

方盒形件冲压拉深比的物理概念 及成形极限的计算^①

常志华 黄尚宇 姜奎华

(武汉工学院)

摘 要

应用塑性变形力学方法—滑移线场理论,对方盒形件冲压变形进行力学分析,给出了冲压拉深比的定义与物理概念,建立了方盒形件与圆筒形件极限拉深比间的数学函数关系式。实验研究结果证实,计算值与实测值基本吻合。

关键词: 板材冲压 方盒形件 拉深比 力学分析 滑移线场理论

方盒形件是一种非旋转体薄壳制件。在冲压成形时,其毛坯变形区的应力分布和变形流动都较旋转体制件—圆筒形件冲压时复杂得多。所以,尽管清楚这两种制件的几何联系,便可用参数 r/B 来描述方盒形件的形状特点(B 为宽度, r 为角部圆弧半径,见图 1),即把圆筒形件看作 r/B 为 0.5 时方盒形件的一种特例,但在其他方面对两者的联系了解甚少。

罗曼诺夫斯基^[1]分析方盒形件冲压成形时,是把角部的变形看作为四分之一圆筒形件拉深,并据此提出用制件角部半径(r)及展开毛坯的角部半径(R)之比作为制件的拉深系数 m ($m=r/R$)。但是,方盒形件冲压拉深变形的实际情况则是角部的材料在向凹模口流动的同时,还向直边部分流动,使直边也产生纬向压缩变形。此外,角部与直边的材料在拉入凹模时的流动速度也不相同(图 1),其结果使角部材料的拉深变形情形不同于圆筒形件的拉深^[2],所以,按照罗氏定义的拉深系数,方盒形件的极限拉深系数与圆筒形件的极限拉深系数不等,就其本身来说也是随参数 r/B 的变化而改变。而且,罗氏定义的方盒形件拉深系数没有明确的物理概念。

在压力加工学科领域,对方盒形件及其他非旋转体冲压件拉深变形的研究十分活跃。用理论解析分析探索其中的变形问题,更是研究者试图解决的难题。本文是应用滑移线场理论,对方盒形件冲压拉深变形进行力学分析,从而探讨冲压拉深比的数学表达及物理概念,寻求方盒形件冲压成形极限的解析计算式。

1 冲压变形的力学分析

从平板毛坯冲压拉深成薄壳制件,是外载荷作用下于毛坯变形区产生径向伸长与纬向压缩的变形,使之成为制件的侧壁。通常可忽略板厚尺寸变化,将拉深变形区视为平面变形,并应用滑移线理论来分析^[3]。

作毛坯变形区的滑移线场(图 2),是从内边界开始的最大剪应力迹线,由螺旋线场(I、V)、均匀场(II、IV)和简单场(III)构成。根据滑移线场理论,于同一滑移线上两点 A 、 D 的平均应力之差^[4]。

