

《材料加工》课程工艺部分

金属塑性加工

Metal Forming Processes

(6)

清华大学机械工程系

主要内容

- 6.1 板料成形性能的重要意义
- 6.2 板料成形性能的主要参数
- 6.3 加工硬化指数 n
- 6.4 板厚方向性指数 r
- 6.5 平面方向性指数 Δr
- 6.6 板料成形极限图FLD
- 6.7 板料冲压性能试验

6.1 板料成形性能的重要意义

1996年，中国钢材产量跃居世界第一位（1亿吨）

2003年，中国钢材产量连续7年保持在世界第一位（2亿吨）

2006年，中国钢材产量将达到3亿吨

中国钢材：\$300/吨 消耗能源2A/吨

外国钢材：\$500/吨 消耗能源 A/吨

钢铁大国 \neq 钢铁强国



产品质量

成形用钢板的质量

力学性能：达到要求

成形性能：很难满足成形要求

板料成形件对材料的要求：强度不是主要的，看重的是成形性能。

1996年 薄板钢材产量 1229.77万吨 比1995年增长 12.33%

进口同类产品 840万吨 比1995年增长47%

出口同类产品 60万吨 比1995年减少65%

板料成形性能的主要内容

板料加工阶段所需要的加工性能，称为冲压性，其中包括冲剪性、成形性和定形性。

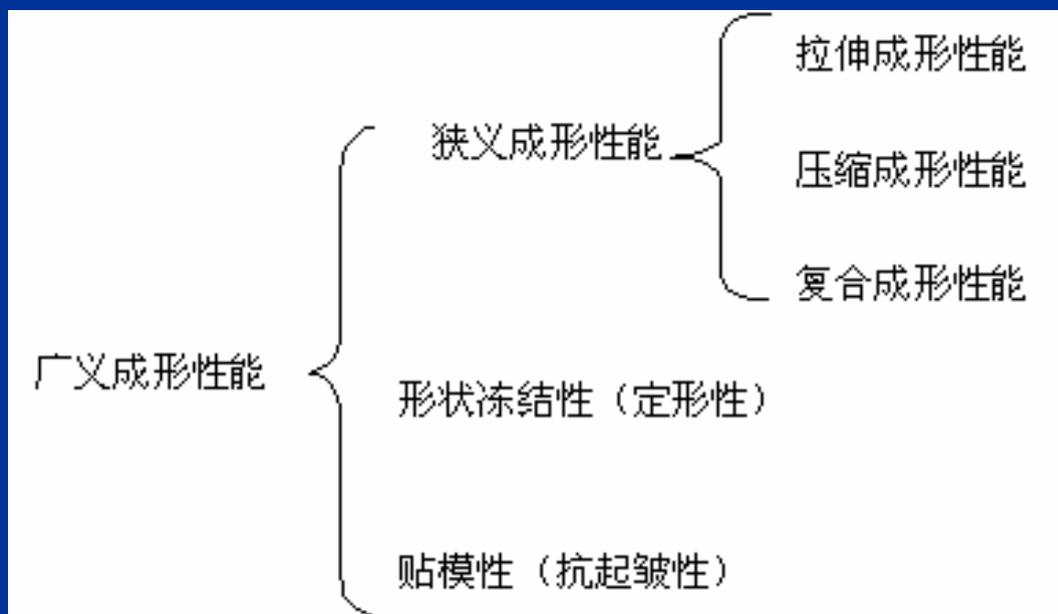
冲剪性：板材适应剪裁加工的能力

成形性：板材适应各种成形加工的能力，平板毛坯变成具有一定形状零件

定形性：成形模具（力）卸去后，板料保持其已得形状的能力

板料的成形性能

板料的成形性能分为广义和狭义两个内容，它们的关系是



6.2 板料成形性能的主要参数

- 1) 抗拉强度 σ_b
- 2) 屈服点 σ_s
- 3) 屈强比 $\frac{\sigma_b}{\sigma_s}$
- 4) 极限(总)延伸率 δ
- 5) 均匀延伸率 δ_u
- 6) 应变硬化指数 n
- 7) 厚向异性指数 r
- 8) 平面异性指数 Δr

板料成形性能的主要参数

金属材料的力学性能包括**强度、硬度、塑性、韧性、耐磨性和缺口敏感性**等。他们主要取决于材料的化学成分、组织结构、冶金质量、残余应力及表面和内部缺陷等内在因素，但在外在因素如载荷类型、应力状态、温度、环境介质等对材料的力学性能影响也很大。在生产中普遍应用的、最基本的常规力学性能试验有拉伸、硬度、压缩、弯曲、剪切、冲击、扭转及高温持久强度、蠕变、松弛试验等

