的成形半径。板材压弯后，进入连续滚弯阶段，下辊作为主动辊，侧辊和上辊作为从动辊，板材在上辊和下辊的作用力和摩擦力的连续加载下，通过辊轴，产生塑性弯曲变形。

2 有限元模型

2.1 有限元模型的建立

2.1.1 材料模型

本研究所用材料为高温合金 GH5188，通过金属材料单向拉伸试验获得了其基本力学性能参数，如表 1 所示。

GH5188 薄板真实应力-应变曲线如图 2 所示。由图可知，塑性变形部分近似幂指数曲线，所以采用幂指数型弹塑性硬化模型来表征 GH5188 密排孔薄板三辊

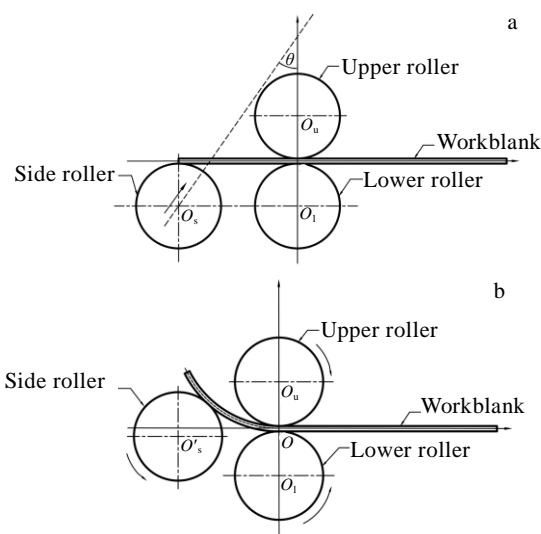


图 1 压弯阶段和滚弯阶段的三辊非对称滚弯示意图

Fig.1 Diagram of asymmetric three-roll bending: (a) bend phase and (b) roll bending phase

表 1 GH5188 合金力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of GH5188 sheet

Poisson's ratio, ν	Young's modulus, E/GPa	Yield strength, $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	Tensile strength, σ_b/MPa
0.28	237	450	1022

非对称滚弯过程中材料的真实应力-应变关系。

2.1.2 几何模型及加载条件处理

在滚弯过程中，辊轴的变形可忽略不计，将其设定为刚体，辊轴半径 $R_u=R_l=R_s=15\text{ mm}$ ，侧辊初始位置与下辊中心距 $a=32\text{ mm}$ 。板材厚度 t 为 1.2 mm ，宽度为 140 mm ，孔直径为 4 mm ，孔间距为 20 mm 。压弯时，侧辊沿倾角 $\theta=20^\circ$ 斜向上进给。连续滚弯时，下辊作为主动辊，上辊和侧辊为从动辊。

2.1.3 接触定义

辊轴与板材间的接触采用 surface-to-surface 接触类型，三辊轴与板材间接触对把刚体辊轴外表面定义为主面，而与辊轴接触的板材表面定义为从面。接触属性采用罚函数摩擦模型。

2.1.4 网格划分

对于滚弯成形过程产生大位移、大变形的密排孔板材，采用三维 8 节点减缩积分体单元 C3D8R，并沿厚度方向将板材网格划分为 5 层。整个密排孔薄板节点数为 108 978 个，单元数为 80 640 个。对于离散刚体的辊轴则都采用 R3D4。网格划分如图 3 所示。

2.1.5 三维有限元模型

基于材料本构、几何模型、加载条件、接触定义和网格划分等关键问题解决后建立了密排孔薄板三辊非对称滚弯三维有限元模型，如图 4 所示。

2.2 模型验证

2.2.1 理论评估

GH5188 密排孔薄板三辊非对称滚弯成形过程中动能 W_k 与内能 W_l 的比值曲线如图 5 所示。由图可知，在板材滚弯成形稳态阶段，板材的动能与内能的比值变

