

文章编号:1000-582X(2009)12-1414-05

矩形管成品拉拔的芯头工作带设计与变形平滑化

权国政,王熠昕,艾百胜,周 杰
(重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400030)

摘 要:分析矩形管带芯头拉拔工艺实质和变形平滑化机理,提出“以小变形量控制矩形截面管坯均匀的从模具工作带挤压出来”的拉拔平滑化方法。建立了带芯头拉拔工艺简化的三维运动模型及弹塑性有限元模拟模型,采集矩形长边中点、短边中点、圆角中点三个研究的关键点,分析获得直线型与带台阶型两种方案关键点的等效塑性应变和接触应力变化规律。在表面质量最难以保证的长边中点,带台阶方案的等效塑性应变较直线型芯头提高 45.5%,其接触应力由 0 提高到 13 MPa。采用带台阶型的芯头工作带拉拔,获得“一拉二压”的应力状态,以少量挤压变形调控壁厚偏差、提高矩形管材内外表面质量。

关键词:芯头;拉拔;矩形;表面粗糙度;接触应力

中图分类号: TG356.11

文献标志码: A

Design in the mandrel land and smoothing the deformation of rectangular tube drawing

QUAN Guo-zheng, WANG Yi-xin, AI Bai-sheng, ZHOU Jie

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: With-mandrel drawing process and the mechanisms of smoothing deformation have been analyzed. A method of smoothing deformation is brought forward that rectangular tube should be extruded uniformly out of die land with little amount of deformation. The dynamics model simplified and FE model of with-mandrel drawing process are established based on FEM software, then simulations are performed. Three points including the center of long side, the center of short side, and the center of corner are positioned for further analysis. As for linear-type and step-type mandrel lands, the effective plastic strain and contact stress of three key points are evaluated. As for the plastic strain at the center of long side, a most difficult place to ensure surface quality, step-type mandrel land can improve 45.5%. As for the contact stress, step-type mandrel land can increase to 13MPa from 0. Drawing with step-type mandrel land achieves the stress status *tensile stress in one orientation and compressive stress in other two orientations*, which purposes of little amount of deformation to correct thickness tolerance and improve inner and outer surface quality of rectangular tube.

Key words: mandrel; drawing; rectangular; surface roughness; touch-stress

收稿日期:2009-05-31

基金项目:国家科技部技术创新项目(07C26215110824);重庆大学研究生科技创新基金重点资助项目(200811B1B0130302)

作者简介:权国政(1980-),男,重庆大学副教授,博士后,主要从事材料变形行为及跨尺度分析研究,
(Tel) 023-65103065;(E-mail) quanz_2006@yahoo.com.cn。

平滑化的拉拔工艺可以获得具有良好表面质量及尺寸精度的等截面矩形、椭圆形、异形铝合金管材^[1-3]。管材拉拔过程中很容易发生失稳、偏心、表面橘皮、划伤等缺陷^[4-6],这使得提高管材拉拔的平滑化性能成为研究的重点和难点。为了提高成品管材的内表面光洁度,现阶段国内外广泛采用电解研磨、电化学抛光、光亮退火等工艺,而这些方法具有环境污染、增加成本、影响尺寸精度等弊端^[7-8]。这就迫使寻找出路,能够从工艺及模具的角度出发以低成本实现拉拔平滑化,而这方面的研究报道几乎没有^[9-10]。从成形工艺及模具的角度入手来实现多道次拉制矩形截面铝合金管材的平滑性能,需要明确影响平滑性能的多个因素:润滑、模具形式、设备、坯料初始状态、表面清洁度等。

笔者的研究对象是通讯用的矩形铝合金管材,要求在微波传输中具有衰减小、传输功率大等特点,内表面的粗糙度要求达到 $Ra0.762$, 尺寸偏差 ± 0.11 mm。这种矩形铝合金管材需要冷变形强化,一般都设计由圆管到矩形管、由空拉拔到带芯头拉拔的多道次拉拔成形方案,本次谨针对最后一道次的带芯头拉拔暨成品拉拔展开研究。对传统的直线型芯头工作带形式进行优化,提出一种带台阶形式的芯头工作带,改善管坯与模腔型面和短芯头的接触条件,使管坯的变形趋于均匀、稳定暨提高变形的平滑性,从而提高矩形铝合金管材的内表面质量。

