

管轴压成形失稳起皱力学过程的研究*

孙志超 杨 合

(西北工业大学材料科学与工程学院 西安 710072)

摘要: 管轴压成形的先进性、优势及成形过程的成功实施受到变形区开裂和传力区起皱等失稳因素的制约, 为此采用理论解析与试验相结合的方法, 对失稳起皱的力学过程、影响因素及影响规律进行了研究, 并给出了失稳判据, 以实现稳定成形时变形参数的取值范围的确定。研究表明: 成形过程的失稳起皱受到几何参数、材料参数及摩擦边界条件的共同作用。其中, 模具圆角曲率半径是决定性因素, 并且存在一个最大和最小圆角半径区域使成形过程顺利进行而不发生失稳起皱; 增大管坯材料硬化指数, 减小相对厚度及接触面的摩擦, 有利于减少失稳的发生。对牌号为 5052, 原始管平均直径 $d_0=31.0$ mm, 41.0 mm 铝管的应用表明所提出的判据是可靠实用的。

关键词: 管轴压成形 失稳力学模型 起皱

中图分类号: TG386

0 前言

薄壁管在合适的圆角模上轴压可以直接获得足够精确的双层管或多层零件, 从而借助简单模具能够制造其他方法难以得到的复杂形状零件。然而, 管轴压成形过程是一个非单调连续变形过程, 成形过程的成功实施受到与成形条件参数密切相关的变形区开裂和传力区起皱等失稳形式的制约, 并且这也是管轴压成形工艺应用和发展迫切需要解决的关键技术问题。因而, 探明成形过程失稳的力学过程及条件参数对失稳的影响规律并给出成形参数范围对充分发挥和利用管轴压成形技术的先进性和优势具有重要意义。因而, 采用理论解析与试验相结合的方法, 从影响失稳的因素入手, 对管轴压成形中的起皱失稳过程进行了分析, 建立了其数学模型, 给出了失稳判据, 研究了失稳起皱的力学过程、影响因素和影响规律。

1 管轴压成形过程描述及失稳模式

图 1 是一种典型的管圆角模轴压成形过程示意图, 管坯在轴向压力作用下, 在合适的成形条件下, 进一步发展可能生成诸如双层类零件, 如图 1 右边所示。图中, F 为成形力, ρ 为模具的圆角曲率半径, d_0 为原始管的平均直径, δ_0 为管子的壁厚。在这一成形过程中变形的毛坯可分为 3 部分: 传力区(未变形区)、变形区和已变形区。在整个成形过程中由于

传力区受压而变形区发生扩口变形受拉, 从而可能会出现欧拉失稳、轴对称起皱、金刚石失稳、错移失稳和管端开裂等各种形式。排除管坯材料缺陷以及上下端面倾斜等因素, 成形过程中的失稳形式主要表现为轴对称起皱和管端开裂(如图 2 所示)。

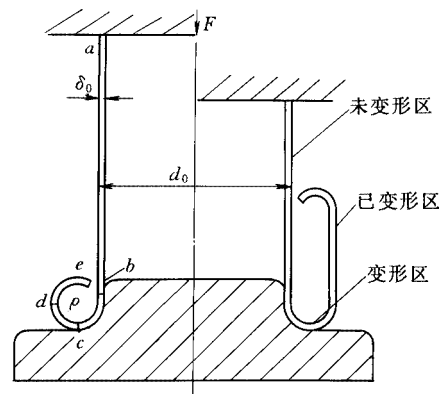
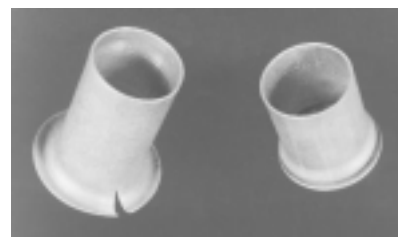


图 1 管轴压成形过程示意图



(a) 开裂 (b) 起皱

图 2 失稳模式

2 失稳起皱的影响因素

传力区的失稳起皱是由于成形过程中管坯所受的压力超过材料本身的抗压强度导致的。因此, 在管轴压成形过程中影响成形力的参数都会对成形过

* 国家自然科学基金(59775055)和西北工业大学博士论文创新基金(G14109)资助项目。20020206 收到初稿, 20021210 收到修改稿

程是否发生起皱失稳起作用。因此，影响起皱的因素包括：管坯材料参数、变形几何参数和接触面的摩擦条件。其中模具圆角半径是决定着成形过程是否顺利进行的关键因素，因而确定合理的模具圆角半径对分析和预测管轴压成形起皱失稳具有重要意义。