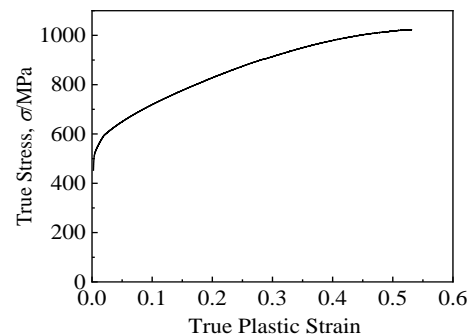


图 2 GH5188 薄板真实应力-塑性应变曲线

Fig.2 True stress-true plastic strain curve of GH5188 sheet

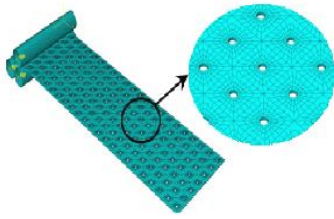


图 3 网格划分

Fig.3 Mesh generation

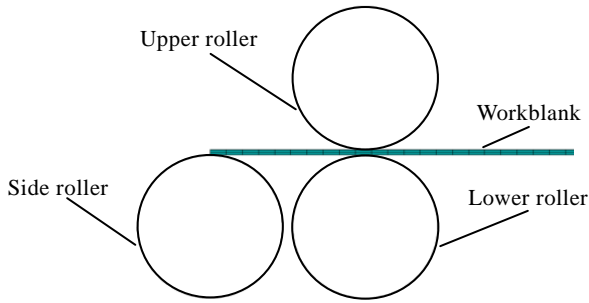


图 4 密排孔薄板三辊非对称滚弯有限元模型

Fig.4 FE model of the sheet with densely hole in asymmetric three-roll bending

化非常小且始终小于 0.05,即动能只占内能的非常小的一部分,因此符合准静态过程^[19],从而可以初步判定所建立的 GH5188 密排孔薄板三辊非对称滚弯三维有限元模型是可靠的。

2.2.2 实验验证

为了验证建立的密排孔薄板三辊非对称滚弯三维有限元模型的可靠性,在 ABAQUS/Explicit 平台进行了数值模拟,采用 OPTIMUM Drei-Rundbie gemaschine BM3 卷板机进行了滚弯实验。实验和模拟条件保持一致。即材料为 GH5188,其余条件见表 2。

数值模拟仿真结果与实验结果对比图如图 6 所示。由图可知,模拟与实验所得结果吻合良好。

为进一步验证模型的可靠性,在加工后的板材的成

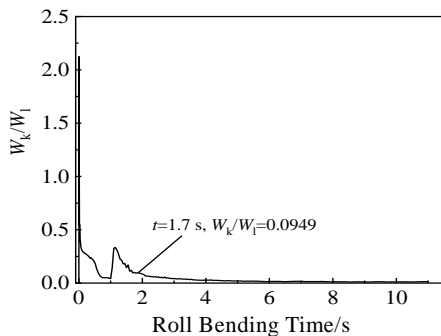


图 5 动能与内能比值曲线

Fig.5 Curve of ratio of kinetic energy to internal energy (W_k/W_i)

表 2 仿真过程中的主要工艺参数

Table 2 Main parameters of the simulation process

Parameter	Value
Feed movement of side roller/mm	8
Revolution of lower roller/r s ⁻¹	2
Friction coefficient of lower roller	0.2
Friction coefficient of upper roller	0.2
Friction coefficient of side roller	0.1

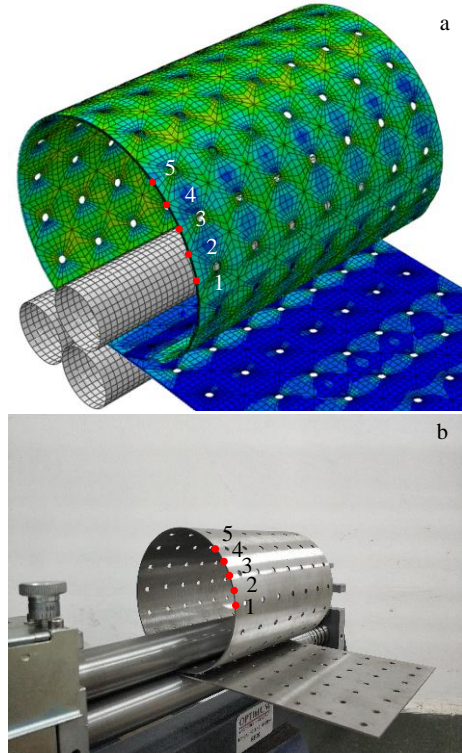


图 6 密排孔薄板滚弯仿真结果实验结果对比

Fig.6 Comparison between simulation (a) and experiment (b) results of the sheet with densely holes after roll bending

