

第4章 拉 深

将金属板坯料外缘全部/局部转移到制件侧壁，使板料/浅的空心工序件成形为空心件/深的空心件(皿状制件)的冲压工序称为拉深。这种工序曾称为拉延、引伸、延长、压延等，现国家标准定名为拉深。拉深工艺可以在一般的单动压力机上进展，也可以在专用的双动、三动拉深压力机或液压机上进展。

实际生产中，拉深件的外形多种多样，按变形力学特点分为以下4种根本类型。

(1) 直壁旋转体制件(如图 4.1(a)所示)——母线为直角折线(平底直壁)的旋转体制件，一般包括无凸缘筒形件(简称筒形件)、有凸缘筒形件、阶梯筒形件等。

(2) 曲面旋转体制件(如图 4.1(b)所示)——母线为非直角折线或曲线(平/凸底，曲/斜壁)的旋转体制件，一般包括球面制件、抛物面外形制件、锥形制件等。

(3) 平底直壁非旋转体制件(如图4.1(c)所示)——以盒形件为典型，还包括有凸缘盒形件。

(4) 非旋转体曲面制件(如图 4.1(d)所示)——各种不规章的简单外形制件。

图 4.1 拉深件的分类

虽然这些制件都称为拉深件，但是在拉深过程中，它们的变形区位置、变形性质、坯料各部位的应力应变状态和分布规律都有相当大的、甚至是本质的差异。所以在确定工艺参数、工序数目与工序挨次以及模具设计原则与方法等方面都各有特点。

本章首先争论筒形件的拉深，在此根底上，再介绍其他各类外形制件的拉深特点。

4.1 筒形件的拉深变形分析

拉深变形是一个较为简单的塑性变形过程，本节主要通过分析筒形件的拉深变形过程所发生的各种现象来介绍拉深变形规律。

4.1.1 筒形件的拉深变形过程

图 4.2 为拉深变形过程示意图。典型拉深模具的工作局部应包含凸模、凹模、压边圈3个功能不同的零件。直径为 D 、厚度为 t 的圆形坯料，经拉深变形得到了具有直径为 d 、高度为 h 的筒形件。

一张直径为 D 的圆纸片要变成一个直径为 d 的圆筒，外缘的纸有多余，假设强制成形，侧壁就会起皱。假想按图 4.3 所示，把环形区阴影局部的三角形剪掉，则可成为一个侧壁没有多余料、也不会起皱的纸筒。但在金属板料的实际拉深过程中，并不是把坯料的“多余三角形”剪掉，而是让“多余三角形”产生塑性变形转移，使得拉深后制件的高度增加

了 $D - h$ [即 $h > (D - d)/2$]，同时，制件的侧壁厚度也略有增加。

图 4.2 筒形件的拉深

1—坯料；2—凸模；3—压边圈；4—凹模；5—制件

为了说明金属的转移，还可以进展如下试验。在圆形坯料上画出很多直径差为 $2a$ 的同心圆和等分度的辐射线组成网格 ($b > b_1 > b_2 > b_3 \cdots > b$ ，如图 4.4 所示)。拉深后，得到筒形件，其底部的网格根本保持原来的外形，而侧壁局部的网格则发生了很大的变化：原来在同一平面上的直径不相等的同心圆，变为侧壁上空间位置相互平行、直径相等的圆 (各圆心都在圆筒的轴心线上，但其间距增大了，愈靠近筒的口部增大愈多，即 a 变成 $a_1, a_2, a_3, \cdots$ ，且 $a_1 > a_2 > a_3 > \cdots > a$ ；原来互成夹角的辐射线变成了侧壁上的平行线，其间距全相等 (即 $b_1, b_2, b_3, \cdots$ 均变成 b)。

假设仅看网格中的 1 个小单元，由拉深前的扇形 A ，变为拉深后的矩形 A' 。假设无视板料厚度的微小变化，则小单元的面积不变，即 $A = A'$ 。说明小单元在径向受到拉应力作用而变长，在切向受到压应力作用而缩短。

图 4.4 筒形件拉深的网格变化

图 4.3 拉深时材料的转移

故拉深变形过程可以归纳如下：在拉深过程中，由于外力的作用，坯料凸缘区内部的各个小单元之间产生了内应力，径向产生拉应力，切向产生压应力，在这两种应力作用下，凸缘区的材料发生塑性变形并不断地被拉入凹模，成为筒形件。

4.1.2 筒形件拉深过程中坯料的应力应变状态

为了更深刻地生疏拉深变形，有必要深入探讨拉深过程中材料各局部的应力应变状态。图 4.5 所示为拉深过程中的某一时刻坯料所处状态。图中

- σ_1, ϵ_1 ——分别表示材料径向的应力与应变；
- σ_2, ϵ_2 ——分别表示板料厚度方向的应力与应变；
- σ_3, ϵ_3 ——分别表示材料切向的应力与应变。

图 4.5 拉深过程中坯料各局部的应力应变状态

依据应力应变状态的不同，拉深坯料可划分为5 个区域。

(1) 平面凸缘区

拉深变形主要发生在该区域，材料在 $+\sigma_1$ 和 $-\sigma_3$ 作用下，发生塑性变形而渐渐进入凹模。在压边圈的作用下，厚度方向存在 $-\sigma_2$ ，通常 σ_2 确实定值要比 σ_1 、 σ_3 小很多，故材料的应变主要是 $-\epsilon_3$ 和 $+\epsilon_1$ ，板厚方向产生不大的 $+\epsilon_2$ 。由于愈靠外缘需要转移的材料愈多，因此，愈到外缘材料变得愈厚，硬化也愈严峻。

(2) 凹模圆角区

这是材料由凸缘进入筒壁的过渡变形区，变形比较简单。除有与平面凸缘区一样的特点即径向受 $+\sigma_1$ 作用产生 $+\epsilon_1$ 和切向受 $-\sigma_3$ 作用产生 $-\epsilon_3$ 外，还由于承受凹模圆角的压力和弯曲的作用而产生较大的 $-\sigma_2$ 。该区域 $+\sigma_1$ 及相应的 $+\epsilon_1$ 确实定值最大。因此板厚方向产生 $-\epsilon_2$ ，板料厚度减薄。

(3) 筒壁区

该区域材料已完成变形，成为筒形，根本不再发生大的变形。但它是传力区，在连续拉深时，凸模作用的拉深力要经过筒壁传递到凸缘局部，故它承受单向拉应力 $+\sigma_1$ 的作用，发生少量径向伸长 $+\epsilon_1$ 和厚度方向变薄 $-\epsilon_2$ 。

(4) 凸模圆角区

这是筒壁与筒底的过渡变形区，材料除承受 $+\sigma_1$ 和 $+\sigma_3$ 外(在外侧， $+\sigma_3$ 作用更明显)，还由于凸模圆角的压力和弯曲作用，在厚度方向承受 $-\sigma_2$ 。其应变状态与筒壁局部一样，但是 $-\epsilon_2$ 引起的变薄现象比筒壁局部严峻得多。

(5) 筒底区

该区域材料根本不变形，但由于作用于凸模圆角区的拉深力，使材料承受双向拉应力 $+\sigma_1$ 与 $+\sigma_3$ ，其应变为平面方向的 $+\epsilon_1$ 和 $+\epsilon_3$ 以及厚度方向的 $-\epsilon_2$ 。由于凸模圆角处摩擦的制约，该区域的应力与应变均不大， $-\epsilon_2$ 可无视不计。

