

# 三维整体外翅片管滚压—犁切/挤压成形工艺

万珍平 燕 辉 葛子平 汤 勇

华南理工大学, 广州, 510640

**摘要:**采用滚压—犁切/挤压复合加工方法成形三维整体外翅片管, 设计了犁切/挤压成形刀具, 分析了三维整体外翅片的犁切/挤压成形过程, 研究翅片顺利成翅的条件和翅片高度随工艺参数的变化规律。推导了翅片顺利成翅的临界进给量计算公式, 并用实验进行了验证; 在实验研究的基础上, 对加工工艺参数的合理选择进行了分析。

**关键词:**三维整体外翅片管; 犁切/挤压; 临界进给量; 翅片高度

**中图分类号:** TG506.2 **文章编号:** 1004—132X(2009)19—2368—04

## Forming Process of Integral Serrated Outside Finned Tube by Rolling and Plowing/Extruding

Wan Zhenping Yan Hui Ge Ziping Tang Yong

South China University of Technology, Guangzhou, 510640

**Abstract:** Rolling and plowing/extruding method was used to machine integral serrated outside finned tube. The plowing/extruding tool was designed and the forming process of integral serrated outside fins by plowing/extruding was analyzed. The terms of fins forming and the influences of the technical parameters on fins height were investigated. The formula of critical feed was deduced and validation experiments were conducted. Moreover, how to choose technical parameters properly was analyzed by experimental results.

**Key words:** integral serrated outside finned tube; plowing/extruding; critical feed; fin height

## 0 引言

始于 20 世纪 70 年代的世界能源危机, 有力地推动了强化传热技术的发展<sup>[1]</sup>。迄今为止, 强化传热技术已在石油、化工、动力、核能、制冷, 乃至国防工业等领域得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。Bergles<sup>[3-4]</sup>将传热技术划分为三代, 对换热管而言, 第一代为光滑通道或光滑管; 第二代为二维粗糙元或二维翅片; 第三代为三维粗糙元或三维翅片。三维外翅片管属于第三代传热技术范畴, 具有优异的强化传热性能<sup>[5-7]</sup>。目前对三维外翅片管的强化传热机理研究较多, 而对其加工成形过程的研究则不够深入。文献[8-9]介绍了三维整体外翅片管的研制过程, 文献[9]还对三维外翅片管的滚压—犁削成形过程进行了分析。三维外翅片的滚压—犁切/挤压成形是一个极其复杂的过程, 涉及切削和塑性成形两个领域, 其工艺参数对翅片的成形过程有重要影响, 且工艺参数之间相互影响、相互制约。目前对翅片的成形规律还缺乏系统深入的研究。本文主要研究铜管三维外翅片顺利成翅的条件、翅片高度随各工艺参数的变化规律。

## 1 三维整体外翅片管的滚压—犁切/挤压成形过程及外观形貌

### 1.1 犁切/挤压刀具及翅片成形过程

三维整体外翅片管的滚压—犁切/挤压成形可分为滚压、犁切/挤压两个过程。首先用滚花刀在坯管上滚压出直纹或斜纹(称为一次翅); 然后在此基础上利用特殊设计的犁切/挤压刀具, 在一次翅基础上犁切/挤压出三维翅片。

图 1 所示为犁切/挤压刀具的几何形状。其中,  $c$  为最大挤刃宽的一半,  $b$  为最大挤刃宽到刀尖的距离,  $\alpha$  为刀具后角,  $\beta$  为挤倾角。翅片的犁切/挤压成形过程可分为三个阶段: 鼓包的挤起、犁切以及翅的挤压成形。鼓包是由于刀具挤压面在工件的旋转运动和刀具的进给运动作用下, 使挤压面这一侧的金属产生塑性流动、堆积而形成的, 如图 2 所示。鼓包的犁切是指随着刀具的进给, 刀具的顶刃将上一圈挤起的鼓包与一次翅切开, 但该鼓包与坯管并不分离的工艺。如果犁切后能够形成正常的翅片, 那么这一阶段就没有“屑”产生。由于只有刀具的“切入”而没有“削”的作用, 因此, 这一过程被称为犁切。翅片的挤压成形与鼓包的犁切是同时进行的, 当刀具的顶刃将鼓包与一次翅犁切开后, 刀具的成形面挤压右侧