形区上用卡尺测量 5 个位置(如图 6b 所示)的成形半径;对有限元仿真成形后的结果在相应 5 个位置(如图 6a 所示)利用节点坐标计算成形半径。其结果如图 7 所示。

从图中可以看出,有限元仿真各位置的成形半径与卷板机弯卷加工后的半径相差很小。有限元模型的成形有较高的精度,验证了有限元模型可靠性,采用本有限元模型得到的仿真数值结果是可靠的。

误差产生的原因主要有:第 1,本文假设板材材料为各向同性,且忽略板材自重及辊轴的弹性变形对滚弯成形的影响。第 2,板材滚弯后会回弹,使半径变大;第 3,有限元模型与实验滚弯过程中的边界条件(如辊轴与板材的接触属性等)有差别。但该模型还是有着较高可靠性。

3 孔的变形

3.1 孔变形量表征

含有多个密排孔薄板滚弯成形孔的变形程度是密排孔板材成形质量的关键。为了定量表征孔的变形，在成形段内任取一开孔，分别取出开孔内表面和外表面各节点的坐标。对节点的三维坐标进行最小二乘法平面拟合以获取投影平面。将节点投影到该平面上，并进行坐标系转换获得投影二维点坐标^[20]，利用绘图软件 origin 对各点坐标进行椭圆拟合，求出其长轴和短轴。将求出的长轴和短轴与板料成形前孔的半径作对比（如图 8 所示），以此来反映孔的变形程度。

3.2 GH5188 密排孔薄板在连续滚弯阶段的应力-应变分布特征

3.2.1 应力场分布特征

图 9 为 GH5188 密排孔薄板滚弯成形后等效应力分布云图。由图可知，板材滚弯成形后，最大等效应力为 654.6 MPa，且较大的等效应力区主要分布在成形板材的开孔边缘附近沿滚弯件轴线方向的两侧。

图 10 为滚弯成形件、滚弯成形件外表面与内表面的等效应力极大值随滚弯进程的变化曲线。由图可知，滚弯成形件等效应力极大值在滚弯过程中处于轻微

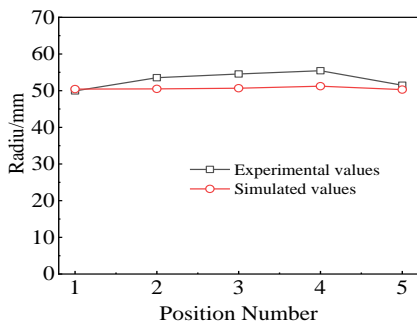


图 7 各位置成形半径仿真结果与滚弯实验结果对比

Fig.7 Comparison between experiment and simulation results of forming radius of each position

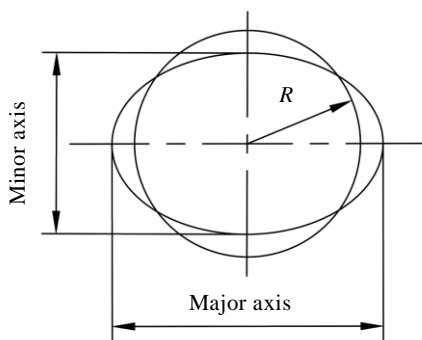


图 8 孔变形前后对比

Fig.8 Comparison of hole shape before and after deformation

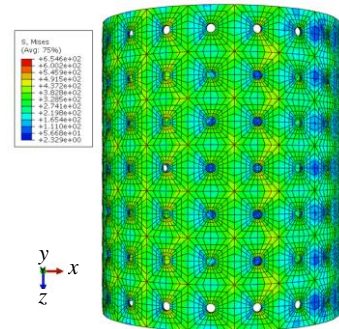


图 9 GH5188 密排孔薄板滚弯成形后等效应力分布云图

Fig.9 Equivalent stress distribution cloud map of GH5188 sheet with densely holes after roll bending

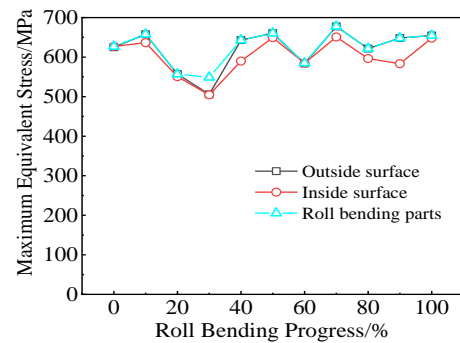


图 10 等效应力极大值随滚弯进程的变化曲线

Fig.10 Change curves of maximum equivalent stress with the progress of roll bending