1 矩形管成品拉拔工艺与平滑化问题

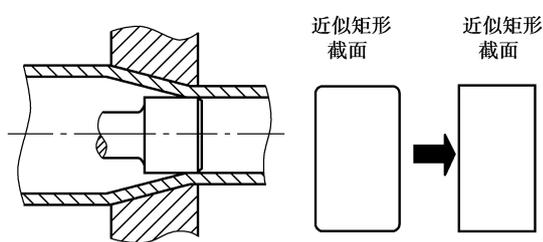


图 1 矩形管带芯头拉拔示意图

1.1 矩形管成品拉拔工艺实质

矩形管成品拉拔是一种带芯头拉拔工艺,如图 1 所示,实质上是对近似矩形管坯进一步收缩、周长进一步减薄壁厚、进一步缩小圆角等综合变形,同时实现纵向延伸^[11-12]。通过带芯头拉拔达到 3 个目的:将近似矩形矫正整形为矩形;矫正累积的尺寸偏差;光整管坯内外表面。这种工艺要求保证矩形四侧面的内部与芯头、外部与模壁都均匀接触,需要设置矩形截面四周收缩量一致和减薄量一致,可有效

地矫正管坯在前面道次累积的质量问题如壁厚不均、塌腰、表面桔皮等。所以,成品带芯头拉拔一般作为多道次拉拔的最后一道工序。

1.2 成品拉拔的变形平滑化机理

单道次带芯头拉拔变形的平滑化主要体现在累积误差的纠正、变形体各处变形量分布均匀、坯料与模具的接触应力分布均匀、无失稳现象,拉拔变形的平滑化将使获得的管制品内外表面质量提高。

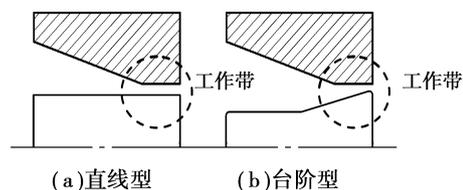


图 2 两种芯头工作带形式

对应用传统直线型工作带的短芯头的拉拔过程进行模拟与实验分析发现:这种芯头拉制出的矩形截面铝合金管材壁厚分布不均且偏差较大,四侧壁中间区域呈现橘皮状且粗糙,但是四个角部光亮。通过对分析力场发现:拉拔变形中,工作带区域的矩形管料四角处于明显的周向拉应力、轴向拉应力和厚向压应力;而矩形管料四侧面的中间区域仅受周向拉应力、轴向拉应力,而厚向没有应力;测量变形管坯壁厚发现四个侧面的中间区域减薄,并未与模具接触。

由此看出,厚向的压应力以及厚向的压缩变形是实现变形平滑化的关键。因此,将挤压理论引用到带芯头拉拔工艺中,提出“以小变形量控制矩形截面管坯均匀的从模具工作带挤压出来”的优化目标,使矩形管坯 4 个侧面中间区域的任意单元均处于两向压应力、一向拉应力的状态,采用少量冷挤压变形能有效提高管材表面质量,而且能较好的调控壁厚偏差。此种芯头形式可作为有效改善管坯内表面与短芯头的接触条件、提高材料变形的平滑性的一条途径。

2 带芯头拉拔的仿真模型及理论

2.1 基本假设

假设管坯是连续的薄壳体,这意味着坯料内部无任何孔洞;假设管坯材料各向同性,这意味着材料性能不随着方向、方位改变而改变,各质点的性能相同^[10-11]。笔者研究目标是在一个工序之内使近似矩形截面控制到产品的矩形截面,这意味着仅有带芯头拉拔可以选择,而不能考虑空拉拔工艺。

对所研究对象的形状和位置做了如下假设:管

坯、芯头与模具都是平面对称的;对象安装时保证了完全同轴;采用理想锥形结构代替实际中的管坯夹头。

2.2 运动模型

带芯头拉拔的运动方式简化为:首先移动芯头穿入拉拔模具并在模具工作带部位停止,其次模具和芯头同时同速运动,而管坯保持不动。

实际生产情况如下:首先应用小型压机砸夹头,将管坯反复翻转,将其一端砸扁、砸实;其次,将砸实的夹头穿过并露出模具的模孔,此时长管坯的主体部分由辊轮平稳支撑;然后,将芯头穿入管坯并在模具工作带部位停止;最后,拉拔机的夹钳夹持住管坯砸实的夹头,以一定的速度平稳拉拔。

实现该过程的模拟需对管坯的锥形夹头加载 $x、y、z$ 三向速度约束,并设定芯头穿入运动速度 $V_y = -100 \text{ mm/s}$,模具和芯头的同步运动速度 $V_y = 100 \text{ mm/s}$,建立的带芯头拉拔 3D 简化运动模型如图 3 所示。所建立的三维动力模型实现了坯料与模具及芯头的相对运动,而没有改变坯料实际的受力情况,具有研究的可行性。