收稿日期: 2008—12—08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50605023)

金属,使原来不规则的形状按刀具的挤压面形状和运动轨迹产生塑性变形,并且在挤压面和金属之间侧向摩擦力的作用下有规律地形成翅片。

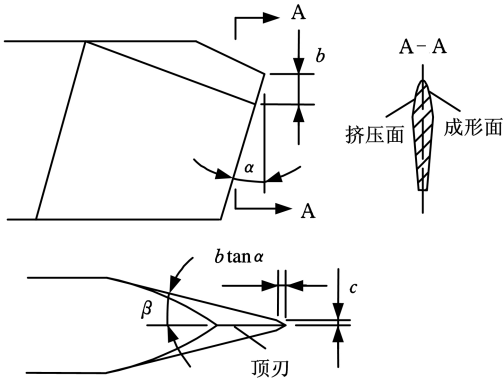


图 1 犁切/挤压刀具几何形状

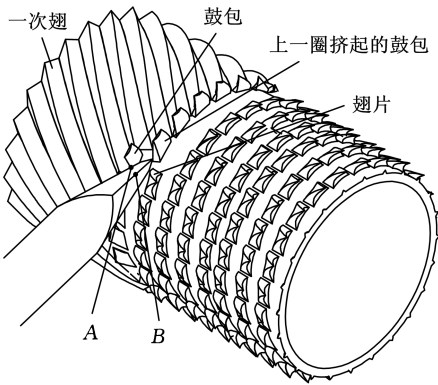
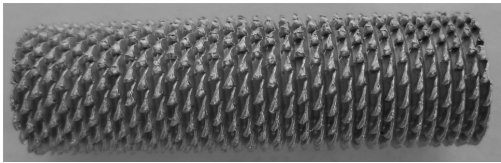


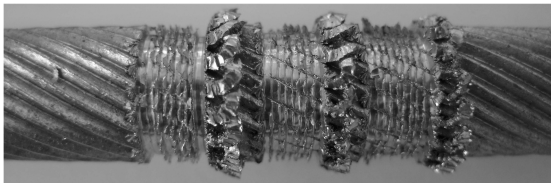
图 2 翅片的形成过程

1.2 三维外翅片管的外观形貌

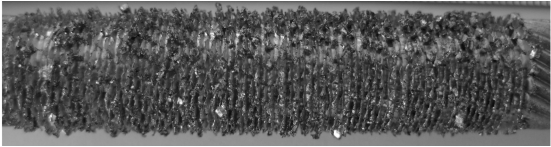
在三维外翅片的犁切/挤压成形的三个阶段中,工艺参数包括刀具的几何参数以及切削用量,如果选取不当,将不能正常成翅。图 3 所示为在不同加工条件下,犁切/挤压加工出的三维外翅片的外观形貌。图 3a 所示为正常翅片的外观形貌。由图 3a 可见,该翅片管不但能极大地扩展传热面积,而且由于各个翅片之间相互错开,能够破坏层流底层,增大流体的湍流度,从而大大提高传热性能。此外,由于该翅片管存在沟槽,因而又可以用作蒸发强化;翅尖能够促使冷凝液滴落,又可以用作冷凝强化;该整体式翅片管结构紧凑,极大地降低了金属消耗量,并可消除翅片与基管间的接触热阻,符合换热器紧凑、高效、节能、节材的发展要求。因而,该三维整体外翅片管具有优异的强化传热性能。图 3b 所示为由于进给量过小,鼓包与一次翅之间没有被犁切开,鼓包被越挤越高而形成的“飞边”;图 3c 所示为当进给量稍大于形成飞边时的进给量,但仍小于正常形成翅片的进给量时,鼓包被部分切除而形成的残翅。



(a) 正常翅片



(b) 飞边



(c) 残翅

图 3 不同加工条件下三维外翅片管的外观形貌

2 临界进给量分析

如前所述,当进给量较小时,要么鼓包与一次翅不能被犁切开,鼓包被越挤越高而形成“飞边”;要么鼓包被部分切除而形成残翅。因此,三维外翅片在犁切/挤压成形过程中,存在临界进给量  $f_c$ 。只有当  $f \geq f_c$  时,才能形成正常的翅片。因此,临界进给量  $f_c$  是三维翅片犁切/挤压成形的重要参数。当然,如果进给量过大,刀具的成形面对鼓包不能形成有效挤压,亦不能形成理想的翅片。