在材料的力学性能参数中，**屈服强度** σ_s 、**屈服比** σ_s/σ_b 、**伸长率** 等强度指标与**塑性指标**，可用来表示材料的基本成形性能。

6.3 应变（加工）硬化指数

硬化指数 n （ n 值）是评定板料伸长类成形性能的一个重要参数。

n 值大的材料，在同样的变形程度下，真实应力增加的要多。在伸长类变形过程中可以使变形均匀化，具有扩展变形区，减少毛坯的局部变薄和增大极限变形参数等作用。

硬化指数 n 的数值，可以根据拉伸试验结果所得的硬化曲线，也可以利用具有不同宽度的阶梯形拉伸试样所做的拉伸试验结果，经过一定的计算求得。

6.4 厚向异性系数

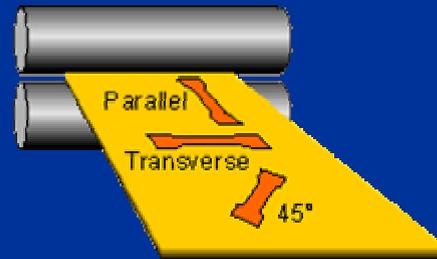
厚向异性系数 r （也叫塑性应变比 r ，简称 r 值）是评定板料压缩类成形性能的一个重要参数。 r 值是板料试件单向拉伸试验中宽度应变 ϵ_w 与厚度应变 ϵ_t 之比，即：

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t}$$

R值的计算

假设轧制方向就是板材的长度方向

$$R_{90} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right)}$$



w, t 代表宽度和厚度尺寸

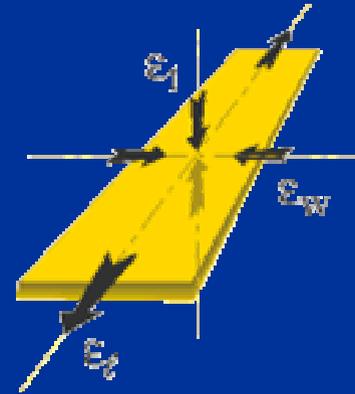
下标0 代表初始尺寸

下标 f 代表变形后的尺寸

厚向异性系数的表达

板平面中最主要的三个方向是与轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° ，相应地用 r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 表示。由于不同方向上测得的数值是变化的，板料的厚向异性系数常用平均值 r 表示

$$r = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90})$$



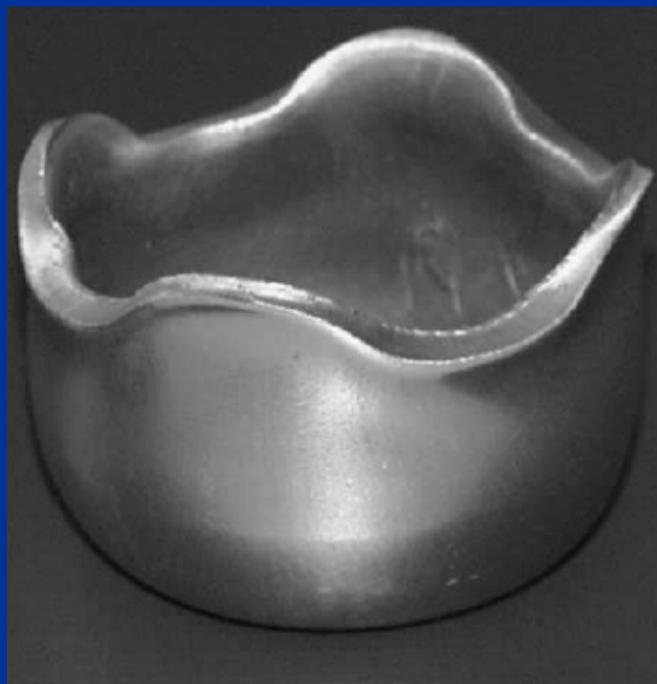
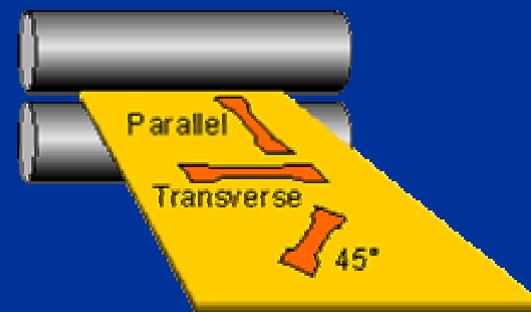
R值对成形的影响

