不同材料外推模型的精冲有限元模拟对比

王少阳,陈文琳,李志杰

(合肥工业大学 材料科学与工程学院,合肥 230009)

摘要:将35钢的应力应变曲线用 VOSS 模型、Ludwik 模型外推并插入到 DEFROM 2D 中,对精冲过程进行有限元模拟,对比了 VOSS 模型、Ludwik 模型及 DEFORM 自带材料模型的计算结果,表明 DE-FORM 自带材料模型与 VOSS 模型计算结果相近,DEFORM 自带材料模型在大塑性应变下仍具有可靠性。

关键词:材料模型;流动应力;精密冲裁;DEFORM;有限元模拟 中图分类号:TP391.9 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2011)05-0009-05

The Comparison of Different Extrapolation Models for Materials in Fine-blanking Simulation

WANG Shao-yang, CHEN Wen-lin, LI Zhi-jie

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The author extrapolated the curves of steel 35 with VOSS, Ludwik models, and inserted them into DEFROM 2D in the fine-blanking process on the finite element simulation. Comparing VOSS model, Ludwik model and material model of DEFORM own calculations the results showed that the VOSS material model and DEFORM own model were similar, DE-FORM own material model in the large plastic strain was still reliable.

Key words: material model; flow stress; fine-blanking; DEFORM; FEM numerical simulation

精密冲裁是指通过强压边力模具结构,使剪切 区处于三向压应力状态下,从而延长剪切区的塑性 变形段,得到低粗糙度冲裁断面的冲裁方法。冲裁 间隙、模具圆角半径、齿圈位置和尺寸、压边力和反 顶力等对冲裁质量有很大的影响。通过有限元数值 模拟能方便地确定工艺参数值,并且对剪切区应力 应变分布状态、断面质量、裂带长度、模具寿命等进 行预测^[1-3]。利用有限元分析软件模拟精冲过程, 优化工艺参数是省时省力的好办法。

文献[4]用 DEFORM 模拟了普通冲裁过程,预测了裂纹的产生和扩展。文献[5]利用 DEFORM 2D 有限元模拟软件,采用局部网格自适应和单元删

除技术模拟裂纹的产生和扩展,对低碳钢精冲工艺 进行大变形弹塑性有限元分析和韧性断裂分析,预 测了成形缺陷。

精冲过程是大塑性变形过程,金属剪切变形真 实应变为4以上,但是 DEFORM 材料库中,材料应 力-应变实验曲线范围较小(碳钢小于2)。变形刚 开始时,计算所得的最大冲裁力与实际相符,但是当 变形继续进行,应变超过自带模型最大值后,DE-FORM 可能无法确定应力值大小。文献[6]利用 VOSS 外推应力应变模型对精冲过程损伤和断裂进 行了研究。

由于应力值的计算模型不同,计算结果也将有

收稿日期: 2010-12-10

作者简介:王少阳(1986-),男,四川成都人,在读研究生,主要研究方向为塑性成形工艺。

所区别,文中通过二次开发插入材料模型,对 VOSS 外推模型、Ludwik 外推模型以及 DEFORM 自带模型的精冲计算结果进行了对比。

1 材料模型外推

常规应变范围内,通常采用拉伸试样法来测得 该材料的工程应力应变曲线,再换算为真实应力应 变曲线^[7],但精密冲裁的应变范围已超出了该方法 的测量范围。使用数学模型拟合实验曲线,得到超 出实验应变范围的应力值,就是材料应力应变曲线 的外推。将外推得到的数学模型插入到有限元计算 中,是解决此问题的有效方法。

1.1 选择外推模型

文献[8]对常用的 8 种外推模型进行了研究,根 据模型在大应变段的收敛情况,将它们分类为硬化 型和饱和型。硬化型模型随着应变的增加,应力值 无限上升,Ludwik 模型为典型的硬化模型;饱和型 模型随着应变值的增加,应力值收敛于某一值附近, VOSS 模型为典型的饱和模型。每种模型的增长、 收敛速度不一,因此计算中模型的选择应根据材料 的种类、热处理状态决定^[9]。