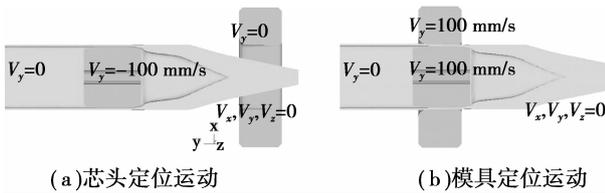


图 3 芯头及模具的运动示意

2.3 本构方程

拉拔工艺的变形具有典型的接触非线性、几何非线性、边界非线性,它是一个多重非线性耦合的问题。建立的有限元模型采用 Cauchy 应力的 Truesdell 率型本构关系进行表示^[13],表达式(1)特别适合于构建金属薄壳体的弹塑性模型。

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} d_{ij}, \quad (1)$$

$$C_{ijkl} = \frac{E}{1+\nu} \left[\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ik} \delta_{jl} - \alpha \frac{\tau'_{ij} \tau'_{kl}}{2\tau^2 \left(1 + \frac{2}{3} H \frac{1+\nu}{E} \right)} \right]. \quad (2)$$

式(1)、(2)中: C_{ijkl} 为材料的模张量; E 为弹性模量; ν 为泊松比; H 为加工硬化速率; α 为塑性态为 1、弹性态为 0 的常数; $\delta_{ik}、\delta_{jl}$ 为 Kronecker 数组; $\tau'_{ij}、\tau'_{kl}$ 分别为剪切应力 $\tau_{ij}、\tau_{kl}$ 的偏量。

1.4 摩擦模型

为了应对在拉拔过程中速度矢量不断变化的问

题,Chen 和 Kobayashi 提出一种与相对速率有关的反正切摩擦模型^[14-15]。

$$f = -\frac{2}{\pi} mK \left[\arctg \left(\frac{V_r}{A} \right) \right]. \quad (3)$$

式中: m 为摩擦因子(此处为 0.1); K 为剪切屈服应力极限; V_r 为管坯和模具间的相对滑移速度; A 为正常数 ($10^{-3} \sim 10^{-5}$)。

3 拉拔工艺设计

3.1 截面变化方案

根据变形平滑化的基本要求,设计管坯截面变化时,初始的近似矩形管坯四周向内均匀收缩 3.2 mm,壁厚由初始的 2.11 mm 压缩至 2.01 mm,具体如图 4 所示。

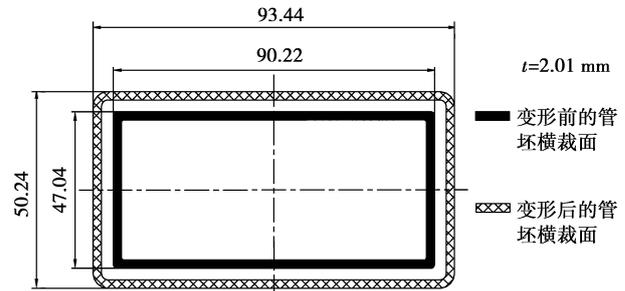


图 4 管坯截面变化示意

3.2 模具半角设计

模具半角对矩形轮廓的充填效果影响很大,要确保管坯同时与模壁接触而均匀的收缩变形,需设计长方形模孔短边与长边的半角一致。角度值可通过表达式(4)近似地计算出来^[15],约 1.7° 。

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} \sqrt{3} \mu (1 - \ln \frac{R_0}{R_f}) \ln \frac{R_0}{R_f}}. \quad (4)$$

式(4)中 μ 为摩擦因子(此处为 0.1), R_0 为初始圆管截面外径, R_f 为变形后管坯的平均外径。

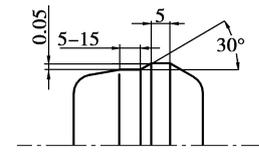


图 5 芯头台阶工作带示意

3.3 芯头台阶设计

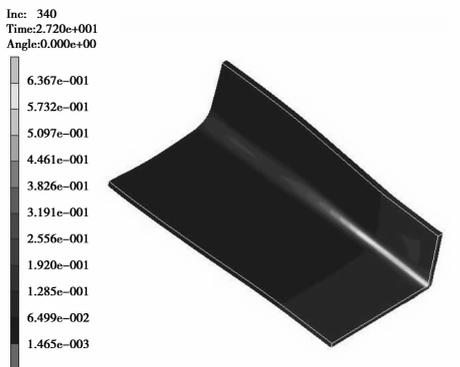
根据变形平滑化的基本要求,设计如图 5 所示的芯头台阶,在管坯内外表面给予高面压和大的塑性变形以改善粗糙度。台阶角度过大,则造成在拉拔时剪切加工过大,反而会划伤管坯的内外表面。通过模拟优化,设计台阶的高度设计为 0.05 mm,台