4.1.3 筒形件拉深变形的力学分析

在拉深时，不仅坯料的不同区域具有不同的应力应变状态，而且其应力与应变确实定值还随着拉深过程的进展而不断变化。因此必需从力学角度分析其变化规律。

1. 凸缘变形区的应力分布

拉深时，凸缘的应力状态为径向受拉，切向受压。当坯料由 R_0 被拉深到 R_t 时，其数值可依据力学的平衡条件与塑性条件通过数学方法导出

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 1.1 \bar{\sigma} \ln \frac{R}{R_t} \\ \sigma_3 &= 1.1 \bar{\sigma} \ln \frac{R_t}{R}\end{aligned}\quad (4-1)$$

式中： R_t ——拉深过程中某时刻的凸缘半径；

R ——凸缘区内任意处的半径；

$\bar{\sigma}$ ——将坯料由 R_0 拉至 R_t 时，凸缘变形区金属变形抗力的平均值；

σ_1, σ_3 ——将坯料由 R_0 拉深到 R_t 时，凸缘区内任意半径 R 处的径向拉应力与切向压应力的值。

由式(4-1)可知，凸缘变形区内， σ_1 与 σ_3 呈对数曲线规律分布(如图 4.6 所示)。

在 $R=r_0$ 处(拉深凹模入口处的凸缘上)， σ 的值最大， $\sigma_{1\max}=1.1\bar{\sigma}\ln(R/r_0)$ ；在 $R=R_t$ 处(凸缘的外边缘)， σ_3 取最大值 $\sigma_{3\max}=1.1\bar{\sigma}$ 。 σ_1 由外向内渐渐增加， σ_3 由外向内，渐渐减小。令 $|\sigma_1|=|\sigma_3|$ ，有 $R=0.61R_t$ 。也就是说，由 $R=0.61R_t$ 作一圆，可将凸缘分为2局部，由此圆向外到边缘的局部， $|\sigma_3|>|\sigma_1|$ ， $-\varepsilon_3$ 为最大主应变，此处板厚方向为 $+\varepsilon_2$ ，板料略有增厚；由此圆向内到凹模口， $|\sigma_1|>|\sigma_3|$ ， $+\varepsilon_1$ 为最大主应变，因此厚度方向为 $-\varepsilon_2$ ，此范围的板料厚度略有减薄。就整个凸缘变形区来说，以压缩变形为主的区域比以拉伸为主的区域要大得多，因此拉深变形属于压缩类变形。

2. 整个拉深过程中 $\sigma_{1\max}$ 和 $\sigma_{3\max}$ 的变化规律

当坯料从 R_0 拉深到 R_t 时，凸缘的外边缘具有 $\sigma_{3\max}$ ，而在凹模口具有 $\sigma_{1\max}$ 。在拉深过程中， R 是不断由 $R \rightarrow r_0$ 变化的，在不同的时刻， $\sigma_{1\max}$ 和 $\sigma_{3\max}$ 的值也不一样。下面分析在整个拉深过程中， $\sigma_{1\max}$ 与 $\sigma_{3\max}$ 是如何变化的，在什么时刻消灭 $\sigma_{1\max}$ 和 $\sigma_{3\max}$ 。

(1) $\sigma_{1\max}$ 的变化规律

由 $\sigma_{1\max}=1.1\bar{\sigma}\ln(R/r_0)$ 可知， $\sigma_{1\max}$ 的变化受因素 $\bar{\sigma}$ 与 $\ln(R/r_0)$ 的制约。 $\bar{\sigma}$ 表示材料的变形抗力，随着拉深的进展，变形程度渐渐增加， $\bar{\sigma}$ 也渐渐增大。 $\ln(R/r_0)$ 反映了凸缘变形区的大小，随着拉深的进展，凸缘变形区渐渐缩小， $\ln(R/r_0)$ 的数值也渐渐减小。如图 4.7 所示，将不同的 R_t 所对应的 $\sigma_{1\max}$ 值连成曲线即为整个拉深过程中 $\sigma_{1\max}$ 的变化状况。由图可知，拉深开头阶段，材料变形抗力增长较快而凸缘变形区的缩减较慢， $\sigma_{1\max}$ 增长很快，当 $R_t=(0.8\sim 0.9)R_0$ 左右到达最大值 $\sigma_{1\max}$ ，而后，凸缘变形区缩减加快， $\sigma_{1\max}$ 就渐渐减小，直到拉深过程完毕， $R_t \rightarrow r_0$ ， $\sigma_{1\max}=0$ 为止。

图 4.6 筒形件拉深时凸缘上的应力分布

图 4.7 拉深过程中 σ_{lmax} 的变化

图 4.7 所示曲线是在肯定的材料和肯定的拉深系数 m (见，经过大量的试验与计算，用数学归纳法得到如下形式的 σ_{lmax} 与拉深系数和材料性质的关系：
式中： a, b ——与材料性质有关的常数。其值列于表4.1 中。

表 4.1 a 值与 b 值

ε_j	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
a	0.65	0.68	0.71	0.73	0.75	0.75	0.75
b	0.52	0.59	0.65	0.70	0.75	0.78	0.79

注：表中 ε_j 是指材料在刚消灭细颈时的真实应变值，假设 δ 为材料的伸长率，则 $\varepsilon_j = \ln(1 + \delta)$ 。

(2) σ_{3max} 的变化规律
由 $\sigma_{3max} = 1.1 \sigma_{lmax}$ 可知，随着拉深过程的不断进展，凸缘变形区的变形程度增加，变形抗力 σ_{lmax} 也随之增加，因此， σ_{3max} 始终上升。直至拉深过程完毕时， σ_{3max} 到达最大值 σ_{3max}^{max} 。其变化规律与真实应力曲线相像，在拉深的初始阶段 σ_{3max} 增加比较快，以后逐步趋于平缓。

1. 筒壁局部受力分析

筒壁局部作为已变形区在拉深过程中又是传力区。凸模作用在制件上的拉深力是通过筒壁传递至凸缘变形区将其渐渐拉入凹模口内的。

图 4.8 筒壁传力区的受力分析

- 如图 4.8 所示，筒壁局部所受的最大拉应力主要有：
- (1) 凸缘材料的变形抗力 σ_{lmax} ；
 - (2) 压边力 P_Q 在凸缘外表产生的摩擦所引起的应力 σ_m ；
 - (3) 由坯料与凹模圆角处摩擦引起的应力；
 - (4) 坯料经过凹模时的弯曲和绕过凹模圆角后的变直引起的应力。

理论和试验争论说明，在正常条件下拉深时(指合理的凹模圆角半径、间隙大小、压边力、润滑条件等)，凸缘变形区最大拉应力 σ_{lmax}^{max} 在筒壁所受到的总拉应力 σ_p 中，约占 65%~75%，因此

$$\sigma_p = \frac{1}{h} \sigma_{lmax}^{max} = \frac{1}{h} \frac{\sigma_{lmax}^{max}}{\eta} \quad (4-2)$$

式中： η ——拉深效率，其值为 0.65~0.75。

由此也可分析得出：在拉深过程中，筒壁局部所受的最大拉应力 σ_p 与 s_{lmax} 同时消灭。
综上所述，拉深件侧壁愈高，需要转移的材料愈多，坯料边缘变形程度愈大，所需变形力愈大，传力区受到的力也就愈大；当变形力超过了传力区的许用强度，拉深就会失败。可见，每次拉深变形的量是有限的。为保证拉深过程顺当进展，必需保证变形区为弱区，传力区为强区，且强弱差异愈大，拉深过程愈稳定。

