

## 22MnB5 钢板不等温拉深成形的影响因素研究

林建平, 孔庆华, 徐 洲, 闵峻英

(同济大学 机械工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 建立了高温下方盒形件不等温拉深成形的有限元模型. 利用正交试验, 研究热冲压过程中模具温度对 22MnB5 钢板的不等温拉深成形能力的影响, 并分析零件几何参数对 22MnB5 钢板的不等温成形能力的影响. 结果表明, 模具温度越高, 22MnB5 钢板的成形能力越好; 其中凹模温度对成形能力的影响最大, 压边圈影响次之, 凸模温度影响不大. 方盒形件的凸、凹模圆角半径越大, 22MnB5 钢板在高温下不等温拉深成形能力越好; 转角半径越大, 转角区域越不易起皱.

**关键词:** 不等温拉深; 方盒形件; 有限元模拟; 成形能力

**中图分类号:** TG 113

**文献标识码:** A

### Study on Factors of 22MnB5 Steel Anisothermal Drawability

LIN Jianping, KONG Qinghua, XU Zhou, MIN Junying

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A finite element model was established for analyzing 22MnB5 steel anisothermal drawing of square box at high temperatures. Based on the orthogonal experiment, the effect of tool temperatures, including die temperature, binder temperature and punch temperature, on the drawability of 22MnB5 steel was analyzed through the FE model. The results indicate that increasing the temperature of punch, die and holder all can improve the drawability of 22MnB5 steel. But the effect of the die temperature is the most significant while effect of punch temperature is not so pronounced. The effect of geometric parameters, including punch radius, die radius and corner radius, was also investigated. It has been found large dimension of punch and die radiuses have a positive effect on the drawability of 22MnB5 steel; a great corner radius can improve the anti-wrinkle performance of the corner region.

**Key words:** anisothermal drawing; square box; finite element

simulation; drawability

应用高强钢和超高强度钢板是汽车轻量化的重要途径. 但是, 随着钢板强度的增加, 其冲压成形能力会下降, 在常温下冲压容易出现开裂、回弹等缺陷, 而热冲压成形技术能够改善上述缺陷.

热冲压成形工艺是先将钢板加热至奥氏体状态, 然后冲压并淬火处理, 保证钢板有较好成形能力, 同时在形变过程中能够快速冷却, 获得在室温下具有均匀马氏体组织的超高强度钢部件. 由于超高强度钢部件具有高强度、高硬度及良好的抗碰撞性能, 近年来越来越多的科研学者对超高强度钢板的热冲压成形技术进行了研究, 他们多以典型形状零件为研究对象, 探索热冲压成形工艺的规律性. 如 G. Palumbo 等人以圆筒形件为研究对象, 研究了 AZ31 合金加热温度与凸模冲压速度之间的关系<sup>[1]</sup>; P. F. Bariani 等人设计制造了热冲压实验模具, 基于 Nakazima 实验, 对 22MnB5 钢板的高温成形极限进行了研究<sup>[2]</sup>; 邢忠文、包军等通过对超高强度硼钢板的 U 形件热弯曲过程的数值模拟, 研究了自由弯曲和热接触弯曲方法的淬火效果和成形精度<sup>[3]</sup>. 本课题组对 22MnB5 超高强度钢板的热冲压成形进行了基础研究, 通过常温 and 高温单向拉伸试验, 获得了材料的基本力学性能数据, 设计并制造了带有冷却水循环系统的热冲压试验专用模具, 并通过理论预测和高温胀形实验, 对其高温成形极限进行研究探索<sup>[4-7]</sup>.

盒形件是典型的非轴对称形的拉深件, 在盒形件的拉深过程中, 材料的变形较为复杂, 变形规律具有一定的典型性<sup>[8]</sup>. 热冲压材料的性能具有温度敏感性的特点, 而模具与板料的接触方式是影响热成形过程中板料温度分布的主要因素. 盒形件冲压成

收稿日期: 2009-12-31

基金项目: 上海汽车工业科技发展基金(0415)

第一作者: 林建平(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为板料成形与汽车轻量化技术.

