

文章编号:1006-2467(2006)10-1649-05

齿形零件精冲成形三维有限元模拟与工艺优化

谢晓龙, 赵震, 虞松, 陈军, 李明辉

(上海交通大学 塑性成形工程系, 上海 200030)

摘要: 利用 DEFORM-3D 建立了三维精冲有限元模型, 采用更新拉格朗日弹塑性有限元方法和基于应变梯度、表面曲率的网格自适应技术, 对齿轮精冲的局部剧烈塑性变形进行了模拟. 通过 DEFORM 用户子程序实现了 Schiffmann 损伤功密度的半耦合计算, 分析了成形过程中静水应力、等效应力、等效应变和损伤的分布以及发展趋势, 并预测了不同工艺参数下的精冲力和齿轮不同部位塌角高度、光亮带高度. 利用模拟得出的最佳工艺参数获得了合格的齿形零件.

关键词: 齿形零件; 精冲; 损伤; 韧性断裂; 弹塑性有限元; 网格自适应

中图分类号: TG 386 **文献标识码:** A

3D FEM Modeling of Gear Wheel Fine-blanking Forming and the Process Optimization

XIE Xiao-long, ZHAO Zhen, YU Song, CHEN Jun, LI Ming-hui

(Dept. of Plasticity Forming Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: By using DEFORM-3D software, a 3D FE model of fine-blanking was created, and the updated Lagrange elasto-plastic FEM and the adaptive remeshing technique based on strain gradient and surface curvature were used to simulate the localized severe plastic deformation. The Schiffmann damage work density model which considers the combination of plastic work of matrix and void growth work was integrated with DEFORM-3D, and it was used to predict the position and developments of damage and fracture. Furthermore, the cutting force and the heights of roll-over and clean-cut in different regions of gear wheel under different process parameters were predicted. In the end, qualified parts were obtained using the optimized process parameters from simulation.

Key words: gear wheel; fine-blanking; damage; ductile fracture; elasto-plastic finite element; adaptive remeshing

传统的齿形零件加工需进行落料冲孔、铰中心孔、滚齿、去毛刺等工序, 工艺复杂, 加工时间长. 精冲工艺作为一种先进的精密塑性成形技术, 在一次冲裁过程中就可以得到尺寸精度高、剪切面光洁, 具有一定立体形状的零件^[1], 因此, 越来越多的齿形零

件采取了精冲成形加工方法. 由于齿形零件较厚, 如果精冲工艺参数不合理会出现零件塌角过大、断裂带过高等缺陷, 通过修模虽可以消除成形缺陷, 但却造成了生产周期的延长和成本的增加. 如何预测精冲成形过程中可能出现的缺陷, 获得合理的工艺参

收稿日期: 2005-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50505027)

作者简介: 谢晓龙(1977-), 男, 山东青岛人, 博士生, 主要从事精冲成形数值模拟研究. 赵震(联系人), 男, 副教授,

电话(Tel.): 021-62813430-8116; E-mail: zzhao@situ.edu.cn.

数,成为精冲技术开发的重要环节。

随着塑性成形仿真技术、损伤力学和断裂力学的发展,许多学者开始了对精冲局部剧烈变形和韧性断裂的研究^[2-7],并取得了很大进展.这些研究建立和完善了精冲大变形有限元模型和韧性损伤、韧性断裂模型,但多局限于平面/轴对称问题,而实际生产中的精冲件多为带体积成形的三维零件,金属在零件轮廓不同曲率半径处具有不同的流动特性,二维数值模拟有很大局限性。

本文利用 DEFORM-3D 建立了精冲三维数值模拟模型,采用更新拉格朗日弹塑性有限元方法和基于应变梯度、表面曲率的网格自适应技术,对齿轮精冲的局部剧烈塑性变形进行了模拟,并预测了精冲过程中材料损伤的发展及不同工艺参数下齿轮不同部位塌角高度、光亮带高度和精冲成形力,利用模拟得出的最佳工艺参数获得了合格的齿形零件。