- 板料r值的大小，反映板平面方向与厚度方向应变能力的差异。
r=1时，为各向同性；
r < 1时，为各向异性。
当r > 1，说明板平面方向较厚度方向更容易变形。r值与板料中晶粒的择优取向有关，本质上是属于板料各向异性的一个量度。
- r值与冲压成形性能有密切的关系，尤其是与拉深成形性能直接相关。板料的r值大，拉深成形时，有利于凸缘的切向收缩变形和提高拉深件底部的承载能力。
- 大型覆盖件成形，基本上是一种拉深与胀形相结合的复合成形，当拉深变形的成分占主导地位时，板材r值大，成形性能好。

6.5 平面异性系数（凸耳参数）

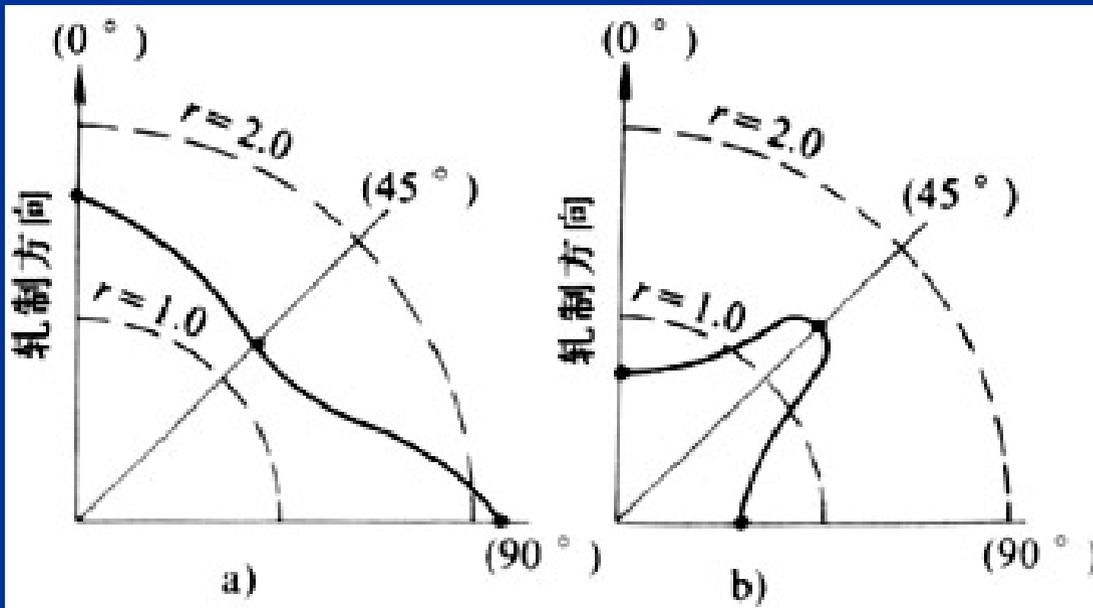
板平面内各向异性的差别用 r 表示。

$$\Delta r = \frac{1}{2}(r_0 - 2r_{45} + r_{90})$$



r对成形的影响

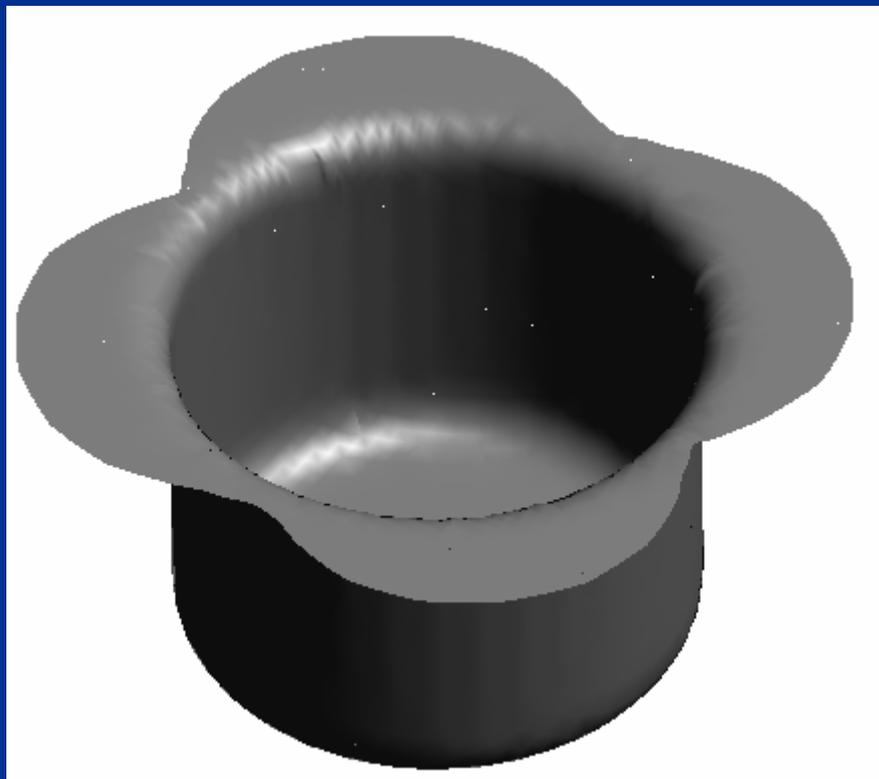
用圆形坯料拉深筒形件，当 $r > 0$ 时，凸耳出现在 0° 和 90° 方向；当 $r < 0$ 时，凸耳出现在 $\pm 45^\circ$ 方向； $r = 0$ 时，不产生凸耳。由于凸耳的位置与大小和 r 有关，所以 r 也叫凸耳参数。