阶的角度为 30°。

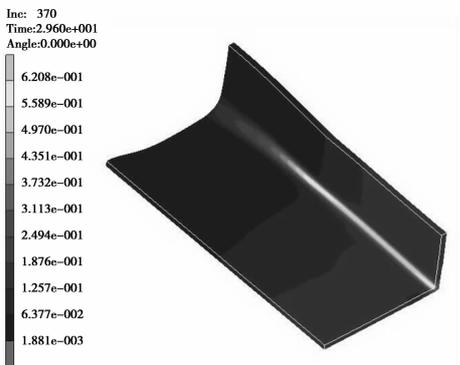
4 变形与接触应力的模拟

4.1 等效塑性应变分析

图 6 显示了传统直线型与带台阶型的芯头工作带两种方案成形后管坯的内表面等效塑性应变云图。从中看出,管坯在带台阶型芯头拉拔过程中,等效塑性应变明显大于直线型芯头拉拔。采用带台阶型芯头拉拔一道次的变形量相当于直线型芯头拉拔 2~3 道次的变形量,确保一定的塑性应变变量以满足平滑化拉拔的条件。为了进一步分析内表面的变形特征,选取表面质量最难以保证的长边中点,分析两种芯头形式下该处的等效应变变化,如图 7 所示。从中看出,在相同拉拔进给量下,带台阶芯头拉拔方案的等效塑性应变明显大于直线型芯头拉拔,约增加了 45.5%。



(a) 直线型芯头工作带拉拔



(b) 带台阶芯头工作带拉拔

两种芯头工作带成形后的管坯等效塑性应变云图

4.2 接触应力分析

接下来,对直线型与带台阶型的芯头工作带两种方案成形过程中的接触应力进行对比分析,选取矩形管坯的长边中点、短边中点、圆角中点,建立的长边中点处的接触应力变化如图 8 所示,建立的短边中点处的接触应力变化如图 9 所示,建立的圆角中点处的接触应力变化如图 10 所示。从图 8-9 中

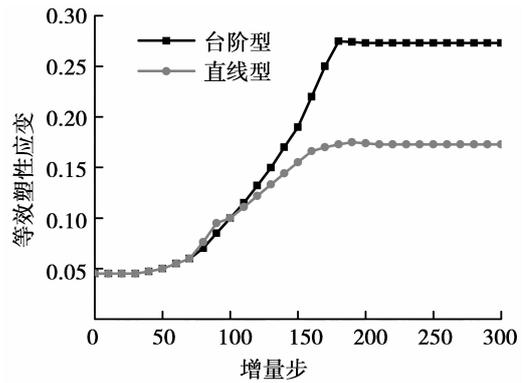


图 7 长边中点等效塑性应变比较

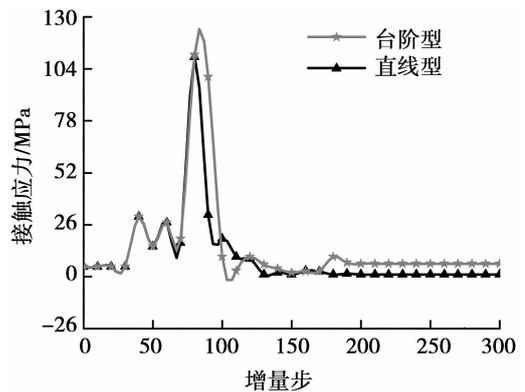


图 8 长边中点接触应力比较

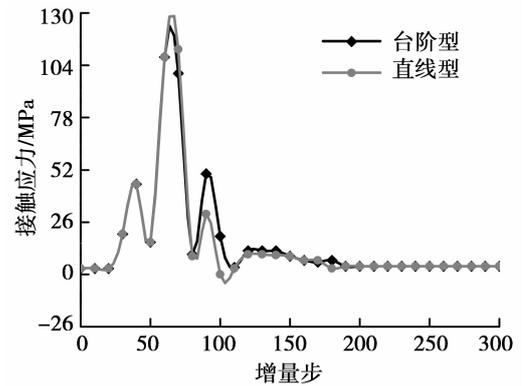


图 9 短边中点接触应力比较

可以看出:2 种方案的接触应力的变化趋势基本相同,只是带台阶型芯头拉拔时,在成形过程中各个位置的接触应力都比传统直线型芯头拉拔时偏大。这个现象说明带台阶型芯头拉拔会给管坯内表面带来较高的面压力,从而为实现小变形量的挤出创造条件,可有效的调控壁厚偏差,提高矩形管制品内外表面的光洁度。

