

# 确定锥形管无模拉伸速度制度的数学模型

夏鸿雁, 吴迪, 栾瑰馥

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:** 无模拉伸是一种金属柔性塑性加工方法, 它的应用消除了常规拉拔过程存在的缺陷, 使轴向变断面制品的拉伸成形以及难变形材料的成形加工问题得到很好解决。在分析锥形管无模拉伸的变形机制及可行性的基础上, 提出了锥形管无模拉伸速度或冷热源移动速度的理论计算方法, 并给出了相应的数学模型。实验研究证明, 提出的速度模型较好地表达了无模拉伸速度变化规律, 可用于确定有关的速度制度。

**关 键 词:** 锥形管; 无模拉伸; 速度变化规律; 数学模型; 柔性加工方法

中图分类号: TG 356.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3026(2009)06-0833-04

## Mathematical Model to Schedule Dieless Drawing Speed for Tapered Tubes

XIA Hong-yan, WU Di, LUAN Gui-fu

(The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China.

Correspondent: XIA Hong-yan, E-mail: xia.hongyan@yeah.net)

**Abstract:** Dieless drawing, as a flexible metal forming technique, could provide rods/tubes with varied cross-section in axial direction and some other formed materials which are hard to be deformed by conventional drawing process. Based on the analysis of deformation mechanism and feasibility of tapered tubes via dieless drawing process, the calculation method of dieless drawing speed and hot/cooling source moving speed during tube forming is proposed theoretically with a relevant mathematical model given. Experimental investigation results showed that the mathematical model indicates variation of dieless drawing speed and hot/cooling source moving speed quite well, and it is available to schedule the two different speeds for dieless drawing.

**Key words:** tapered tube; dieless drawing; speed variation; mathematical model; flexible forming technique

### 1 管材无模拉伸工艺简介

无模拉伸是一种不采用模具而进行金属成形的新工艺, 它消除了常规挤压拉拔存在的缺陷, 使一些难变形材料的成形加工和轴向变断面制品的拉伸成形问题得到了很好的解决<sup>[1-6]</sup>。

管材无模拉伸的基本形式<sup>[7-8]</sup>如图1所示。将金属的一端固定, 采用感应线圈对局部快速加热至高温, 然后以恒定速度  $V_1$  拉伸管材的另一端, 与此同时, 感应线圈以速度  $V_2$  向与  $V_1$  相反(或相同)的方向运动。在感应线圈后跟随同步运动的冷却器从中喷出冷却介质, 对已变形一定程

度的局部进行快速冷却。随着冷热源的不断移动, 瞬间的局部成形就构成了沿轴向的连续拉伸成形过程。

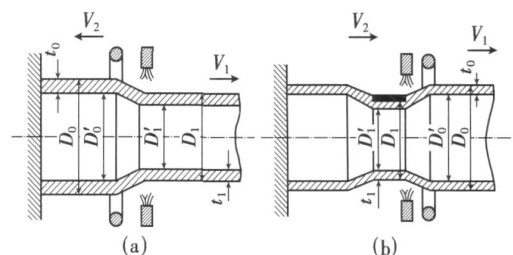


图1 管材无模拉伸模型

Fig. 1 Deformation model of tube via dieless drawing

(a) — $V_1$  与  $V_2$  方向相反; (b) — $V_1$  与  $V_2$  方向相同。

收稿日期: 2008-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50334010)。

作者简介: 夏鸿雁(1962-), 女, 内蒙古通辽人, 东北大学博士研究生, 沈阳大学副教授; 吴迪(1952-), 男, 辽宁绥中人, 东北大学教授, 博士生导师; 栾瑰馥(1933-), 女, 辽宁鞍山人, 东北大学教授。

反向拉伸如图 1a 所示,根据体积不变条件有

$$A_1(V_1 + V_2) = A_0 V_2 \quad (1)$$

式中:  $A_0, A_1$  为拉伸前后管材断面面积;  $V_1, V_2$  为拉伸速度与冷热源移动速度。

断面减缩率:

$$R_s = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (2)$$

同向拉伸如图 1b 所示,根据体积不变条件有

$$A_0(V_2 - V_1) = A_1 V_2 \quad (3)$$

断面减缩率:

$$R_s = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = \frac{V_1}{V_2} \quad (4)$$