E-mail: jplin58@mail.tongji.edu.cn

通讯作者: 徐洲(1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属板料成型技术. E-mail: cambrejr@126.com

形时,板料与模具的接触方式具有典型性.而现有文献中尚未发现对盒形件热冲压成形工艺的研究.因此,以盒形件为研究对象,对热冲压拉深工艺作进一步探讨更具有实际意义.

笔者以方盒形件为研究对象,用数值模拟的方法,研究热冲压过程中模具温度和零件几何参数对高温下 22MnB5 钢板不等温拉深成形能力的影响.

## 1 22MnB5 钢板不等温拉深有限元模拟

### 1.1 有限元几何模型

根据图 1 所示尺寸,在三维软件 CATIA 中建立几何模型,将其以 IGS 的文件格式导入 Pam-Stamp 中,合理划分网格,得到方盒形件的有限元几何模型.如图 2 所示.

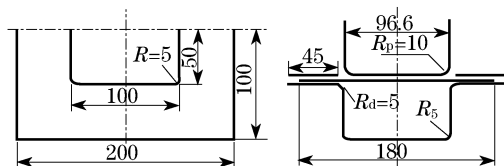


图 1 方盒形件模具(单位:mm)

Fig.1 Dies drawing of square box(unit:mm)

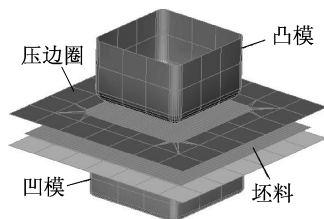


图 2 有限元网格模型

Fig.2 The FE model

### 1.2 材料模型

实验材料选择 22MnB5 钢板,厚度为 1.7mm.板料在热冲压拉深成形过程中会发生温降(不等温拉深),而 22MnB5 钢的性能对温度很敏感,因此,在有限元模拟时,材料模型需要输入不同温度下的应力应变  $\sigma-\epsilon$  曲线(图 3).

### 1.3 接触模型

在有限元模拟中,热冲压过程中的板料与模具的接触计算分为机械接触和热学接触两部分.前者与传统冷冲压工艺相同,采用罚函数法计算接触力与摩擦状况;后者则使用热传导理论进行传热学计算,分析热流量和坯料的温度变化等.因此,在数值模拟中需要确定板料与空气以及板料与模具之间的热传导系数.热传导系数  $h$  可以由下式定义<sup>[9]</sup>:

$$h = -\frac{c_p \rho V}{At} \ln \left( \frac{T(t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \right) \quad (1)$$

式中: $c_p$  为比定压热容; $\rho$  为密度; $T(t)$  为瞬时温度; $T_0$  为初温; $T_\infty$  为接触体的温度(可看作定值); $V$  为板料体积; $A$  为接触面积; $t$  为传热时间.

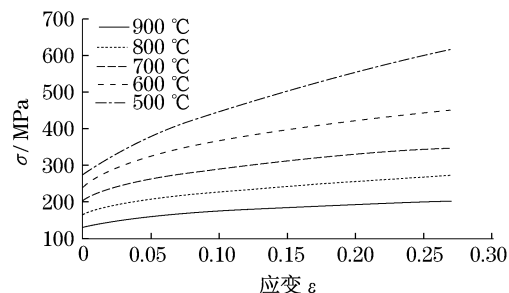
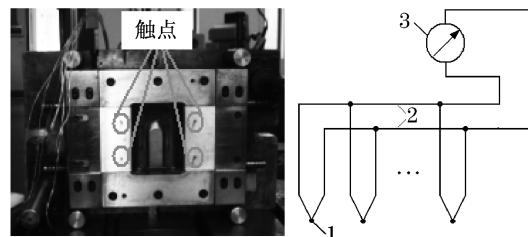


图 3 22MnB5 钢高温应力应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of 22MnB5 steel at high temperatures

由式(1)可知,确定热传导系数,需获得板料冷却过程的温度历史.为此,采用课题组自主开发的带测温系统的热冲压模具(图 4),通过传热试验得到 22MnB5 钢板空冷,与模具单、双接触的降温历史.

