

[文章编号] 1004-0609(2002)06-1149-05

管筒形件的机械扩径成形条件^①

郭宝锋, 聂绍珉, 金 淼, 李 群, 任运来

(燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004)

[摘 要] 机械扩径是制造各种管筒形零件的有效方法之一。研究机械扩径技术, 首先需要建立管坯在扩径过程中可以扩圆的整体屈服条件和可能扩裂的局部破坏条件。根据管坯的基本变形规律和主要特征, 提出了在机械扩径过程中, 管坯变形可以分为整圆和扩径两个阶段的概念。通过对这两个变形阶段的应力分析, 建立了管筒形零件机械扩径时的整体屈服和局部破坏条件, 即机械扩径成形条件。

[关键词] 机械扩径; 应力分析; 成形条件; 管筒形件

[中图分类号] TG 3

[文献标识码] A

管筒形零件的扩径工艺通常分为机械扩径(又称机械胀形)和液压扩径(又称液压胀形)两种。机械扩径是采用斜块扩孔原理、通过分瓣凸模使管坯产生塑性变形的一种材料加工技术, 是制造各种管筒形零件的有效方法之一^[1~4]。机械扩径的作用因管坯的制造工艺及其制品的用途不同而异。一般说来, 机械扩径的目的主要在于改善制品的形状和尺寸精度、消除残余应力和提高材料的屈服强度^[5~10]。由于被扩制的管坯都有不同程度的椭圆度, 所以根据管坯的椭圆度误差合理确定扩径变形程度, 以求既能扩圆又不扩裂的最佳扩径效果, 是一个在机械扩径技术中具有共性且尚未解决的理论问题^[11, 12]。本文作者将基于椭圆管坯的变形特征和应力分析, 给出具有普遍意义的管筒形零件机械扩径时的整体屈服条件和局部破坏条件, 即机械扩径成形条件。

1 应力分析

就变形特征而言, 具有椭圆度的管筒形零件的机械扩径变形过程可以分为整圆和扩径两个变形阶段。在整圆阶段, 管坯的变形主要表现为横截面几何形状的变化; 在扩径阶段, 管坯的变形则主要表现为横截面几何尺寸的改变。因此, 在不同的变形阶段, 管坯横截面的应力状态也不尽相同。

1.1 整圆阶段的应力分析

为便于数学处理并考虑到实际情况, 假设管坯

横截面为壁厚均匀的标准椭圆, 其平均周长等于以公称规格表示的圆管坯平均周长; 同时假定在整圆阶段, 管坯只产生弯曲变形, 中性层的位置和周长保持不变, 沿壁厚方向材料互不挤压。

在管坯上任取一段微小的弧, 设它的中性层曲率半径为 ρ_0 , 管壁产生弯曲变形后, 中性层曲率半径为 ρ 。在距中性层 δ 处, 如果材料尚处于弹性变形阶段, 则管坯上任意一点的切向应力可以表示为

$$\sigma_\theta = E \cdot \left[\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right] \cdot \delta \quad (1)$$

式中 E —弹性模量(MPa)。

沿壁厚方向, 最大切向应力 $\sigma_{\theta\max}$ 发生在管壁的内外表面, 即 $\delta = t_0/2$ 处, 且与变形前后的曲率半径和壁厚有关。不难证明, 当变形前后中性层的形状和管坯的壁厚确定时, 横截面上的最大切向应力位于椭圆对称轴线上。因此, 如果在整圆阶段有塑性变形发生, 则必定首先发生在对称轴线上。值得指出的是, 由于管坯的初始曲率不同, 即使位于中性层同一侧的点, 其应力状态也不尽相同。图 1 所示为椭圆长轴与极轴重合时管坯横截面上的切向应力分布情况。图中的横坐标为极角。由图可见, 在中性层外侧, 对称于椭圆长轴两侧各 45° 的范围内 $\sigma_\theta < 0$, 对称于椭圆短轴两侧各 45° 的范围内 $\sigma_\theta > 0$ 。然而在中性层内侧相应部位的情形则分别为 $\sigma_\theta > 0$ 和 $\sigma_\theta < 0$ 。