为分析临界进给量,将刀具与工件相接触的部分取出放大,如图 4 所示。随着刀具的切入,金属在刀具顶刃的作用下被分成左右两部分,左边

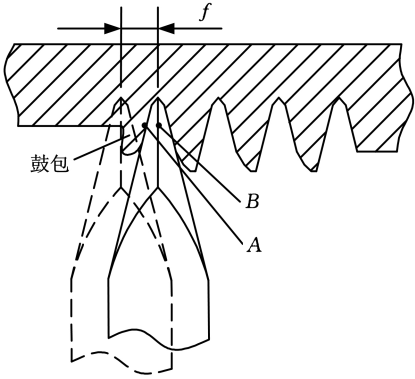


图 4 临界进给量分析示意图

部分在刀具挤压面、刀具与金属相接触的摩擦力的共同作用下发生塑性变形,沿着加工速度方向被挤压入沟槽而形成鼓包(图 2),该鼓包的厚度近似等于 A、B 两点在基面投影的距离  $l_{AB}$ 。随着

加工的进行,在下一圈刀具顶刃将切到该鼓包;但如果在下一圈刀具顶刃刚好越过该鼓包则不会将该鼓包切除,而此时的刀具成形面正好挤压该鼓包,那么该鼓包就会被挤压而形成翅片,如图 4 所示。可见,为保证刀具顶刃不将鼓包切除而成形面正好挤压鼓包,进给量应等于或稍大于  $2l_{AB}$ 。因此,根据图 1,  $f_c$  可表示为

$$f_c = 2[c + (a_p - b \tan \alpha) \tan \beta]$$

式中,  $a_p$  为犁切 / 挤压深度。

可见,临界进给量  $f_c$  与刀具参数  $c$ 、 $b$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  以及犁切 / 挤压深度  $a_p$  有关。只有进给量等于或稍大于  $f_c$ , 才能形成正常翅片。

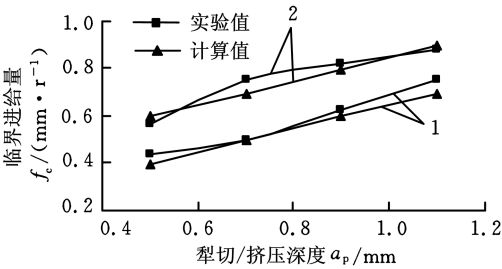
3 实验研究临界进给量和翅片高度的变化规律

3.1 实验方法与条件

实验在 C6132 车床上进行,刀具材料为高速钢,参数分别为:  $b = 2\text{mm}$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\beta = 14^\circ$ ; 工件材料为紫铜 (TP2), 外径为  $12.6\text{mm}$ , 壁厚为  $1.25\text{mm}$ ; 犁切 / 挤压速度为  $4\text{m/min}$ , 无切削液。加工时,首先用节距为  $1.8\text{mm}$ 、螺旋角为  $45^\circ$  的滚花轮在坯管上滚压出一次翅;然后再用犁切 / 挤压刀具加工出三维整体翅片。

3.2 临界进给量的变化规律

由式(1)可以看出,临界进给量与刀具参数及犁切 / 挤压深度有关。通过实验进一步发现,半挤刃宽  $c$ 、挤倾角  $\beta$ 、犁切 / 挤压深度  $a_p$  是影响临界进给量的主要参数。图 5 所示为在不同的挤刃宽度下,临界进给量与犁切 / 挤压深度的关系曲线。由图 5 可以看出,理论曲线与实验曲线比较接近,说明用式(1)来计算  $f_c$  是可行的。



1. 挤刃宽  $2c = 0.3\text{mm}$  时的理论和实验曲线  
2. 挤刃宽  $2c = 0.5\text{mm}$  时的理论和实验曲线

图 5 临界进给量与犁切/挤压深度的关系

由于机床进给量的选取是非连续的,为确保鼓包不被切除,进给量往往选取稍大于理论计算的值。图 6 所示为在不同的挤倾角条件下,临界进给量计算值与实验值的比较曲线。由图 6 可以看出,实验值稍大于计算值。