：

4.1.4 筒形件的拉深系数与拉深次数

在拉深工艺设计时，必需推断制件是否能一次拉深成形，或需要几道工序才能拉成。正确解决这个问题直接关系到拉深生产的经济性和拉深件的质量。

1. 拉深系数

每次拉深后的筒形件直径与拉深前坯料(或工序件/半成品)的直径之比称为拉深系数，用符号 m 表示(符号右上标表示拉深次数，为避开混乱，一律加方括号，下同)，即首次拉深

$$m_{[1]}=d_{[1]}/D$$

以后各次拉深

$$\begin{aligned} m_{[2]} &= d_{[2]} / d_{[1]} \\ m_{[3]} &= d_{[3]} / d_{[2]} \\ m_{[n]} &= d_{[n]} / d_{[n-1]} \end{aligned} \tag{4-3}$$

总拉深系数表示从坯料拉深至所需筒形件的总变形程度。即

$$m = \frac{d_{[n]}}{D} = \frac{d_{[1]}}{D} \times \frac{d_{[2]}}{d_{[1]}} \times \cdots \times \frac{d_{[n-1]}}{d_{[n-2]}} \times \frac{d_{[n]}}{d_{[n-1]}} = m_{[1]} m_{[2]} \cdots m_{[n-1]} m_{[n]} \tag{4-4}$$

:

式中: $m_{[1]}, m_{[2]}, \dots, m_{[n]}, m_{\varepsilon}$ ——各次的拉深系数及总拉深系数;

D ——坯料直径;

$d_{[1]}, d_{[2]}, \dots, d_{[n-1]}, d_{[n]}$ ——各次工序件/半成品(或最终制件)的直径(中径)(参考图 4.9)。

图 4.9 屡次拉深件示意图

拉深系数 m 反映了拉深前后坯料直径的变化量, 反映了坯料边缘在拉深时切向压缩变形的大小, m 愈小表示拉深变形程度愈大。拉深系数的倒数称为拉深比, 用符号 K 表示, 即 $K=1/m$ 。

由式(4-2)可知, m 愈小, 筒壁传力区产生的最大拉应力 σ_p 愈大, 当 σ_p 到达筒壁受力区的有效抗拉强度, 危急断面濒于拉断时, 这一极限变外形态下的拉深系数即称为极限拉深系数 $m_{\min}$ 。 $m_{\min}$ 表示了拉深前后坯料直径的最大变化, 是拉深工作中重要的工艺参数, 它是进展拉深工艺计算和设计模具的根本动身点。假设 $m_{\min}$ 愈小, 就意味着板料的拉深极限变形程度愈大。原来可能需要两次拉深才能成功的仅需要一次拉深就可以实现。因而其经济意义也很大。为此, 应当从技术上去乐观寻求降低 $m_{\min}$ 的措施。

提高拉深成形的极限变形程度, 应着眼于降低变形区的变形抗力及提高传力区的承载力量。围绕这个原则, 可以通过以下途径, 降低 $m_{\min}$ 。

(1) 材料性能方面

提高板料塑性, 尤其是板料的拉深性能, 研制和选择组织均匀、晶粒大小适中、屈强比 σ_s/σ_b 小、塑性应变比 r 大的材料。

由于 σ_s 小, 材料简洁变形, 凸缘变形区的变形抗力减小, 筒壁传力区的拉应力也相应减小; 而 σ_b 大, 则提高了危急断面处的强度, 减小裂开的危急。延长率 δ 值大的材料在变形时不易消灭缩颈, 因而危急断面的严峻变薄和拉断现象也相应推迟。一般认为 $\sigma_s/\sigma_b \leq 0.65$, 而 $\delta \geq 28\%$ 的材料具有较好的拉深性能。 r 值大说明板料在厚度方向变形困难, 危急断面不易变薄、拉断, 因而对拉深有利, 拉深系数可以减小。

(2) 制件设计方面

在进展拉深件设计时, 应当考虑到拉深成形的工艺性。从拉深变形特点动身, 尽量使板料的相对厚度 t/D 大些, 以增大其变形区抗压缩失稳的力量, 这样可以减小压边力, 也就可减小摩擦阻力, 有利于减小拉深系数。同时, 应当留意拉深件底部的圆角半径不宜过小, 以提高传力区危急断面的抗拉强度。

(1) 工艺与模具设计方面

应设计合理的凸模圆角半径和凹模圆角半径以及选择合理的拉深间隙。由于过小的凸模圆角半径和过小的凹模圆角半径以及过小的拉深间隙会使拉深过程中摩擦阻力与弯曲阻力增加，危急断面的变薄加剧，而过大的凸模圆角半径和过大的凹模圆角半径以及过大的拉深间隙会减小有效压边面积，使板料的悬空局部增加，易于使板料失稳起皱。

承受压边圈并配以合理的压边力对拉深有利，可以减小拉深系数。

凹模(特别是其圆角入口处)与压边圈的工作外表应尽量光滑并承受润滑剂，以减小对板料变形流淌的阻力，减小传力区危急断面的负担，可以减小拉深系数。对于凸模工作外表，则不必做得很光滑，也不需要润滑，使其与板料之间有相当的摩擦力，有利于阻挡危急断面变薄，因而有利于减小拉深系数。

对速度敏感的金属(如钛合金、不锈钢和耐热钢等)承受液压机拉深，以降低拉深速度，减小极限拉深系数。

但是，选用过小的拉深系数会引起底部圆角与直壁相切局部过分变薄，而且在以后的拉深工序中，这局部变薄严峻的缺陷会转移到成品制件的侧壁上去，降低制件的质量。所以，在生产实际中，一般承受大于极限值的拉深系数。表 4.2 为筒形件用压边圈时的各次拉深系数；表4.3 为筒形件不用压边圈时的拉深系数；表4.4 为各种材料的拉深系数(所列 $m_{[n]}$ 为后续各次拉深系数的平均值)。

表 4.2 筒形件带压边圈时的拉深系数

拉深系数	坯料相对厚度 $t/D(\%)$					
	2.0~1.5	1.5~1.0	1.0~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15	0.15~0.08
$m_{[1]_{\min}}$	0.48~0.50	0.50~0.53	0.53~0.55	0.55~0.58	0.58~0.60	0.60~0.63
$m_{[2]_{\min}}$	0.73~0.75	0.75~0.76	0.76~0.78	0.78~0.79	0.79~0.80	0.80~0.82
$m_{[3]_{\min}}$	0.76~0.78	0.78~0.79	0.79~0.80	0.80~0.81	0.81~0.82	0.82~0.84
$m_{[4]_{\min}}$	0.78~0.80	0.80~0.81	0.81~0.82	0.82~0.83	0.83~0.85	0.85~0.86
$m_{[5]_{\min}}$	0.80~0.82	0.82~0.84	0.84~0.85	0.84~0.85	0.86~0.87	0.87~0.88

注：1. 表中拉深数据适用于08、10 和 15Mn 等一般拉深碳钢及软黄铜H62。对拉深性能较差的材料，如20、25、Q215、Q235、硬铝等应比表中数值大 1.5%~2.0%；而对塑性更好的，如 05、08、10 等拉深钢及软铝应比表中数据小 1.5%~2.0%。

2. 表中数据适用于未经中间退火的拉深，假设承受中间退火工序时，可取较表中数值小2%~3%。

3. 表中较小值适用于大的凹模圆角半径 $r_{\text{凹}}=(8\sim15)t$ ，较大值适用于小的凹模圆角半径 $r_{\text{凹}}=(4\sim8)t$ 。

表 4.3 筒形件不带压边圈时的拉深系数

拉深系数	坯料相对厚度 $t/D(\%)$				
	1.5	2.0	2.5	3.0	≥ 3.0
$m_{[1]_{\min}}$	0.65	0.60	0.55	0.53	0.50
$m_{[2]_{\min}}$	0.80	0.75	0.75	0.75	0.70
$m_{[3]_{\min}}$	0.84	0.80	0.80	0.80	0.75
$m_{[4]_{\min}}$	0.87	0.84	0.84	0.84	0.78
$m_{[5]_{\min}}$	0.90	0.87	0.87	0.87	0.82
$m_{[6]_{\min}}$	—	0.90	0.90	0.90	0.85