1.2 扩径阶段的应力分析

扩径是整圆的后续变形阶段。当变形从整圆转

① [基金项目] 河北省教育厅自然科学研究计划资助项目(2001114)
[作者简介] 郭宝锋(1958-), 男, 教授, 博士。

[收稿日期] 2002-01-23; [修订日期] 2002-04-22

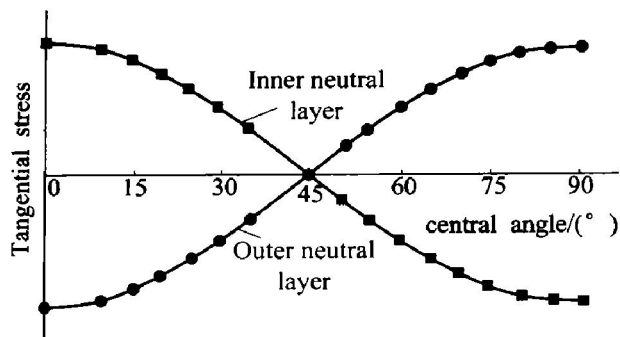


图 1 横截面切向应力分布

Fig. 1 Tangential stress distribution of cross section

入扩径后, 原先处于 $\sigma_0 < 0$ 区域的材料将经历先卸载再加载的复杂加载现象。为避免分析方面的困难, 考虑到在整圆阶段一般不会产生塑性变形^[13], 将基于如下假设分析扩径阶段的应力分布。

1) 扩径阶段的物理模型为自由状态的等壁厚圆管。考虑到整圆阶段的作用, 管坯内部的切向应力取整圆阶段和扩径阶段的切向应力之代数和。

2) 材料模型为理想塑性硬化材料^[14], 即 $\bar{\sigma} = \sigma_s + E' \bar{\epsilon}$ 。式中 $\bar{\sigma}$ —真实应力, MPa; σ_s —初始屈服强度, MPa; E' —塑性模量, MPa; $\bar{\epsilon}$ —真实应变。

3) 变形满足体积不变条件。

4) 材料符合单一曲线假设。

5) 管坯沿轴向的应变为零, 即 $\epsilon_z = 0$ 。

根据假设, 管坯的塑性变形基本方程^[15]为平衡方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \quad (2a)$$

屈服条件

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \bar{\sigma} \quad (2b)$$

几何方程

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (2c)$$

体积不变条件

$$\epsilon_\theta + \epsilon_r = 0 \quad (2d)$$

式中 σ_r —半径等于 r 处的径向应力, MPa; u —半径等于 r 处的径向位移, mm; ϵ_r —半径等于 r 处的径向应变。

由式(2c)和(2d)可以得到

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = 0$$

根据对上式的积分结果可以得到等效应变

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{C}{r^2} \quad (3)$$

式中 C —积分常数。

综合式(2a)、(2b)、(3)和给定的材料模型, 平衡方程可表示为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta}{r} + \frac{2E'}{\sqrt{3}} \frac{C}{r^3}$$

进而有

$$\sigma_r = \sigma_s \ln r - \frac{E'}{\sqrt{3}} \frac{C}{r^2} + D \quad (4)$$

式中 D —积分常数。

依据边界条件 $r = r_a$, $\sigma_r = -p$ 和 $r = r_b$, $\sigma_r = 0$, 有

$$C = \frac{\sqrt{3}}{E'} \frac{r_a^2 r_b^2}{r_b^2 - r_a^2} \left[p + \sigma_s \ln \frac{r_a}{r_b} \right]$$

$$D = -\sigma_s \ln r_b + \frac{E'}{\sqrt{3}} \frac{C}{r_b^2}$$

式中 r_a —管坯的内半径, mm; r_b —管坯的外半径, mm; p —管坯内压, MPa。

对上述结果加以整理, 就可以得到变形体内任意点的径向应力、切向应力与 p 的关系

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_s \ln \frac{r}{r_b} - \frac{r_a^2}{r_b^2 - r_a^2} \frac{r_b^2 - r^2}{r^2} \left[p + \sigma_s \ln \frac{r_a}{r_b} \right] \\ \sigma_\theta = \sigma_s \left[1 + \ln \frac{r}{r_b} \right] + \frac{r_a^2}{r_b^2 - r_a^2} \frac{r_b^2 + r^2}{r^2} \left[p + \sigma_s \ln \frac{r_a}{r_b} \right] \end{cases} \quad (5)$$

