

金属板料成形极限的研究

江 健 孙政元

(锻压教研室)

摘 要

本文用 $M-K$ 凹槽模型和倾斜凹槽模型,计算了不同材料性能参数的成形极限图,计算了不同应变路径对成形极限图的影响,并用双板实验的结果与理论计算结果进行了对比。实验与理论计算结果都表明,曲线应变路径对成形极限图有明显影响。因此,用实验方法绘制成形极限图时,必须保证应变路径的直线性。

A Research of Sheet Metal Forming Limit

Jiang Jian Sun Zheng-yuan

Abstract

The $M-K$ groove model and inclined-groove model are used to calculate forming limit diagrams for sheet metal having different properties. The influence of different strainpaths on forming limit diagrams is analysed. A comparison is made between the results of calculations and double-plank experiments. The results, both experiments and calculations, show that curved strainpaths have obvious influence on forming limit diagrams, so the linear strainpaths must be ensured when making forming limit diagrams experimentally.

一、前 言

在1965年到1968年间, Keeler 和 Goodwin 提出了成形极限图的概念^[1,2]。这一概念的提出,为金属板料成形极限的研究开辟了一条新的途径。成形极限图反映金属板料在受拉状态下变形时的成形极限能力。对于实际生产中的成形件,有相当数量的破坏是在两向拉应力状态下发生的。因此,研究成形极限图具有潜在的应用价值,它可以为金属板料在受拉状态下的成形极限能力,提供一个综合性的指标。

用实验手段获得材料的成形极限图普遍采用的方法是:用半球形凸模拉伸成形不同宽度的试件。近几年,也有不少学者采用了双板实验方法^[3,4]。到目前为止,各国学者对成形极限图已进行了大量实验研究,不仅做出了各种不同材料的成形极限图,而且分析了 n 、 r 值以及厚度、曲率、应变路径等因素对成形极限图的影响。同时,许多学者用理论分析的方法对成形极限图进行了计算^[5-8]。用理论分析成形极限图,就是分析金属板料在受拉变形过程中的塑性失稳。由于金属板料成形极限问题的复杂性,使现有理论计算和实验结果之间仍存在一定差异。但是,对成形极限图的广泛深入研究,对于揭示板料受拉成形极限的规律、对于用实验来验证现有塑性理论,都有重要的意义。

二、理论分析

在平面应力状态下,按 Hill 的各向异性理论,可推出下列关系式:

$$\begin{cases} d\epsilon_x = \frac{3(1+r)}{2(2+r)} \left(\sigma_x - \frac{r}{1+r} \sigma_y \right) \frac{d\bar{\epsilon}}{\sigma} \\ d\epsilon_y = \frac{3(1+r)}{2(2+r)} \left(\sigma_y - \frac{r}{1+r} \sigma_x \right) \frac{d\bar{\epsilon}}{\sigma} \\ dr_{xy} = \frac{3(1+2r)}{2(2+2r)} r_{xy} \frac{d\bar{\epsilon}}{\sigma} \end{cases} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3(1+r)}{2(2+r)} \left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \frac{2r}{1+r} \sigma_x \sigma_y + \frac{2+4r}{1+r} \tau_{xy}^2 \right)} \quad (2)$$

$$d\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2(1+r)(2+r)}{3(1+2r)} \left(d\epsilon_x^2 + d\epsilon_y^2 + \frac{2r}{1+r} d\epsilon_x d\epsilon_y + \frac{2r}{1+r} dr_{xy} \right)} \quad (3)$$

把应力—应变关系曲线的经验公式取为

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (4)$$

(1)~(4)式构成了成形极限图理论计算的基本公式

1. M—K 凹槽假设

M—K 凹槽假设的模型如图(1)所示。Z. Marciniak, K. Kuczyn'ski 假设:金属板料内任何类型的不均匀,都可以等效地用一个凹槽类型的几何不均匀表示,该凹槽与最大主应力方向垂直。由于凹槽厚度小于它周围材料的厚度,所以随变形过程的发展,将使变形越来越集中于凹槽,从而引起材料的破坏。板料原始不均匀状态用 $f_0 = \frac{t_{B0}}{t_{A0}}$ 表示。

