

文章编号: 1673-5196(2007)05-0034-05

韧性断裂机理的理论探讨与基于铝合金薄板韧性断裂准则的修正

朱浩¹, 朱亮^{1,2}, 陈剑虹^{1,2}, 吕丹¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 有色金属合金省部共建教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 对韧性材料的断裂机理进行理论研究. 当裂纹尖端附近两个相邻的材料微单元体的破坏面共面或共线时, 裂纹可以通过破坏面扩展并传递到相邻的单元; 当两个单元体的破坏面与两单元体中心线成一定角度时, 两单元体之间将产生相对滑动或旋转, 使得两破坏面之间重新共面或共线, 从而使得裂纹可以扩展, 形成一个连续的裂纹开裂面. 基于铝合金 6063 薄板修正韧性材料的断裂准则, 并用简单的平面应力状态下的平板拉伸试验和平面应变状态下的缺口拉伸试验, 结合有限元 ABAQUS 计算求得韧性断裂准则中的材料常数.

关键词: 韧性断裂机理; 铝合金薄板; 韧性断裂准则

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A

Theoretical inquiry into ductile fracture mechanism and modification of ductile fracture criterion based on aluminum alloy sheet

ZHU Hao¹, ZHU Liang^{1,2}, CHEN Jian hong^{1,2}, LU Dan¹

(1. State Key Lab. of Gansu Advanced Non ferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Key Lab. of Non ferrous Metal Alloys, The Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: The ductile fracture mechanism of ductile materials was theoretically investigated. If the fracture surface between two adjacent cells close to the crack tip was coplanar or collinear, the cracks would propagate and transfer to the adjoining cell through the fracture surface. If the fracture surface was located at an angle to the midline of the adjoining cells, the two cells would slip or rotate relatively, making the fracture surface coplanar or collinear newly. Therefore, the crack could propagate, forming a continuous fracture surface. At the same time, the fracture criterion of ductile materials was modified based on 6063 aluminum alloy sheet. The materials constants of ductile fracture criterion were obtained by using planar tensile in the tests condition of plane stress and the notch tensile tests in the condition of plane strain combined with FEM ABAQUS calculation.

Key words: ductile fracture mechanism; aluminum alloy sheet; ductile fracture criterion

由于裂尖断裂过程中的微损伤及裂尖塑性区的存在, 使得韧性断裂机理相当复杂. 韧性断裂中既有拉伸破坏, 又有剪切破坏. 目前工程上常用的断裂判据大多是脆性断裂判据, 对影响裂尖断裂的因素考虑不够, 而且不能处理裂纹尖端的分叉开裂. 在各种复杂的断裂判据中, 最大周向正应力判据、 G 判据和 S 判据等能量判据不能反映裂纹的拉压状态, 也没

有考虑裂尖的弹塑性力学关系^[1~4]. 按照这些断裂判据所预测的裂纹开裂与演化过程与实际的韧性试验和工程结果有较大的差异. 因此研究韧性断裂过程对于实际工程断裂问题的解决有着重要价值. 本文对韧性材料的断裂机理进行理论性探讨, 并且基于铝合金 6063 薄板修正韧性材料的断裂准则.

1 韧性材料断裂机理

用图示法解释裂纹尖端裂纹扩展机制. 取裂纹尖端附近圆周上两个相邻的材料微单元体 A 和 B ,

收稿日期: 2007-05-07

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项(2004CCA 04900)

作者简介: 朱浩(1975-), 男, 江苏徐州人, 博士生

这里的裂尖是韧性材料裂纹在应力场的作用下形成空穴上的真实裂尖.假设裂纹在载荷作用下裂尖应力场在 A 和 B 两个微单元上产生的最大应力 σ ,当载荷增加到 $\sigma = \sigma_c$ 时,单个微单元产生破坏并沿着破坏面断裂.且微元的破坏面为 A' 和 B' ,破坏面经过微单元的中心点 O_A 和 O_B .节点 3 和节点 4 是微元 A 的节点,节点 $3'$ 和节点 $4'$ 是微元 B 的节点.