3 失稳起皱的力学过程及判据

3.1 基本假设

为分析方便起见作出如下假设。

(1) 管坯材料是均匀的，忽略 Bauehinger 效应，应力应变关系可描述为 $\sigma = k\varepsilon^n$ ；管壁厚度和厚向应变可忽略，摩擦均布于模具圆角区。

(2) 外力所作的功完全用于管坯塑性变形及摩擦损耗。

(3) 不考虑弹性变形，材料一进入圆角区就完全贴模，而离开圆角区后自由扩口和自由缩口过程中，始终保持与模具圆角相同的曲率半径 ρ 不变，成形过程中材料满足体积不变条件。

3.2 失稳起皱的力学过程及判据

当成形过程中管坯传力区所受的载荷超过了材料的临界失稳力时则出现起皱失稳。不发生失稳起皱的条件是

$$F = F_{cr} \quad (1)$$

式中 F_{cr} ——临界压缩失稳力，可表示如下

$$F_{cr} = S\sigma_{cr} \quad (2)$$

式中 S ——承载面积

$$S = \pi d_0 \delta_0$$

σ_{cr} ——临界正应力

根据圆形壳体轴向压缩屈曲理论^[1]有

$$\sigma_{cr} = 2E_p \delta_0 / [d_0 \sqrt{3(1-\nu)}]$$

式中 E_p, ν ——材料塑性模量和泊松比

$$E_p = d\sigma / d\varepsilon = kn\varepsilon^{n-1}$$

式中 k, n ——系数和材料硬化指数

关于成形力的求解，参考文献[2]采用主应力法给出了成形力 F 的表达式，针对理想塑性材料而没有考虑材料的应变强化；参考文献[3]采用能量法研究了成形力，但没有考虑摩擦的影响。这里则考虑了材料硬化及摩擦的影响，采用能量法求解，成形过程中总的变形功为

$$W = W_b + W_{ext} + W_f \quad (3)$$

式中 W_b, W_{ext}, W_f ——弯曲变形功、扩口变形功和摩擦损耗功

将管坯变形分为弯曲、扩口和反弯几个独立的过程，各阶段的应变和等效应变分别为

$$\varepsilon_b = \ln[1 + \delta_0 / (2\rho)] \quad \varepsilon_{b,e} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_b \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ext} = \ln \frac{4\rho + d_0 - \delta_0}{d_0} \quad \varepsilon_{ext,e} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{ext} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{rb} = \ln \left(1 + \frac{\delta_0 / 2}{d_0 + \rho} \right) \quad \varepsilon_{rb,e} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{rb} \quad (6)$$

式中 $\varepsilon_b, \varepsilon_{b,e}$ ——弯曲应变和弯曲等效应变

$\varepsilon_{ext}, \varepsilon_{ext,e}$ ——扩口应变和扩口等效应变

$\varepsilon_{rb}, \varepsilon_{rb,e}$ ——反弯应变和反弯等效应变

则式(3)可表示为

$$W = \pi \delta_0 d_0 k u \left(\int \varepsilon_{b,e}^n d\varepsilon_{b,e} + \int \varepsilon_{rb,e}^n d\varepsilon_{rb,e} + \int \varepsilon_{ext,e}^n d\varepsilon_{ext,e} \right) + \frac{u s_c k \mu}{\sqrt{3}} \int \varepsilon_{f,e}^n d\varepsilon_{f,e} \quad (7)$$