假设凹槽外均匀的区域应力比在变形过程中为常

数,则 $\frac{d\sigma_{1A}}{\sigma_{1A}} = \frac{d\sigma_{2A}}{\sigma_{2A}} = \frac{d\bar{\sigma}_A}{\bar{\sigma}_A} \quad (5)$

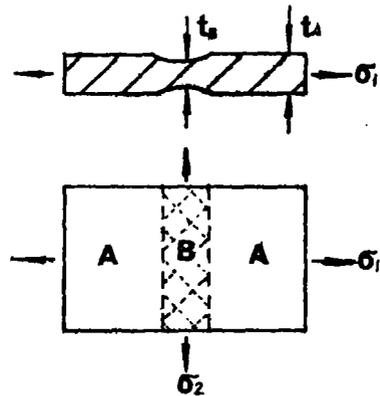


图 1

令 $x_A = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, 则(1)(2)两式变为

$$\frac{d\varepsilon_1}{1+r-rx_A} = \frac{d\varepsilon_2}{(1+r)x_A-r} = \frac{-d\varepsilon_3}{1+x_A} = \frac{\sqrt{3} d\bar{\varepsilon}}{\sqrt{2(1+r)(2+r)}\sqrt{1-\frac{2r}{1+r}x_A+x_A^2}} \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3(1+r)}{2(2+r)}\left(1-\frac{2r}{1+r}x_A+x_A^2\right)^{\frac{1}{2}}}\sigma_1 \quad (7)$$

由模型图得力的平衡方程: $\sigma_{1A}t_A = \sigma_{1B}t_B$ (8)

$$\text{引入参数 } u = \sqrt{\frac{3(1+2r)}{2(1+r)(2+r)} \cdot \frac{\sigma_{1B}}{\sigma_B}} \quad (9)$$

(9)代入(8)并微分得

$$\frac{du}{u} = \frac{d\bar{\sigma}_A}{\bar{\sigma}_A} - \frac{d\bar{\sigma}_B}{\bar{\sigma}_B} + d\varepsilon_{3A} - d\varepsilon_{3B} \quad (10)$$

(10)式可以容易地表达为 $M-K$ 微分—积分方程的最终形式

$$\begin{cases} \frac{du}{u} = \left(\frac{nB\sqrt{1-u^2}}{A+\varepsilon_2} - \frac{n}{\varepsilon_0+\varepsilon_B} + Cu + D\sqrt{1-u^2} \right) d\bar{\varepsilon}_B \\ \varepsilon_2 = B \int \sqrt{1-u^2} d\bar{\varepsilon}_B \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{其中 } A = \frac{\sqrt{3}[(1+r)x_A-r]\varepsilon_0}{\sqrt{2(1+r)(2+r)}\sqrt{1-\frac{2r}{1+r}x_A+x_A^2}} \quad B = \sqrt{\frac{3(1+r)}{2(2+r)}} \\ C = \sqrt{\frac{3(1+2r)}{2(1+r)(2+r)}} \quad D = B \left(\frac{1+x_A}{r-(1+r)x_A} + \frac{1}{1+r} \right)$$

用(11)式计算成形极限图, 是以 u 作为失稳判据的。 u 是一个反映 B 区应力状态的参数, $u=1$ 时, B 区为平面应变状态。在计算中, u 从小于 1 的值逐渐上升趋近于 1, 应变 $d\varepsilon_2$ 逐渐趋于零, 使 $\frac{d\varepsilon_{1B}}{d\varepsilon_2} \rightarrow \infty$, 这时, 就认为材料失稳, A 区当前的应变值($\varepsilon_1, \varepsilon_2$)就是极限应变。

在求解 $M-K$ 方程时, 首先要定出初值 u_0 。为此, 假设材料初始屈服时满足 $\bar{\sigma}_{A0} = \bar{\sigma}_{B0}$, 则

$$u_0 = \frac{\sqrt{1+2r}}{f_0(1+r)\sqrt{1-\frac{2r}{1+r}x_A+x_A^2}} \quad (12)$$