为方便与其他文献结果对比,文中选用 35 钢作 为精冲材料,35 钢真实应力随着应变的增加收敛 于σ_b 附近^[10],因此选择饱和型的 VOSS 外推模型 进行估测,作为对比,同时选择硬化型的 Ludwik 模 型计算。

1.2 拟合曲线

DEFORM 材料库中的 AISI 1035 钢流动应力 曲线为一系列数据点构成的折线,数据点见表 1。

	表 1 材料库 AISI 1035 钢应力应变
Table 1	The stress-strain table of AISI 1035 in material library

中本体	应力 σ / MPa			
应受值	应变速率 $\frac{\cdot}{\epsilon_p}/s^{-1}$	应变速率 _{ε_p/s⁻¹}		
σþ	1	100		
0	700	701		
0.09	743.924	745.924		
0.81	930.811	932.811		
2	934	936		

为了对比3种模型的计算结果,因此各个模型 都使用相同的数据点进行拟合。使用最小二乘法将 表1中的数据点分别拟合到 VOSS 模型、Ludwik 模型中^[8]。

VOSS 模型:

 σ^{i}

$$= \sigma_{\rm s} + A [1 - \exp(-m\varepsilon_{\rm p})]$$
 (1)

式中:A为材料系数,A > 0;m为硬化系数,m > 0; σ_s 为材料屈服强度; ε_s 为塑性等效应变值。

Ludwik 模型:

$$\sigma = \sigma_{\rm s} + A \varepsilon_{\rm p}^{\ n} \tag{2}$$

式中:A, σ_s , ε_p 同上;n 为材料硬化指数。

迭代求解方程组,得到的拟合参数见表2、表3。

表 2 VOSS 模型拟合参数

Table 2 The fitting parameters of VOSS model

参数	拟合值	相对误差/%
$\sigma_{ m s}$	690	1.43
A	245	7.4
m	2.77	36.3

表 3 Ludwik 模型拟合参数

Table 3 The fitting parameters of Ludwik model

参数	拟合值	相对误差/%
$\sigma_{ m s}$	640	8.57
A	184	54.2
n	0.467	49.3

拟合后的 VOSS 模型:

$$\sigma = 690 + 245 [1 - \exp(-2.77\varepsilon_p]$$
 (3)

拟合后的 Ludwik 模型:

$$\sigma = 640 + 184\varepsilon_{p}^{0.467} \tag{4}$$

拟合曲线如图1所示。VOSS 模型拟合精度较



图 1 VOSS 模型 Ludwik 模型的拟合曲线

Fig. 1 The fitting curve of VOSS and Ludwik

Ludwik 模型更高,并且在应变值超过2以后收敛在 σ_b 附近,而Ludwik 模型的应变值继续上升,直至超 过σ_b。由于数据点有限,总体精度不高,文中主要 讨论的是应变外推段的影响,故拟合精度不重点考 虑。

2 有限元模型的建立

2.1 二维建模

为了对自定义材料库模型、VOSS模型及Ludwik模型的计算结果加以对比,建立如图2所示的





有限元模型。板料为弹塑性体,材料为 AISI 1035, 板厚为 4.5 mm,直径为 φ50 mm,零件为圆形,可以 简化为轴对称问题。精冲模的凸模、凹模、齿圈压 板、反顶器为刚体,忽略模具变形和温度变化。参考 精冲手册及相关文献^[11],取优化的工艺参数见表 4。

表4 精密冲裁算例工艺

Table 4	Parameters	of	fine-blanking	process	example
rubie i	1 urumeters	01	inte bianking	Process	example

工艺参数	参数值
加工温度/℃	20
工件材料	AISI 1035 COLD 及其外推模型
冲裁速率/(mm • s ⁻¹)	10
压边力/kN	250
反顶力/kN	150
模具刃口间隙/mm	0.032
主冲裁力/kN	约 500
凸模圆角半径/mm	0.1
凹模圆角半径/mm	0.3
V型齿圈高/mm	0.9