将试件在高温炉中加热至 950 °C,保温 5 min,使其完全奥氏体化.然后将其转移至模具测温系统的触点上,即可用温控仪采集数据.通过控制模具的合模与开模,实现试件与板料的双面接触和单面接触.由于转移过程中存在温降,因此采集到的温度从 820 °C 左右开始,如图 5 所示.



a 模具图  
1—触点; 2—K型热电偶丝; 3—温控仪

图 4 热冲压模具测温系统

Fig.4 The thermometric system of the die for hot stamping

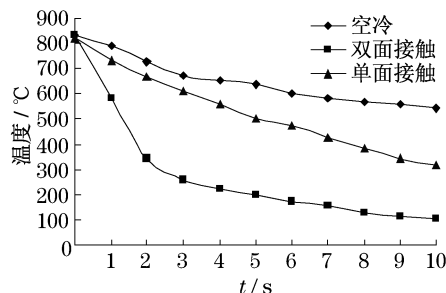


图 5 板料的温度历史

Fig.5 The temperature history of blank

#### 1.4 有限元模拟结果

为保证方盒形件在法兰处不起皱,且材料能顺利流入凹模,故冲压工艺参数初步设为压边力  $F=100\text{ N}$ ,冲压速度  $v=15\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,摩擦系数  $f=0.15$ .板料初温为  $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,模具初温为  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $t=2\text{ s}$  时,得到有限元模拟结果如图6所示.

从图6a中可以看出,方盒形件拉深成形时,板料的最大应变发生在底部圆角与直壁相切处;从图6b可以看出,法兰处温度为  $580\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,底部温度为  $740\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,直壁与凸、凹模圆角处温度为  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,这与1.3节传热试验  $t=2\text{ s}$  时板料的温度基本相符.由于直壁部分与凸模圆角部分的温度差异不大,因此,凸模圆角部分材料的成形能力与直壁部分材料的成形能力也相差不大.但是,由于板料变形一开始在凹模口变薄最大,这部分的金属通过凹模圆角时,经弯曲变形又一次减薄.在拉深开始向凸模圆角时,沿凸模圆角发生弯曲变形及胀形变形,厚度再度减薄,使得角部凸模圆角与直壁相切处(图6aG区域)成为破裂危险断面,易拉深破裂.

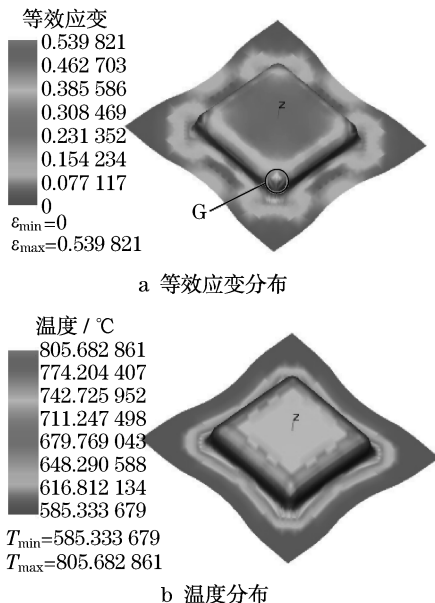


图6 高温下22MnB5钢板方盒形件不等温拉深有限元模拟结果

Fig.6 The result of finite element simulation of square box non-isothermal drawing process of 22MnB5 steel at high temperatures

## 2 模具温度影响分析

在热冲压过程中,板料被加热到较高温度,板料与模具之间存在温差,接触也不均匀,如图7.图中,

A处与模具双面接触,B处与模具不接触,C处与模具单面接触.由于接触不均匀,引起板料在冲压过程中温度不均匀,造成22MnB5板的成形能力不均匀.