图(2)是用 B6800 计算机对 $M-K$ 方程进行数值计算的部分结果。该模型只能计算出成形极限图的右半部。

2. 倾斜凹槽假设

倾斜凹槽假设是对 $M-K$ 凹槽假设的修正。计算模型如图(3)。该模型假设凹槽有一初

始倾角 ψ_0 ，在变形过程中该倾角要发生转动。材料均匀区的变形情况，用固定在材料上的主轴坐标系描述，薄弱区的变形情况，用随槽转动的局部坐标系 xoy 描述。 x 轴和 y 轴总与凹槽保持垂直和平行。假设板料存在厚向异性，板面各向同性，并假设 A 区应变满足关

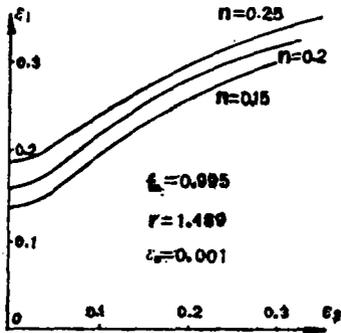


图2 a

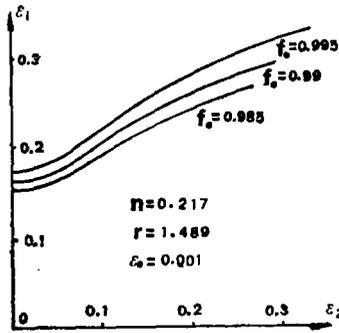


图2 b

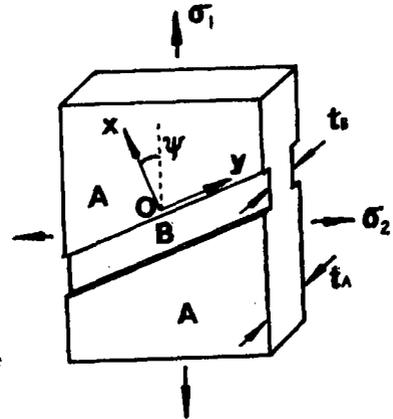


图3

系： $d\epsilon_2 = \rho d\epsilon_1$ ， ρ 为常数。按模型图，可以推导出如下关系式

$$\operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} \psi_0 \exp(\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (13)$$

$$d\epsilon_y = d\epsilon_1 \sin^2 \psi + d\epsilon_2 \cos^2 \psi \quad (14)$$

$$\sigma_x = f^{-1}(\sigma_1 \cos^2 \psi + \sigma_2 \sin^2 \psi) \quad (15)$$

$$\tau_{xy} = f^{-1}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin \psi \cos \psi \quad (16)$$

$$f = f_0 \exp(\epsilon_{3B} - \epsilon_3) \quad (17)$$

(13)~(17)式与(1)~(4)式组成了该计算模型基本公式。

在计算中以 ϵ_x 的大小作为停止计算的标准，当 ϵ_x 大于某一极限值 ϵ_{\max} 时就停止计算。 ϵ_x 很大意味着 $t_B \rightarrow 0$ ，这就表明材料已发生塑性破坏。我们在计算中取 $\epsilon_{\max} = 1$ ，但计算结果表明，只要取 $\epsilon_{\max} \geq 0.6$ ，对计算结果均无影响。用 B6800 计算机对该模型进行了数值计算，计算结果如图(4)~(7)所示。

计算结果表明，对于不同应变比 ρ ，存在一个初始倾角 ψ_0 ，使极限应变值 ϵ_1 最小，如图(4)所示。它表示了该计算模型下材料的这样一种性质：材料本身含有一组相同 f_0 值的不同角度的凹槽，在某一应变比下，有一个倾角的凹槽将首先开动，使材料的失稳最终出现在这一凹槽中。当 $\rho \geq 0$ 时， ψ_0 均为零，这正是 $M-K$ 垂直凹槽假设的情况。可是两种模型的计算结果却不一致。这主要是由于停止计算的判据不同。说明在理论计算中，还有待于找出较为合理的失稳判据。有了倾角与应变比之间的关系，就可以计算出材料的成形极限图。