在远场载荷 P_1 的作用下,微单元 A 的破坏面 A_1' 和微单元 B 的破坏面 B_1' 形成共面(三维)或共线(二维),此时微单元 A 的破坏可以传递到微单元 B 上,使得破坏过程能够继续进行下去,形成一个连续的宏观断裂面,从而最终形成裂纹的扩展开裂.微单元破坏面的示意图如图 1 所示.

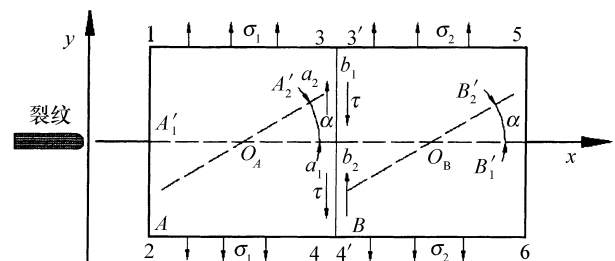


图 1 韧性材料相邻微单元破坏的过程示意图

Fig. 1 Sketch map of fracture process between adjoining cells of ductile materials

在远场载荷 P_2 的作用下,微单元 A 的破坏面 A_2' 和微单元 B 的破坏面 B_2' 与两个微单元中心的连线 $O_A O_B$ 形成夹角 α ,两个破坏面的两个微单元的共边或共面 34 上的点 a_2 和 b_2 不重合.但是由于延性断裂过程中裂尖材料在高应力的作用下将产生塑性变形,微单元 A 和微单元 B 之间将产生相对的滑动或旋转,这时两个微单元的共线(二维)或共面(三维) 34 和 $3'4'$ 之间产生滑动,即节点 3 和节点 $3'$ 与节点 4 和节点 $4'$ 之间由于塑性大变形而产生相对的滑动.微单元 A, B 受力产生变形后,节点 a_2 和 b_2 滑动到重合的位置,破坏面 A_2' 和 B_2' 形成共线(二维)或共面(三维)的状态,如图 2 所示.

这时的破坏面 A_2' 的破坏过程可以传递到破坏面 B_2' 上,从而形成一个连续的裂纹开裂面.所以微单元 A 和微单元 B 的破坏过程能够连续下去,因此形成连续的破坏面进而形成宏观上的裂纹扩展.当材料发生韧性断裂时,裂纹的开裂要全面考虑裂纹尖端所受的应力状态,裂尖处的最大主应力,最大剪应力或最大有效应力决定着裂纹的开裂和扩展.同时韧性材料的断裂还要考虑裂尖处塑性区的影响.韧性断裂中包括了 I 型张开型的拉伸断裂和 II 型滑移型的剪切断裂.具体断裂形式取决于材料本身的

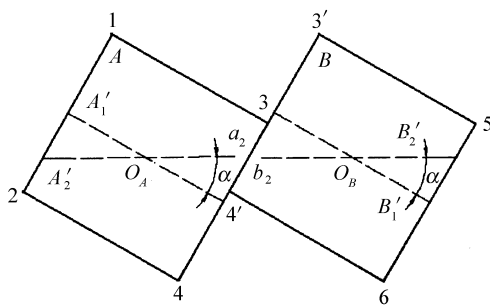


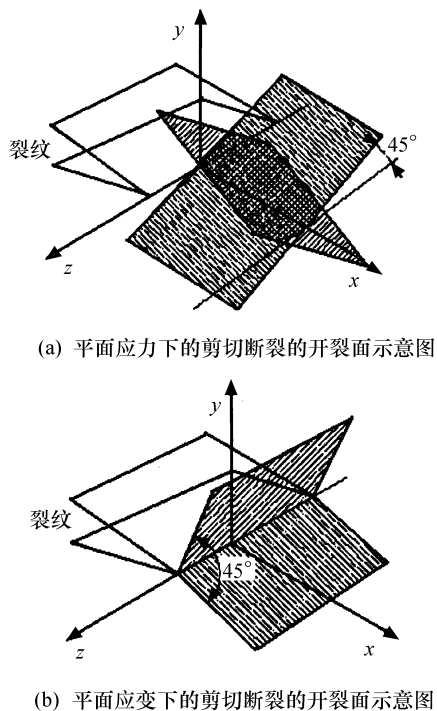
图 2 韧性材料相邻微单元之间的滑动破坏示意图

Fig. 2 Sketch map of slip fracture between adjoining cells of ductile materials

性质和材料所受的应力状态.