波动状态；滚弯成形件外表面的等效应力极大值始终大于内表面，且滚弯成形件等效应力极大值基本处于外表面。

3.2.2 等效应变分布特征

图 11 为 GH5188 密排孔薄板滚弯成形后等效应变分布云图。由图可知，等效应变较大区域分布在板材的开孔边缘附近的沿滚弯件轴线方向两侧，呈扇形状，且由扇形中心向外等效应变逐渐减小。

图 12 为滚弯成形件、滚弯成形件外表面与内表面的等效应变极大值随滚弯进程的变化曲线。由图可知，滚弯件等效应变极大值在滚弯起始和结束段明显增大，中间过程较平稳，总体呈增大态势。滚弯成形件外表面的等效应变极大值始终大于内表面，且滚弯成形件等效应变极大值基本处于外表面。

3.3 GH5188 密排孔薄板滚弯成形中孔变形特征分析

3.3.1 滚弯过程中的孔变形特征

取成形件上的孔作为研究对象，孔原本直径为 4 mm。根据前文所述孔变形量表征方法，该孔的变形量，即该孔的投影椭圆的长轴与短轴长度随滚弯进程的变化曲线如图 13 所示。

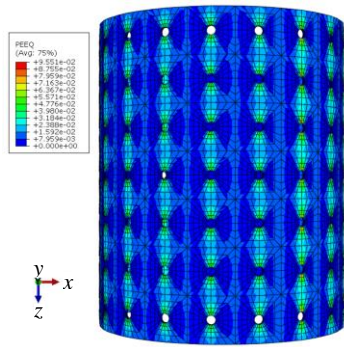


图 11 GH5188 密排孔薄板滚弯成形后等效应变分布云图

Fig.11 Equivalent strain distribution cloud map of GH5188 sheet with densely holes after roll bending

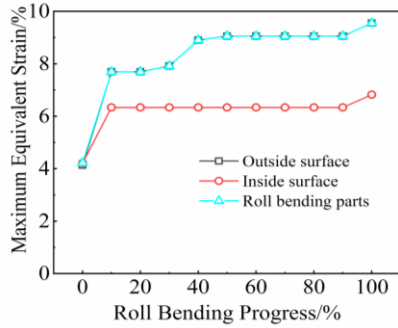


图 12 等效应变极大值随滚弯进程的变化曲线

Fig.12 Change curves of maximum equivalent strain with the progress of roll bending

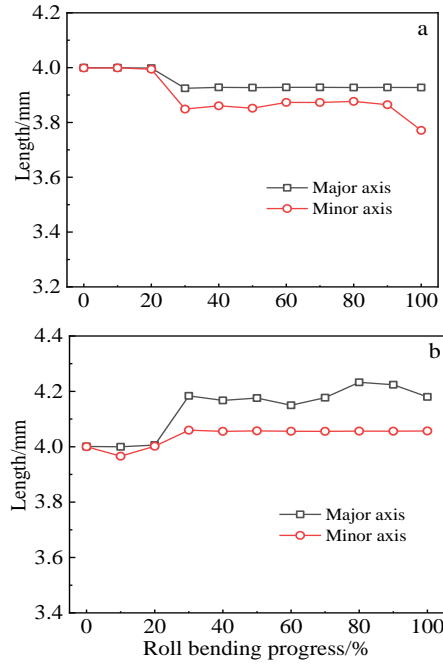


图 13 内表面和外表面孔变形量随滚弯进程的变化曲线

Fig.13 Change curves of hole deformation with the progress of roll bending: (a) inside surface and (b) outside surface