图(5)图(6)是两步直线应变路径对成形极限图的影响。从图中看出，单拉 \rightarrow 等双拉路径对材料成形性最有利。而等双拉 \rightarrow 平面应变路径对材料成形性最不利。这与许多实验研究的结果是一致的。在计算中逐步改变 ρ 的数值，得到了图(7)所示的三条曲线应变路径的结果。它们包括了曲线应变路径的三种典型形式。从图中可看出：应变比 ρ 逐渐增加的路径，

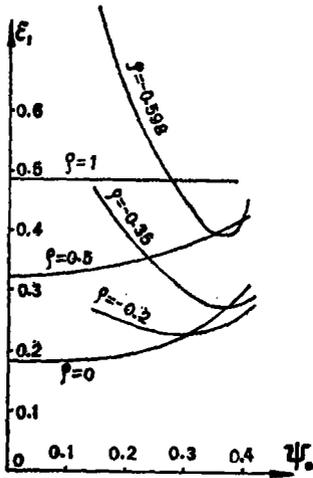


图4 极限倾角关系

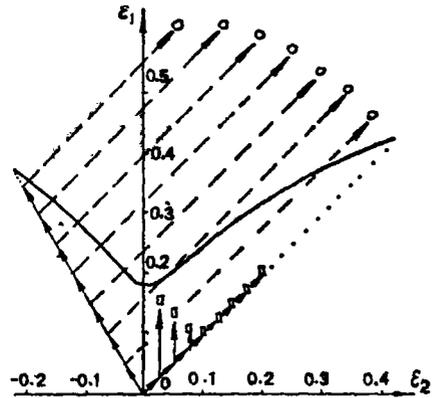


图5 单位↑等双拉和等双拉→平面应变路径结果。

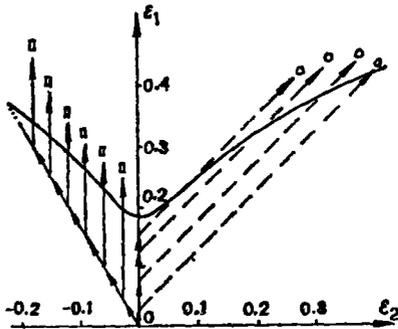


图6 单位平面应变和平面应变→等双拉路径结果

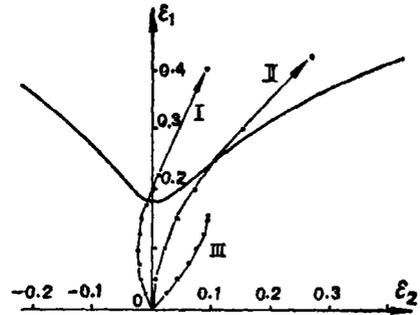


图7 三条弯曲应变路径结果

可以提高极限应变值，应变比 ρ 逐渐减少的路径，将降低极限应变值。

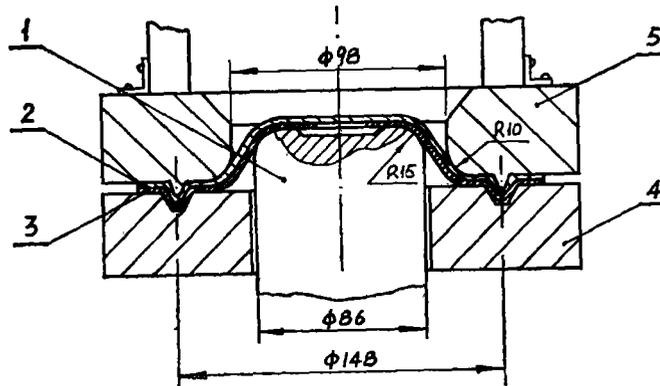
三、实 验

在实验中我们采用了双板实验方法，与其它方法相比较，双板实验方法具有下述的优点：

- (1) 试件在变形过程中无曲率、摩擦和模具正压力的影响，从而保证了实验条件一致。
- (2) 试件变形后仍为平面，便于精确测量。
- (3) 模具结构简单，能容易地获得等双拉变形极限。
- (4) 可以控制应变为直线路径。
- (5) 应变梯度小。
- (6) 实验条件与理论计算模型相近，便于比较。