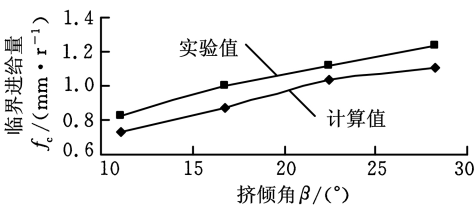


图 6 临界进给量与挤倾角的关系 ( $2c = 0.5\text{mm}$ )

3.3 翅片高度的变化规律

翅片高度  $h$  是三维外翅片管的重要特征参数,一般希望翅片的高度愈高愈好。本文中,翅片高度定义为:三维整体外翅片管成形后的翅片顶部直径与坯管外径之差的一半。

翅片高度与刀具参数、犁切 / 挤压深度、临界进给量等参数有关,这些参数之间也相互影响,如刀具参数、犁切 / 挤压深度的改变,必然导致  $f_c$  的变化。图 7 所示为在挤刃宽  $2c$  为  $0.5\text{mm}$  的条件下,翅片高度随进给量变化的规律曲线。由图 7 可以看出,进给量存在一个最佳值,在这一进给量条件下,翅片高度最高,该进给量就是临界进给量。当  $f < f_c$  时,有部分鼓包被切除,导致翅片高度下降;当  $f > f_c$  时,由于挤压面对鼓包的挤压作用减弱,亦导致翅片高度下降。这与前述分析是一致的。进一步分析发现,该临界进给量与式(1)的计算值较为接近,也进一步说明了用式(1)来计算  $f_c$  是可行的。

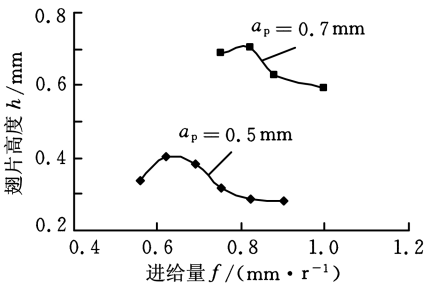
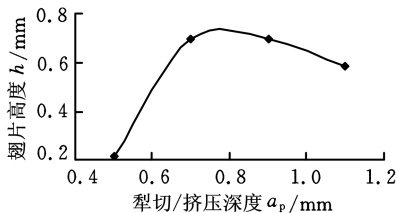


图 7 翅片高度与进给量的关系 ( $2c = 0.5\text{mm}$ )

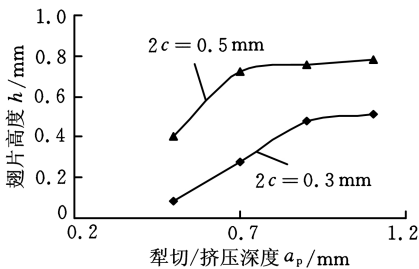
图 8a 所示为当进给量一定时 ( $f = 0.82\text{mm/r}$ ),犁切 / 挤压深度对翅片高度的影响曲线;图 8b 所示为在相应的进给量条件下,翅片高度随犁切 / 挤压深度的变化规律曲线。由图 8a 可以看出,当犁切 / 挤压深度大于  $0.7\text{mm}$  时,随着犁切 / 挤压深度的增大,翅片高度反而减小,这是因为此时随着犁切 / 挤压深度的增大,临界进给量大于  $0.82\text{mm/r}$ ,部分鼓包被切除。由图 8b 可以看出,在正常成翅条件下,翅片高度随犁切 / 挤压深度的增大而增大,但当  $a_p$  大于一定值时,随  $a_p$  的增大,翅片高度增大的趋势变缓。

图 9 所示为挤倾角  $\beta$  对翅片高度的影响曲线。由图 9 可以看出,翅片高度随  $\beta$  的增大反而略有减小。这是因为随着  $\beta$  的增大相应的进给量





(a) 进给量一定时 ( $2c=0.5\text{mm}$ ,  $f=0.82\text{mm/r}$ )



(b) 进给量按式(1)选取时

图 8 犁切/挤压深度对翅片高度的影响

也增大,二者共同影响导致随着 $\beta$ 的增大,翅片高度略微减小。

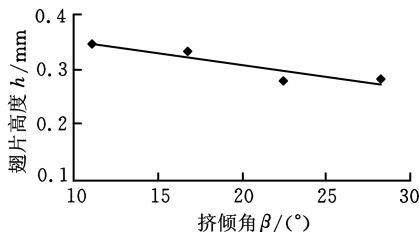


图 9 挤倾角对翅片高度的影响

( $a_p=0.8\text{mm}$ ,  $2c=0.3\text{mm}$ )