$$\sigma_{cpA} - \sigma_{cpD} = 2k\omega_{AD} \quad (1)$$

式中 k 为塑性常数; ω_{AD} 为从点 A 到点 D 沿滑移线的转角。

①1992年9月10日收到初稿

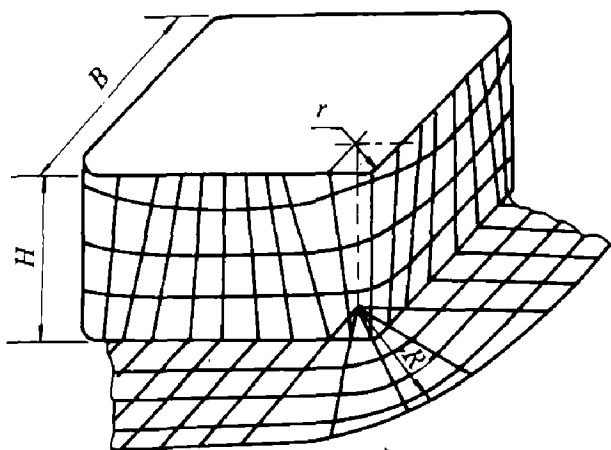


图1 方盒形件拉深变形的特点

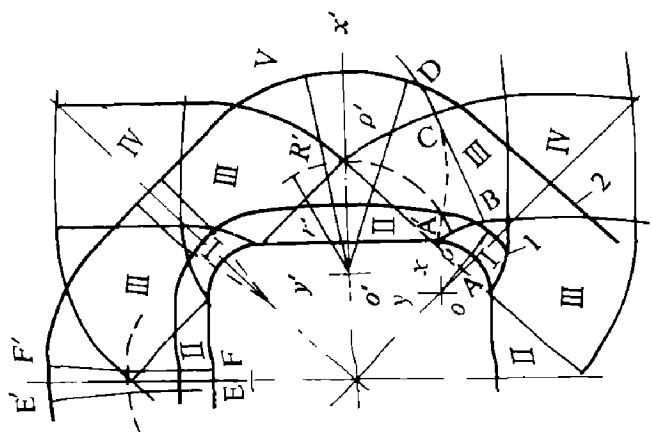


图2 毛坯变形区滑移线场

考虑图2中滑移线 $\widehat{ABCD}$ 。已知I区螺旋线 $\widehat{AB}$ 在 xoy 系中的方程

$$\rho = re^{-\theta+\varphi} \quad (2)$$

假设V区螺旋线 $\widehat{CD}$ 在 $x'o'y'$ 系中的方程

$$\rho' = r'e^{-\theta'+\varphi'} \quad (3)$$

根据III区滑移线场性质,可证得^[5]

$$r' = r + \sqrt{2}e^{-\pi/4}(B/2 - r) \quad (4)$$

并且沿滑移线 $\widehat{ABCD}$ 之转角 ω_{AD} , 等于沿滑移线 $\widehat{A'CD}$ 之转角 $\omega_{A'D}$, 即有

$$\omega_{AD} = \omega_{A'D} \quad (5)$$

基于滑移线场做制件的合理展开毛坯是作与滑移线成 $\pm \pi/4$ 交角的闭合曲线, 并使其面积等于制件的面积。这样, 毛坯外周线于V区是曲线中心为 o' 、曲率半径等于 R' 的圆弧

(外周边线2)。点D位于毛坯外周边线上, 即有 $\rho' = R'$ 时, $\sigma_{rD} = 0$, 故 $\sigma_{\theta D} = -2k$, 得 $\sigma_{cPD} = -k$, 且 $\omega_{AD} = \omega_{A'D} = \ln(R'/r')$ 。于是

$$\sigma_{cpA} = k(2\ln(R'/r') - 1) \quad (6)$$

$$\text{得} \quad \sigma_{rA} = 2k\ln(R'/r') \quad (7)$$

(7)式是方盒形件冲压拉深时使变形区产生塑性变形作用于角部内边界上径向拉应力的滑移线场理论解。不难证明, 在变形区的内边界上, 作用于角部的径向拉应力数值最大。事实上, 制约方盒形件拉深变形过程正常进行的拉深破裂, 也总是发生在角部承载区的危险断面上。

2 冲压拉深比的定义与概念

在冲压拉深成形中, 将毛坯法兰全部拉入凹模且保证材料不发生破裂的必要条件是: 作用于承载区危险断面上的实际拉应力数值不大于材料的承载能力, 影响因素有材料性能、润滑状况和凸、凹模圆角半径及毛坯形状与尺寸等。若其他条件均已确定, 毛坯形状与尺寸就决定冲压拉深过程能否正常进行。

合理的毛坯形状与尺寸可以采用滑移线场方法确定, 或者是按图3所示来得到^[5,6]。由(7)式知, 相对毛坯尺寸 R'/r' 愈大, 作用于变形区角部内边界上的径向拉应力 σ_{rA} 亦愈大, 结果使作用于承载区危险断面上的实际拉应力增大。更进一步地说, 相对毛坯尺寸 R'/r' 的大小, 在很大程度上反映了方盒形件冲压拉深成形过程的稳定性。