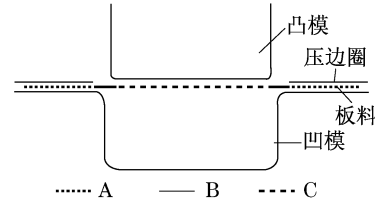


图7 板料与模具的接触

Fig.7 The contact between blank and dies

拉深成形主要需要克服起皱与开裂缺陷.对于方盒形件,起皱通过调节压边力很容易得到控制,所以,为研究冲压参数在高温下对22MnB5钢板不等温拉深成形能力的影响,可在固定压边力的情况下,用方盒形件的成形高度作为评价其拉深成形能力的标准.所谓成形高度即指方盒形件不拉深破裂的极限高度.也就是说,成形高度越大,成形能力越好.

由1.4节分析可知,方盒形件的破裂危险断面位于角部凸模圆角与直壁相切处,即图7中的B区域.从图6可以发现,破裂危险断面的材料温度较高,且破裂处温度随模具温度的变化不大,保持在  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右.因此,决定采用22MnB5钢  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  的成形极限图<sup>[7]</sup>来判断方盒形件不等温拉深的成形极限.凸模、凹模和压边圈的温度对板料的温度会产生不同程度的影响,为减少模拟次数并分析各因素的主次关系,设计正交试验来研究模具温度对22MnB5钢板不等温拉深成形能力的影响.

#### 2.1 正交试验设计与有限元模拟结果

表1为正交试验的试验因子和试验水平,采用  $L_9(3^4)$  的正交表来拟定试验方案,其中,  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为凸模温度、凹模温度、压边圈温度.依此试验方案进行有限元模拟,得到模拟结果如表2所示.表中,  $H$  为成形高度,  $T_b$  表示破裂处温度.

表1 试验因子与水平  
Tab.1 Test factors and their levels  $^{\circ}\text{C}$

水平	试验因子		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	190	190	190
2	390	390	390
3	590	590	590

表2中,  $K_1, K_2$  和  $K_3$  分别为表1中的水平1,2和3所对应的试验指标的数值之和,  $k_1, k_2$  和  $k_3$  分别为表1中的水平1,2和3试验指标的平均值.

表 2 正交试验方案及有限元模拟结果  
Tab.2 The orthogonal experiment scheme and the result of finite element simulation

水平	因子			$H/\text{mm}$	$T_b/^\circ\text{C}$
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		
$\alpha_1\beta_1\gamma_1$	190	190	190	20.90	795
$\alpha_1\beta_2\gamma_2$	190	390	390	23.57	797
$\alpha_1\beta_3\gamma_3$	190	590	590	26.44	794
$\alpha_2\beta_1\gamma_2$	390	190	390	21.93	801
$\alpha_2\beta_2\gamma_3$	390	390	590	24.52	800
$\alpha_2\beta_3\gamma_1$	390	590	190	25.67	802
$\alpha_3\beta_1\gamma_3$	590	190	590	23.58	801
$\alpha_3\beta_2\gamma_1$	590	390	190	22.87	802
$\alpha_3\beta_3\gamma_2$	590	590	390	25.51	803
$K_1$	70.93	69.43	69.46		
$K_2$	72.13	70.96	71.01		
$K_3$	71.96	77.62	74.54		
$k_1$	23.643	22.143	23.153		
$k_2$	24.040	23.653	23.670		
$k_3$	23.987	25.873	24.847		

2.2 试验结果分析

试验的方差分析见表 3( $e$  表示误差).  
从方差分析结果可以看出,因素  $\beta$  影响高度显著, $\gamma$  影响显著, $\alpha$  影响不显著.因素主次顺序为  $\beta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ .即在模具温度中,凹模温度对方盒形件的 不等温拉深成形高度的影响最大,压边圈的温度影响次之,凸模温度的影响最小.图 8 表示方盒形制件成形高度随着凸模温度、凹模温度和压边圈温度的变化情况,其中, $T$  表示模具温度, $T_1$  代表凸模温度, $T_2$  代表凹模温度, $T_3$  代表压边圈温度.

表 3 方差分析  
Tab.3 Analysis of variance

因素	平方和	自由度	均方	$F$	显著水平
$\alpha$	0.278	2	0.139		
$\beta$	21.121	2	10.561	44.374	* *
$\gamma$	4.519	2	2.259	4.492	*
$e$	0.675	2	0.338		
总结	26.594	8			

注: $F_{0.05}(2,4)=6.94,F_{0.01}(2,4)=18$ .