r值在板平面内的变化

a) $r > 0$ b) $r < 0$

圆筒件拉深的制耳



常见金属材料的平均R值

锌合金 (Zinc Alloys)	0.4-0.6
热轧钢板 (Hot-rolled steel)	0.8-1.0
冷轧沸腾钢板 (Cold-rolled rimmed steel)	1.0-1.4
冷轧铝镇静钢板 (Cold-rolled aluminum-killed steel)	1.4-1.8
铝合金 (Aluminum alloys)	0.6-0.8
铜 (Copper and brass)	0.6-0.9
钛合金 (α) (Titanium alloys)	3.0-5.0
不锈钢 (Stainless steels)	0.9-1.2
高强低合金钢 (High-strength low-alloy steels)	0.9-1.2

平面各向异性的由来

织构的概念：1) 晶体学织构

2) 变形织构

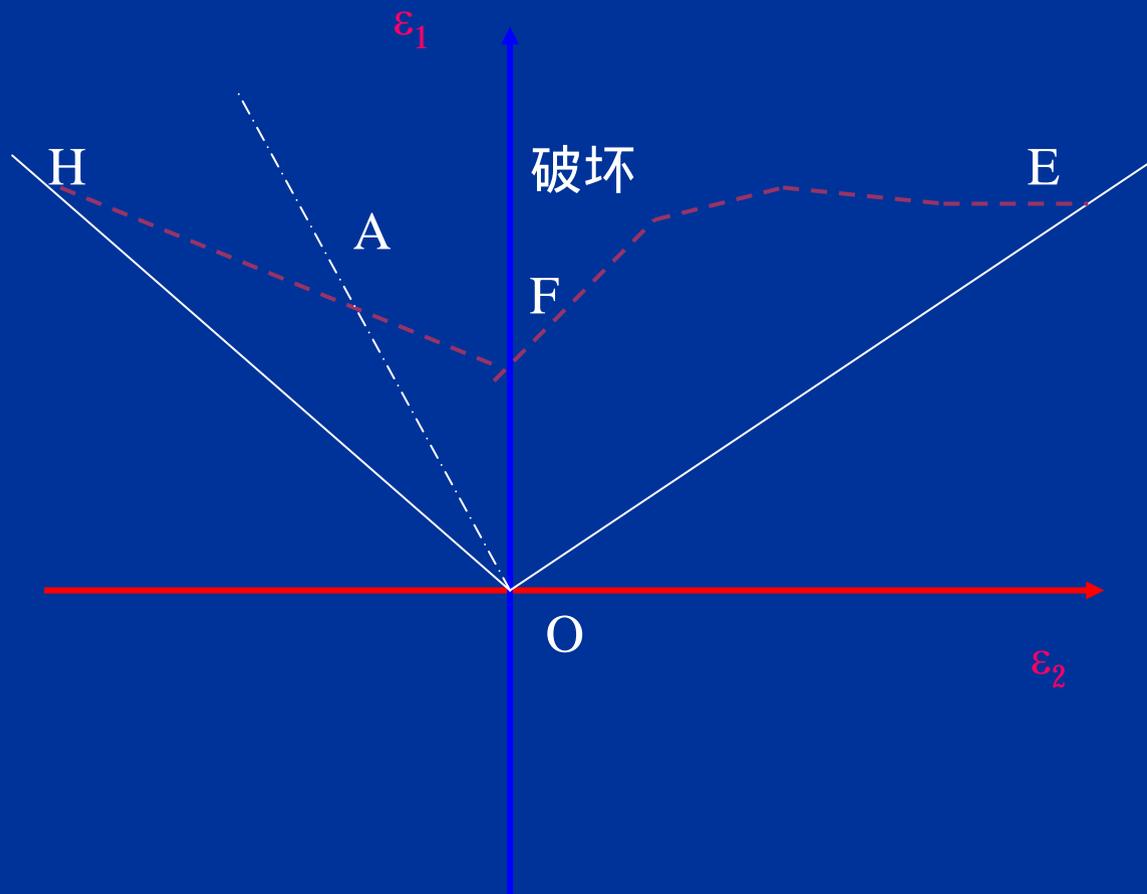
单晶体在不同的晶体学方向上，其力学、电磁、光学、耐腐蚀、磁学甚至核物理等方面的性能会表现出显著差异，这种现象称为**各向异性**。多晶体是许多单晶体的集合，如果晶粒数目大且各晶粒的排列是完全无规则的统计均匀分布，即在不同方向上取向几率相同，则这多晶集合体在不同方向上就会宏观地表现出各种性能相同的现象，这叫**各向同性**。