1 精冲模型的建立

图1为齿轮精冲模具三维示意图,考虑到齿轮零件的对称性,为了节约模拟时间,对模型进行了合理简化,工件与模具均取1/10进行研究.精冲模型尺寸示意图如图2所示,板料厚度为5 mm,凸模圆角半径 R_p 和凹模圆角半径 R_d 分别为0.05 mm和0.01~0.21 mm,齿圈压边力 F_r 和反顶力 F_g 分别为0~400 kN和45~150 kN,凸模压入速度 $v=10$ mm/s,单边冲裁间隙 C 为0.04~0.12 mm,摩擦系数 $\mu=0.2$.去除板料上不发生塑性变形的部分,并对精冲齿圈压板进行简化,齿圈所创造的压应力由平面压板和施加在板料外侧的轴向载荷代替.模拟中板料为弹塑性体,凸模、凹模、压板、反顶器为刚体. DEFORM 体积单元只有四面体等参单元一种类型,由于低阶单元的位移函数是线性的,单元内应变分布是常数,在模拟局部塑性大变形时会造成预测的剪切带宽度加大,难以捕捉变形局部化现象.因

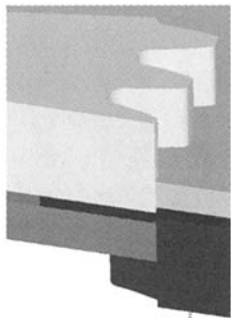


图1 DEFORM 齿轮精冲模型

Fig. 1 The fine-blanking modeling of gear

此,在模拟前先将变形区网格进行细化,模拟过程中采用网格自适应技术,由应变梯度和表面曲率自动确定单元的细化程度,能准确预测剪切带中的应变集中现象,自适应效果如图3所示。

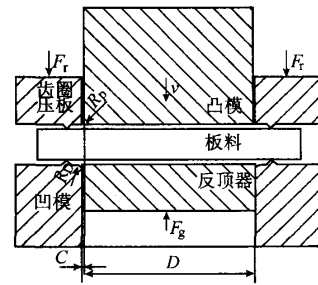


图2 精冲尺寸示意图

Fig. 2 Schematic of the dimensions

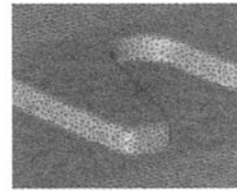


图3 自适应网格细化

Fig. 3 The adaptive mesh refinement

模拟中所使用的材料为35钢,通过标准板料拉伸试验获得如下材料参数:弹性模量 $E=200$ GPa,屈服强度 $\bar{\sigma}_s=585.5$ MPa,抗拉强度 $\bar{\sigma}_b=745.6$ MPa,延伸率 $s=18.5\%$.为获得大变形下的流动应力,采用Voce硬化模型对实验数据进行了外推,得到了35钢材料流动应力-应变 $\sigma-\epsilon$ 曲线(见图4)。

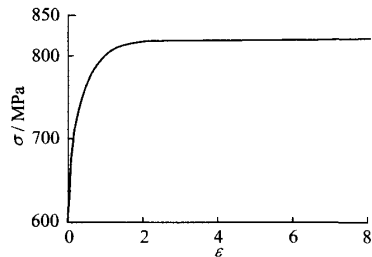


图4 35钢材料硬化曲线

Fig. 4 The material hardening curve of 35 steel

2 成形过程分析

图5~7为变形初期、中期和末期应变、应力的分布情况.图5为凸模进入板厚25%和90%时应变 $\bar{\epsilon}$ 分布,齿轮的塑性变形区域集中在狭窄的凸模-凹模间隙附近,形成局部塑性剪切带,最大值出现在凸模刃口附近,这是由于尖锐的凸模刃口引起了金属流动不均匀,金属晶粒在此处旋转、拉伸程度最大, $\bar{\epsilon}$

由 2.81 发展到了 7.8.

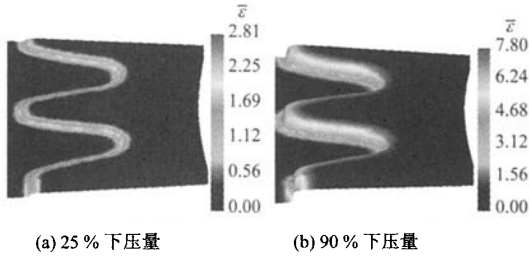


图 5 凸模压入板厚 25%、90%时 $\bar{\epsilon}$ 分布

Fig. 5 The distribution of $\bar{\epsilon}$ when punch penetrated into 25% and 90% of sheet metal

图 6 为凸模进入 50% 时齿尖处应力 $\bar{\sigma}$ 分布,随着变形程度的增大,材料的硬化程度加剧,由初始屈服强度 585.5 MPa 上升到 815 MPa. 精冲过程中平均主应力 σ_m 起到关键作用, σ_m 的值越高(即 σ_m 的负值越大),越有利于材料塑性的发挥,金属破坏时的极限变形程度越大.