实验原理及装置

双板实验的原理及模具简图如图(8)所示。试件和传动板被压边圈紧紧压住不动。在实



图(8) 1.凸模 2.试件 3.传动板 4.压边圈 5.凹模

验过程中凸模与试件不直接接触,而通过传动板向试件传力。传动板中部设有一孔,这样就使试件和传动板的变形情况完全不同。在实验中,传动板的孔要扩大,属于扩孔过程,而试件表面不含孔,因此,造成在凸模顶部试件与传动板的流动速度不一致。显然,传动板的扩孔流动速度要大于试件受拉变形的流动速度。双板实验正是在这种变形流动不一致的情况下,通过传动板与试件间的摩擦力,使试件中部产生较大的变形。如果不用带孔传动板,则会造成试件在凸模园角处被拉裂,而中部几乎没有产生多少塑性变形。

传动板孔径的选取,是双板实验成功的关键。通过实验摸索不难定出合适的尺寸。传动孔径一般的选取原则是:(1)孔径尽可能大,便于传动板的扩孔流动;(2)扩大后的孔径要略小于凸模顶部园角以内的直径,以免扩大后的孔边切断试件。

实验材料

试件和传动板都选用08铝镇静钢板,厚1.0mm,其应变硬化指数和厚向异性系数分别为:
 $n=0.217$, $r=1.489$ 。

实验步骤及结果

为了测量试件变形量,首先用照像印网法在试件表面印制一组相交的园形网格。为了拉开试验点,并保证应变路径的直线性,实验中需采用不同尺寸的试件和传动板,个别的试件和传动板还要打小孔和喷涂聚四氟乙烯膜来确保上述要求。实验时,试件和传动板被凹模和压边圈夹住不动,然后,凸模以 $1\text{cm}/\text{min}$ 的速度进行拉伸成形。在试件变形过程中,可以通过观察空间看到试件表面的变形情况,当试件表面出现第一个颈缩痕迹时,立刻卸载,取下试件进行测量。图(9)是08铝钢板成形极限图的实验结果(图中坐标为对数应变)。为了检查试件变形中应变路径的发展情况,在试验之前对每种尺寸的试件都进行了应变路径的测量,测量结果标在图(9)中(虚线表示)。从图中看出,实验结果符合直线应变路径的要求。

由于试件变形后仍为平面,因此,可以准确测量试件表面的变形网格。因为不同尺寸的试件变形后,颈缩发展规律不同,所以测量园格的选取要按成形件表面的颈缩发展情况来定。图(10)是成形以后的试件。成形件(Ⅳ)~(Ⅵ)表面颈缩发展情况基本一致,

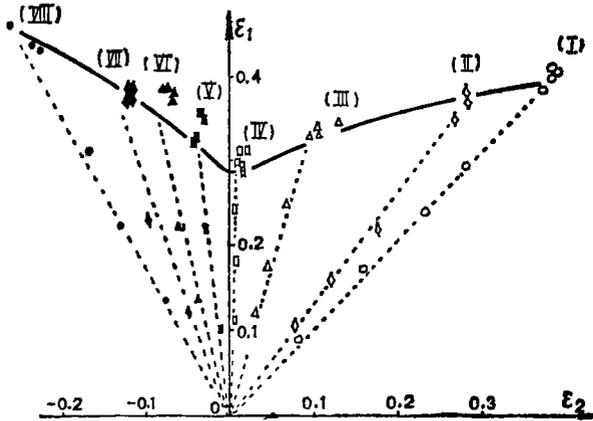
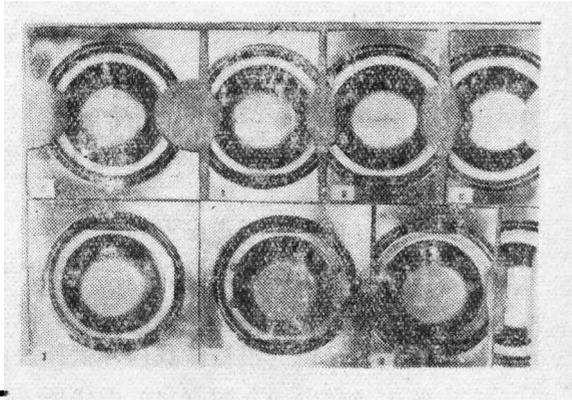