实际上, 相对毛坯尺寸 R'/r' 取决于制件几何参数, 即 R'/r' 由制件几何参数唯一确定。当制件相对高度 H/B 较小, R'/r' 亦较小时, 可由平板毛坯拉深成形得到合格制件; 否则, 若制件 H/B 过大, 势必使展开毛坯的 R'/r' 也较大, 当作用于承载区危险断面上的拉应力数值超过材料的极限强度, 就会出现拉深破裂现象, 拉深过程也将被迫中止, 此时就不能由平板毛坯一次拉深得到合格制件。

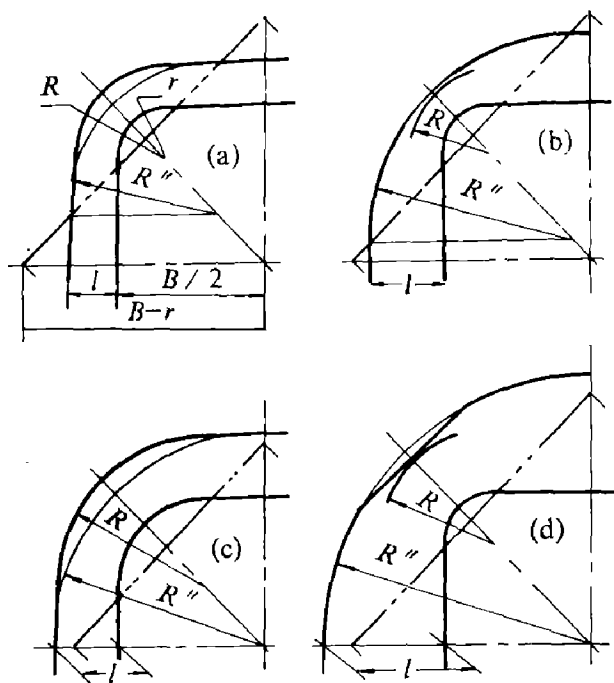


图3 方盒形件合理毛坯的简化作用

(a)—α坯; (b)—β坯; (c)—β'坯; (d)—γ坯

$$R = \begin{cases} \sqrt{r^2 + 2rH} & (R \leq 2.19r) \\ 1.32r + 0.46H & (R > 2.19r) \end{cases}$$

$$l = \begin{cases} H & (l \leq B/2 - r) \\ \sqrt{r'^2 + 2r'[H - (\frac{B}{2} - r)]} \\ + \frac{\sqrt{2} - 1}{2} B - \sqrt{2}r & (l > B/2 - r) \end{cases}$$

据此, 可定义方盒形件的冲压拉深比为

$$K_s = R' / r' \quad (8)$$

参见图2, 以变形区内边界直线段的中垂线 mm 为对称轴, 作底边长 ds 的曲边梯形 $EFF'E'$ (由主应力 σ_r 和 σ_θ 迹线构成)。由于该曲边梯形在拉深成形后的方盒形件侧壁上变为矩形, 依面积相等原则可推证展开毛坯尺寸

$$R' = \sqrt{r'^2 + 2r'[H - (\frac{B}{2} - r)]} \quad (9)$$

式中 r' 由(4)式计算得到。

当 $r/B = 0.5$ 、 $r' = r$ 和 $R_0 = R' = r^2 + 2rH^{1/2}$ 时, 相当于有圆形毛坯的圆筒形件。如果方盒形件的高度较低 ($H < 1.91r$), 展开毛坯的角部外周边线落入滑移线场的 I 区, 则转角 $\omega_{AB'} = \ln R/r$ (参见图2毛坯外周边线1), 此

时用(7)式计算 σ_{rA} 应用 R/r 替换 R'/r' , 当然有相应的冲压拉深比

$$K_s = \frac{R}{r} \quad (R = \sqrt{r^2 + 2r'H})$$

综上所述, 方盒形件的冲压拉深比

$$K_s = \begin{cases} \sqrt{1 + 2\frac{H}{r}} & (\alpha, \beta' \text{坯}) \\ \sqrt{1 + \frac{2[H + (\frac{B}{2} - r)]}{r + \sqrt{2}(\frac{B}{2} - r)e^{-\pi/4}}} & (\gamma \text{坯}) \end{cases} \quad (10)$$