然而多晶体在其形成过程中，由于受到外界的力、热、电、磁等各种不同条件的影响，或在形成后**受到不同的加工工艺**的影响，多晶集合体中的各晶粒就会沿着某些方向排列，呈现出或多或少的统计不均匀分布，即出现在某些方向上聚集排列，因而在这些方向上取向几率增大的现象，这种现象叫做**择优取向**。这种组织结构及规则聚集排列状态类似于天然纤维或织物的结构和纹理，故称之为织构。织构测定在材料研究中有重要作用。

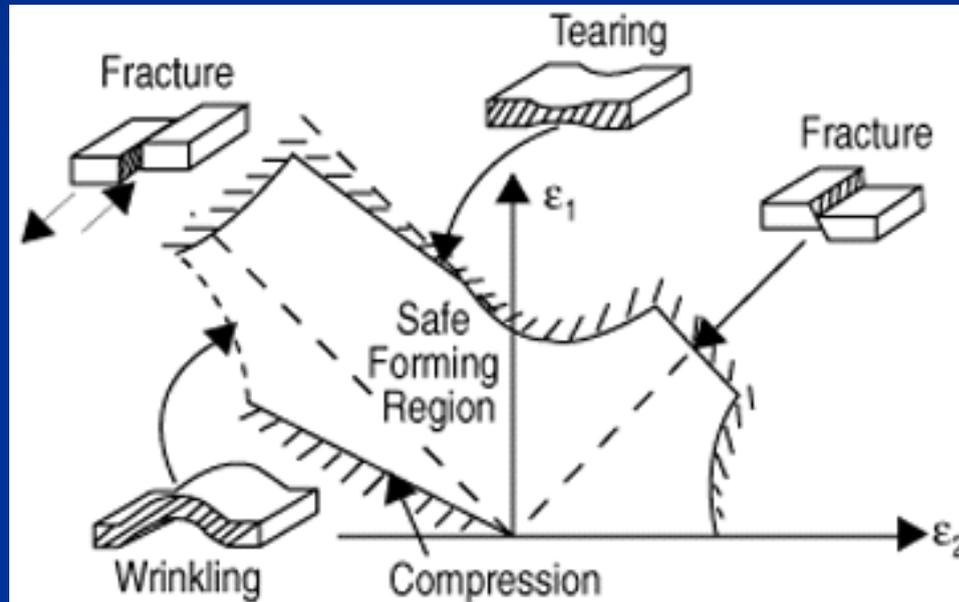


6.6 成形极限曲线(图) FLC or FLD

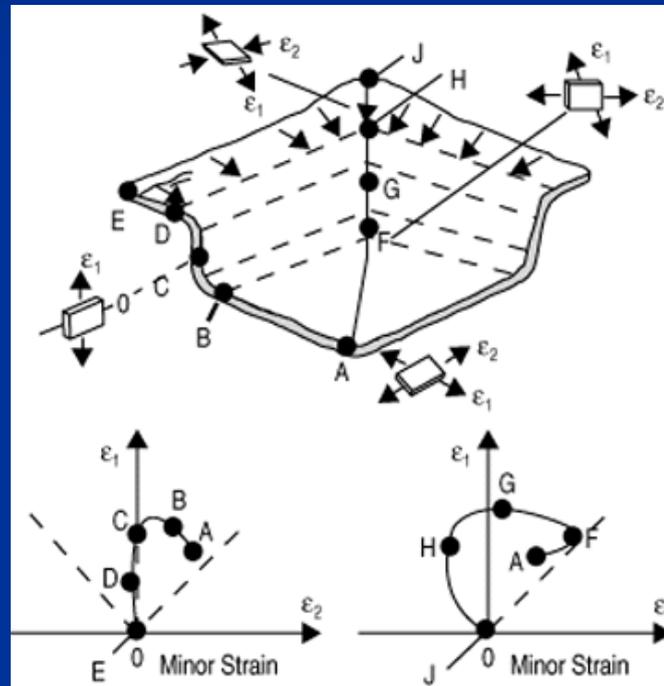
变形板料中的一点应变状态，可以通过一点的两个主应变 ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) 来确定，通过实验，求得一种材料在各种应力应变状态下的成形极限点，把这些点标注到以主应变（工程应变或对数应变）为坐标轴的直角坐标系中并连接成线，就是该材料的成形极限曲线（Forming Limit Curve）或成形极限图（Forming Limit Diagram）