图9 08铝铁板成形极限图及应变路径结果



图(10)

它们都是在试件表面出现一条（有时是交叉的）明显局部颈缩，这些试件可以在颈缩两侧选点测量。成形件（I）~（III）则完全不同，它们经常是在试件表面先出现个别零星小颈缩，再继续变形时，又会出现更多的小颈缩，最终在试件表面发展出一组由很多条局部颈缩组成的颈缩网。一旦出现了这种情况，就无法进行选点测量。为了获得合理的测点，在拉伸成形这三种试件时，要注意观察试件接近失稳时的表面情况，一发现有零星小颈缩出现，就立刻卸载，这样所得的试件，在小颈缩以外的许多点都可以作为测点。实际测量表明，这种测量方法得到的结果是比较稳定的。

许多实验研究及理论计算都表明，变形路径对成形极限图有显著影响。我们用单拉予应变和等双拉予应变对此作了进一步的验证。等双拉予应变同样采用双板实验方法，单拉予应变采用大尺寸单拉试件。图（11）图（12）是四种应变路径的结果。

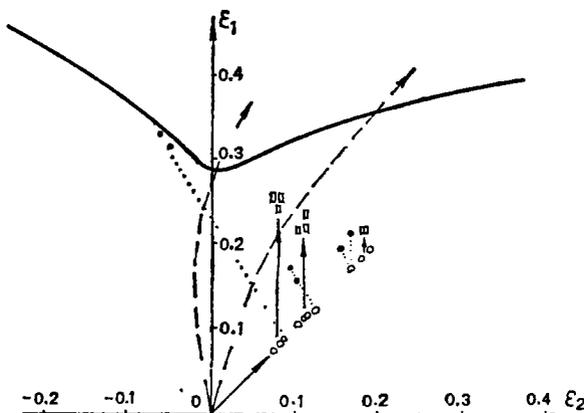


图11 等双拉予应变结果

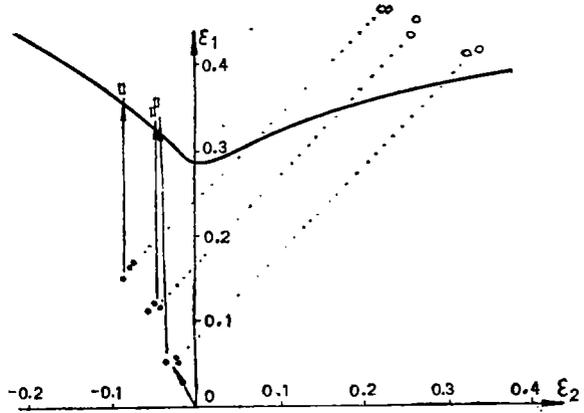


图12 单位予应变结果

四、讨 论

1. 理论计算与实验结果的比较:

从定性的角度看,理论计算与实验结果之间有许多一致的方面,但是作定量的比较,差别又是很大的。

图(11)(12)是两步成形的实验结果。从趋势上看,理论计算结果图(5)(6)与实验结果非常一致。理论计算表明,等双拉变形到 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$ 时,已不能承受平面应变变形了,实验时也发现,对于等双拉予应变值为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 > 0.1$ 的试件,进行平面应变变形时,在凸模与试件接触后的很短行程内,试件表面就出现了很明显的局部颈缩。

在实验中经常发现,图(11)虚线所示的弯曲应变路径对成形极限图右半部的形状和应变水平都有很大影响。图(7)所示的三条弯曲路径模拟了这种情况,它们与实验结果的趋势非常一致。图(7)中的路径(Ⅱ)在实验中没有出现,但按等双拉→平面应变路径的实验结果,可以认为,如果实验中出现了这样的路径,将使成形极限明显降低。