不计拉深成形时材料经过凹模圆角的弯曲与反弯曲变形以及摩擦等因素的影响, 保证不发生拉深破裂的条件是

$$\sigma_{rA} \leq \sigma_p \quad (11)$$

式中 σ_p —平面应下的抗拉强度(MPa)。

用 σ_f 取代 $2k$ 表示变形区材料的塑性流动应力, 得

$$\ln K_s \leq \sigma_f / \sigma_p \quad (12)$$

分析(12)式知, 当 K_s 较小时, 有 $\ln K_s \leq 1$, 表明 $\sigma_f / \sigma_p < 1$; K_s 增加, 变形区材料加工硬化增强, 亦引起塑性流动应力 σ_f 增加, 在 $\sigma_f / \sigma_p = 1$ 时, 冲压拉深变形达到临界状态。所以, 虽然冲压拉深比 K_s 的形式是毛坯与制件的尺寸之比, 但是其大小实质上是反映拉深变形过程中承载区的抗拉强度 σ_t 与变形区的流动应力 σ_p 之对比关系。

对于圆筒形件 ($r/B = 0.5$) 而言, 忽略材料板平面各向异性的影响, 冲压拉深时沿毛坯周边的压缩变形为均匀分布, 也就是说, 此时的冲压拉深比可表示变形前后毛坯直径的变化量, 是拉深毛坯变形程度的另一种简单而实用的表示方法^[2]。但是, 对于非旋转体的方盒形件 ($0.5 > r/B > 0$), 变形沿毛坯周边分布极不均匀。当制件的角部展开尺寸 $R \leq 2.19r$ 时 (即用 α 或 β' 坯), K_s 可用来表示毛坯角部周边的变形程度; 而当 $R > 2.19r$ 时 (γ 坯), 毛坯角部周边的变形程度 $\varepsilon_\theta \approx 0.784$ (理论值), 与 r/R 无关。图4是实际测得的方盒形件角部的应变分布 (图中理论曲线未计入通

过凹模圆角的拉弯变形, 而实测结果是将法兰拉成侧壁后测得的, 其中包含有法兰流动时的拉深变形成分和通过凹模圆角时的拉弯变形成分两个部分)。由此不难看出, 实际在使用 γ 坯拉深方盒形件时, 拉深系数 m ($m=r/R$) 没有任何物理含义。

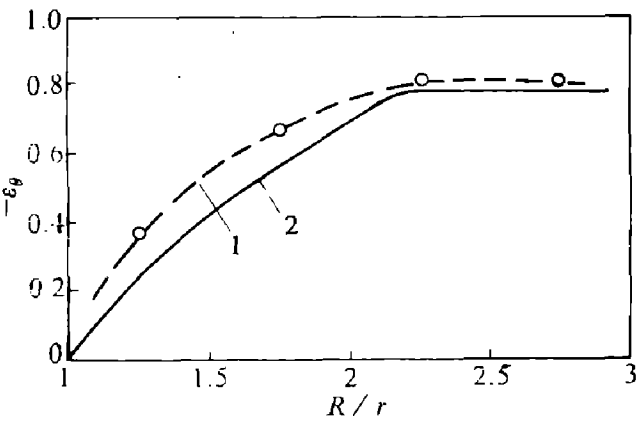


图4 方盒形件拉深时角部的应变分布(低碳钢板 γ 坯)
1—实测值; 2—理论值

3 方盒形件拉深的成形极限

方盒形件拉深破裂的危险断面是角部直壁与凸模圆角相切处。由于只有满足(11)式的条件, 方能保证拉深变形过程正常进行, 因此能够采用的冲压拉深比 K_s 必须保证(12)式成立。若(12)式取等号, 方盒形件冲压拉深变形达到成形极限状态, 这时冲压拉深比取得最大值 K_{smax} , 并当 $r/B=0.5$ 时有 $K_{smax}=K_{max}$ (K_{smax} —圆筒形件极限拉深比)。这表明, 假若不计拉深过程中材料的弯曲与反弯曲变形以及摩擦等因素的影响, 方盒形件冲压的极限拉深比 K_{smax} 是与参数 r/B 无关的常数, 等于圆筒形件的极限拉深比 K_{max} 。