可见,管材的断面减缩率与拉伸速度与冷热源移动速度比值  $V_1/V_2$  有关,  $V_1/V_2$  值以一定的比率连续变化,就可以得到锥形管。

## 2 锥形管无模拉伸速度制度数学模型的建立

锥形管拉伸模型如图 2 所示。

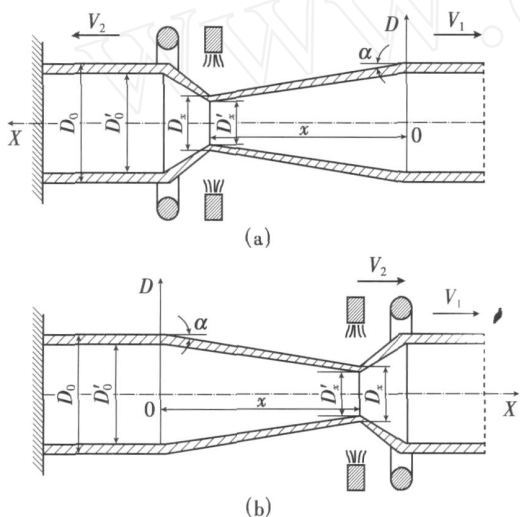


图 2 锥形管无模拉伸模型

Fig. 2 Deformation model for dieless drawing of tapered tube

(a) —  $V_1$  与  $V_2$  方向相反; (b) —  $V_1$  与  $V_2$  方向相同。

1) 若采用图 2a 工艺,  $V_1$  与  $V_2$  反向,在  $x$  处断面面积  $A_x$  是  $x$  的函数。

根据体积不变条件有

$$A_0 V_2 = A_x (V_1 + V_2),$$

$$A_x = \frac{1}{4} (D_x^2 - D_x'^2), A_0 = \frac{1}{4} (D_0^2 - D_0'^2) \quad (5)$$

式中:  $D_0, D_0'$  为拉伸前管材内、外径;  $D_x, D_x'$  为拉伸后  $x$  处锥形管内、外径。

根据理论与实验结果<sup>[9]</sup>,

$$\frac{D_x}{D_0} = \frac{D_0}{D_0'} = \sqrt{1 - R},$$

$$D_x = D_0 - 2x \tan \alpha.$$

将以上各式代入式(5),得出拉伸速度  $V_1$ , 冷热源移动速度  $V_2$  与位移  $x$  的关系式:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{(D_0 - 2x \tan \alpha)^2}{D_0^2 - (D_0 - 2x \tan \alpha)^2} \quad (6)$$

若  $V_1$  与  $V_2$  反向,保持  $V_1$  不变,改变  $V_2$ , 则  $V_2$  与  $x$  关系如下:

$$V_2 = \frac{(D_0 - 2x \tan \alpha)^2}{D_0^2 - (D_0 - 2x \tan \alpha)^2} V_1 \quad (7)$$

根据位移 - 速度 - 时间的关系得出位移 - 时间关系:

$$dx = (V_1 + V_2) dt,$$

将式(6)代入并积分有

$$2D_0 x^2 \tan \alpha - \frac{3}{4} x^3 \tan^2 \alpha = D_0^2 V_1 t \quad (8)$$

若  $V_1$  与  $V_2$  反向,保持  $V_2$  不变,改变  $V_1$ , 则  $V_1$  与  $x$  关系如下:

$$V_1 = \frac{D_0^2 - (D_0 - 2x \tan \alpha)^2}{(D_0 - 2x \tan \alpha)^2} V_2 \quad (9)$$

同样,根据位移 - 速度 - 时间的关系得出位移 - 时间关系:

$$dx = (V_1 + V_2) dt,$$

将式(9)代入并积分有

$$D_0^2 x - 2D_0 x^2 \tan \alpha + \frac{4}{3} x^3 \tan^2 \alpha = D_0^2 V_2 t \quad (10)$$

2) 若采用图 2b 工艺,  $V_1$  与  $V_2$  同向,在  $x$  处断面面积  $A_x$  是  $x$  的函数,即在  $x$  处直径  $D_x$  是  $x$  的函数,根据体积不变条件有

$$A_0(V_2 - V_1) = A_x V_2 \quad (11)$$

$$\text{又} \quad \frac{D_x}{D_0} = \frac{D_0}{D_0'} = \sqrt{1 - R},$$

$$D_x = D_0 - 2x \tan \alpha.$$

得出拉伸速度  $V_1$ , 冷热源移动速度  $V_2$  与位移  $x$  的关系式:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{D_0^2}{D_0^2 - (D_0 - 2x \tan \alpha)^2} \quad (12)$$

若  $V_1$  与  $V_2$  同向,保持  $V_1$  不变,改变  $V_2$ , 则  $V_2$  与  $x$  关系如下:

$$V_2 = \frac{D_0^2}{D_0^2 - (D_0 - 2x \tan \alpha)^2} V_1 \quad (13)$$

同样,根据位移 - 速度 - 时间的关系得出位移 - 时间关系:

$$-\frac{1}{3} x^3 \tan^2 \alpha + \frac{1}{2} D_0 x^2 \tan \alpha = \frac{1}{4} D_0^2 V_1 t \quad (14)$$