2.2 边界条件、网格划分及断裂准则

取接触摩擦因子为 0.12,板料轴心处 V_x=0。 由于精冲属大塑性变形,需要进行网格重划分。为 了提高计算精确度,增加剪切区单元密度,使用网格 划分窗口对网格密度进行控制,剪切区最小网格边 长为 0.013 mm,总单元数 5 000。塑性变形达到一 定程度,材料将产生空穴聚集而断裂,使用 Mc-Clintock 断裂准则,能较好地反应精冲剪切塑性变 形过程的断裂^[12]。

2.3 二次开发插入应力模型

文中采用二次开发来插入外推的 VOSS, Ludwik 应力应变模型。DEFROM 软件由若干个子程 序模块组成,使用 FORTRAN 语言可对求解器模 块的相应用户子程序进行修改、编译,从而在计算时 插入用户需要的参数、方程。材料应力应变模型存 放在 USRMTR 子程序中,程序结构如图 3 所示。



图 3 材料应力应变模型子程序结构

Fig. 3 Material stress-strain model subroutine chart

使用 FORTRAN 编译器编译后即得到新的求解器 文件,在预处理材料设置页面中将工件材料设定为 插入的应力应变模型^[13]。

3 模拟结果及讨论

分别使用 DEFORM 自带 35 钢应力模型、 VOSS 模型、Ludwik 模型拟合得到的 35 钢应力模型,对精冲过程进行了模拟计算。

3.1 应力分布

剪切区处于三向压应力状态是精密冲裁的必备 条件。对 3 种模型计算结果的三向压应力分布进行 对比。1/3 冲裁行程时的三向压应力分布如图 4 所 示,浅色区域平均应力小于零,为受压区域。3 种材



Fig. 4 The 3D compression stress distribution of 1/3 stroke

料模型的计算结果都显示出了符合理论的应力分布 趋势,在剪切区材料仍然处于受压状态,延迟了裂纹 的出现。随着凸模继续下行,深色的拉应力区域逐 渐在剪切区中部汇合,裂纹随即出现。

3.2 负载曲线对比

12

3种模型计算所得的冲裁负载曲线如图 5 所



Fig. 5 The load curve of different models

示。3条负载曲线的形状都相似,与实验所得数据 接近^[14]。在冲裁开始阶段,随着材料的硬化,负载 很快增加,达到一个峰值后,由于剪切面积逐渐减 少,负载力开始降低,直至材料达到断裂极限。此时 软件开始删除网格单元,模拟裂纹出现,负载力急剧 降低,曲线出现拐点。

VOSS 外推模型与自带模型计算所得最大负载 为 490 kN,与经验公式计算值的主冲裁力 500 kN 接近。Ludwik 模型的负载峰值较低,这是由于负载 最大值都出现在冲裁刚开始的阶段,Ludwik 模型在 小应变阶段的应力值较低(如图 1 所示),但是随着 硬化程度的加剧,Ludwik 模型的负载值在冲裁后半 段超过了 VOSS 模型。

由图 5 可见, DEFORM 自带模型与 VOSS 外 推模型的负载曲线一致性较好, 在剪切区的等效应 变为 4 以上时(如图 6 所示)也能良好重合, 证明



图 6 塑性变形最后阶段的应变分布

Fig. 6 The strain distribution on the final stage of plastic deformation

DEFORM 自带材料模型已经采用了类似的曲线拟 合方法对输入的数据点进行了拟合,并得到了合理 的拟合方程。当应变值超过输入的数据点时,软件 能够由拟合方程自动外推得到大应变下的应力值。 Ludwik 模型由于拟合误差较大,计算结果偏差较 大。