同时, 这两个应力分量还可以表示成管坯内壁径向位移 u_a 的函数

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_s \ln \frac{r}{r_b} - \frac{r_a}{r_b^2} \frac{r_b^2 - r^2}{r^2} \frac{E'}{\sqrt{3}} \cdot u_a \\ \sigma_\theta = \sigma_s \left[1 + \ln \frac{r}{r_b} \right] + \frac{r_a}{r_b^2} \frac{r_b^2 + r^2}{r^2} \frac{E'}{\sqrt{3}} \cdot u_a \end{cases} \quad (6)$$

2 机械扩径成形条件

如果机械扩径的目的只是为了改善管坯的形状和尺寸精度, 那么最大限度地抵消或彻底消除整圆阶段的弹性回复便是实现这一目的的根本保障。从以上分析知道, 整圆阶段横断面上呈现出两种不同的变形区, 一是在对称于椭圆长轴两侧各 45° 范围内, 中性层外侧材料沿切向为压缩变形、内侧为伸长变形; 二是在对称于椭圆短轴两侧各 45° 范围内, 中性层外侧材料为伸长变形、内侧为压缩变形。显然, 如果在扩径阶段不能有效地消除压缩变形的影响, 也就无望改善管坯的形状精度和尺寸精度。因此, 若以制品的几何形状精度作为主要技术指标, 则在扩径的整个变形过程中, 就必须保证足够的变形程度, 使管坯横断面上压缩变形区内的材料, 在反向

加载过程中完全进入屈服状态。

基于扩径分析基本假设,将整圆和扩径两个变形阶段的异号切向应力的代数和与材料的屈服强度进行比较,即可建立起异号切向应力之和与材料屈服强度之间的函数关系。该关系可作为判断压缩变形区的材料是否开始屈服的标志,称其为扩圆的整体屈服条件。考虑到管坯横断面上切向应力的分布特点,该条件可以写成

$$E\left(\frac{1}{R_{m0}} - \frac{a}{b^2}\right)\frac{t_0}{2} + \sigma_s + \frac{2E'}{\sqrt{3}}\frac{r_a}{r_b^2}u_a \geq \sigma_s \quad (7a)$$

或

$$E\left(\frac{b}{a^2} - \frac{1}{R_{m0}}\right)\frac{t_0}{2} + \sigma_s\left(1 + \ln\frac{r_a}{r_b}\right) + \frac{E'}{\sqrt{3}}\left(1 + \frac{r_a^2}{r_b^2}\right)\frac{1}{r_a}u_a \geq \sigma_s \quad (7b)$$

式中 a, b —分别为管坯中性层的椭圆长轴和短轴半径; R_{m0} —以公称规格表示的圆环管坯的平均半径。

整体屈服条件最终可以转换为扩径位移 u_a 与管坯材料常数、几何参数之间的函数关系,即

$$u_a \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{E}{E'} \frac{r_b^2}{r_a} \left(\frac{a}{b} - \frac{1}{R_{m0}}\right) \frac{t_0}{2} \quad (8a)$$

$$u_a \geq \frac{r_b^2}{r_b^2 + r_a^2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{E'} \left[E\left(\frac{1}{R_{m0}} - \frac{b}{a^2}\right) \frac{t_0}{2} - \sigma_s \ln \frac{r_a}{r_b} \right] \cdot r_a \quad (8b)$$

以上两式的物理含义是,对于不同材质、不同几何尺寸和形状的管坯,若要整圆阶段出现在管坯长轴两侧、中性层之外和管坯短轴两侧、中性层之内的压缩变形区的材料进入屈服状态,其扩径位移 u_a 必须符合上述相应条件。

值得注意的是,整体屈服条件并非说明无论管坯的椭圆度如何,都能够通过机械扩径的方法,使其成形为具有规范圆型截面形状和几何尺寸的制品。原因在于扩径时还存在一个成形极限问题。因此,尚需要对整圆和扩径两个变形阶段的同号切向应力之和加以限制,使其最大值不超过管坯材料的强度极限。由此建立的函数关系可用于判断拉伸变形区的材料是否破坏,故称之为扩裂的局部破坏条件。该条件可以表示为

$$E\left(\frac{a}{b^2} - \frac{1}{R_{m0}}\right)\frac{t_0}{2} + \sigma_s\left(1 + \ln\frac{r_a}{r_b}\right) + \frac{E'}{\sqrt{3}}\left(1 + \frac{r_a^2}{r_b^2}\right)\frac{1}{r_a}u_a \leq \sigma_b \quad (9a)$$