板料成形中的主要缺陷出现在FLD的不同位置



方盒拉深成形中主要缺陷出现在FLD的不同位置



6.7 冲压工艺性能试验

- 杯突试验（Erichsen试验）
- 冲杯试验（Swift拉深试验）
- 锥杯试验（福井试验）
- 方板对角拉伸试验（吉田试验，拉皱试验）

1) 杯突试验

杯突试验（Erichsen试验）如图1所示。试验时，90mm×90mm的试样或宽度90mm的条料试样放在凹模与压边圈之间压死（压边力取10kN），测出试件刚好破裂时的凸模压入深度 I_E 。杯突试验是模拟胀形工艺，所以**试验值 I_E 可作为材料的胀形成形性能指标**。 I_E 值大，胀形成形性能好。

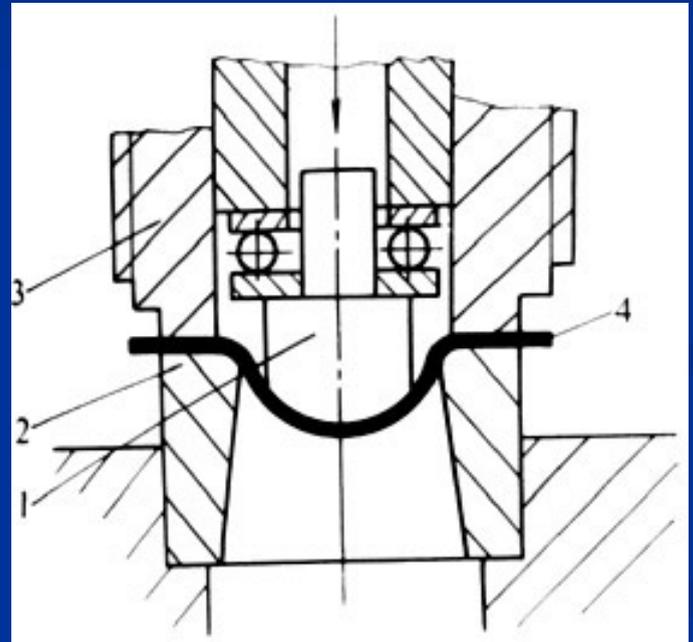
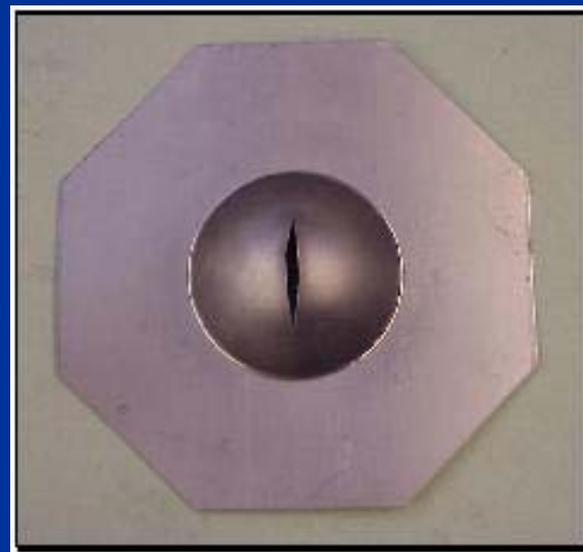
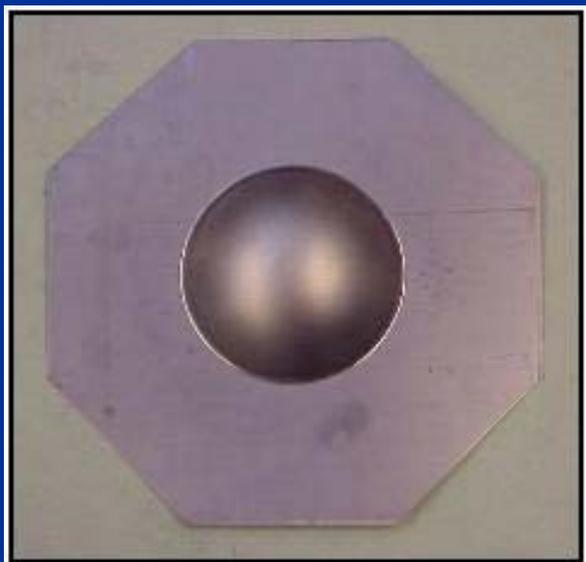