5 结论

1) 提出“以小变形量控制矩形截面管坯均匀的

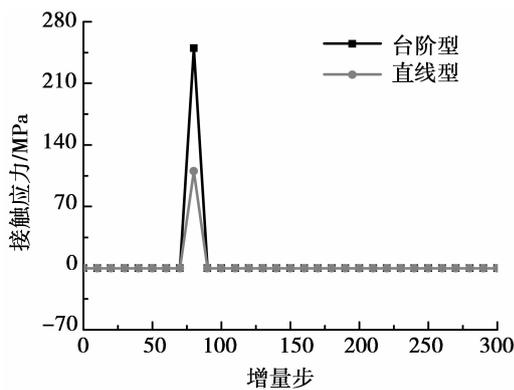


图 10 圆角中点接触应力比较

从模具工作带挤压出来”的拉拔平滑化方法,使矩形管坯 4 个侧面中间区域的任意单元均处于“一拉二压”的应力状态,以少量冷挤压变形调控壁厚偏差、提高矩形管材内外表面质量。

2) 将传统的直线型芯头工作带改进成为带台阶型芯头工作带,设计台阶的高度为 0.05 mm,台阶的角度为 30° 。在相同拉拔进给量下,在表面质量最难保证的长边中点处,带台阶芯头拉拔方案的等效塑性应变较直线型芯头提高了 45.5%;带台阶芯头拉拔方案的接触应力较直线型芯头由 0 提高到 13 MPa。

参考文献:

- [1] CHAO JAN-HYUNG, ROLLETT A D, CHOC J S, et al. Investigation on cold-drawn gold bonding wire with serial and reverse-direction drawing[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 432(1-2): 202-215.
- [2] RUBIO E M. Analytical methods application to the study of tube drawing processes with fixed conical inner plug: slab and upper bound methods[C]// *Proceedings of the International Scientific Conference on CAM'3S*, 2005, Warsaw, Poland. Warsaw: IEEE, 2005: 841-850.
- [3] SWIATKOWSKI K, HATALAK B. Study of the new floating-plug drawing process of thin-walled tubes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151(1/3): 105-114.
- [4] QUAN G Z, WANG M H. Deforming mechanisms of two-pass drawing process of an aluminum tube from circular to rectangle section [J]. *Materials Science Forum*, 2008, 577(8): 549-554.
- [5] QUAN G Z, ZHOU J. A study on non-mandrel drawing process of a rectangular tube from circular cross-section[J]. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 2008, 7(1):45-49.
- [6] 江运宏,周靖,汤飞.高精度冷拉材优化拉拔条件的探索与实践[J]. *上海钢研*, 2006(2):19-22.
JIANG YUN-HONG, ZHOU JING, TANG FEI. Optimizing of drawing conditions for high precision cold-drawn products[J]. *Journal of Shanghai Iron and Steel Research*, 2006(2): 19-22.
- [7] RUBIO E M, GONZALEZ C, MARCOS M, et al. Energetic analysis of tube drawing processes with fixed plug by upper bound method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1/3): 175-178.
- [8] YOSHIDA KAZUNARI, FURUYA HIROAKI. Mandrel drawing and plug drawing of shape-memory-alloy fine tubes used in catheters and stents[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153/154: 145-150.
- [9] KIM S W, KWON Y N, LEE Y S, et al. Design of mandrel in tube drawing process for automotive steering input shaft [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187/188: 182-186.
- [10] LEE S K, KO D C, KIM C B M, et al. A study on monobloc tube drawing for steering input shaft[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191(1/3): 55-58.
- [11] RUBIO E M, SEBASTI M A, SANZ A Y. Mechanical solutions for drawing processes under plane strain conditions by the upper bound method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 143/144: 539-545.
- [12] WANG K L, ARGYROPOULOS V. Design and analysis of direct cold drawing of section rods[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 166(3): 345-358.
- [13] MACKENZIE P M, WALKER C A, MCKELVIE J. A method for evaluating the mechanical performance of thin-walled titanium tubes [J]. *Thin-Walled Structures*, 2007, 45(4): 400-406.
- [14] LI MING-QI, SUN ZHI-CHAO, LI MING HUI, et al. FEM numerical simulation of tube axial drawing process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 160(3): 396-400.
- [15] QUAN G Z, ZHOU J. Deforming mechanism of drawing process of circular aluminium tube by simulation [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16(z3): 1101-1104.

(编辑 张小强)