三维外翅片管在实际使用中,要求翅片之间具有一定的间距,以便具有较高黏度的流体流过时,翅片仍能够破坏流体的层流底层,增加流体的湍流度。挤倾角越大,翅片间距就越大,但挤倾角太大会对工件材料产生严重的挤压,会有屑产生。因此,挤倾角在 $16^{\circ}\sim 22^{\circ}$ 之间为宜。为使翅片具有较高的高度,挤刃宽 $2c$ 应取 $0.5\text{mm}$ 。挤刃宽过大也会对工件材料产生严重的挤压,会有屑产生;挤刃宽过小,翅片高度又会很低。当挤刃宽 $2c$ 为 $0.5\text{mm}$ 时,犁切/挤压深度在 $0.7\sim 0.9\text{mm}$ 之间比较合适。一方面,在此条件下随犁切/挤压深度的增大,翅片高度增大的趋势变缓;另一方面,犁切/挤压深度过大,将导致翅片根部到基管内径之间的厚度过小,对换热器的工作会有不利影响。

## 4 结论

(1)三维整体外翅片的犁切/挤压成形可分为鼓包的挤起、犁切以及翅片的挤压成形三个阶段。在翅片成形过程中,进给量是影响翅片能否顺利成形的关键因素。

(2)推导了翅片顺利成形临界进给量的计算公式。实验结果表明,该公式可以作为翅片加工时进给量选取的计算依据。

(3)影响翅片高度的因素主要为挤刃宽、挤倾角、犁切/挤压深度和进给量。在实际加工中,挤刃宽 $2c$ 取 $0.5\text{mm}$ ,挤倾角在 $16^{\circ}\sim 22^{\circ}$ 之间,犁切/挤压深度在 $0.7\sim 0.9\text{mm}$ 之间比较合适。

## 参考文献:

- [1] 过增元,魏澎,程新广. 换热器强化的场协同原则[J]. 科学通报, 2003, 48(22): 2324-2327.
- [2] 王斌斌,仇性启. 高效传热技术的研究现状及进展[J]. 工业加热, 2006, 35(4): 48-51
- [3] Bergles A E. Enhanced Heat Transfer: Endless Frontier, or Mature and Routine[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 1999, 6(2/4): 79-88.
- [4] Bergles A E. Advanced Enhancement—third Generation Heat Transfer Technology or the “Final Frontier”[J]. Transaction of the Institute of Chemistry Engineering, Part A., 2001, 79: 437-444.
- [5] Zhang Z G, Xu T, Fang X M. Experimental Study on Heat Transfer Enhancement of a Helically Baffled Heat Exchanger Combined with Three-dimensional Finned Tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(14/15): 2293-2300.
- [6] Zhang Z G, Yu Z S, Fang X M. An Experimental Heat Transfer Study for Helically Flowing Outside Petal-shaped Finned Tubes with Different Geometrical Parameters[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(1): 268-272.
- [7] 高学农,黄玉优,陈姝. 立式花瓣管外空气螺旋流动传热及流阻性能研究[J]. 高校化学工程学报, 2006, 20(4): 653-656.
- [8] 吴斌,夏伟,汤勇,等. 新型 3 维整体翅片铜管的研制[J]. 中国机械工程, 2002, 13(13): 1134-1136.
- [9] Tang Y, Xia W, Liu S D, et al. Fin Formation Model during Pre-roll Ploughing of Copper 3D Outside Fin Tube[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2001, 11(5): 712-716.

(编辑 王艳丽)

作者简介:万珍平,男,1971 年生。华南理工大学机械与汽车工程学院博士、副教授。研究方向为现代加工理论与技术、面向节能与新能源的制造技术。发表论文 40 余篇。燕 辉,男,1978 年生。华南理工大学机械与汽车工程学院硕士研究生。葛子平,男,1986 年生。华南理工大学机械与汽车工程学院硕士研究生。汤 勇,男,1962 年生。华南理工大学机械与汽车工程学院教授、博士研究生导师。