

点焊残余应力对汽车门框拉弯回弹稳定性的影响

屈云陵^{1,2}, 李国富^{1*}, 王正才^{2,3}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211;
3. 宁波职业技术学院, 浙江 宁波 315800)

摘要: 为提高汽车门框的生产精度, 利用 ANSYS 有限元模拟软件, 经材料参数的确定、单元类型选择、几何建模等步骤, 分析了点焊热残余应力的形成、门框型材拉弯成型及回弹过程。通过对比有、无焊点失效时的回弹量得出拉弯过程中应力较大处的焊点失效对回弹稳定性的影响较大, 反之则影响较小等结论, 并据此提出了相应的解决措施。相关研究对提高汽车门框生产质量有着重要意义。

关键词: 汽车门框; 回弹; 点焊; 残余应力; 模拟

中图分类号: TG386.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 01-0018-05

型材的拉弯回弹一直是拉弯工艺的难点, 对于汽车门框的拉弯而言, 控制并保持回弹量对拉弯质量起着至关重要的作用。Nanun 等^[1]及 Yu 等^[2]分别分析了 U 形与 L 形横截面型材在拉弯过程中应力分布与回弹量之间的关系, 并且指出这种应力分布关系还适用于 T 形型材。Hopperstadt 等^[3]及 Clausen^[4-5]等对矩形铝型材进行了有限元模拟分析及实验, 提出工件的回弹受预拉力及材料的应变硬化指数控制, 减少应变硬化指数和增加拉伸力都可以减小回弹。近几年对汽车门框的研究主要涉及工艺参数以及模具两方面, 通过有限元模拟、实验以及修改模具形状等方法, 有利于得到最优参数^[6-9], 从而提高门框的生产效率。

虽然拉弯回弹研究已有很多成果, 但在实际生产中仍存在一些问题。本文主要针对某公司同材料、同参数、同批次的门框坯料在拉弯过程中存在拉弯回弹不同的问题, 研究分析了拉弯前点焊残余应力对汽车门框拉弯回弹稳定性的影响。

1 汽车门框点焊及拉弯的理论分析

汽车门框点焊时, 通过控制焊缝机通断电流

时间和电机转速可以控制点焊的时间及位置。点焊过程中, 电极因高温高压作用容易产生塑性变形、粘附、磨损、合金化等现象, 电极的这些变化会导致出现点焊质量不均匀, 或产生不合格焊点等问题, 从而造成点焊残余应力的不同, 而不同的残余应力则最终影响到拉弯回弹量。

1.1 点焊热传导分析

点焊是一个局部快速加热到高温, 并随后快速冷却的过程。随着点焊温度的变化, 材料热物理性能也随温度剧烈变化, 同时还存在熔化和相变时的潜热现象。因此, 点焊温度场分析属于非线性瞬态热传导问题, 其控制方程为:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q},$$

式中, c 为门框材料比热容; ρ 为材料密度; λ 为导热系数; T 为焊点温度场分布函数, 随时间、位置的变化而变化; $\dot{q}$ 为内热源在单位时间及单位体积内产生的热量; t 为点焊过程中传热时间。

点焊过程即为瞬态传热过程, 在此过程中系统的热流率、温度、热边界条件以及系统内能随着时间的改变都有明显变化, 但在点焊过程中能量

收稿日期: 2015-11-19.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY12E09001); 宁波市自然科学基金(2015A610150, 2014A610080); 浙江省教育厅科研项目(Y201223524); 宁波市重点学科项目(XK115D223)。

第一作者: 屈云陵(1989-), 女, 山东济宁人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 点焊对汽车门拉弯变形的影响。E-mail: 841757359@qq.com

*通信作者: 李国富(1966-), 男, 浙江温岭人, 教授, 主要研究方向: 机电测控, 现代制造系统。E-mail: liguofu@nbu.edu.cn

是守恒的, 因此点焊的瞬态热平衡可表示为:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\},$$

式中, $[C]$ 为比热矩阵, 考虑点焊系统内能的增加; $\{\dot{T}\}$ 为焊点温度对时间的导数; $[K]$ 为门框热传导矩阵, 包含热系数、电极与门框的对流系数及辐射和形状系数; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{Q\}$ 为节点热流率向量。