3.3 断裂带分布

测得落料圆板侧面光亮带长度如图 7 所示,图





中非常逼真地显示了板料断裂分离,断裂带非常明显。断裂带长度即为料厚减去光亮带长度,模拟结

13

果的光亮带长度均超过料厚的 2/3,与实际情况较 为接近。Ludwik 模型计算所得的断裂带最短,仅 0.7 mm。由于 Ludwik 模型的硬化速度较慢,在应 变达到 3 以前其应力均小于 VOSS 模型,因此 Ludwik 模型较"软",精冲时不容易出现裂纹。DE-FORM 自带模型与 VOSS 模型计算所得的断裂带 长度相近,可见 2 种模型近似程度很高。

4 结语

1)通过 DEFROM 二次开发插入流动应力模型能够正确地对精密冲裁过程计算求解,不同的应力应变模型对模拟结果有显著影响,因此进行工艺模拟时应当注重材料模型的测试、选择。

2) DEFORM 中的材料模型已经通过软件拟合 为流动应力方程,与利用 VOSS 外推模型得到的结 果相近,在应变超出材料模型实测数据点不太多的 情况下,能够保证一定的计算精度,因此不需另用外 推模型进行计算。

参考文献:

- [1] CHAN L C, LEUNG Y C, LEE T C, et al. Numerical Simulation for Fine-blanking—A New Approach[J]. Materials Science and Engineering A,2004,364(1/2): 207-215.
- [2] HAMBLI R, RESZKA M. Fracture Criteria Identification Using an Inverse Technique Method and Blanking

Experiment [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(7): 1349-1361.

- [3] 林立峰,王贵成,樊曙天,等.精冲模具磨损及对制件棱 边质量的影响[J].机械设计与制造,2009(10):243-245.
- [4] 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.
- [5] 赵震,谢晓龙,谷胜光,等. AISI-1035 钢精冲成形与断 裂的数值模拟[J]. 模具工业,2005(7):13-16.
- [6] 谢晓龙,赵震,虞松,等.基于 Oyane 损伤和断裂模型 的厚板精冲过程数值模拟和缺陷预测[J].上海交通大 学学报,2006,40(6):927-931.
- [7] David Roylance. Stress-strain Curves[M]. Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [8] 李宏烨, 庄新村, 赵震. 材料常用流动应力模型研究 [J]. 模具技术, 2009(5):9-12.
- [9] KLEEMOAL H J, NIEMINEN M A. On the Strain-Hardening Parameters of Metals [J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2007,5(8):1863-1866.
- [10] HOWARD E Boyer. Atlas of Stress-strain Curves
 [M]. American Soc Metals, 1987:70-75.
- [11] 朱玉生. 套冲在精密冲裁中的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学,2007.
- [12] 李奋强. 微型铝合金轴承座冲锻复合成型模拟与优化 研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
- [13] Scientific Forming Technologies Corporation. DE-FORMTM 2D User's Manual[K]. Columbus, 2006.
- [14] 涂光祺. 精冲技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 16-17.

国内最大加氢反应器筒节锻造成功

近日,中国二重为中石化扬子石化公司生产的加氢反应器第一支筒节锻造成功。该筒节直径 6 250 mm,是目前国内最大的容器筒节件。

据悉,该加氢反应器全套产品共计约需 56 支钢锭。其中 4 台渣油加氢处理反应器的筒体直径达到 6 250 mm,壁厚 510 mm,属于超大直径、壁厚设备,钢锭质量均在 310 t 以上,最大锭型为 420 t。由于锻件 尺寸超大,且钢锭较重,致使冶炼、锻造难度明显加大,目前世界上只有中国和日本具备生产能力。

为保证冶炼、锻制出合格的"双超"加氢锻件,在水压机车间锻制前,中国二重锻造分厂技术人员对"双 超"加氢反应器筒节的生产进行工艺交底和技术指导。水压机车间提前对相关设备进行了全面维护和检查, 确保设备正常运转。生产工段在班前会上要对每火次锻造工艺进行详细交底,对操作过程中可能出现的问 题进行分析,并制定相应措施,确保锻制顺利进行。

(来源:中国压缩机网)