由图可知, 在滚弯进程初期, 当该孔位置还没有到达滚弯阶段时, 孔有轻微变形; 当该孔在通过辊轴滚弯时, 孔的变形量迅速变大, 成形件外表面孔是扩

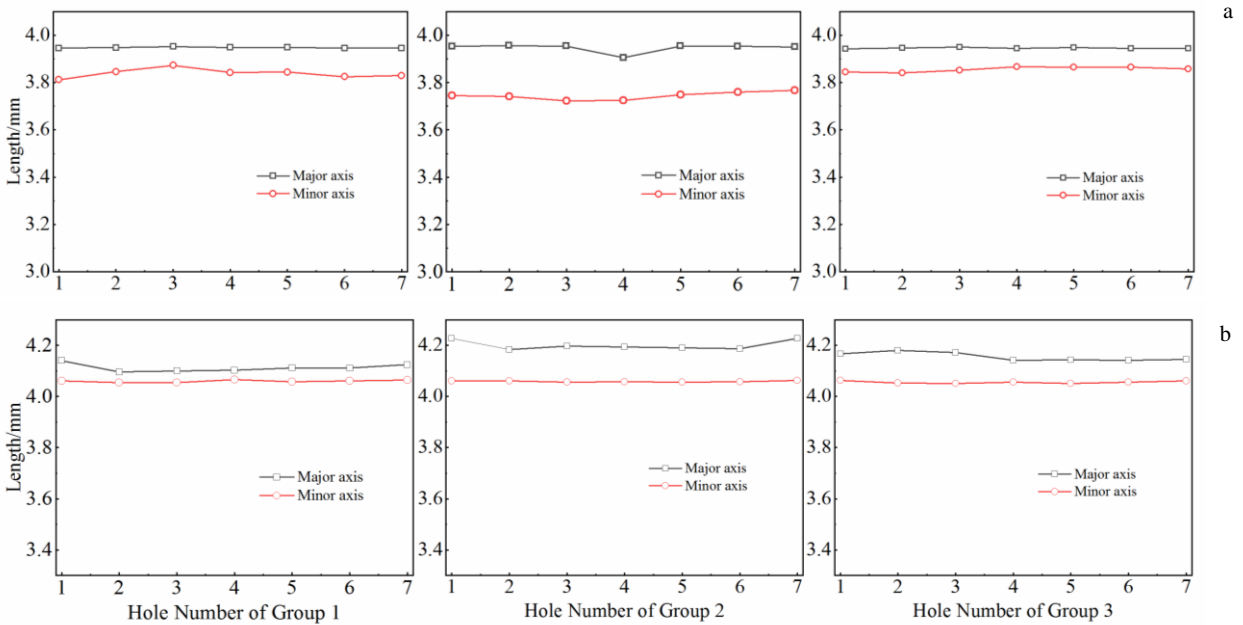


图 14 轴向上孔的投影椭圆的长轴与短轴长度

Fig.14 Lengths of major axis and minor axis of the projection ellipse of hole on axis direction: (a) inside surface and (b) outside surface