因为点焊过程中材料热性能随温度变化, 并且含有非线性单元, 如 $C_{(T)}$ 、 $K_{(T)}$ 等; 若考虑辐射传热, 点焊的热平衡方程为:

$$[C_{(T)}]\{\dot{T}\} + [K_{(T)}]\{T\} = \{Q(T)\},$$

式中, $C_{(T)}$ 为考虑随焊点温度变化的材料比热矩阵; $K_{(T)}$ 为考虑随焊点温度变化的材料传导矩阵; $Q(T)$ 为考虑随焊点温度变化的节点热流率向量。

1.2 点焊热弹塑性应力分析

文中在对门框型材点焊做热弹塑性分析时作如下假设: (1) 材料的屈服服从米赛斯(Von Mises)屈服准则; (2) 塑性区内的行为服从塑性流动准则和强化准则; (3) 弹性应变、塑性应变与温度应变不可分, 并采用顺序法计算; (4) 与温度有关的力学性能、应力应变在微小的时间增量内线性变化。

根据 Prandtl-Reuss 流动理论分析, 将点焊过程中焊点处的变形视为热弹塑性变形, 全应变增量为:

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon_e\} + \{d\varepsilon_p\} + \{d\varepsilon_r\},$$

式中, $\{d\varepsilon\}$, $\{d\varepsilon_p\}$, $\{d\varepsilon_e\}$, $\{d\varepsilon_r\}$ 分别表示全应变、塑性应变、弹性应变和热应变增量, 所以应力应变增量式可以表示为:

$$\{d\sigma\} = [D_e](\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon_p\} - \{d\varepsilon_r\}),$$

式中, $\{d\sigma\}$ 为应力增量; $[D_e]$ 为弹性应力应变矩阵。

1.3 拉弯过程弹塑性有限元求解基本算法

汽车门框的拉弯过程包括大变形、大位移以及门框与模具的接触问题, 与此对应的是包括几何非线性、材料非线性以及边界非线性等问题, 此类问题较为复杂, 对有限元的基础理论和程序实现方法有更高的要求。在拉弯的模拟过程中可以采用隐式算法, 不仅可靠度高, 而且能很好地模拟压边, 并且可预测回弹, 还适用于型材成形较慢的情况。

在隐式算法计算中, 将采用 Newton-Raphson 迭代求解以下方程:

$$[K_{nm}^i]\{C_m^i\} = \{P_n^i\} - \{Q_m^i\},$$

式中: $[K_{nm}^i]$ 表示当前刚度矩阵; $\{C_m^i\}$ 表示位移纠正向量; $\{P_n^i\}$ 表示外力向量; $\{Q_m^i\}$ 表示内力向量。

位移的增量采用以下公式计算得到:

$$\{\Delta u_m^{i+1}\} = \{\Delta u_m^i\} + \{C_m^i\}.$$

该公式有几条计算要点: 所有节点都要达到力平衡和力矩平衡; 所有加载增量都要进行迭代, 直到收敛; 相对位移增量而言, 位移校正量较小。

2 数值模拟

汽车门框的生产过程是先由板材辊压成型, 然后进行点焊、切断、拉弯、检测, 最后将对称拉弯的门框再进行切断。在模拟过程中, 需考虑计算量以及计算时间的问题, 在保证模拟质量的前提下对模拟过程进行简化: (1) 该模拟只考虑回弹问题, 忽略截面畸变及起皱等现象; (2) 型材以及模具都采用 1/2 模型进行模拟; (3) 将横截面的肋板、凸筋进行简化。

2.1 计算模型

取该门框工件长度为 1 050 mm, 按照半模型考虑, 取工件长度为 525 mm, 工件型材厚度取为 0.8 mm, 焊点离左右两端各 10 mm, 焊点与焊点之间的间隔为 50 mm。模具的外轮廓与型材右侧贴合, 根据门框横截面面积以及材料的屈服极限得出弯曲时的拉力 $F=30$ kN。

2.2 材料参数

汽车门框材料采用较为常用的低碳钢, 密度为 $7800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 比热容为 $502 \text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$; 传热系数为 $16.3 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$; 线膨胀系数为 $1.06 \times 10^{-5} \text{ J}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$, 其他力学性能参数见表 1。