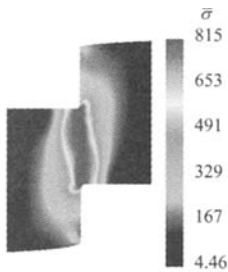


图 6 凸模压入板厚 50% 时 $\bar{\sigma}$ 分布

Fig. 6 The distribution of $\bar{\sigma}$ when punch penetrated into 50% of sheet metal

图 7(a) 为凸模压入板厚 10% 时齿尖处的 σ_m 平面分布,凸模下侧和凹模上侧材料 σ_m 最大,精冲剪切区内也保持压应力状态,抑制了裂纹的产生;随着变形程度加大,板料承受剪切力的有效面积在减小, σ_m 逐渐向正值转变,凸模压入 90% 时(见图 7(b)),剪切区内 σ_m 较小.

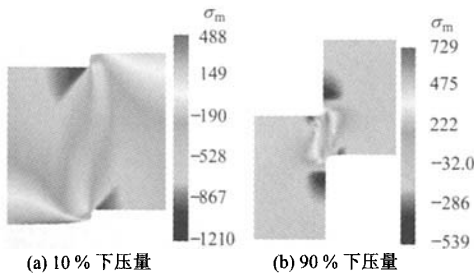


图 7 凸模压入板厚 10%、90% 时 σ_m 分布

Fig. 7 The distribution of σ_m when punch penetrated into 10% and 90% of sheet metal

当材料受载达到一定程度时,空穴在夹杂和三相粒子处形核,随着变形程度的增加,空穴不断长大和聚合,形成微裂纹. 文献[8-11]将临界空穴体积率或临界空穴增长率作为判断韧性断裂的材料常数,但不具备普适性. 如材料在纯剪状态下空穴几乎没有增长,但裂纹也会出现[12],因此一个合理的韧性损伤和断裂准则应综合考虑空穴增长和塑性变形程度的影响. Schiffmann[12]运用塑性变形能量守恒理论,提出损伤功密度模型,只有当塑性变形功和损伤功对材料的作用之和达到某一临界值时,材料发生韧性断裂,

$$W_d = \int_0^{\bar{\epsilon}_t} \left[1 + 3\alpha \frac{\sigma_m}{\sigma} \exp\left(1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma}\right) \right] \bar{\sigma} \, d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

式中: $\bar{\epsilon}_t$ 为裂纹出现时的等效应变; α 为材料常数,对于大多数低碳钢和中碳钢, $\alpha = 0.5$ [12]. W_d 为裂纹出现时的临界损伤功密度,为材料常数. 为获得 35 钢韧性断裂的临界值,将其放入精冲模具中进行冲裁,测量断裂带的高度和断裂出现时凸模的行程,然后用 DEFORM 软件进行有限元建模,工艺参数和模具参数同实验中的一致,当模拟中凸模行程与实验中相等时,计算出的损伤功即为出现裂纹时的材料常数,为 1.45 GJ/mm³.

图 8 是冲裁间隙为 0.05 mm 时凸模压入板厚 90% 的损伤分布,剪切带内剧烈变形引起了材料损伤的集中,接近临界损伤值. 图 9 为冲裁间隙不同、其他工艺参数相同时凸模和凹模刃口附近材料损伤功密度的发展趋势. 当单边冲裁间隙 $C = 0.04$ mm 时,小的冲裁间隙产生了大的负静水应力,凸模和凹模圆角附近材料的损伤功密度增长缓慢,抑制了材料空穴的长大,虽然 W_d 中的塑性变形功部分在增长,但损伤功部分却增长不大,因此在变形最后阶段才达到临界值. 由于凸模刃口圆角半径比凹模小而引起材料的变形程度不同,凸模附近材料 W_d 值要高于凹模附近. 当 $C = 0.12$ mm 时,由于较大的 C