注：此表适用于 08、10 及 15Mn 等材料，其余各项同表4.2 之注。

:

表 4.4 各种材料的拉深系数 m

材 料	牌 号	首次拉深 $m_{[1]}$	后续各次拉深 $m_{[n]}$
铝和铝合金	8A06M、1035M、3A21M	0.52~0.55	0.70~0.75
杜拉铝	2A11M、2A12M	0.56~0.58	0.75~0.80
黄铜	H62	0.52~0.54	0.70~0.72
纯铜	H68	0.50~0.52	0.68~0.72
无氧铜	T2、T3、T4	0.50~0.55	0.72~0.80
		0.52~0.58	0.75~0.82
康铜(铜镍合金)		0.50~0.56	0.74~0.84
镍、镁镍、硅镍		0.48~0.53	0.70~0.75
白铁皮		0.58~0.65	0.80~0.85
酸洗钢板		0.54~0.58	0.75~0.78
不锈钢、耐热钢	Cr13	0.52~0.56	0.75~0.78
钢	Cr18Ni	0.50~0.52	0.70~0.75
	1Cr18Ni9Ti	0.52~0.55	0.78~0.81
	Cr18Ni11Nb、Cr23Ni18	0.52~0.55	0.78~0.80
	Cr20Ni75Mo2AlTiNb	0.46	—
	Cr25Ni60W15Ti	0.48	—
	Cr22Ni38W3Ti	0.48~0.50	—
	Cr20Ni80Ti	0.54~0.59	0.78~0.84
	30CrMnSiA	0.62~0.70	0.80~0.84
可伐合金	工业纯钛	0.65~0.67	0.85~0.90
钼铍合金	TA5	0.72~0.82	0.91~0.97
钽		0.65~0.67	0.84~0.87
铌		0.65~0.67	0.84~0.87
钛合金		0.58~0.60	0.80~0.85
锌		0.60~0.65	0.80~0.85
		0.65~0.70	0.85~0.90

注：1. 凹模圆角半径 $r_{凹} < 6t$ 时，拉深系数取大值； $r_{凹} \geq (7\sim 8)t$ 时，取小值。
2. 材料相对厚度 $t/D \geq 0.6\%$ 时，拉深系数取小值； $t/D < 0.6\%$ 时，取大值。

由表 4.2~表 4.4 可以看出，用压边圈首次拉深时， $m_{[1]}$ 约为 0.5~0.6 左右；后续各次拉深时， $m_{[n]}$ 的平均值约为 0.7~0.8 左右。后续各拉深系数愈来愈大。不用压边圈的拉深系数大于用压边圈的拉深系数。

2. 拉深次数

当具体制件所需的拉深系数大于极限拉深系数时，该制件可一次拉成，否则，就需屡次拉深。屡次拉深的拉深次数可按以下方法确定。

(1) 计算法

假设后续各次拉深系数为 $m_{[n]}$ ，由式(4-3)可知

$$d_{[n]}=m_{[n]}d_{[n-1]}=(m_{[n]})^{(n-1)}(m_{[1]}D)$$

由此可得对数方程式

$$\lg d_{[n]}=(n-1)\lg(m_{[n]})+\lg(m_{[1]}D)$$

即

$$n=1+[\lg d_{[n]}-\lg(m_{[1]}D)]/\lg(m_{[n]}) \tag{4-5}$$

式(4-5)中 $m_{[1]}$ 与 $m_{[n]}$ 由表 4.4 查取。留意，计算所得的拉深次数 n 小数局部应一律进位取整数，而不得四舍五入。

：

(2) 推算法

筒形件的拉深次数也可依据 t/D 值查出 $m_{[1]}$, $m_{[2]}$, $\cdots$, 然后从首次拉深 $d_{[1]}$ 向 $d_{[n]}$ 推算。即按式(4-3)始终算到所得的 $d_{[n]}$ 不大于制件所要求的直径 d 为止。此时的 n 即为所求的次数。

(3) 查图法

由于拉深后的制件/工序件直径与拉深前工序件/坯料直径是线性关系，只是该直线的斜率分别是 $m_{[1]}$, $m_{[1]}m_{[2]}$, $\cdots$, $m_{[1]}(m_{[n]})^{(n-1)}$, 所以，针对不同材料，可分别绘出一组斜线图。设计时直接查选，直观便利。

(4) 查表法

前人对大量的生产实践进展了总结归纳，建立了各种行之有效的表格，如按坯料相对厚度 t/D 与制件相对高度 h/d 查拉深次数，按坯料相对厚度 t/D 与总拉深系数 m 查拉深次数(表 4.5)，等等。设计时可直接查取。

表 4.5 总拉深系数 m 与拉深次数的关系

ϵ

拉深次数 n	坯料相对厚度 $t/D(\%)$				
	2.0~1.5	1.5~1.0	1.0~0.5	0.5~0.2	0.2~0.06
2	0.33~0.36	0.36~0.40	0.40~0.43	0.43~0.46	0.46~0.48
3	0.24~0.27	0.27~0.30	0.30~0.34	0.34~0.37	0.37~0.40
4	0.18~0.21	0.21~0.24	0.24~0.27	0.27~0.30	0.30~0.33
5	0.13~0.16	0.16~0.19	0.19~0.22	0.22~0.25	0.25~0.29

注：表中数据适用于08 及 10 钢的筒形件(用压边圈)。

为了保证拉深工序的顺当进展和变形程度分布合理，应使每次拉深的实际拉深系数与相应次数的极限拉深系数的差值尽量接近。设实际承受的拉深系数为 $m_{[1]}'$, $m_{[2]}'$, $m_{[3]}'$, $\cdots$, $m_{[n]}'$, 应使

$$m_{[1]}' - m_{[1]} \approx m_{[2]}' - m_{[2]} \approx m_{[3]}' - m_{[3]} \approx \cdots \approx m_{[n]}' - m_{[n]} = D \quad m$$

2. 后续各次拉深的特点及方法

后续各次拉深时所用的坯料与首次拉深不同，它不是平板而是筒形工序件/半成品。因此它与首次拉深相比，有很多不同之处。表4.6 对二者进展了归纳比较。

表 4.6 首次拉深与后续拉深特点比较

序号	项 目	首次拉深	后续拉深
1	板料厚度 t 、材料性能 σ_s / σ_b 、 δ	均匀	不均匀，已有加工硬化，坯料要经过 2 次弯曲才被拉入凹模
2	变形区	渐渐缩小	不变，最终阶段才缩小
3	拉深力(参见图 4.10)	开头阶段较快到达最大值，然后渐渐减小为零	在整个拉深过程中始终都在增加，直到拉深最终阶段才由最大值下降至零
4	裂开可能发生的时刻	初始阶段	末尾阶段
5	稳定性	起皱简洁发生在初始阶段	较好，由于有筒壁刚性支持，起皱可能发生在最终阶段
6	拉深系数	$m_{[1]}$ 较小	$m_{[n]}$ 较大，且 $m_{[n]} \geq m_{[n-1]} \geq \cdots \geq m_{[2]}$

:

后续拉深有正拉深和反拉深两种方法，如图4.11 所示。正拉深的拉深方向与上次拉深方向全都，而反拉深的拉深方向与上一次拉深方向相反。反拉深的特点如下：

图 4. 10 首次拉深与第 2 次拉深的拉深力变化曲线

1—首次拉深；2—第 2 次拉深

- (1) 反拉深制件的内外外表相互转换，材料的流淌方向有利于抵消拉深时形成的剩余应力。
- (2) 反拉深材料的弯曲与反弯曲的次数较少，加工硬化也少，有利于成形。
- (3) 坯料与凹模的接触面大(包角达 180°)，材料流淌阻力大，材料不易起皱。因此一般可不用压边圈，这就避开了由于压边力不适当或者不均匀而造成的拉裂。
- (4) 反拉深的拉深力比正拉深大 20%左右。
- (5) 反拉深极限拉深系数比正拉深时可降低10%~15%。
- (6) 拉深凹模壁厚不是任意的，它受到拉深系数的影响。如图4.11(b)所示，凹模壁厚为 $(d_{[1]} - d_{[2]} - 2t)/2$ 。假设反拉深系数太大，凹模壁就会过薄，造成强度缺乏。同时，凹模的圆角半径不能大于 $(d_{[1]} - d_{[2]} - 2t)/4$ 。

图 4. 11 正拉深与反拉深

反拉深方法主要用于厚度较薄的大件和中等尺寸筒形件的后续各次拉深，反拉深后圆筒的直径 $d_{[2]} \geq (30 \sim 90)t$ ，凹模圆角半径 $r_{\text{凹}} > (2 \sim 6)t$ 。反拉深方法也可用于锥形件、球形件、抛物曲面制件的最终拉深成形(参见 4.8 节)。图 4.12 所示为一些典型的反拉深件。

图 4. 12 一些典型的反拉深件

4.2 筒形件拉深的主要质量问题及防止措施

拉深成形的实质在于凸缘局部的压缩变形，拉深件质量问题的表现形式主要有起皱、拉裂、拉深凸耳、时效开裂、回弹、外表不良等。

4.2.1 起皱

拉深过程中，坯料凸缘在切向压应力作用下，可能产生失稳，其表征为起皱(凸缘边上材料产生皱折，如图 4.13 所示)。稍微的起皱坯料可通过凸-凹模间隙，仅在筒壁上留下皱痕，影响制件外表质量；而严峻的起皱会使材料不能通过凸-凹模间隙而被拉裂。

凸缘局部材料的失稳与压杆两端受压失稳相像，它不仅取决于切向压应力 σ_t 的大小，而且与凸缘相对厚度 $t/(D-d)$ 有关。 σ_t 愈大， $t/(D-d)$ 愈小，则愈易起皱。此外，材料弹性模量 E 愈大，抵抗失稳的力量也愈大。由，在拉深过程中， $\sigma_{3\max}$ 随着拉深的进展而不断增大，但与此同时，凸缘相对厚度 $t/(D_t-d)$ 也在不断增大。前者增加失稳起皱的趋势，后者却是提高抵抗失稳起皱的力量。这 2 个因素相互作用的结果，使凸缘失稳起皱趋势最为猛烈的瞬间落在 $R_t=(0.8\sim 0.9)R_0$ 时刻，即根本上也就是 $\sigma_{1\max}$ 消灭的时刻。

防止起皱的主要措施有：

(1) 承受压边(料)装置，使坯料可能起皱的局部被一大小适宜的力 P_Q 压在凹模平面与压边圈之间进展拉深，如图4.2 所示。压边力 P_Q 的大小对拉深有很大影响， P_Q 过大，则使凸缘变形区坯料与凹模、压边圈之间的摩擦力剧增，可能导致制件的过早拉裂；假设 P_Q 过小，则起不到防皱作用或作用很小(图 4.14)。从理论上讲，拉深过程中 P_Q 的大小最好与 $\sigma_{1\max}$ 的变化全都，当 $R_t=(0.8\sim 0.9)R_0$ 时，压边力 P_Q 亦应最大。对于拉深系数足够大，且坯料相对厚度也较大的制件(按表 4.3)，也可不用压边。

图 4.13 起皱现象

图 4.14 压边力 P_Q 的大小对拉深的影响

(2) 改善凸缘局部的润滑，选用屈强比 σ_s/σ_b 小、屈服点 σ_s 低的材料，尽量使板料的相对厚度 t/D 大些，以增大其变形区抗压缩失稳的力量。

(3) 在模具中选择设计合理的压边形式(参见 4.3 节)和适当的拉深筋(参见图 4.22)，对防止起皱也有较好的效果。

(4) 承受反拉深方法。

4.2.2 拉裂

由，当 σ_p 大于筒壁处材料的有效抗拉强度时，拉深件即被拉裂，如图4.15所示。

拉裂一般发生在筒壁与筒底过渡部位的圆角与侧壁相切处。这是由于经拉深后，筒壁上部和下部的厚度和材料硬度是不一样的，上部材料是由凸缘外边缘转移而来，其切向压缩变形量大，厚度有增厚趋向，加工硬化现象显著(如图4.16所示)，因此有效抗拉强度较高。而下部靠近凸模圆角处的材料是由凸缘局部的内边缘转移而来的，状况正好与上部相反，由于受单向拉应力 σ_1 的影响，厚度有变薄的趋向，加之此处材料受凸模圆角弯曲时产生的弯曲应力影响，会进一步降低它的有效抗拉强度，所以此处成为拉深时最易拉裂的危险断面。

图 4.15 拉裂破坏图

图 4.16 拉深后筒形件壁部厚度与硬度的变化

筒形件拉深时产生拉裂的缘由有可能是由于凸缘失稳起皱，坯料不能通过凸—凹模间隙，使筒壁所受总拉应力 σ_p 特别增大所致。但假设在防皱措施到位的状况下产生拉裂，则是由于拉深变形程度太大，即拉深系数 $m < m_{\min}$ 所致。因此，拉深系数 $m_{\min}$ 成为拉深的主要工艺参数，其值确实定就是以不拉裂为前提的。

防止拉裂的主要措施有：

(1) 合理选取拉深系数。由式(4-2)可知，筒壁所受到总拉应力 σ_p 与拉深系数 m 成反比，即 m 愈小 σ_p 愈大，较小的拉深系数虽可加大拉深变形程度，但却大大增加了拉深力，使制件筒壁变薄拉裂。

(2) 合理选用材料。拉深板料除应满足制件使用要求外，还应考虑工艺成形性能的要求。一般来说，选用材料应考虑这样几个指标：屈强比 σ_s / σ_b 要小(屈服应力 σ_s 小，材料变形简洁；强度极限 σ_b 高，材料不易拉裂)， n 值和 $\bar{r}$ 值大。

板料各项性能指标中对拉深影响最大的是塑性应变比 r ，由第1章， r 值大说明材料在切向径向变形比较简洁，故 $m_{\min}$ 值小。同时，筒壁局部与底部圆角相切处受单向拉应力作用，当 r 值大时，板料厚度方向也不易变薄，危急断面有效截面积不易减小。因此，选用 $r > 1$ 的材料进展拉深是防止拉裂的重要措施。

(3) 选择合理的凸、凹模圆角半径。如图4.8所示，凹模圆角半径太小，材料在拉深成形中弯曲阻力增加，从而使筒壁传力区的最大拉应力增加，危急断面易拉裂；凹模圆角半径太大，又会削减有效压边面积，使凸缘材料易起皱。同样，凸模圆角半径虽然对筒壁传力区拉应力影响不大，但却影响危急断面的抗拉强度。凸模圆角半径太小，材料绕凸模弯曲的拉应力增加，危急断面抗拉强度降低；凸模圆角半径太大既会削减传递凸模载荷的承载面积又会削减凸模断面与材料的接触面积，增加坯料的悬空局部，易使悬空局部起皱。