考虑拉深过程中材料的弯曲与反弯曲变形以及摩擦等因素的影响, (11)式应改写成^[7]

$$\sigma_{rA} \leq \eta \sigma_p \tag{13}$$

式中 η 为变形效率系数

很显然, 随着 r/B 减小, 材料塑性流动的阻力增加, 变形效率系数 η 亦有下降; 但是, 与此同时直边部分对角部变形的减轻作用增加, 使变形区材料加工硬化相应减弱。两者相互消长, 这样可以采用的冲压拉深比 K_s 应满足下式

$$\ln K_s \leq \eta \sigma_t / \sigma_p \tag{14}$$

表1是部分常用冲压板材的极限拉深比即 K_{smax} 的实验结果。实验用毛坯形状为 γ 坯。

表1 三种冲压板材的成形极限						
材料	r/B	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
低碳钢板	计算高度 H	34	41.4	40.6	39.8	
	实测有效高度 H'	34	41.5	40.8	41	
	极限拉深比 K_{smax}	1.60	1.92	1.96	2.0	2.02
	突耳高度 ΔH	2	2	5	2	
镀锌钢板	计算高度 H'	35.1	40.8	40	39.8	
	实测有效高度 H	35	41	40	40	
	极限拉深比 K_{smax}	1.64	1.90	1.95	2.0	2.04
	突耳高度 ΔH	2.5	3	4	4	
铝板	计算高度 H		21.8	20.4	17.8	
	实测有效高度 H'		21.8	21	18.3	
	极限拉深比 K_{smax}		1.3	1.4	1.45	1.46
	突耳高度 ΔH		1	1	0	

表2 三种毛坯形状的成形极限($r/B=0.2$)			
毛坯形状	罗氏毛坯	大田—宫内毛坯	γ 坯
H/B	0.8	0.64	0.8
H'/B	0.7	0.6	0.8
$\Delta H/B$	-10%	-4%	0

注: 实验材料为低碳钢板

由表1知, 当满足 $0.5 \geq r/B > 0.2$ 时, 极限拉深比 K_{smax} 变化不大; 而当 $r/B < 0.2$ 时 K_{smax} 开始明显减小。根据回归分析, 有 $K_{smax} = [1 - 0.917 \times (0.5 - r/B)^{1.95}] K_{max}$ (15)

应用(15)式计算方盒形件一次拉深的极限拉深比 K_{smax} , 必须是用 γ 坯。假如某种材料的拉深性能较差, 或者是当制件的 r/B 极小, 在极限拉深状态下只能使用 α 坯(或 β' 坯), 此时极限拉深比 K_{smax} 与圆筒形件 K_{max} 基本相同。

(下转第51页)

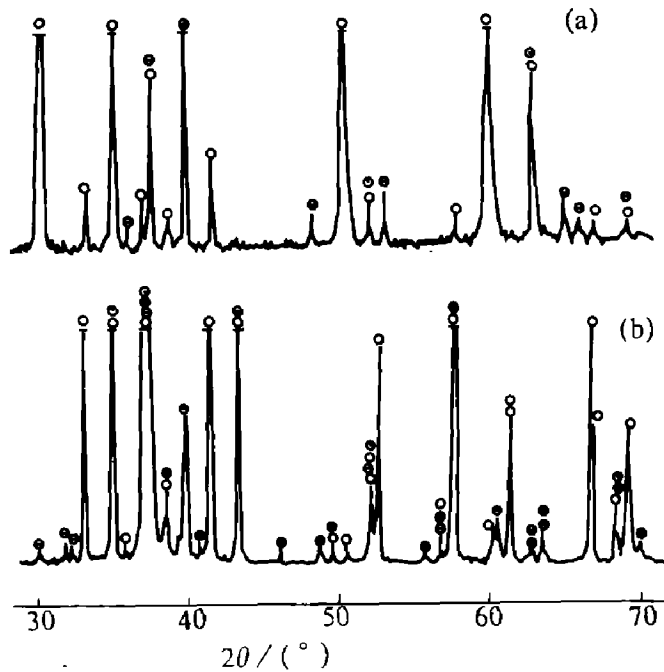


图6 AgInTi-氧化物陶瓷界面 X 射线衍射谱(CuK α)