式中 u ——位移

$\varepsilon_{f,e}$ ——强制扩口等效应变

s_c, μ ——接触面面积和动摩擦因数

$$\varepsilon_{f,e} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln(1 + 2\rho / d_0)$$

$$s_c = \pi \rho (d_0 + \rho) / 2$$

根据能量原理，外力所作的功等于塑性变形功与摩擦损耗功之和，即 $W = Fu$ ，则成形力为

$$F = \frac{\pi \delta_0 d_0 k}{n+1} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \left\{ \left[\ln \left(1 + \frac{\delta_0}{2\rho} \right) \right]^{n+1} + \left[\ln \left(1 + \frac{4\rho - \delta_0}{d_0} \right) \right]^{n+1} + \left[\ln \left(1 + \frac{\delta_0 / 2}{d_0 + \rho} \right) \right]^{n+1} \right\} + \quad (8)$$

$$\frac{\pi \rho (d_0 + \rho) k \mu}{n+1} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \left[\ln \left(1 + \frac{2\rho}{d_0} \right) \right]^{n+1}$$

当 $\delta_0 / (2\rho), \rho / d_0$ 较小时，上式可简化为

$$F = \frac{\pi \delta_0 d_0 k}{n+1} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \left\{ \left(\frac{\delta_0}{2\rho} \right)^{n+1} + \left(\frac{4\rho - \delta_0}{d_0} \right)^{n+1} + \left(\frac{\delta_0 / 2}{d_0 + \rho} \right)^{n+1} \right\} + \frac{\pi \rho (d_0 + \rho) k \mu}{n+1} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \left(\frac{2\rho}{d_0} \right)^{n+1} \quad (9)$$

将式(2)和(8)代入式(1)则可得到起皱失稳的判据

$$F = 2\pi kn\varepsilon^{n-1} \delta_0^2 / \sqrt{3(1-\nu)} \quad (10)$$

由上式便可实现成形过程中的失稳起皱的分析和预测。

4 结果与讨论

基于上述的解析分析，研究了成形条件参数对失稳起皱的作用机理，在分析中以管坯临界失稳力

与成形力比值 F_{cr}/F 为指标, 讨论了各参数对 F_{cr}/F 的影响, 进而分析了不发生起皱的模具圆角曲率半径与其他成形参数的关系, 所得的结果如图 3~6 所示。

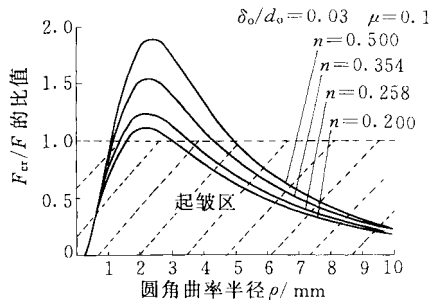


图 3 δ_0/d_0 给定时 ρ 对 F_{cr}/F 的影响

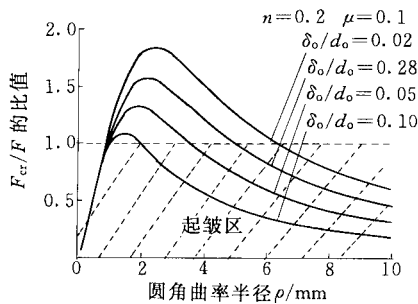


图 4 n 给定时 ρ 对 F_{cr}/F 的影响

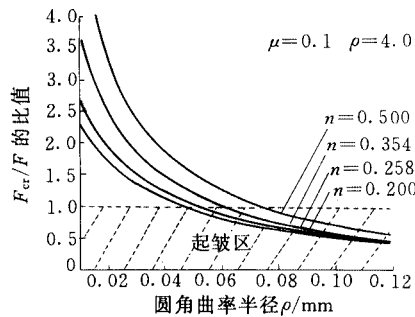


图 5 ρ 给定时 δ_0/d_0 对 F_{cr}/F 的影响

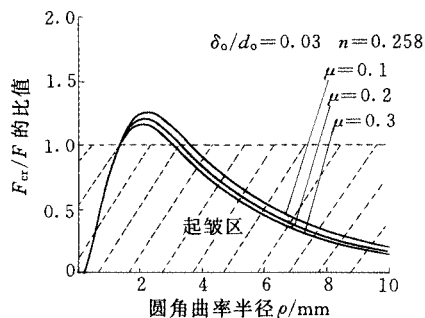


图 6 n 给定时 μ 对 F_{cr}/F 的影响

可以发现: F_{cr}/F 随着模具圆角曲率半径 ρ 的增大先增大而后减小, 存在一个 ρ 值使 F_{cr}/F 的值达到最大, 即起皱的趋势随着 ρ 的增大先减小而后又增大(图 3、4)。