(4) 合理进展润滑。拉深时承受必要的润滑，有利于拉深变形的顺当进展，且筒壁变薄得到改善，但必需留意润滑剂只能涂在凹模和压边圈与坯料接触的外表，而在凸模外表不要润滑，由于凸模与坯料外表的摩擦属于有益的摩擦，它可以防止制件在拉深过程中的滑动和变薄。但矩形件拉深不受此限制。

:

4.2.3 拉深凸耳

筒形件拉深，在制件口端消灭有规律的凹凸不平现象就是拉深凸耳(参见图 1.18(a))。凸耳的数目一般为 4 个，产生拉深凸耳的缘由见第1 章

需要指出的是，板料的塑性应变比 r 值愈大，拉深成形极限愈高，但一般 r 值大的材料，其 $|Vr|$ 也愈大，凸耳愈严峻。这说明 r 值对拉深件质量有相互冲突的 2 个方面的影响。

欲消退凸耳获得口部平齐的拉深件，只有进展修边，修边余量应大于 $h_{\max} - h_{\min}$ (参见图 1.18(a))。

4.2.4 时效开裂

所谓时效开裂，是指制件拉深成形后，由于经受到撞击或振动，甚至存放一段时间后消灭的口部开裂现象，且一般是以口端先开裂，进而扩开放来，如图 4.17 所示。

图 4.17 拉深件时效开裂现象

引起时效开裂的缘由主要有金属组织和剩余应力两个方面。其中金属组织方面主要是金属中含有氢的作用，脱氢处理对解决某些不锈钢等材料拉深件的时效开裂问题是相当有效的。由板料拉深成筒形件后，筒壁每一个截面上内、外层金属存在不均匀变形；筒壁上下部金属变形量也有差异。由于不均匀变形的存在，使板料金属作为一个整体便产生相互牵制的应力。在变形过程中和变形完成后，就产生了附加应力和剩余应力。

预防时效开裂的措施有：拉深后准时修边；在拉深过程中准时进展中间退火；在屡次拉深时尽量在其口部留一条宽度较小的凸缘边等。

4.3 压边方式设计

压边方式(压边装置和压边力)选择设计得当是防止凸缘变形区失稳、起皱的主要措施。

4.3.1 压边装置与压边圈形式

压边装置是打算压边力大小和冲压过程中压边力变化规律的装置，压边圈形式合理与否直接关系到极限变形程度和进料阻力的大小。

1. 承受压边装置的条件

在生产实际中，可用表 4.7 的条件来推断是否在拉深模的设计中承受压边装置。

表 4.7 承受或不承受压边装置的条件

拉深方法	首次拉深		后续各次拉深	
	$t/D(\%)$	$m_{[1]}$	$t/d_{[n+1]}(\%)$	$m_{[n]}$
用压边圈	<1.5	<0.6	<1.0	<0.8
可用可不用压边圈	$1.5\sim2.0$	0.6	$1.0\sim1.5$	0.8
不用压边圈	>2.0	>0.6	>1.5	>0.8

2. 压边装置

设计压边装置时必需考虑便于调整压边力，生产中常用的压边装置分弹性和刚性两类。

(1) 弹性压边装置(图 4.18)

图 4.18 弹性压边装置

弹性压边装置分弹簧垫、橡皮垫、气垫和液压垫等几类，如图4.18 所示。弹簧垫和橡皮垫的压边力随行程增大而渐渐增大，产生的压边力曲线与拉深曲线不协调(参见图 4.24)，明显对拉深不利，因而只适用于浅拉深。但这种装置构造较简洁，使用较便利，因此在普通单动压力机上比较常用。气垫和液压垫的压边力根本不随行程变化，而且经过调整气压或液压能很便利地对压边力进展比较准确的调整，因此压边效果较好。其中，液压垫压边装置必需在液压机上才能实现。一般压力机加置专用拉深气垫可实现气垫压边，但还要求生产场全部专用气源。

(2) 刚性压边装置

图 4.19 所示为双动压力机上的刚性压边装置。拉深凸模固定在内滑块上，而压边圈固定在外滑块上，每次冲压行程开头时，在凸模尚未接触坯料之前，外滑块带动压边圈下降，直至压住坯料并停顿于此位置上；接着内滑块再带动凸模下降，进展拉深。拉深完毕后凸模紧跟内滑块回程；待凸模上升到某一高度后，外滑块也带动压边圈回程到上死点位置(参见图 1.28(a))。明显，刚性压边圈的压边作用，并不是靠调整压边力来保证的，而是通过调整压边圈与凹模平面之间的间隙(外滑块的下死点)来获得的(压边力是由于坯料凸缘变形区在拉深过程中板厚会增大而产生的)，所以在拉深过程中具有压边平稳、压边力不随行程变化等特点，拉深效果好且模具构造简洁。

图 4.19 双动压力机上的刚性压边

1—内滑块；2—外滑块；3—压边圈；4—凹模；5—凸模

:

3. 压边圈的形式

图 4.20 所示是首次拉深模所用的 4 种压边圈形式。

图 4.20 首次拉深模所用的 4 种压边圈形式

图 4.20(a)所示为一般平面压边圈，是首次拉深最常用的压边圈形式。

图 4.20(b)所示为平锥压边圈，其中压边圈的锥角 α 的大小应与拉深件壁部增厚规律相适应，试验争论说明锥角 α 可按下列式计算：

$$\alpha = \arctan \frac{Z t}{(D - d)/2}$$

式中： t ——板料厚度(mm)；

Z ——拉深件壁部增厚系数，取 0.2~0.3； D ——

坯料直径(mm)；

d ——拉深件直径(mm)。

平锥压边圈不仅能使压边力调整工作得到肯定程度的简化，而且能提高拉深的极限变形程度。

图 4.20(c)所示为圆弧压边圈，它适用于有凸缘且凸缘直径较小、圆角半径较大的筒形件，可防止制件在拉深完毕时起皱。

图 4.20(d)所示为首次拉深有限位装置的压边圈，该形式使弹性压边力不随行程增大而增大，使压边力均衡和防止压边圈将坯料压得过紧。限位距离 $S=t+(0.05\sim0.1)\text{mm}$ 。

图 4.21 为后续各次拉深有限位装置的压边圈。由于后续各次拉深时工序件均为筒形，其稳定性较好，在拉深过程中不易起皱，因此所需要的压边力较小，而后续各次拉深的高度一般都较大，明显弹性压边装置可能造成拉深末尾因压边力过大而裂开，所以大多数后续各次拉深模，在承受弹性压边装置时，都使用此种形式压边圈。通过调整限位杆的凹凸可调整压边间隙进而调整压边力的大小。

图 4.21 后续各次拉深有限位装置的压边圈

图 4.22 为常用带拉深筋的压边圈。所谓拉深筋，就是在压边圈的压料面上设置突出的筋条，在凹模面上开有相应的凹槽。在拉深筋的作用下，板料在拉深过程中，可增大径向拉应力，减小切向压应力以防止起皱发生。拉深非旋转体曲面制件时，通过拉深筋的设置来调整直边局部和圆角局部拉深时材料流淌的进料阻力，并使制件获得肯定的胀形变形。

为防止拉深薄板在成形时起皱，拉深筋设计成如图4.22(a)所示形式；拉深球形件、锥形件和抛物面制件的拉深筋设计成如图4.22(b)所示形式；拉深非旋转体大型件时，拉深筋设计成如图 4.22(c)所示形式。图中 $R=(4\sim6)t$ ； $B=(8\sim10)\text{mm}$ ； $A=(2\sim3)B$ ； $R_1=(6\sim10)\text{mm}$ ； $R_2=(3\sim5)\text{mm}$ 。