由于韧性材料裂尖处的破坏形式既有拉伸断裂又有剪切断裂,因此这里对断裂的判断要根据材料所处的力学状态进行分析.

对于剪切型断裂,通常有图 3 所示两个断裂形式.



(a) 平面应力下的剪切断裂的开裂面示意图

(b) 平面应变下的剪切断裂的开裂面示意图

图 3 剪切型断裂开裂面的示意图

Fig. 3 Sketch map of fracture surfaces of shear type fracture

1) 当材料的抗剪强度大于抗拉强度的一半时,裂纹在载荷的作用下先达到其抗拉强度,则认为应力场中的最大周向拉应力为裂纹开裂和扩展的驱动力,这时的裂纹在 $\theta = 0^\circ$ 处产生 I 型张开型断裂.

2) 当材料的抗剪强度小于抗拉强度的一半时,裂纹在载荷的作用下先达到其剪切强度,则认为应

力场中的最大剪应力为裂纹开裂和扩展的驱动力,这时的裂纹属于 II 型的滑移型断裂.

2 韧性断裂准则

2.1 韧性断裂准则的修正

基于 Le maitre 损伤力学理论^[5]及塑性势理论^[6]导出韧性断裂准则^[7]:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

式中: σ_m , $\bar{\sigma}$ 分别是平均应力和等效应力; $\bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}_f$ 分别是等效应变和断裂时的等效应变; p 和 C 为材料常数, C 是一个与塑性变形中所产生的微损伤有关的参量, 其物理意义是间接代表微孔洞的体积分数(微孔损伤变量)的大小. 从力学上来讲, 它是等效应变和三轴应力度的总的综合作用效果. 但更加取决于等效应变.

式(1)断裂准则对于预测韧性材料的断裂非常有效. 但是对于铝合金薄板来说, 这个韧性断裂准则是不够准确的. 因为铝合金材料的损伤是从材料过了最高载荷(颈缩开始点), 经历了塑性大变形之后产生的. 在颈缩之前, 材料中几乎没有产生损伤或产生的损伤量可以忽略, 所以将式(1)可修正成式(2):

$$\int_{\bar{\epsilon}}^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C \quad (2)$$

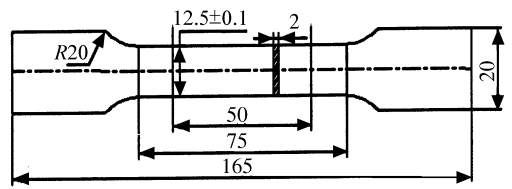
式中: $\bar{\epsilon}$ 为试样在最大载荷时对应的等效塑性应变, $\bar{\epsilon}_f$ 是试样断裂时对应的等效塑性应变.

2.2 韧性断裂准则中材料常数的确定

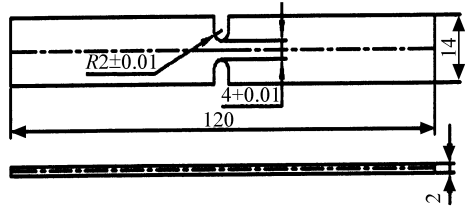
在使用式(2)的时候, 要预先确定与断裂处的微孔洞体积分数有关的材料常数 p 和 C , 而微孔洞体积分数是个统计物理量, 需要测定大量的试验数据, 不便于工程应用. 本文中简单的拉伸试验来确定式(2)中的材料常数^[8,9].

使用平面应力状态的平板拉伸试样和带缺口的平面应变试样进行拉伸试验, 从而获得式(2)中的材料常数. 使用的单向拉伸试样是按照 GB 6397-86 的规定制成的, 单向拉伸试样和带缺口的拉伸试样如图 4 所示. 平板拉伸和缺口拉伸试验所获得的应力-应变曲线如图 5 所示.