管坯相对厚度 δ_0/d_0 越大, F_{cr}/F 的值及稳定成形的区域越小, 这是由于随着 δ_0/d_0 的增大, 临界失稳力 F_{cr} 及成形力 F 都增大, 而 F 增大的幅度大于

F_{cr} 的幅度, 因而 δ_0/d_0 越大越易起皱(图 4、5)。

随着材料硬化指数 n 的增大及接触面的摩擦的减小, F_{cr}/F 的值及稳定区域不断增大, 说明 n 越大, 接触面的摩擦越小, 发生起皱的趋势越小(图 3~6)。

同时, 从图 3、4 可以看出: 对于给定的管坯, 存在一个最大和最小模具圆角曲率半径 $(\rho)_{b,max}$ 和 $(\rho)_{b,min}$ 的区域, 使得成形过程不发生起皱, 并且该 ρ 值的区域随着管坯 n 的增大和 δ_0/d_0 的减小而增大; 令 $F_{cr}/F=1.0$ 便可获得 $(\rho)_{b,max}$ 和 $(\rho)_{b,min}$ 的值, 即可以确定该条件下管坯不发生起皱 ρ 的取值范围, 这在管轴压成形实践中具有重要意义。

5 试验研究

为了检验上述分析结果的可靠性, 采用试验对管轴压成形过程中的失稳起皱进行了研究。材料为 5052 的铝管 ($\sigma = 294\epsilon^{0.258}$), 模具圆角曲率半径 $\rho=2.75 \sim 6.0$ mm; 壁厚 $\delta_0=1.00$ mm, 平均外径 $d_0=31.0$ mm, 41.0 mm 润滑剂为猪油和石墨与矿物油的混和物 ($\mu=0.2, 0.1$)。试验所得的结果及其与计算结果的比较如表和图 7、8 所示。

表 管轴压成形起皱失稳的试验研究

编号	动摩擦因数 μ	原始管平均直径 d_0 /mm	曲率半径 ρ /mm	成形力 F /kN	临界失稳力与成形力之比 F_{cr}/F	成形状态
1	0.1	41.0	2.75	13.4	1.17	√
2	0.1	41.0	3.0	13.2	1.19	√
3	0.1	41.0	3.5	12.9	1.22	√
4	0.1	41.0	4.5	13.3	1.18	√
5	0.1	41.0	5.0	14.5	1.08	√
6	0.1	41.0	5.5	15.5	1.01	△
7	0.1	41.0	6.0	15.7	1.00	△
8	0.2	41.0	2.75	13.6	1.15	√
9	0.2	41.0	3.0	13.4	1.17	√
10	0.2	41.0	3.5	13.3	1.18	√
11	0.2	41.0	4.5	13.5	1.16	√
12	0.2	41.0	5.0	14.6	1.08	√
13	0.2	41.0	5.5	15.6	1.01	△
14	0.2	41.0	6.0	15.7	1.00	△
15	0.1	31.0	2.75	12.5	1.10	√
16	0.1	31.0	3.0	13.0	1.05	√
17	0.1	31.0	3.5	13.6	1.00	△
18	0.1	31.0	4.5	13.5	1.01	△□
19	0.2	31.0	2.75	12.5	1.10	√
20	0.2	31.0	3.0	13.1	1.05	√
21	0.2	31.0	3.5	13.7	1.00	△
22	0.2	31.0	4.5	13.6	1.01	△□

注: √—变形顺利完成 △—起皱 □—开裂

从表可以看出, 对于 $d_0=41.0$ mm 的管坯, 当 $\rho/5.5$ mm 时发生失稳起皱, 则本试验条件下该管坯

不发生起皱的最大圆角半径 $\rho_{b, \max} = 5.5 \text{ mm}$ ，并且管坯的平均临界失稳力 $F_{cr} = 15.6 \text{ kN}$ ；同样对于 $d_0 = 31.0 \text{ mm}$ 的管坯，有 $\rho_{b, \max} = 3.5 \text{ mm}$ ， $F_{cr} = 13.6 \text{ kN}$ 。同时可知：该管坯不发生开裂的最大圆角半径约为 4.5 mm 。图 7、8 可以看出这一试验结果与由失稳判据所得的计算结果吻合得较好，说明分析结果是可靠的。因此可得：对于 5052， $\delta_0 = 1.00 \text{ mm}$ ， $d_0 = 41.0 \text{ mm}$ 的管坯，稳定成形的模具圆角半径区域为： $1.3 \text{ mm} \leq \rho \leq 5.5 \text{ mm}$ ；对于 $d_0 = 31.0 \text{ mm}$ 的管坯，有 $1.1 \text{ mm} \leq \rho \leq 4.5 \text{ mm}$ 。由于在上述模具圆角范围内成形管坯并未发生开裂现象，因而所得的 ρ 的取值范围也就是保证成形过程顺利进行不发生起皱或开裂失稳的模具圆角半径区域。