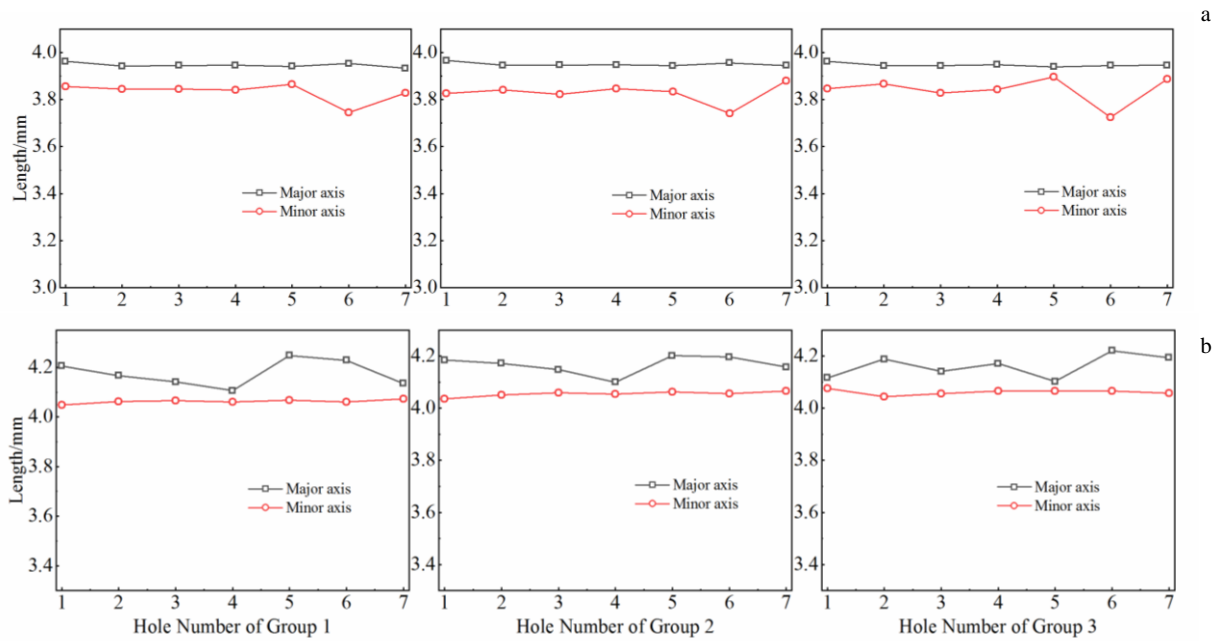


图 15 周向上孔的投影椭圆的长轴与短轴长度

Fig.15 Lengths of major axis and minor axis of the projection ellipse of hole on circumferential direction: (a) inside surface and (b) outside surface

张的，成形件内表面孔是压缩的，且扩张量略大于压缩量；当板材滚弯后，孔的变形量随滚弯进程的进行有轻微波动，略有增大。这是因为，应力在滚弯过程中处于轻微波动状态。所以，孔变形后，外表面孔的扩张量比内表面孔的压缩量略大，在滚弯过程中孔的变形量有轻微波动，略有增大。

3.3.2 沿成形件轴向上孔的变形特征

取成形件上 3 组同一轴向上的 7 个孔作为研究对象，根据前文所述孔变形量表征方法，各组同一轴向上各孔的投影椭圆的长轴与短轴长度如图 14 所示。

由图 14 可知，3 组内表面孔的投影椭圆长轴最大差值仅为 0.051 mm，短轴最大差值 0.061 mm；3 组外表面孔的投影椭圆长轴最大差值仅为 0.044 mm，短轴最大差值仅为 0.012 mm。这是因为同一轴向上各孔所在位置成形件的曲率相同，周向和轴向上所受应力也相同。所以，沿成形件同一轴向上的孔的变形量差值极小。

3.3.3 沿成形件周向上孔的变形特征

取成形件上 3 组同一周向上的 7 个孔作为研究对象，根据前文所述孔变形量表征方法，各组同一周向上各孔的投影椭圆的长轴与短轴长度如图 15 所示。

由图 15 可知，3 组内表面孔的投影椭圆长轴最大差值仅为 0.029 mm，短轴最大差值为 0.172 mm；外表面孔的投影椭圆长轴最大差值为 0.122 mm，短轴最大

差值为 0.031 mm。这是因为板材回弹使得周向上各孔所在位置成形件的曲率有细小差别，周向和轴向上所受应力也有细小差别，所以，沿成形件同一周向上的孔的变形量是波动变化的，但差值很小。

4 结 论

1) 在解决了高温合金 GH5188 密排孔薄板三辊非对称滚弯成形有限元建模关键技术问题后，建立了该成形过程的三维有限元模型，并验证了该模型是可靠的。

2) 提出了密排孔薄板滚弯成形孔变形的定量表征方法。

3) 孔变形后，外表面孔的扩张量略大于内表面孔的压缩量，在滚弯过程中孔的变形量有轻微波动，略有增大；沿成形件同一轴向上的孔的变形量差值极小；沿成形件同一周向上的孔的变形量是波动变化的，但差值很小。

参考文献 References

[1] Zhao Gangyao(赵刚要), Zhang Ranyang(张冉阳), Guo Zhenghua(郭正华) et al. *Rare Metal Engineering and Materials*(稀有金属工程与材料)[J], 2018, 47(12): 3761

[2] Han Tingzhuang(韩廷状), Huang Guangsheng(黄光胜), Wang Lifei(王利飞) et al. *Rare Metal Engineering and Materials*(稀