或

$$E\left(\frac{1}{R_{m0}} - \frac{b}{a^2}\right)\frac{t_0}{2} + \sigma_s + \frac{2E'}{\sqrt{3}}\frac{r_a}{r_b^2}u_a \leq \sigma_b \quad (9b)$$

同样道理,以上两式最终也可以转换为塑性扩径位移 u_a 与管坯材料常数、几何参数之间的函数关系。由(9a)和(9b)导出的局部破坏条件分别为

$$u_a \leq \frac{r_b^2}{r_b^2 + r_a^2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{E'} \cdot \left[\sigma_b - \sigma_s \left(1 + \ln\frac{r_a}{r_b}\right) - E\left(\frac{a}{b^2} - \frac{1}{R_{m0}}\right) \frac{t_0}{2} \right] \cdot r_a \quad (10a)$$

$$u_a \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{E'} \frac{r_b^2}{r_a} \left[(\sigma_b - \sigma_s) - E\left(\frac{1}{R_{m0}} - \frac{b}{a^2}\right) \frac{t_0}{2} \right] \quad (10b)$$

机械扩径时,管坯上的应力状态必须同时满足以上两个条件,因此将它们的组合称为机械扩径的成形条件。

在机械扩径技术中,通常把 u_a 与 R_{m0} 的比值定义为扩径率,且用 α_p 表示。图2所示是根据机械扩径条件绘制的管坯椭圆度与扩径率的关系曲线。该图所采用的数据为: $E = 2.1 \times 10^5$ MPa, $E' = 378$ MPa, $\sigma_s = 475$ MPa, $\sigma_b = 610$ MPa, $R_{m0} = 605$ mm, $t_0 = 10$ mm。图中曲线1对应位于管坯外壁椭圆长轴点的整体屈服条件,曲线2对应位于管坯外壁椭圆短轴点的局部破坏条件。

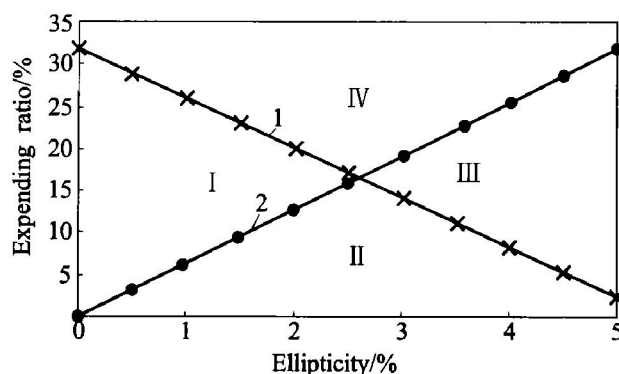


图2 机械扩径条件

Fig. 2 Criteria of mechanical expanding

整体屈服条件和局部破坏条件将图2分为4个区。其中I区为管坯的横断面既能完全进入屈服状态而又不发生破裂的区域;II区是保证管坯不发生破坏、但也不能够使管坯横断面全部处于屈服状态的变形区;III和IV两个区域是发生扩径破裂的区。曲线1和曲线2的交点位置、I区和II区的大小均与管坯的材料常数、管坯的相对壁厚有关。

图2说明,对于管筒形零件机械扩径工艺,即便是管坯只有1%的椭圆度,要追求制品的零椭圆度效果,其塑性扩径率也要达到5%以上。然而由于模具分瓣结构的缘故,采用一次大扩径率成形将会在

相邻两瓣模具之间形成新的直边,产生新的圆度误差。因此,就机械扩径工艺而言,不但需要制定一个合理的制品精度指标,而且为了使管坯横断面上绝大部分区域处于塑性变形状态,以获得预期的制品形状和尺寸精度,还必须对管坯的原始椭圆度加以适当限制。

3 结论

基于机械扩径时管坯的变形特征,提出了整圆和扩径两个变形阶段的概念。在对两个变形阶段应力分析的基础上,建立起了管筒形零件机械扩径的整体屈服条件和局部破坏条件。将这两个条件综合起来,即构成了一个具有普遍意义的管筒形零件机械扩径成形条件,解决了机械扩径工艺技术的一个共性理论问题。

[REFERENCES]