表 1 力学性能参数

摄氏温度/ $^\circ\text{C}$	弹性模量/Pa	屈服强度/Pa	泊松比
20	2.06×10^{11}	385×10^6	0.3
500	1.70×10^{11}	251×10^6	0.3
1 000	0.90×10^{11}	154×10^6	0.3
1 500	0.20×10^{11}	30×10^6	0.3
2 000	0.01×10^{11}	6×10^6	0.3

2.3 单元格的选择

考虑到计算中涉及热应力计算和后续的拉弯问题, 选取易于转化的热应力计算壳单元 SHELL 131, 在完成点焊的温度计算后再进行热应力的计

算 因此为满足该计算的转化, 将 SHELL131 单元转化为等效结构的 SHELL181 单元. 对于模具与型材接触的接触面, 采用接触单元 conta173 和 target170 方式, 对于接触设置中的目标面(门框型材)采用 target170, 对于接触设置中的接触面(刚性模具)采用 conta173 单元, 对于点焊作用采用 MPC184 单元. 网格划分如图 1 所示.

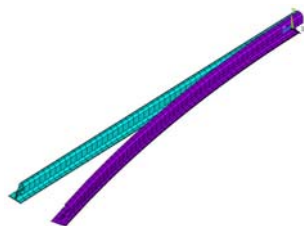


图 1 建模与网格划分

2.4 模拟过程

模拟过程主要包括几何模型的建立、全部焊点和有失效焊点时的温度场的分布、应力分布、点焊后门框拉弯及回弹量的分析.

在完成几何建模后, 采用点焊热源的瞬态计算方法建立起初始温度场. 对点焊的温度场进行计算分析, 初始温度为 1500°C ; 并根据实际生产情况设置焊点直径为 5 mm , 持续时间为 3 个周波, 紧接着冷却至室温; 然后分析点焊过程的应力分布, 将温度作为体载荷施加到门框构件, 分析出时程相关的应力分布; 在构件冷却后, 一部分弹性变形释放, 另一部分塑性变形保留下来, 形成构件的点焊残余应力. 汽车门框拉弯成形主要是通过施加拉载荷和模板的接触挤压, 获得型材与模板吻合的形状, 将点焊考虑为 MPC 的多点约束, 最后移除模板, 实现型材的自由回弹.

在实际生产中, 因电极磨损或其他原因造成的焊点热残余应力会有所不同, 本文为突出热应力的作用, 对门框焊点依次不施加热载荷, 但所有焊点都设置为 MPC 连接, 然后分别进行拉弯回弹的数值分析.

3 模拟结果

3.1 温度及应力分布

将点焊温度以体载荷形式施加到门框相应位置并坚持 0.06 s , 因此而形成焊点, 当然焊点处温度最高, 然后依次向外降低. 由于点焊时间较短,

焊点直径较小, 所以焊点周围的温度梯度较大, 焊点温度波及范围也较小. 若考虑点焊失效情况, 焊点失效处因没有温度载荷而不产生温度.

因施加热载荷而产生的热应力随温度不断变化而变化, 直至达到一种稳定状态. 在门框冷却后, 一部分弹性变形释放, 另一部分塑性变形得以保留, 所以形成门框点焊的残余应力. 虽然点焊产生的热应力会随着温度的降低不断消除, 但仍有一部分应力无法消除, 并且还会在焊点处出现应力集中的现象. 若考虑某焊点失效时, 没有施加温度载荷, 该点处也不会产生热残余应力, 更不会产生应力集中的现象. 图 2 以门框左边第一焊点失效为例, 展示点焊后应力分布情况. 从图中可见, 左边第一焊点因没有施加热载荷而不存在残余应力, 其他残余应力的位置都完全与焊点相对应, 并且残余应力的大小与点焊时温度大小相关, 点焊时温度由熔核向外不断降低, 因此在每个焊点处的残余应力也随着温度的递减不断递减.