从图 5a 可以看出, 平板拉伸试验中的最高载荷对应的等效塑性应变与断裂时对应的等效塑性应变值分别是 0.055 和 0.109; 缺口拉伸试验中的最高载荷对应的等效塑性应变与断裂时对应的等效塑性应变值分别是 0.035 和 0.094. 从图还可以看出, 平板拉伸时的断裂应变大于缺口拉伸时的断裂应变, 而平板拉伸时的屈服应力及峰值应力小于缺口拉伸



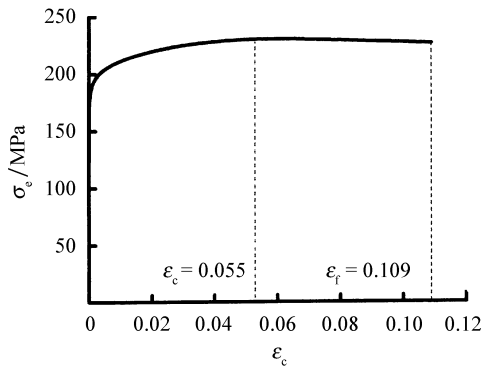
(a) 平面应力状态的单向拉伸试样



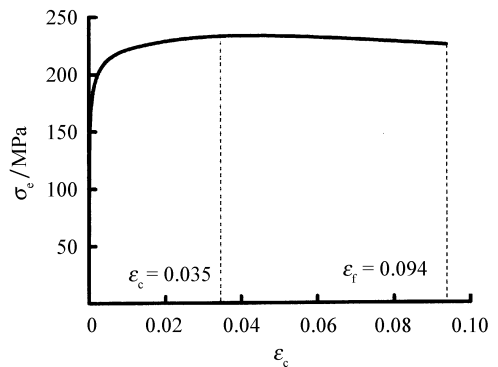
(b) 平面应变状态的缺口拉伸试样

图 4 两种应力状态的拉伸试样

Fig. 4 Tensile specimens under two kinds of stress states



(a) 平板拉伸



(b) 缺口拉伸

图 5 两种试验的工程应力-应变曲线

Fig. 5 Engineering stress strain curves of two tests

时的屈服应力及峰值应力, 原因是平板拉伸时, 在材料中的三轴应力始终为 0.34, 而在缺口拉伸中产生的三轴应力最大值可达到 0.515, 相对较高的三轴应力使材料的屈服应力和峰值应力提高. 三轴应力提高时材料的塑性变形变得比较困难, 要达到相同的应变时需要的应力就会更高, 但三轴应力升高时,

材料断裂的驱动力增大,导致材料提前断裂.

平面应力状态的单向拉伸试样在拉伸的过程中几乎没有发生颈缩现象,试样的三轴应力度一直维持在 0.34,所以到断裂时刻为止应变路径始终保持恒定,这一点可以从图 6 得到验证.图 6 是用有限元 ABAQUS 模拟平板拉伸试验计算出的试样中心的三轴应力度与等效塑性应变之间的关系曲线.从图可以看出,单向拉伸试样中心的三轴应力度不随等效塑性应变的变化而变化.相反地,缺口拉伸试样在拉伸的过程中发生了颈缩现象,试样中心的三轴应力度随着加载时间的增量步增大而增大,如图 7a 所示.试样厚度方向的三轴应力也是随着加载时间的增量步的增大而增大,如图 7b 所示.在同一加载增量步的条件下,试样缺口附近不同区域等效塑性应变也不同.图 7c 是缺口附近同一加载增量步条件下不同路径的示意图.三轴应力度大的位置,其等效塑性应变较小,所以材料在拉伸的过程中,当板材发生颈缩以后,应变路径都要发生不同程度的漂移^[10].图 8 是用有限元 ABAQUS 模拟的缺口拉伸试验曲线,从图可以看出,三轴应力度随着等效塑性应变的变化而变化.