若  $V_1$  与  $V_2$  同向,保持  $V_2$  不变,改变  $V_1$ , 则  $V_1$  与  $x$  关系如下:

$$V_1 = \frac{D_0^2 - (D_0 - 2xtan\alpha)^2}{D_0^2} V_2 \quad (15)$$

将  $x = V_2 t$  代入,有速度与时间的关系式:

$$V_1 = \frac{4V_2^2tan\alpha}{D_0^2} (-V_2t^2tan\alpha + D_0t) \quad (16)$$

通过以上公式可以看出,如果假定  $V_1$  或  $V_2$  不变,就可以导出  $V_2$  或  $V_1$  与  $t$  的关系式,很明显,所得  $V_2$  或  $V_1$  与  $t$  的关系式都是隐式.在实际的处理过程中,是采用分段多项式逼近的方式实现的.

3 试验研究

3.1 试验设备

锥管件试验研究是在无模拉伸试验机上进行的,其结构如图 3 所示.

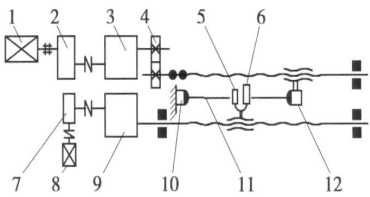


图 3 无模拉伸试验机结构

Fig. 3 Schematic of dieless drawing tester

- 1—主电机; 2—ZD 型减速器; 3—床头箱变速系统;
- 4—传动齿轮; 5—感应加热线圈; 6—冷却装置;
- 7—WD 型减速机; 8—辅助电机; 9—床头箱变速系统;
- 10—固定卡头; 11—拉伸件; 12—拉伸卡头.

3.2 锥形管无模拉伸

对于锥形管无模拉伸的试验研究,试验所采用的材料为  $\phi 14\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$  碳钢管,随着时间的变化,连续改变  $V_1$  或  $V_2$  值获得连续变化的断面减缩率,成功地拉出了锥形管.

如果保持  $V_1$  为一定值,通过改变  $V_2$  值成形锥管件,其  $V_2$  的变化规律如图 4 所示.为便于计

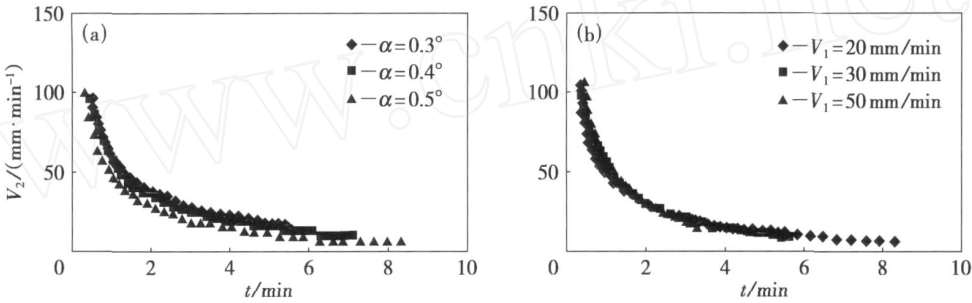


图 4 锥形管无模拉伸冷热源移动速度  $V_2$  的变化规律

Fig. 4 Variation of hot/ cooling source moving speed  $V_2$  during dieless drawing for tapered tube

(a) —  $V_1 = 20\text{ mm/min}$ ; (b) —  $\alpha = 0.5^\circ$ .

算以及计算机控制的拉伸过程处理,采用分段多项式逼近的方式确定了锥形管无模拉伸冷热源移动速度  $V_2$  变化规律.

从图 4 曲线中可以看出,随着  $t$  的逐渐增长,  $V_2$  的值也会随之降低,且  $V_2$  的变化程度越来越小;随着  $V_1$  的增大,  $V_2$  的变化程度也随之增加;随着锥半角的逐渐增大,  $V_2$  的变化程度也越

来越大.

如果保持  $V_2$  为一定值,通过改变  $V_1$  值成形锥形管,其  $V_1$  的变化规律如图 5 所示.从曲线中可以看出,  $V_1$  的值随着  $t$  的增长逐渐增加,且  $V_1$  的变化程度逐渐增大;随着锥半角的逐渐增大,其  $V_1$  的变化程度也越来越大.随着  $V_2$  的逐渐增大,  $V_1$  的值也随之增加.