- 有金属工程与材料[J], 2020, 49(1): 21
- [3] Lu Kaiju(鲁凯举), Cheng Li(程礼), Chen Xuan(陈煊) *et al.* *Rare Metal Engineering and Materials*(稀有金属工程与材料)[J], 2019, 48(10): 3175
- [4] Hu Zhihua(胡智华), Chen Minghe(陈明和), Xie Lansheng(谢兰生). *Rare Metal Engineering and Materials*(稀有金属工程与材料)[J], 2017, 46(10): 2957
- [5] Gao Yawei(高亚伟), Dong Jianxin(董建新), Yao Zhihao(姚志浩) *et al.* *Rare Metal Engineering and Materials*(稀有金属工程与材料)[J], 2017, 46(10): 2922
- [6] Li Guangjun(李光俊), Yang Heng(杨恒), Xu Xudong(许旭东) *et al.* *Rare Metal Engineering and Materials*(稀有金属工程与材料)[J], 2018, 47(1): 26
- [7] Fu Zemin(付泽民), Xu Jia(徐佳), Zhang Suohuai(张锁怀) *et al.* *Journal of Plastic Engineering*(塑性工程学报)[J], 2017, 24(2): 33
- [8] Fu Zemin, Tian Xiuli, Chen Wei *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 69: 1639
- [9] Zhou Chi(周迟), Sun Yu(孙宇), Wu Kai(武凯) *et al.* *Journal of Plastic Engineering*(塑性工程学报)[J], 2018, 25(3): 35
- [10] Zhou Chi(周迟), Sun Yu(孙宇), Liu Qingyin(刘庆印) *et al.* *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2017, 42(7): 36
- [11] Wang Yan(王艳), Cui Ximin(崔西民), Xu Guanghui(许光辉) *et al.* *Journal of Plastic Engineering*(塑性工程学报)[J], 2017, 24(5): 44
- [12] Wang Yan(王艳), Hu Jiefei(胡捷飞), Xu Guanghui(许光辉) *et al.* *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2016, 27(15): 2085
- [13] Wang Yan(王艳), Hu Jiefei(胡捷飞), Xu Guanghui(许光辉) *et al.* *Journal of Plastic Engineering*(塑性工程学报)[J], 2016, 23(4): 69
- [14] Gong Fayun(龚发云), Wang Xunxiang(王训响). *Journal of Hubei University of Technology*(湖北工业大学学报)[J], 2005(3): 13
- [15] Salem Jamel, Champliaud Henri, Feng Zhengkun *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 83(9-12): 1823
- [16] Zhang Zhiqing(张志强), Song Jianli(宋建丽), Fu Jianhua(付建华) *et al.* *Journal of Plastic Engineering*(塑性工程学报)[J], 2014, 21(1): 1
- [17] Zhang Zhiqiang, Song Jianli, Fu Jianhua *et al.* *Journal of Iron and Steel Research (International)*[J], 2014, 21(3): 328
- [18] Feng Zhengkun, Champliaud Henri. *Simulation Modelling Practice and Theory*[J], 2011, 19(9): 1913
- [19] Hibbit K, Karlsson B, Sorensen P. *ABAQUS Analysis User's Manual*[M]. Pawtucket: Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc, 2010
- [20] Liu Zengyi(刘增艺), Jiang Kaiyong(江开勇), Lin Junyi(林俊义). *Mechanical Science and Technology*(机械科学与技术)[J], 2015, 34(7): 1048

Analysis of Deformation Characteristics of Holes on GH5188 Sheet with Densely Holes Formed by Roll Bending

Zhao Gangyao, Jin Chenbai, Zhang Ranyang, Cheng Yibo, He Long, Guo Zhenghua
(Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: After solving the material model, geometric model, mesh generation and other key technical problems in the FE model of GH5188 sheet with densely holes formed by roll bending, the 3D FE model of asymmetric three-roll bending of the sheet with densely holes was established. The simulation results of the FE model agree well with the experimental results, and the model is reliable. And then, a representation method for the deformation of the holes on the sheet with densely holes was proposed. The deformation rule of the holes on the sheet with densely holes was analyzed. The results show that the expansion of the outside face is slightly greater than the compression of the inside face after the hole deformation, and the deformation of the holes fluctuates slightly and increases slightly during the rolling process. The deformation difference of the holes along the same axis direction of the forming part is teeny. The deformation of the holes along the same circumference direction of the forming part fluctuates, but the difference is very small.

Key words: GH5188; sheet with densely holes; asymmetric three-roll bending; hole deformation

Corresponding author: Zhao Gangyao, Ph. D., Associate Professor, School of Aeronautic Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863028, E-mail: gangyaozhao@126.com