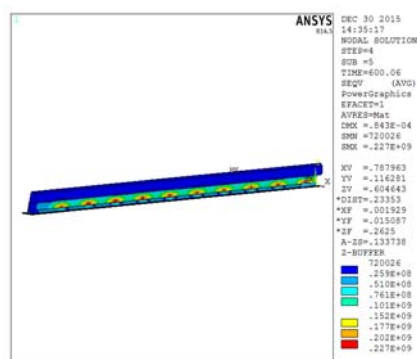


图 2 第一焊点失效时应力分布

3.2 拉弯及回弹

拉弯及回弹模块是在点焊热残余应力的基础上对轿车门框进行拉弯及回弹研究. 选用可靠性较高的隐式算法, 首先对型材两端施加垂直横截面的力, 然后模具上移, 直至与型材弯曲接触并达到一定工艺要求, 在此期间门框产生了弹塑性的变形, 因此当模具撤离后, 会发生一定回弹. 有、无失效焊点对热残余应力的分布有所影响, 因此, 有、无失效焊点对拉弯后应力的整体分布有一定关系, 而应力分布不均又会造成撤离模具后的回弹量有所不同. 图 3 为无失效焊点时, 门框与模具紧密贴合时的应力分布, 从图中可见, 弯曲后的应力分布并不均匀, 在曲率较大处弯曲应力也较大, 而

门框的右边部位弯曲应力最小。虽然在弯曲过程中汽车门框一直存在点焊残余应力, 但该应力相对于弯曲应力较小, 所以图中并没有显现点焊残余应力, 但残余应力并不能忽略, 它将影响弯曲后的回弹量。

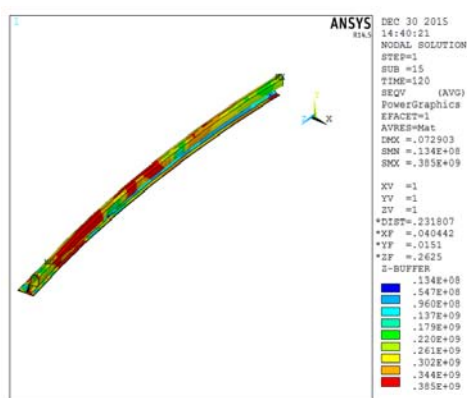


图 3 应力分布

汽车门框与模具贴合后撤离模具, 门框在弯曲应力的作用下自由回弹, 应力带动门框回弹, 回弹也使应力不断变化, 直到达到应力稳定状态后回弹停止。回弹后的型材弯曲如图 4 所示, 最大回弹量为 L_0 。

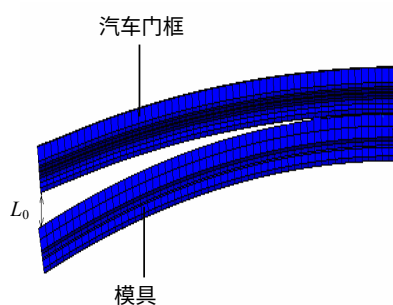


图 4 弯曲回弹

3.3 点焊失效的弯曲回弹

由于考虑到点焊热残余应力的不同会造成弯曲回弹的不同, 现从左到右依次不施加热载荷, 然后分别进行拉弯回弹分析, 得出的最大回弹量分别为 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_{11}$, 某点焊失效的最大回弹量与无焊点失效时的最大回弹量差分别为 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_{11}$, 差值大小分布如图 5 所示。

图中横坐标表示有、无失效的各焊点, 纵坐标表示回弹差值, 从图 5 可以看出, 有焊点失效时的回弹量大于无焊点失效的回弹量, 并且不同位置的焊点失效对回弹量影响不同, 图中最大值出现

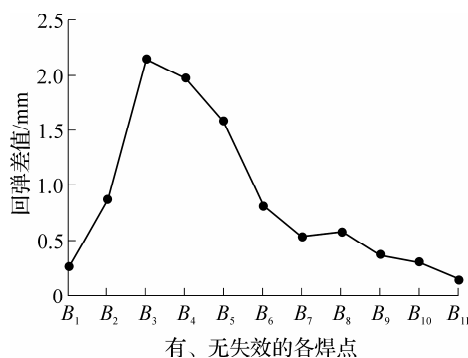


图 5 有、无焊点失效时的回弹差值曲线

在 B_3 处, 最小值出现在 B_{11} 处, 即左边第三焊点失效时的最大回弹量与无焊点失效时的最大回弹量之差最大, 而最右端焊点失效时的最大回弹量与无焊点失效时的回弹量之差最小。又因在条件不变的情况下, 无焊点失效时的回弹量不变, 所以左边第三焊点失效时的弯曲回弹量最大, 最右边焊点失效时的回弹量在有焊点失效的情况下回弹最小。结合图 3 与图 5, 可以看出弯曲时应力较大处的焊点失效后, 回弹量也随之变大。当然不同车型的门框形状也不同, 并且不同的弯曲方式, 应力分布也有所不同, 所以在实际生产中需根据各自工艺参数进行分析。