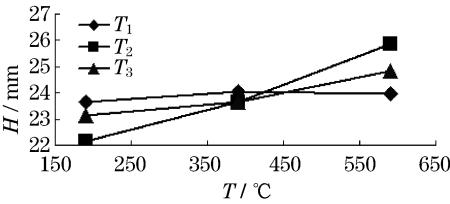


图 8 模具温度对成形高度的影响  
Fig.8 The effect of dies temperature on forming height

在热冲压过程中,板料与模具接触后温度会大幅度下降.随着温度降低,材料中的动态回复作用下

降,塑性变形过程中的加工硬化作用增强,材料的塑性降低.模具温度升高后会减小板料的降温速率,在一定程度上提高了板料的成形能力.凹模与板料接触面积最大,因此对方盒形件的成形高度影响最大;压边圈温度的提高可以减缓压边处材料的硬化,使得材料更加容易流入凹模参与变形,因此,其温度变化对成形高度也有一定的影响;凸模与板料接触大部分位于方盒形件底部,由于这部分很少参与变形,其性能的提高对整个板料性能的提高贡献不大.因此,凸模温度对方盒形件的成形高度影响最小.

3 零件几何参数的影响分析

除模具温度外,影响高温下的 22MnB5 钢板方盒形件不等温拉深成形能力的因素还很多,如零件的几何形状、压边力、冲压速度等.考虑到生产实际情况及对生产、模具调试的指导意义,选取零件凸、凹模圆角半径、转角半径几个主要参数研究.在其他参数一定的情况下,分别对凸模角半径  $R_p$ 、凹模角半径  $R_d$  和转角半径  $R$ (见图 1)进行有限元仿真,得到单一因素对成形高度的影响规律,如图 9 所示.

从图 9a, b 可以看出,随着凸、凹模圆角半径的增大,方盒形件的成形高度随之增大,即凸、凹模圆角越大,成形能力越好.从图 9c 可以看出,转角半径对方盒形件的成形高度影响较小.对于冷冲压盒形件,转角半径  $R$  越小,转角区域材料的流动阻力越大,增加了传力区转角部分的拉力,会使盒形件的成形高度降低<sup>[10]</sup>.但对热冲压盒形件,由于在变形过程中存在动态回复的软化机制,因此降低了转角半径对成形高度的影响.

在其他工艺参数相同的情况下,从图 10 和图 11 可以看出,当  $R=4\text{ mm}$  时,法兰上转角部位材料厚度为 1.96 mm;当  $R=10\text{ mm}$  时,材料厚度为 1.86 mm,即转角半径越大,方盒形件法兰上更不易发生起皱. $R$  的增大,一方面降低了转角区域材料流动的阻力,一方面增加了吸收拉深时产生的多余三角形的材料,因此材料更不容易堆积而起皱.由于在热冲压中转角对成形高度的影响不大,所以可以尽量用大转角代替小转角,以避免法兰转角区域起皱.