图 4.22 常用带拉深筋的压边圈形式

1—凸模；2—压边圈(镶件)；3—凹模

拉深筋的数量与位置需视制件外形、拉深深度等因素而定，一般布置在简洁起皱的部位(如图 4.23 所示)。

图 4. 23 拉深筋的合理设置

4.3.2 压边力的计算

如，压边力的大小要依据既不起皱也不被拉裂这个原则，在试模中加以调整，设计压边装置时应考虑便于调整压边力。

在生产中，压边力为压边面积乘以单位压边力，即

$$P_Q=Fq \tag{4-6}$$

式中： P_Q ——压边力(N)；
 F ——在压边圈下坯料的投影面积(mm2)；
 q ——单位压边力(MPa)，可按表 4.8 选取。

表 4. 8 局部材质的单位压边力 q 取值

材 料 名 称		单位压边力 q /MPa
铝		0.8~1.2
纯铜、硬铝(退火)		1.2~1.8
黄铜		1.5~2.0
软钢	板料厚度 $t<0.5\text{mm}$	2.5~3.0
	板料厚度 $t>0.5\text{mm}$	2.0~2.5
镀锌钢板		2.5~3.0
耐热钢(软化状态)		2.8~3.5
高合金钢、高锰钢、不锈钢		3.0~4.5

4.4 拉深力与拉深功

为了合理选择冲压设备和设计模具，应当求出拉深力和拉深功。

拉深变形的力学分析见 4.1.3，典型的拉深力—凸模行程曲线见图4.10，可见它与冲裁力—凸模行程曲线(图 2.13)有明显区分，主要表达在拉深行程比冲裁行程长得多。拉深系数(变形程度)、压边力、润滑条件、材料特性等都会影响拉深力—凸模行程曲线的走向。

一般概念上的拉深力是指其峰值，理论计算简单繁琐，有用性不良。生产实际中常用阅历公式进展近似计算。

筒形件有压边圈拉深时的拉深力

$$P=K\pi d t \sigma_b \tag{4-7}$$

式中： P ——拉深力(N)；
 d ——筒形件直径(mm)；
 t ——板料厚度(mm)；
 σ_b ——材料强度极限(MPa)；

K ——修正系数，见表 4.9。首次拉深用 $K_{[1]}$ ，后续各次拉深用 $K_{[2]}$ 。

表 4.9 修正系数 K 的值

$m_{[1]}$	0.55	0.57	0.60	0.62	0.65	0.67	0.70	0.72	0.75	0.77	0.80
$K_{[1]}$	1.00	0.93	0.86	0.79	0.72	0.66	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
$m_{[2]}$	0.70	0.72	0.75	0.77	0.80	0.85	0.90	0.95			
$K_{[2]}$	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.70	0.60	0.50			

对于横截面为矩形、椭圆形等外形的拉深件，拉深力也可应用上式原理求得

$$P = (0.5 \sim 0.8) L t \sigma_b$$

式中： L ——横截面周边长度。

一般单动压力机拉深时，压边力(弹性压边装置)与拉深力是同时产生的，所以，压力机吨位的大小应依据拉深力和压边力的总和来选择，即

$$P = P_{\varepsilon} + P_Q \tag{4-8}$$

当拉深行程较大，特别是承受落料拉深复合模(参见图 7.39)时，不能简洁地将落料力与拉深力叠加上去选择压力机，而应确保冲压力—行程曲线位于压力机许用负荷曲线以下，否则很可能消灭压力机超载损坏。如图4.24 所示状况，虽然落料力与拉深力之和小于公称压力，但在模具工作的早期(落料时)已超载了。

图 4.24 冲压力曲线、弹性压边装置压边力曲线与压力机许用负荷曲线

1—压力机许用负荷曲线；2—拉深力；3—落料力；4—气垫压边力；5—橡胶垫压边力；6—弹簧垫压边力

为了选用便利，一般可按下式概略估算。

$$\text{浅拉深时} \quad P_{\varepsilon} \leq (0.7 \sim 0.8) P_0$$

$$\text{深拉深时} \quad P_{\varepsilon} \leq (0.5 \sim 0.6) P_0$$

式中： P_{ε} ——拉深力、压边力及其他变形力总和；

P_0 ——压力机的公称压力。

同样，由于拉深行程较冲裁行程要长得多，仅仅按拉深力进展设备的选择并不肯定很保险。由于有时设备的吨位足够，但因拉深行程很长，设备具备的功不肯定能满足拉深功的要求。遇到这种状况，可能消灭拉深时，压力机的行程速度减缓，甚至会损坏设备的电动机，为此还需对拉深功进展核算。

理论上拉深功是拉深力—凸模行程曲线下的面积积分，准确计算同样繁琐。生产实践中，常将最大拉深力折算成平均力来计算，即 $P_m = (0.6 \sim 0.8) P$ ，所以，拉深功

$$A = (0.6 \sim 0.8) P h \times 10^{-3}$$

式中： A ——拉深功(J)；

P ——最大拉深力(N)；

h ——拉深深度(凸模工作行程)(mm)。

压力机电动机功率(kW)可按下式校核计算

$$P_d = n k A / (60 \eta_1 \eta_2) \tag{4-9}$$

式中： k ——不均衡系数，取 1.2~1.4；

n ——压力机每分钟行程次数；

：

η_1 ——压力机效率，取 0.6~0.8；

η_2 ——电动机效率，取 0.9~0.95。

4.2 筒形件拉深模工作局部设计

拉深件的尺寸精度主要取决于拉深模工作局部的制造精度，合理的拉深系数也必需靠模具工作局部的尺寸来保证。拉深模凸—凹模间隙和凸、凹模圆角半径对起皱、拉裂等拉深件质量问题的产生都有直接的影响。因此，正确设计拉深模工作局部，是设计拉深模的重要内容。

4.5.1 凹模圆角半径和凸模圆角半径

1. 凹模圆角半径 $r_{\text{凹}}$

一般来说，大的 $r_{\text{凹}}$ 可以降低极限拉深系数，而且还可以提高拉深件的质量，所以 $r_{\text{凹}}$ 尽可能大些。但 $r_{\text{凹}}$ 太大会减弱压边圈的作用，可能引起起皱现象。

筒形件首次拉深时的 $r_{\text{凹}}$ 可由下式确定：

$$r_{\text{凹}} = C_1 C_2 t \tag{4-10}$$

或

$$r_{\text{凹}} = 0.8 \sqrt{(D - D_{\text{凹}})t} \tag{4-11}$$

式中： C_1 ——与材料力学性能有关的系数，对于软钢、硬铝， $C_1=1$ ；对于纯铜、黄铜、铝， $C_1=0.8$ ；

C_2 ——与板料厚度及拉深系数有关的系数，见表4.10；

t ——板料厚度(mm)；

D ——坯料直径(mm)；

$D_{\text{凹}}$ ——凹模直径(mm)。

表 4. 10 拉深凹模圆角半径系数

板料厚度 t /mm	拉深件直径/mm	拉深系数 m [1]		
		0.48~0.55	$\geq 0.55 \sim 0.60$	≥ 0.60
~0.5	~50	7~9.5	6~7.5	5~6
	>50~200	8.5~10	7~8.5	6~7.5
	>200	9~10	8~10	7~9
>0.5~1.5	~50	6~8	5~6.5	4~5.5
	>50~200	7~9	6~7.5	5~6.5
	>200	8~10	7~9	6~8
>1.5~3.0	~50	5~6.5	4.5~5.5	4~5
	>50~200	6~7.5	5~6.5	4.5~5.5
	>200	7~8.5	6~7.5	5~6.5

后续各次拉深凹模圆角半径可逐步缩小，但不能小于 $2t$ 。一般可取

$$r_{\text{凹}}^{[n]} = (0.6 : 0.8)r_{\text{凹}}^{[n-1]}$$

(4-12)