图1 杯突试验

1-凸模 2-凹模 3-压边圈 4-试样

杯突试验的试件 (OSU)



杯突试验的试件（清华）



2) 冲杯试验

冲杯试验（也叫Swift拉深试验、LDR试验），是采用

50mm的平底凸模将试样拉深成形（图2）。试验过程中，采用逐级增大试件直径 D_0 的办法，测定杯体底部不被拉破而又能将凸缘全部拉入凹模的最大直径 D_{0max} ，并用下式计算**极限拉深比（LDR）**作为拉深成形性能指标。

$$LDR = D_{0max} / d$$

LDR越大，材料的拉深性能越好。

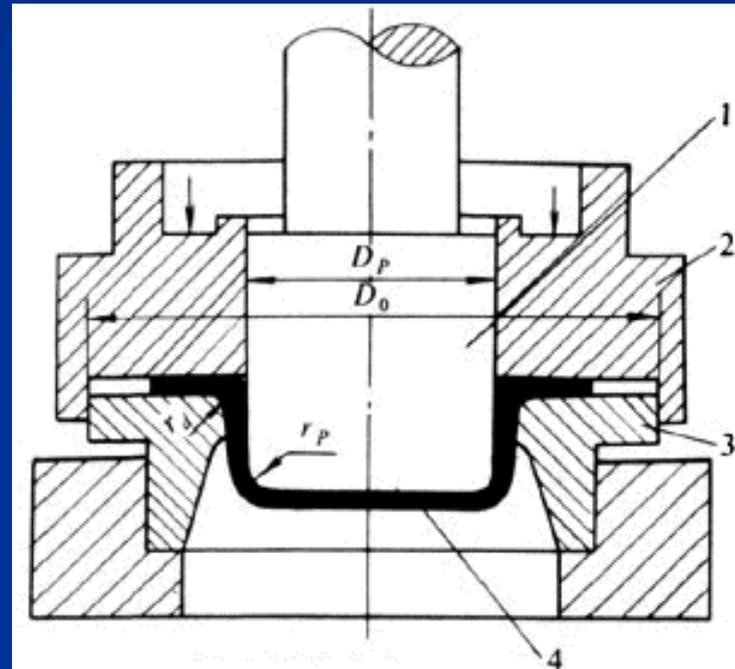


图2 冲杯试验

1-凸模 2-压边圈 3-凹模 4-试样

3) 锥杯试验

锥杯试验（福井试验）是通过钢球把试样冲成锥杯图3，当发现材料破裂时停止试验，测量杯口的最大直径 D_{cmax} 和最小直径 D_{cmin} ，并用下式计算锥杯试验值
 $C.C.V=(D_0-D_m)/D_0$ 。试验值CCV可作为材料的拉深和胀形复合成形性能指标。