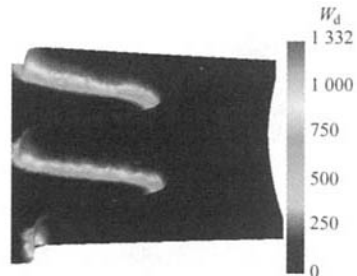


图 8 凸模压入板厚 90% 时损伤功密度分布

Fig. 8 The distribution of W_d when punch penetrated into 90% of sheet metal

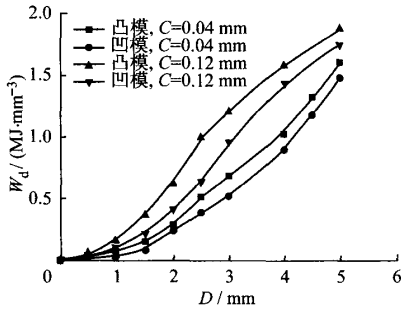


图9 不同冲裁间隙下材料 W_d 随凸模行程 D 的变化
Fig. 9 The damage developments in different cutting clearances

值抑制不住空穴的长大,凸模和凹模圆角处损伤功密度增长很快,当凸模行程为 3.5 mm 时,凸模刃口处材料 W_d 达到了临界值,过早地出现了韧性断裂,最终达到 1.84 GJ/mm^3 。

3 工艺参数优化

图 10 为齿尖和齿根光洁面高度预测曲线,对于齿轮来说,材料流经凹模刃口形成了零件的外形,抑制断裂产生关键是要抑制材料损伤的发展,延长塑性变形阶段。刃口圆角半径 R_D 过小,会引起材料应力集中,影响剪切区内金属流动的均匀性,加快材料损伤的发展,过早地出现断裂。当 $R_D=0.01 \text{ mm}$ 时,齿尖处光洁面比例 δ 只占板厚的 72%。 R_D 越大,材料极限变形程度越高, δ 越大;当 $R_D=0.21 \text{ mm}$ 时,齿尖和齿根侧都能获得完全光洁的表面。但过大的 R_D 会导致成形载荷大、工件弯曲等问题,所以圆角半径必须适中。

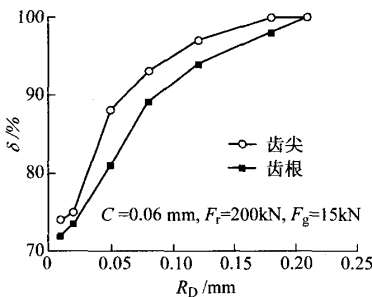


图 10 不同凹模刃口圆角 R_D 下齿尖、齿根 δ 预测
Fig. 10 The prediction for δ of point and root of tooth under different R_D

塌角是零件轮廓交界处的材料向剪切面转移而形成的^[13],齿尖处由于比较尖锐,材料流动剧烈,因此塌角最大。过大的塌角会减小齿轮的功能面和承载能力,应尽可能小。在众多工艺因素中, F_r 和 F_g

对零件塌角比例 η 的影响最大^[14]。从图 11 所示的模拟结果可以看出,在相等 F_g 下, η 随 F_r 的增加而减小, F_r 增加到一定程度时 η 不再变化,过大的 F_r 会引起板料厚度的减小,降低模具寿命。从模拟中还可以看出, η 随 F_g 的增加而减小,在 $F_r=400 \text{ kN}$ 、 $F_g=150 \text{ kN}$ 时,齿尖处 η 最小。

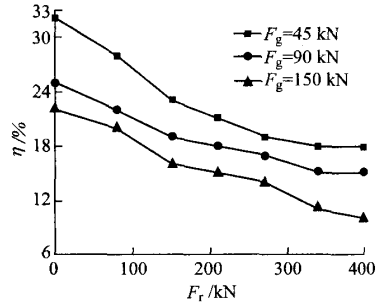


图 11 不同压边力 F_r 和反顶力 F_g 下齿尖 η 预测
Fig. 11 The prediction for roll-over heights of point of tooth under different F_r and F_g