1. 凸模圆角半径 $r_{\text{凸}}$

$r_{\text{凸}}$ 对拉深变形的影响，不像 $r_{\text{凹}}$ 那样显著，但 $r_{\text{凸}}$ 过大或过小同样对防止起皱和拉裂及降低极限拉深系数不利。除最终一次应当取与制件底部圆角半径相等的数值外，中间各次可取相应于 $r_{\text{凹}}$ 略小些的数值，即

$$r_{\text{凸}}^{[n]} = (0.7 : 1.0)r_{\text{凹}}^{[n]}$$

(4-13)

在实际设计工作中，拉深凸模圆角半径和凹模圆角半径应选取比计算值略小一点的数值，这样便于在试模调整时渐渐加大，直到拉出合格制件为止。

4.5.2 拉深间隙

拉深间隙是指单边间隙，即 $Z=(d_{\text{凹}} - d_{\text{凸}})/2$ (参见图 4.2)。间隙过小会增加摩擦阻力，使拉深件筒壁拉裂，且易擦伤制件外表，降低模具寿命；间隙过大则对坯料的校直作用小，影响制件尺寸精度。因此确定间隙的原则是，既要考虑板料厚度的公差，又要考虑筒形件 口部的增厚现象，依据拉深时是否承受压边圈和制件尺寸精度、外表粗糙度要求合理确定。

(1) 不用压边圈时

考虑起皱的可能性，不用压边圈的拉深间隙

$$Z = (1.0 \sim 1.1)t_{\text{max}}$$

式中： Z ——单边间隙，末次拉深或周密拉深件取小值，中间拉深时取大值；
 t_{max} ——板料厚度的上限值。

(2) 用压边圈时

用压边圈的拉深间隙 Z 按表 4.11 选取。

表 4.11 有压边圈拉深时的单边间隙

总拉深次数	拉深工序	单边间隙 Z	总拉深次数	拉深工序	单边间隙 Z
1	第 1 次拉深	$(1.0 \sim 1.1)t$	4	第 1、2 次拉深	$1.2t$
2	第 1 次拉深	$1.1t$		第 3 次拉深	$1.1t$
	第 2 次拉深	$(1.0 \sim 1.05)t$		第 4 次拉深	$(1.0 \sim 1.05)t$
3	第 1 次拉深	$1.2t$	5	第 1、2、3 次拉深	$1.2t$
	第 2 次拉深	$1.1t$		第 4 次拉深	$1.1t$
	第 3 次拉深	$(1.0 \sim 1.05)t$		第 5 次拉深	$(1.0 \sim 1.05)t$

注：1. 板料厚度取允许偏差的中间值。
2. 当拉深周密制件时，末次拉深间隙 $Z = (0.9 \sim 1.0)t$ 。

4.5.3 凸模和凹模工作局部的尺寸及制造公差

对于末次拉深模，其凸模和凹模尺寸及公差应按制件的要求确定。

(1) 当制件要求外形尺寸时(如图 4.25(a)所示)，以凹模尺寸为基准进展计算。即

:

凹模尺寸 $D_{\text{凹}} = (D - 0.75\Delta)_{+ \delta_{\text{凹}}}^0$

凸模尺寸 $D_{\text{凸}} = (D - 0.75\Delta - 2Z)_{- \delta_{\text{凸}}}^0$

(2) 当制件要求内形尺寸时(如图 4.25(b)所示), 以凸模尺寸为基准进展计算。即

凸模尺寸 $d_{\text{凸}} = (d + 0.4\Delta)_{- \delta_{\text{凸}}}^0$

凹模尺寸 $d_{\text{凹}} = (d + 0.4\Delta + 2Z)_{+ \delta_{\text{凹}}}^0$

(3) 对于中间各道工序拉深模, 由于其坯料尺寸与公差没有必要予以限制, 这时凸模和凹模尺寸只要取等于坯料过渡尺寸即可。假设以凹模为基准时, 则

凹模尺寸 $D_{\text{凹}} = D_{+ \delta_{\text{凹}}}^0$

凸模尺寸 $D_{\text{凸}} = (D - 2Z)_{- \delta_{\text{凸}}}^0$

凸、凹模的制造公差 $\delta_{\text{凹}}$ 和 $\delta_{\text{凸}}$ 可按表 4.12 选取。

图 4. 25 拉深制件的标注与模具尺寸

:

表 4.12 拉深凸模制造公差 $\delta_{凸}$ 和凹模制造公差 $\delta_{凹}$ mm

板料厚度 t	拉深件直径					
	≤ 20		$> 20 \sim 100$		> 100	
	$\delta_{凹}$	$\delta_{凸}$	$\delta_{凹}$	$\delta_{凸}$	$\delta_{凹}$	$\delta_{凸}$
≤ 0.5	0.02	0.01	0.03	0.02	—	—
$> 0.5 \sim 1.5$	0.04	0.02	0.05	0.03	0.08	0.05
> 1.5	0.06	0.04	0.08	0.05	0.10	0.06

注: $\delta_{凹}$ 、 $\delta_{凸}$ 在必要时可提高至IT6~IT8 级。假设制件公差在IT13 级以下, 则 $\delta_{凹}$ 、 $\delta_{凸}$ 可以承受IT10 级。

$\delta_{凹}$ $\delta_{凸}$

4.5.2 凸模和凹模的构造

拉深凸模和拉深凹模构造形式的设计要有利于拉深变形, 这不但可以提高制件质量, 而且可以降低极限拉深系数。

下面介绍几种常用的构造形式。

1. 不用压边圈的拉深凸模和凹模

对于可一次拉成的浅拉深件, 其凸模和凹模构造如图4.26 所示, 图4.26(a)所示为一般带圆弧的平端面凹模, 适用于大件; 图 4.26(b)与图 4.26(c)所示适宜于小件, 图 4.26(b)(带锥形凹模口)和图 4.26(c)(带渐开线凹模口)所示的凹模构造在拉深时坯料的过渡外形呈曲面外形, 因而增大了抗失稳力量, 凹模口部对坯料变形区的作用力也有助于它产生切向压缩变形, 削减摩擦阻力和弯曲变形阻力, 所以对拉深变形有利(如图 4.27 所示), 可以提高制件质量, 降低极限拉深系数。

图 4.26 不用压边圈的拉深凹模构造

对于 2 次以上的拉深件, 其凸模和凹模构造如图4.28 所示。

2. 用压边圈的拉深凸模和凹模

图 4.29(a)所示为有压边圈的凸模和凹模, 多用于拉深尺寸较小的制件 ($d \leq 100\text{mm}$); 图 4.29(b)所示为有斜角和带渐开线的凹模, 承受这种构造不仅使坯料在下道工序中简洁定位, 而且能削减坯料反复弯曲变形, 改善了拉深时的变形条件, 削减了材料的变薄, 有利于提高拉深件侧壁的外表质量。多用于尺寸较大的制件($d > 100\text{mm}$)。

不管实行哪种凸、凹模构造形式, 都应留意前后道工序的凸模和凹模圆角半径、压边圈的圆角半径之间的关系(如图 4.28、图 4.29 所示)。要使前后两道工序的冲模形式和尺寸具有正确的关系, 要尽量做到前道工序制成的中间坯料外形、尺寸有利于在后道工序中成形。

图 4.27 锥形凹模拉深特点

图 4.28 不用压边圈的屡次拉深凹模构造

图 4.29 有压边圈的屡次拉深凹模构造

3. 带限制圈的拉深凹模

有些不经中间热处理的屡次拉深工序件/半成品, 拉深之后稍隔一段时间, 制件的口部

:

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/025104020144011214>