为解决汽车门框拉弯回弹的稳定性的问题, 秉持高质量、高效率、低成本的原则, 提出以下两点建议:

(1) 增加弯曲应力较大处的焊点密度。焊点密度的增加会使每个焊点对回弹量的影响变小, 因为应力较小处焊点对回弹量的影响很小, 所以对弯曲应力较大处增加焊点密度, 不仅可以保证弯曲量的稳定性, 还有利于提高效率, 降低成本。

(2) 增加修整电极的次数。电极的磨损会造成点焊预压力以及电流的变化, 以至于造成焊点热残余应力以及质量的波动, 所以增加修整电极次数有利于保证每个焊点质量的稳定性, 从而保证回弹的稳定性。

4 总结

利用 ANSYS 有限元模拟, 通过对焊点施加温度, 分析点焊及拉弯过程的应力分布。通过失效焊点验证点焊残余应力对汽车门框拉弯回弹稳定性有一定影响, 即有焊点失效时的回弹量大于无焊

点失效时的回弹量, 弯曲应力较大处焊点失效时对回弹量的影响较大. 因此, 在生产过程中, 当点焊质量不高时, 即便是对相同材料、相同参数的汽车门框进行拉弯, 回弹后也会出现不同弯曲程度的产品, 即弯曲回弹量不够稳定, 造成部分产品不能满足生产质量的要求, 同时也降低了生产效率, 但若增加汽车门框弯曲应力较大处的焊点密度, 则可以有效减少回弹不稳定的现象.

参考文献:

- [1] NANUN N, BRABIE G. Analytical model for prediction of springback parameters in the case of U stretch-bending process as a function of stresses distribution in the sheet thickness[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2012, 64(1):1-21.
- [2] YU C L, LI X Q. Theoretical analysis on springback of L-section extrusion in rotary stretch bending process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(12):2705-2710.
- [3] HOPPERSTAD O S, LEIRAA B J, REMSETH S. Reliability-based analysis of a stretch-bending process for aluminium extrusions[J]. *Computers and Structures*, 1999, 71(1):63-75.
- [4] CLAUSEN A H, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M. Stretch bending of aluminium extrusions for car bumpers [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 102(1/3):241-248.
- [5] CLAUSEN A H, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M. Sensitivity of model parameters in stretch bending of aluminium extrusions[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43(2):427-453.
- [6] 沈亚静, 徐仲祥, 夏琴香, 等. 汽车门框上条制件拉弯成形模具设计[J]. *模具制造*, 2014, 14(1):29-34.
- [7] 王强, 黄世军, 胡凌峰, 等. 轿车门型材拉弯缺陷及修复工艺研究[J]. *锻压技术*, 2014, 39(7):47-50.
- [8] 贾俐俐, 高锦张. 汽车门框空腹铝型材弯曲工艺[J]. *金属成形工艺*, 2000, 18(6):34-35.
- [9] 陈亚兵, 夏琴香, 沈亚静, 等. 汽车门框上条件拉弯成形过程的数值模拟研究[J]. *机电工程技术*, 2014, 43(7):47-50.

Influence of spot welding residual stress on stability of automobile frame bending springback

QU Yun-ling^{1,2}, LI Guo-fu^{1*}, WANG Zheng-cai^{2,3}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China;

3.Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China)

Abstract: In this paper, the material parameters, element type selection, geometric modeling steps are determined using ANSYS finite element simulation software, and the thermal residual stress formation of spot welding, stretch bending and springback processes of doorframe profile are analyzed for improving the production accuracy. In the end, the results from using springback with and without failure welding are obtained and analyzed. It is found that: failure solder joint at place of great stress has a stronger influence on the stability of the springback in the process of stretch bending, and otherwise less influence is exerted. In addition, other corresponding solutions are proposed, which play a significance role for improving the quality of automobile frame production.

Key words: automobile frame; springback; spot welding; residual stress; simulation

(责任编辑 章践立)