图 12 为预测的不同冲裁间隙下精冲冲裁力曲线。图中, D 为凸模行程。 C 越小,塑性剪切带越窄,应变集中现象越明显,材料的硬化程度就越大,因此获得的冲裁力 F_s 就越大。精冲过程可分为两阶段,首先是 F_s 急剧上升阶段,随着变形程度的加大,虽然板料承受剪切力的有效面积在减小,但材料硬化作用加强, F_s 不断增大,直至达到峰值。第 2 阶段为缓慢下降阶段,由于承受 F_s 的有效面积下降的影响超过了材料硬化对冲裁力的影响, F_s 开始平缓下降,发展趋势类似于挤压成形,没有出现普通冲裁由于断裂出现过早而产生的冲裁力急剧下降的现象。

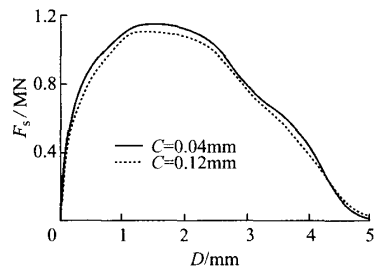


图 12 不同冲裁间隙预测的精冲剪切力 F_s
Fig. 12 The prediction for fine-blanking cutting forces under different cutting clearances

通过有限元模拟,得出了最佳的工艺参数,模拟出的齿形零件如图 13,塌角高度最小,没有出现断裂带,图 14 为利用最佳工艺参数制造出合格的齿形零件。

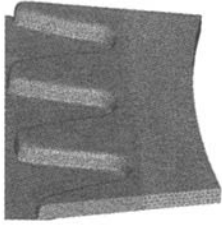


图 13 通过优化后的最佳工艺参数模拟出的齿形零件
Fig. 13 The gear wheel part in simulation using optimized process parameters



图 14 利用优化后的工艺参数制造的齿形零件
Fig. 14 The gear wheel part produced through using optimized process parameters

4 结 语

利用 DEFORM-3D 进行齿形零件精冲数值模拟,可以进行成形缺陷预测和工艺优化,大大提高了工艺设计的效率。采用了 Voce 硬化模型对标准拉伸试验所得的应力进行了外推,精确性有待于进一步验证。对大变形下材料应变硬化、损伤软化对流动应力的影响仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] Lange K, Birzer D I, Mukhoty A, *et al.* Cold forming and fineblanking——A handbook on clod processing, material properties, component design [M]. Switzerland:Edelstahlwerke Buderus AG, 1997.
- [2] Chen Z H, Tang C Y, Lee T C, *et al.* Numerical simulation of fine-blanking process using a mixed finite element method[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, 44: 1309—1333.
- [3] Zheng P F. Finite element analysis of the combined fine blanking and extrusion process [D]. Department of Industrial and Engineering, Hong Kong: Polytechnic University, 2000.
- [4] 贾建军,彭颖红,阮雪榆. 精冲断裂过程的有限元模拟[J]. *上海交通大学学报*, 2003, 37(7):1064—1067.
JIA Jian-jun, PENG Ying-hong, RUAN Xue-yu. The FEM simulation of fine blanking ductile fracture [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(7):1064—1067.
- [5] Kwak T S, Kim Y J, Bae W B. Finite element analysis on the effect of die clearance on shear planes in fine blanking [J]. *Journal of Materials Producing Technology*, 2002, 130-131:462—468.
- [6] Klocke F, Sweeney K, Raedt H W. Improved tool design for fine blanking through the application of numerical modeling techniques[J]. *Journal of Materials Producing Technology*, 2001, 115:70—75.
- [7] 方刚,曾攀. 金属板料冲裁过程的有限元模拟[J]. *金属学报*, 2001, 37(6):653—657.
FANG Gang, ZENG Pan. Finite element simulation fro blanking process of sheet metal[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(6):653—657.
- [8] Gurson A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth, I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media. [J]. *Engineering Material Technology*, 1977, 99:2—15.
- [9] McClintock F A. A criteria for ductile fracture by the growth of holes [J]. *J Appl Mech Trans ASME*, 1968, 35: 363—371.
- [10] Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar[J]. *Acta Metal*, 1984, 32 (1) :157—169.
- [11] Rice J R, Tracey D. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields[J]. *J Mech Phys Solids*, 1969, 17:201—217.
- [12] Schiffmann R, Bleck W, Dahl W. The influence of strain history on ductile failure of steel[J]. *Computer Materials Science*, 1998, 4: 142—147.
- [13] 涂光祺. 精冲技术[M]. 北京,机械工业出版社,1990.
- [14] 周开华. 简明精冲手册[M]. 北京,国防工业出版社,1993.