- [1] 胡世光. 板料冷压成形原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
HU Shi-guang. Principle of Cold Pressing of Sheet Metal [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979.
- [2] 刘助柏. 塑性成形新技术及其力学原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
LIU Zhu-bai. New Technologies and Its Mechanics Principle of Plastic Forming [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995.
- [3] 彭在美. 国内外直缝焊管机组的发展趋势[J]. 钢管, 1998, 27(4): 14 - 18.
PENG Zai-mei. Development trend of straight welded pipe mills both at home and abroad [J]. Steel Pipe, 1998, 27(4): 14 - 18.
- [4] 郭宝锋, 金 淼, 任运来, 等. 模具扇形角对机械扩径成形过程的影响[J]. 塑性工程学报, 2002(1): 59 - 61.
GUO Bao-feng, JIN Miao, REN Yun-lai, et al. The influence of sectorial angle on mechanical expanding process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002(1): 59 - 61.
- [5] 贺幼良, 白光润, 邹克让, 等. 焊管胀径工艺理论研究[J]. 焊管, 1997, 20(6): 9 - 11.
HE You-liang, BAI Guang-ren, ZOU Ke-rang, et al. A theoretical study on the technology of tube expanding [J]. Welded Pipe and Tube, 1997, 20(6): 9 - 11.
- [6] 王 龙. 大口径直缝焊管生产用扩径机的研制[J]. 钢

管, 2000, 29(2): 37 - 39.

WANG Long. Development of expanding mill for production of large-sized straight weld pipes [J]. Steel Pipe, 2000, 29(2): 37 - 39.

- [7] 付正荣. 螺旋焊管冷扩径技术的实验研究[J]. 重型机械, 1999(5): 18 - 22.
FU Zheng-rong. Research into the helically-welded tube cold-expanding technology [J]. Heavy Machinery, 1999(5): 18 - 22.
- [8] 蒋 阳. 日本 UOE 焊管生产工艺及设备简介[J]. 焊管, 1992, 15(5): 54 - 56.
JIANG Yang. A brief introduction of UOE welded pipe's production technology and equipment in Japan [J]. Welded Pipe and Tube, 1992, 15(5): 54 - 56.
- [9] Jenzen S, Horner W N. Alliance pipeline—a design shift in long distance gas transmission [A]. Proceedings of the International Pipeline Conference [C]. ASME: 1998. 83 - 88.
- [10] Glover A G, Horsley D J, Dorling D V. Pipeline design and construction using higher strength steels [A]. Proceedings of the International pipeline Conference [C]. ASME: 1998. 659 - 664.
- [11] 郭宝锋, 金 淼, 任运来, 等. 大口径直缝焊管 UOE 成形技术及发展策略[J]. 锻压技术, 2000, 25(3): 22 - 25.
GUO Bao-feng, JIN Miao, REN Yun-lai, et al. UOE forming process and R & D strategy of large-diameter longitudinally SAW line pipe [J]. Forging & Stamp Technology, 2000, 25(3): 22 - 25.
- [12] 李鹤林. 天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题[J]. 焊管, 2000, 23(3): 43 - 61.
LI He-lin. Highlights of research and application of gas transmitting linepipe [J]. Welded Pipe and Tube, 2000, 23(3): 43 - 61.
- [13] 郭宝锋. 管线钢管机械扩径工艺的数值模拟和实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2001.
GUO Bao-feng. FEM simulation and experimental study on mechanical expanding process of line-pipe [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2001.
- [14] 曹宏德. 塑性变形力学基础与轧制原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
CAO Hong-de. Mechanics Fundamentals of Plastic Deformation and Principle of Rolling [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981.
- [15] 王 仁. 塑性力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
WANG Ren. Fundamentals of Plasticity Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1998.

Mechanical expanding forming criterion for cylindric products

GUO Bao-feng, NIE Shao-min, JIN Miao, LI Qun, REN Yun-lai

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

[Abstract] Expanding is one of the effective methods for producing cylindrical parts. It is a key subject in the basal research on expanding technology to set up a reasonable technical standard and the predetermined deformation level, according to the specific shape of the raw pipes. It is therefore necessary to give the overall yielding criterion for expanding and the local rupture criterion for possible cracking. Based on the basic deformation law and main features of pipe, a conception that the deformation process can be divided into two stages was established. After the stress analysis of the part at the stages, the overall yielding criterion for expanding and the local rupture criterion for possible cracking were established.

[Key words] mechanical expanding; stress analysis; forming criterion; cylindric products

(编辑 袁赛前)