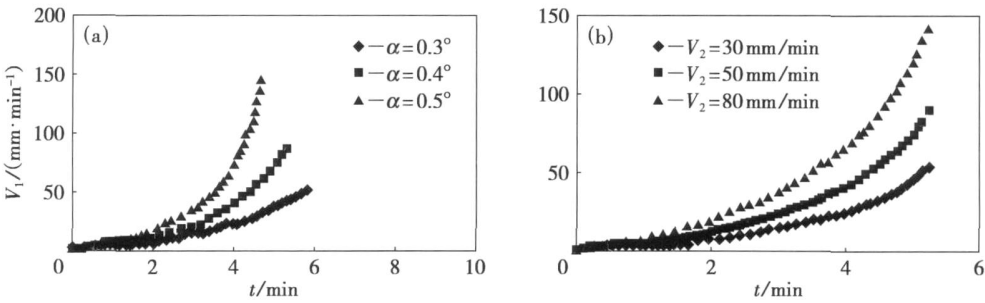


图 5 锥形管无模拉伸冷热源移动速度  $V_1$  的变化规律

Fig. 5 Variation of dieless drawing speed  $V_1$  for tapered tube

(a) —  $V_2 = 50\text{ mm/min}$ ; (b) —  $\alpha = 0.4^\circ$ .

图 6 为拉伸件外形与实测外形的比较,实测外形与计算外形吻合较好,误差分别为 6.7%, 7.6% 和 7.8%。

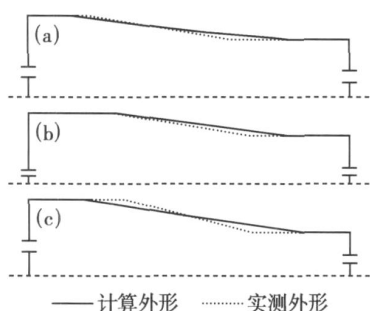


图 6 拉伸件外形与实测外形的比较

Fig. 6 Comparison of tapered tube surface between specimen and product

- (a)  $V_2 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.3^\circ$ ;  
 (b)  $V_2 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.4^\circ$ ;  
 (c)  $V_2 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.5^\circ$ .

## 4 结 论

通过对锥形管无模拉伸理论研究和实验分析,建立了锥形管无模拉伸速度制度数学模型.通过实验研究证明,所建立的数学模型较好地表达了无模拉伸速度变化规律,具有实用价值,具体可得出如下结论:

- 1) 假定  $V_1$  或  $V_2$  不变,就可以导出锥形管无模拉伸  $V_2$  或  $V_1$  与  $t$  的关系式。
- 2) 在锥形管无模拉伸的模型中,得到的  $V_2$  或  $V_1$  与  $t$  的关系式都是隐式。
- 3) 为便于计算以及计算机控制拉伸过程处理,采用分段多项式逼近的方式确定了锥形管无模拉伸速度变化规律。

## 参考文献:

- [1] 栾瑰馥,曹立,董学新. 无模拉伸 Ti-6Al-4V 合金研究[J]. 金属学报, 1999, 35(1): 616 - 620.  
(Luan Gui-fu, Cao Li, Dong Xue-xin. Research on the dieless drawing of the Ti-6Al-4V alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(1): 616 - 620.)
- [2] Zhang W G, Luan G F, Seiguchi H. Study on wire temperature field and structure properties in dieless drawing [C]. *Advanced Technology of Plasticity*. Tokyo: Japan Society for Technology of Plastic, 1990: 557 - 562.
- [3] Kawaguchi Y, Katsube K, Muihashi M, et al. Applications of dieless drawing to Ti-Ni wire drawing and tapered steel wire manufacturing[J]. *Wire Journal International*, 1991, 12: 53 - 58.
- [4] Giga M, Canta T. Theory and application of dieless drawing [J]. *Wire Industry*, 1999, 6: 294 - 297.
- [5] Wang Z T, Luan G F, Bai G R. Study of the deformation velocity field and drawing force during dieless drawing of tube [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 94: 73 - 77.
- [6] Wang Z T, Luan G F, Bai G R, et al. The study on the dieless drawing of variable section tube part [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 59(4): 391 - 396.
- [7] Kobatake K, Miura T, Sekiguchi H, et al. A new forming method of non-circular tapered pipes [C]. *Advanced Technology of Plasticity*. Beijing: International Academic Publishers, 1993: 67 - 72.
- [8] 王忠堂,栾瑰馥,白光润,等. 管材无模拉伸壁厚变化规律研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1995, 16(6): 618 - 622.  
(Wang Zhong-tang, Luan Gui-fu, Bai Guang-run, et al. Study on thickness variation of pipe wall during dieless drawing [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 1995, 16(6): 618 - 622.)
- [9] Wang Z T, Zhang S H, Luan G F, et al. Experimental study on the variation of wall thickness during dieless drawing of stainless steel tube [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 120: 90 - 93.