为了克服理论计算与实验结果之间出现的较大差异,许多学者对 $M-K$ 模型进行了改进^{[9][10]},但结果仍得不到全面的改善。实验中发现,不同应变比下,材料变形后的颈缩发展规律不同。在这种情况下,要找出合理的失稳判据,就要求对板料在不同应变比下受拉失稳的机理有较为深入的了解。

2. 关于双板实验方法

前面提到的半球形凸模实验方法,虽然有接近于工业生产实际的优点,但也存在一些不利的实验条件,如:(1)试件变形后成为不可展曲面,很难对变形网格进行精确测量;(2)摩擦、弯曲、正压力等因素对成形极限图究竟有多大影响,还不清楚;(3)很难用理论计算来模拟这样的实验条件。正是由于半球形凸模方法存在这些不足,所以,近来一些学者采用双板实验方法绘制材料的成形极限图。

用双板实验方法绘制成形极限图,最关键的是要作出直线应变路径的点(Ⅰ)和点(Ⅱ),其它点很容易得到。对于点(Ⅰ)和点(Ⅱ),如果模具和试件的尺寸选得不好,就会出现图(11)中虚线所示的弯曲路径。它们将提高材料直线应变路径的成形极限水平。为了使试件变形始终按直线应变路径发展,可以采取一些适当的措施,如:增大凸模圆角半径、调整试件的几何形状和尺寸、增大凸、凹模间隙、调整试件与传动板间的摩擦情况等等。

双板实验的成形件有一个固定的可测量范围,它是由传动板孔径所决定的。在这一范围内,试件不受模具正压力和摩擦的作用。对成形试件变形梯度的测量表明,试件(Ⅰ)~(Ⅱ)的应变梯度几乎为零。而对于所有切口试件,应变梯度都较大。如果改变试件的切口形式,将有助于缓和这种应变梯度。

3. 关于成形权限图的应用

自从成形权限图的概念出现以来,人们就非常重视它的应用,进行了大量的研究,力图把成形权限图作为板料受拉成形极限的一个综合性能指标,应用到实际生产中去。实验中发现,应用成形权限图评定生产制件变形剧烈程度时,有两点需要注意。第一,应该按直线应

变路径做出材料的成形极限图。实验表明，弯曲路径可以降低也可以提高材料的成形极限。如果在实验室做材料的成形极限图，没有保证应变路径的直线性，就有可能做出许多不同形状和应变水平的成形极限图，使评定工作没有一个统一的标准。与弯曲路径相反，直线应变路径的形式是唯一的，如果保证了应变路径的直线性，在相同的条件下，就一定能获得唯一形状和应变水平的成形极限图，从而使材料受拉成形性能有一个确定的指标。第二，不能简单地把实际生产制件表面的应变值与成形极限图比较。绝大部分产品的成形过程都不是按直线路径发展的，如果不加分析地拿来与成形极限图比较，可能会得出错误的判断。所以，应该首先根据模具结构和坯料几何形状等参数，仔细分析产品的变形过程，然后才与成形极限图对比，作出结论。

参 考 文 献

- [1] S.P. Keeler: Sheet Metal Ind., 1965, Vol. 42, p. 683
- [2] G.M. Goodwin: S. A. E. Trans., Paper. No. 680093
- [3] H.J. Kleemola et al.: J. Mech. Working. Tech., 1980, p. 289
- [4] J. Gronostajski et al.: Memoires Scientifiques Revue Metallurgie, 1980, p. 570
- [5] Z. Marciniak et al., Int. J. Mech. Sci., 1967, Vol. 9, p. 609
- [6] R. Sowerby et al., Int. J. Mech. Sci., 1971, Vol. 13, p. 217
- [7] 胡世光: 《板料冷压成形原理》，国防工业出版社，1979年7月，第一版
- [8] S. N. Rasmussen, CIRP, Vol. 30/1/1981, p. 179
- [9] K. H. Kim et al., Int. J. Mech. Sci., 1983, Vol. 25, p. 293
- [10] K. Yamaguchi et al., Int. J. Mech. Sci., 1975, Vol. 18, p. 85