对于平面应力状态的平板拉伸试样而言,三轴应力度在拉伸的过程中是个常数(0.34),所以直接

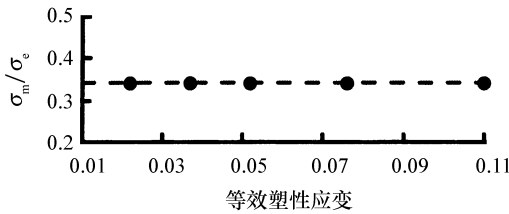
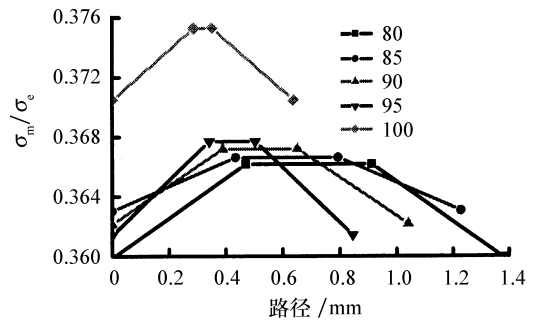
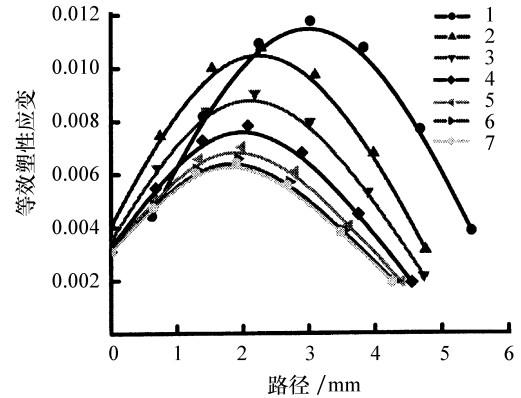


图 6 单向拉伸试样中心三轴应力度与等效塑性应变 (PEEQ) 关系

Fig. 6 Relationship of stress triaxiality vs PEEQ of uniaxial tensile specimen



(b) 不同增量步下厚度方向上的三轴应力度分布



(c) 同一增量步下不同路径上的等效塑性应变分布

图 7 缺口拉伸试样中的三轴应力度与等效塑性应变的分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of stress triaxiality and PEEQ of notch tensile specimen

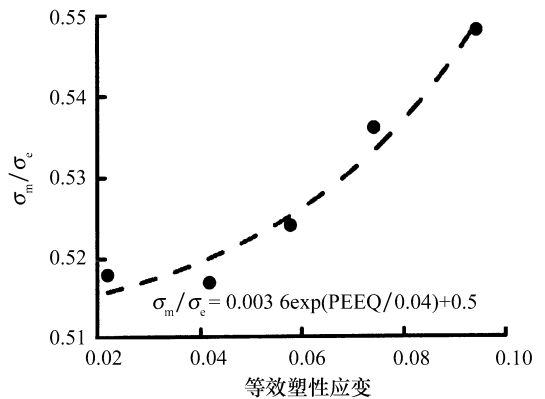
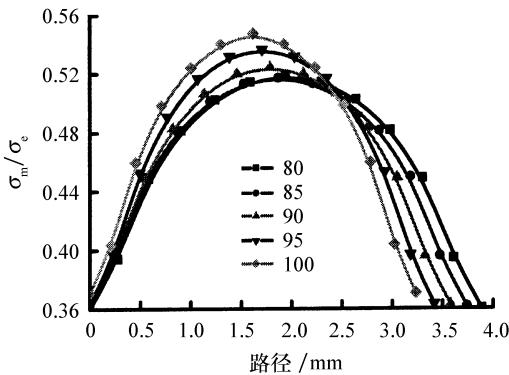


图 8 缺口拉伸试样中心三轴应力度与等效塑性应变 (PEEQ) 关系曲线

Fig. 8 Relationship of stress triaxiality - PEEQ of notch tensile specimen

将 0.34 代入式(2)进行计算.最高应力处的等效塑性应变 $\bar{\epsilon}$ 和断裂时的等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_f$ 直接采用上述的平板拉伸试验数据.