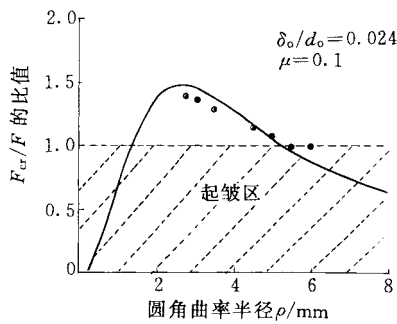


图 7 $\delta_0/d_0=0.024$ 时计算值与试验值的对比

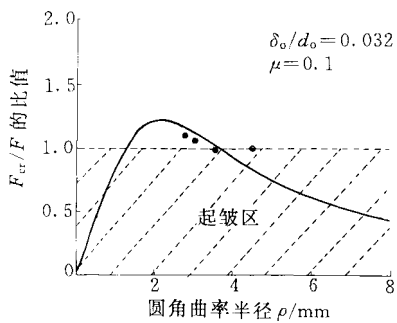


图 8 $\delta_0/d_0=0.032$ 时计算值与试验值的对比

6 结论

采用解析与试验相结合的方法对管轴压成形过程中失稳的力学过程进行了研究，给出了失稳的判据，以实现稳定成形时变形参数取值范围的确定。结果表明：成形中失稳起皱的影响因素有几何参数、材料参数及摩擦边界条件，其中，模具圆角半径是影响失稳起皱的决定性因素，并且存在一个最大和最小圆角曲率半径之间的区域使成形稳定进行不发生失稳起皱；同时提高管坯材料的硬化指数 n 和减小相对厚度 δ_0/d_0 及接触面的摩擦有利于减少起皱发生的可能性。对牌号为 5052， $d_0 = 31.0 \text{ mm}$ ， 41.0

mm 铝管的应用表明所提出的判据是可靠实用的。

参 考 文 献

- 1 梁炳文，胡世光. 弹塑性稳定理论. 北京：国防工业出版社，1983
- 2 俞彦勤，黄早文. 外翻管变形的分析. 锻压技术，1998(6)：25~28
- 3 YAI-Hassani STS. Tube inversion: a process for obtaining gross expansion in the diameter of thin-wall tubes. In: Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., 15th, 1974: 571~576

RESEARCH ON MECHANICAL MODEL OF BUCKLING IN TUBE AXIAL COMPRESSIVE FORMING PROCESS

Sun Zhichao Yang He

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract: The advantage of tube axial compressive forming and whether to realize forming process depend on whether to produce the tearing or buckling failures during the forming process. Based on minimum energy principle for plastic forming, the buckling mechanism and effects of forming parameters on it are investigated by theoretical analysis and experiment, and the criterion for buckling failure is developed which can be used to determine proper parameters for stable forming. The results show that the effect parameters of buckling failure includes geometrical parameters, material properties, and friction condition. The main governing parameter that controls the success of forming process without buckling is the correct choice of die radius, and existing a maximum radius and a minimum radius, in this range no buckling failure happens. With the high value of material strain hardening exponent n and the low value of the thickness to diameter ratio, it is possible to prevent buckling failure, at the same time decreasing the friction condition is helpful to prevent buckling. The criterion for buckling failure purposed in this paper is used in tube axial compressive forming process for aluminum tube blanks with brand No 5052, $d_0 = 31.0 \text{ mm}$, 41.0 mm and the results show that criterion is reliable and practical.

Key words: Tube axial compressive forming

Mechanical model of failure Buckling

作者简介：孙志超，男，1974 年出生，博士研究生。主要从事先进塑性加工技术及计算机仿真研究，发表论文 20 余篇。