4 结论

(1)模具温度越高,成形能力越好;其中,凹模温度对成形能力的影响最显著,压边圈温度对成形能

力有一定的影响,凸模温度的影响很小。

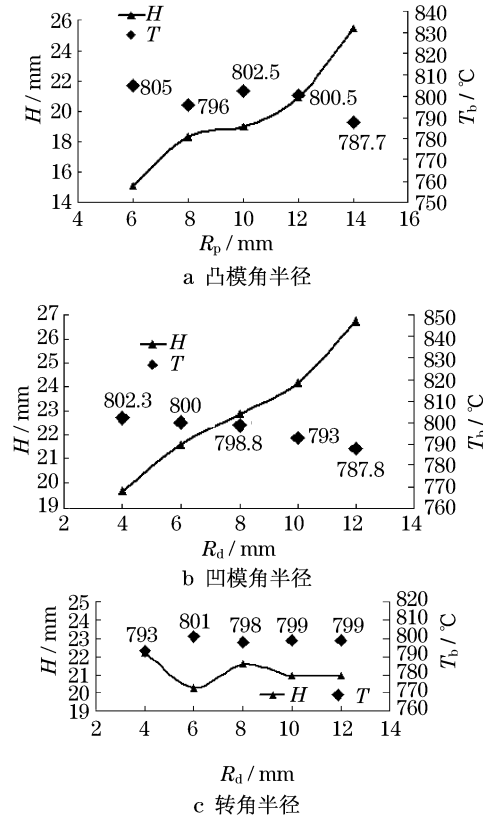


图9 零件几何参数  $R$  对成形高度的影响

Fig.9 The effect of geometric parameters on forming height

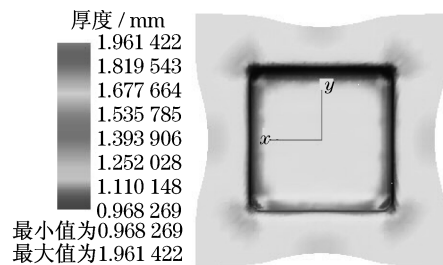


图10  $R = 4$  mm 时板料的厚度变化(单位:mm)

Fig.10 The thickness variation of sheet metal when  $R = 4$  mm(unit:mm)

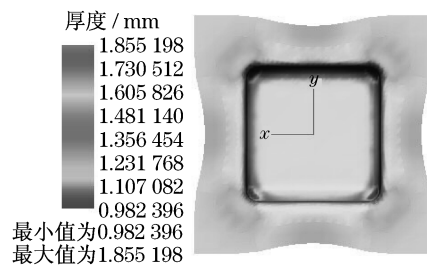


图11  $R = 10$  mm 时板料的厚度变化(单位:mm)

Fig.11 The thickness variation of sheet metal when  $R = 10$  mm (unit:mm)

(2)方盒形件的凸、凹模圆角半径越大,高温下不等温拉深成形能力越好;较大的转角半径可以改善方盒形件法兰上转角区域的起皱现象,提高高温下22MnB5 钢板的成形能力。

#### 参考文献:

- [1] Palumbo G, Sorgente D, Tricarico L, et al. Numerical and experimental investigations on the effect of the heating strategy and the punch speed on the warm deep drawing of magnesium alloy AZ31 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191:342.
- [2] Bariani P F, Bruschi S, Ghiotti A, et al. Testing formability in the hot stamping of HSS [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57:265.
- [3] Xing Z W, Bao J, Yang Y Y. Numerical simulation of hot stamping of quenchable boron steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499:28-31.
- [4] 朱巧红. 热成形模具热平衡分析及冷却系统设计优化[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2007.  
ZHU Qiaohong. Heat balance analysis of hot stamping and optimizing design of cooling system [D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2007.
- [5] 王立影. 超高强度钢板热冲压成形技术研究[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2008.  
WANG Liying. Research on hot stamping technology for ultra high strength steels [D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2008.
- [6] 胡琦. 超高强度硼钢板热冲压的力学性能研究[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2008.  
HU Qi. Study on the mechanical properties of ultra high strength boron steels in hot stamping [D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2008.
- [7] 孙国华. 超高强度硼钢板高温成形极限研究[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2009.  
SUN Guohua. Study on the High temperature Forming Limit of Ultra-high Strength Boron Steels [D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2009.
- [8] 齐会文. 方盒形件拉深工艺分析及数值模拟[D]. 秦皇岛市: 燕山大学机械学院, 2005.  
QI Huiwen. Analysis of drawing process of square box part and numerical simulation [D]. Qinhuangdao: Yanshan University. College of Mechanical Engineering, 2005.
- [9] Alberto Turetta. Investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of quenchable high strength steels in hot stamping operations [D]. Padua: Padua University. Institute of Mechanical Engineering and Management, 2008.
- [10] 王凤琴, 赵军, 官英平, 等. 方盒形件拉深破裂预测的研究[J]. 塑性工程学报, 2003(6):19.  
WANG Fengqin, ZHAO Jun, GUAN Yingping, et al. Study on fracture prediction of deep drawing for square box[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003(6):19.