对于平面应变状态的缺口拉伸试样而言,三轴应力度是个变量,根据图 8 缺口拉伸试样中心三轴应力度与等效塑性应变 (PEEQ) 之间的关系,通过



(a) 不同增量步下宽度方向上的三轴应力度分布

数据拟合可以得到:

$$\sigma_m / \sigma_c = 0.003 \exp(\text{PEEQ} / 0.04) + 0.5 \quad (3)$$

将式(3)以及缺口拉伸试验中的 $\bar{\epsilon}$ (缺口拉伸试样发生颈缩时的等效塑性应变)和 $\bar{\epsilon}_f$ (缺口拉伸断裂时的等效塑性应变)代入式(2)所得到的方程,联合平板拉伸得到的方程进行计算,得到铝合金 6063 的韧性断裂准则中的材料常数 $p = 1.2, C = 0.0007$ 。所以韧性材料的断裂准则变为

$$\int_{\bar{\epsilon}}^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \bar{\epsilon}^{1.2} d\bar{\epsilon} = 0.0007 \quad (4)$$

可以认为,当 $C \geq 0.0007$ 时,材料发生断裂。

3 结论

1) 材料发生韧性断裂时,裂纹的开裂要考虑裂纹尖端所受的应力状态,具体断裂形式取决于材料本身的性质和材料所受的应力状态。

2) 韧性断裂中包括了 I 型张开型的拉伸断裂和 II 型滑移型的剪切断裂。当材料的抗剪强度大于抗拉强度的一半时,裂纹在载荷的作用下先达到其抗拉强度,则认为应力场中的最大周向拉应力为裂纹开裂和扩展的驱动力,这时的裂纹在 $\theta = 0^\circ$ 处产生 I 型张开型断裂。当材料的抗剪强度小于抗拉强度的一半时,裂纹在载荷的作用下先达到其剪切强度,则认为应力场中的最大剪应力为裂纹开裂和扩展的驱动力,这时的裂纹属于 II 型的滑移型断裂。

3) 裂纹尖端附近圆周上两个相邻的材料微单元体的破坏面共面或共线时,裂纹可以通过破坏面扩展并传递到相邻的单元;当两个单元体的破坏面与两单元体中心线成一定的角度时,两单元体之间将产生相对的滑动或旋转,使得两破坏面之间重新共面或共线,从而使得裂纹可以扩展,这时破坏面的破坏过程可以传递到相邻的破坏面上,从而形成了一个连续的裂纹开裂面。

4) 基于铝合金薄板修正了韧性断裂准则,并且研究了韧性断裂准则中材料常数的计算方法。用简单的拉伸试验(平面应力状态的单向拉伸试验和平面应变状态的缺口拉伸试验)结合有限元 ABAQUS 计算,获得了韧性断裂准则中的材料常数。

参考文献:

- [1] 左宏,陈宜亨,郑长卿.复合型韧性断裂试验和控制参数[J].力学学报,1999,31(5):534-541.
- [2] BIAN L C, KIM K S. The minimum plastic zone radius criterion for crack initiation criterion applied to surface cracks and through cracks under mixed mode loading [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(11): 1 169-1 178.
- [3] ISAKSSON P, STAHLE P. A directional crack path criterion for crack growth in ductile materials subjected to shear and compression loading under plane strain conditions [J]. International Journal of Solid and Structure, 2003, 40(13-14): 3 523-3 536.
- [4] 朱浩,朱亮,陈剑虹.铝合金在三种不同的应力状态下断口的分析[J].兰州理工大学学报,2006,32(6):28-31.
- [5] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture [J]. J Eng Mat Tech, 1985, 107: 83-89.
- [6] 吴诗婷.金属超塑性变形理论[M].北京:国防工业出版社,1997.
- [7] 于忠奇,杨玉英,王永志,等.基于韧性断裂准则的铝合金板材成型极限预测[J].中国有色金属学报,2003,13(5):1 223-1 226.
- [8] TAKUDA H, MONI K. Finite element analysis of limit strains in biaxial stretching of sheet metals allowing for ductile fracture [J]. Int J Mech Sci, 2000, 42(4): 785-798.
- [9] TAKUDA H, MONI K. Prediction of forming limit in deep drawing of Fe/Al laminated composite sheet using ductile fracture [J]. J Mat Pro Tech, 1996, 60(1-4): 291-296.
- [10] DOEGE E, DOEGE E, DSOKI T E, et al. Prediction of necking and wrinkling in sheet metals forming [J]. J Mat Pro Tech, 1995, 50(1-4): 197-206.