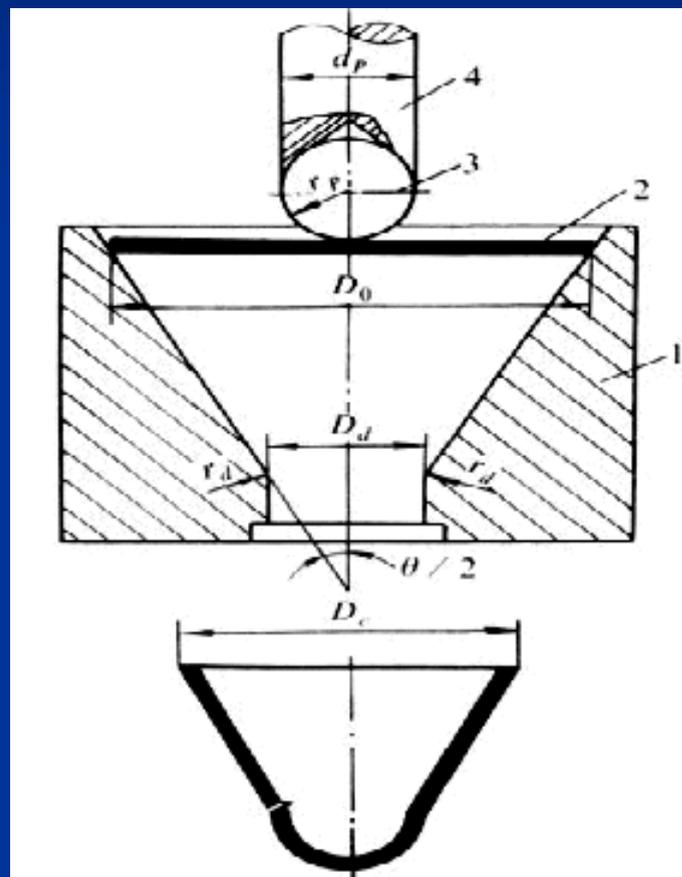


图3 锥杯试验

1-凹模 2-试样 3-钢球 4-凸模

4) 方板对角拉伸试验

方板对角拉伸试验（吉田试验，或YBT）分为单向对角拉伸和双向对角拉伸两种。两种方法的试样尺寸、拉伸标距、夹持宽度等均相同。该试验的示意图见图4。试验测得的是起皱的高度，作为衡量板料抗皱性能指标。

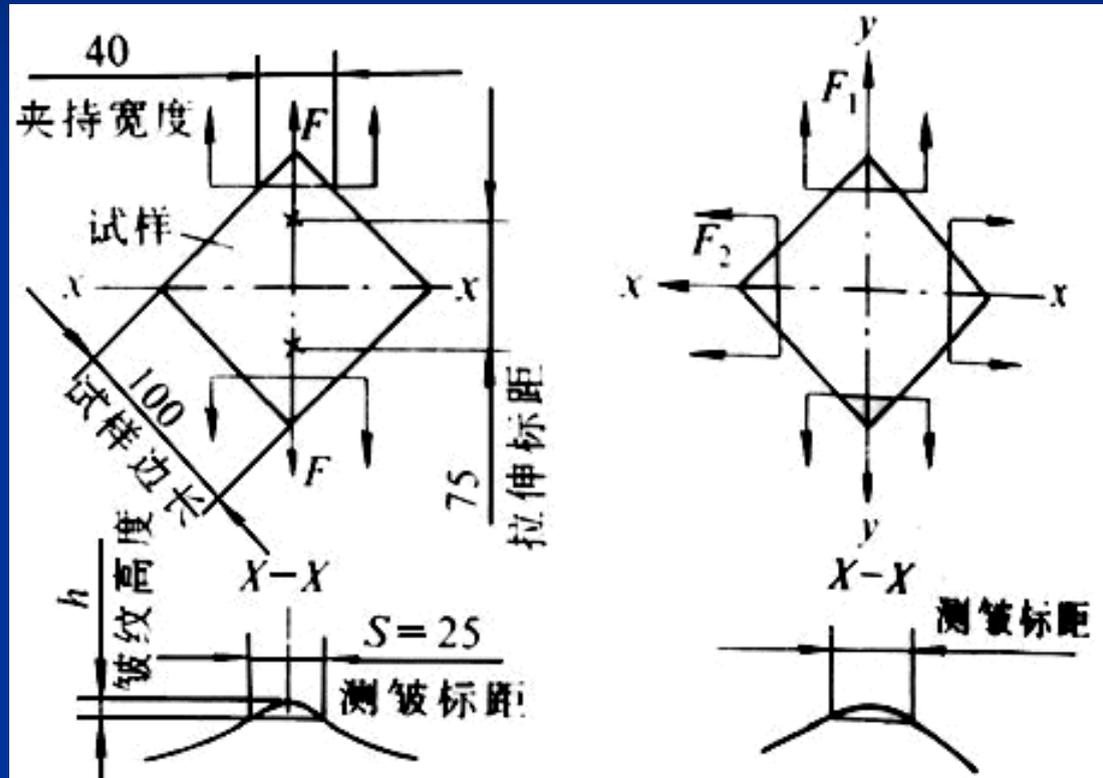


图4 方板对角拉伸试验
a) 单向对角拉伸 b) 双向对角拉伸

本部分重点

- n值对成形的影响
- r值的计算以及对成形的影响
- Δr 值的计算以及对成形的影响
- 成形极限图FLD，典型间成形破坏与FLD对应关系
- 四个冲压直接试验的目的（试验值是衡量板料哪些成形性能）