○—合金样品与基板; ◐—Ti₂O₃; ⊖—TiO₂; ●—TiO

(a)—AgInTi-ZrO₂; (b)—AgInTi-Al₂O₃

着功分别为 0.1 Jm⁻² 与 0.06 Jm⁻²;

(3) 低 Ti 的 AgInTi 合金对 Al₂O₃ 的附着功大于该合金对 ZrO₂ 的附着功;

(4) AgInTi 合金与 Al₂O₃ 的界面反应相为 Ti₂O, TiO 和 TiO₂, 而该合金与 ZrO₂ 的界面相为 Ti₂O 和 TiO。

参考文献

- 1 Kapoor R R, Eagar T W. Metall Trans, 1989, 20B: 919.
- 2 沈爱平. 博士论文, 中国科学院金属研究所, 1991.
- 3 王景唐, 边茂恕, 曾孟仓. 金属学报, 1981, 17: 359.
- 4 横田胜, 福田修久, 永井宏等. 日本金属学会志, 1989, 53: 439.
- 5 Livey D T, Murray P. J Amer Ceram Soc, 1956, 39: 363.
- 6 铃木弘茂. エンシニアソケセウミツワヌCMC, 1983.
- 7 Kritsalis P, Coudurier L, Eustathopoulos N. J Mater Sci, 1991, 26: 3400.

(上接第 47 页)

就大多数冲压板材来说, 制件达到或是接近最大成形高度时, 展开毛坯的合理形状是图 3 所示的 γ 坯, 当 $0.5 \geq r/B > 0.1$ 时尤其如此。因此, 若制件按图 3 所示展开不为 γ 坯, 则属于可一次拉深成形的浅方盒形件, 也需计算制件的冲压拉深比 K_s 。否则, 当制件展开为 γ 坯时, 可根据圆筒形件的 K_{smax} , 按(15)式计算方盒形件的 K_{smax} 。若制件的 $K_s \geq K_{smax}$, 可一次拉深成形; 若制件的 $K_s > K_{smax}$, 则应多次拉深成形。

毛坯形状是影响成形极限的一个极其重要的因素。毛坯形状不同, 最大相对成形高度也不相同, 表 2 是三种不同毛坯形状的实际拉深结果。因此, 按本文计算 K_{smax} 并判断制件能否一次拉深成形, 必须是按图 3 所示的 γ 坯。

4 结论

(1) 与塑性加工力学中的其他方法相比, 滑移线场理论在数学上比较严谨、理论上比较完整、计算精度较高。用于板材冲压拉深的力学与变形分析, 被实际证明是一种非常有

效的手段;

(2) 基于滑移线场理论的分析结果定义的方盒形件冲压拉深比, 不仅有明确的物理概念, 而且有助于建立方盒形件与圆筒形件之间极限拉深比的关系, 对工程应用有重大的理论价值与实际意义;

(3) 依据本文的结果, 可由圆筒形件的极限拉深比 K_{smax} , 方便、准确地确定出不同 r/B 的方盒形件极限拉深比 K_{smax} , 为方盒形件冲压工艺设计提供可靠依据。

参考文献

- 1 罗曼诺夫斯基 B Л 著, 迟家骏译. 冷压手册. 北京: 中国工业出版社, 1957. 117.
- 2 李硕本主编. 冲压工艺学. 机械工业出版社, 1982. 127-128.
- 3 斯托罗热夫 M B 主编, 杨鸿勋译. 金属压力加工的理论基础. 北京: 科学出版社, 1962.
- 4 斯莱特 R A C 著, 王仲仁等译. 工程塑性理论及其在金属成形中的应用. 北京: 机械工业出版社, 1983. 226-228.
- 5 常志华等. 武汉工学院学报, 12(4): 57-62.
- 6 常志华等. 武汉工学院学报, 12(2): 38-44.
- 7 肖景容, 姜奎华主编. 冲压工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1990. 81.