

# 高精度和大直径内螺纹挤压攻丝的 机理与实践\*

夏正权 沈子镛

(华侨大学) (大连机车车辆厂)

## 摘 要

本文在多年试验和实践基础上,提出一种对大直径的内螺纹的高精度挤压加工方法,(在此之前其应用仅对铝、铜等有色金属和低炭结构钢并局限于16mm以下小直径)。总结出内螺纹的螺纹精度直接取决于丝锥的精度,而螺纹孔的位置精度却有赖于攻丝前螺纹底孔的位置精度。到本文发表时止,已成功地发展出一种高速精钻工艺来制备铬铝合金钢连杆的螺纹底孔,和一种尺寸达22—36mm的系列无槽丝锥的挤压攻丝技术以精加工内螺纹。其结果是一次挤压可获得一级螺纹精度和 $\nabla 7$ 的表面光洁度,螺纹抗拉强度增加20—30%,抗剪强度增加5—10%,表面硬度增加40%和一个0.15mm的硬化深度,这对螺纹的抗疲劳性能有好处。目前,内螺纹挤压已经技术鉴定,并已在铁道部系统推广使用。

## 一、内螺纹的加工特点和利用切削丝锥加工螺纹孔所存在的缺点

通过生产实践和对加工产品的测试,结果发现,用丝锥作切削刀具而加工获得的内螺纹其自身精度主要取决于丝锥的制造精度,而螺纹孔对其它基面的位置精度则有赖于攻丝前的底孔位置精度,依赖程序视加工方式而异,挤压攻丝方式要比切削攻丝方式更为明显。

经归纳总结,依靠切削丝锥加工内螺纹比起挤压攻丝,存在以下三个缺点。

(1) 被加工的螺纹精度,包括螺纹自身尺寸和几何精度,以及螺纹对其它基面的位置精度都较低。由于切削加工的特点,对二级螺纹精度以上的内螺纹往往要经过一攻、二攻等连续多工序,难免带来螺纹的乱扣,切削工序也难确保螺纹对其它基面诸如同心、垂直等位置精度。

(2) 由于需多工序,致相应的生产效率较低,要在自动生产线上推广也较困难。

(3) 切削的螺纹由于切断金属的内部纤维,因而螺纹的联接强度遭到削弱。

本研究是从东风4型内燃机车16240Z等柴油机42C、Mo连杆的M22×2-1螺栓孔,在加

本文1987年4月23日收到。

\* 本文1987年8月在美国召开的第九届国际生产研究会上宣读。

工时所遇到的困难而开始的。

连接连杆体和连杆盖的四个 M22×2-1 螺栓孔，除要求本身有一级螺纹精度（相当于 ISO 国际标准 4H）外，还要求螺栓肩端面的不垂直度允差为 0.05/100（见图 1）。

过去螺纹加工工序是钻孔、扩孔、粗铰孔、精铰孔、一次攻丝和二次攻丝，仍然难以确保上述精度要求，废品时而出。

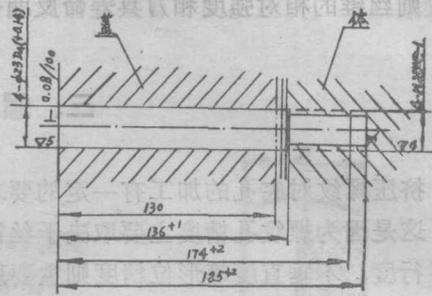


图 1 连杆螺栓孔

## 二、内螺纹挤压攻丝的机理和特点

利用金属在外力作用下处于三向强烈压应力状态，和改善了冷塑性变形性能的条件下，而采用的工艺方式属于冷挤压。连杆螺栓孔的挤压攻丝是属于成形的无屑加工范围。

金属在受外力作用下，其中一部分晶体沿着一定晶面和这个晶面上的某一晶向，对另一部分产生的相对移动，称为滑移。滑移的宏观结果是塑性变形。在金属的塑性变形过程中，晶粒被改变了形状，一些晶体格架受到了歪曲、扭斜，还有些部分破坏了。外力作用的结果增加了晶体内部能量的储备，使金属得到强化，其结果是随着金属塑性变形，材料的机械和物理性能得到了改变。比如材料的比例极限、屈服点、强度极限、耐磨性和表面硬度可望能得到提高，还能产生一定的表面压应力，这对抗疲劳有好处。另一方面，诸如延伸率、收缩率、冲击韧性、导电性、导磁性、导热性等则要降低。这就是一般所谓冷作硬化的实质。人类适当地利用金属性能的这种特点，是可以带来许多好处的。

对连杆螺栓孔施行内螺纹挤压，证明具有下列特点：

(1) 在挤压过程，材料处在塑性和弹性变形中，挤丝后的扩张量小，刀具对被挤表面还起着挤光作用，获得的螺纹精度高，可达一级螺纹精度（相当于 4H 级）。实测表面微观不平度  $H = 5.04\mu$ ， $\nabla 7$  表面光洁度。此外挤压过程丝锥的导向性能好，只要底孔的形位精度高，则挤压螺纹的形位精度也高。

(2) 由于冷挤的一次成形特点，能够做到一次挤压攻丝就挤出成品另件的要求，这就可简化工序，为在自动机床或自动生产线上加工内螺纹打开广阔的前途。

(3) 由于是挤丝，被挤的金属被塑性移动，因而金属的纤维组织仍呈连续状态（见图版 I）。经过对比，挤压螺纹能比切削螺纹在抗拉强度上提高 20—30%，抗剪强度提高 5—10%。此外，冷作硬化会使表面硬度提高 40%，硬化深度达 0.15mm（见表 1），这对螺纹联结强度尤其是抗交变应力的疲劳强度十分有利。

表 1 挤压螺纹表面压硬层深度及硬度值

距齿根距离 mm	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
硬度值 Hv	412	329	286	274	274	274

挤压用的无槽丝锥的制造并不困难，通过外表面加工，可以制造得很精确，此外无容屑槽，则丝锥的相对强度和刀具寿命反而可以提高。

### 三、螺纹底孔的精钻工艺

挤压螺纹对底孔的加工有一定的要求，主要是一定的尺寸精度、表面光洁度的和位置精度。这是因为螺纹孔精度主要取决于丝锥精度，而螺纹孔中心线的不直度及其对其它表面的不平行度、不垂直度等形位精度则主要取决于螺纹底孔的形位精度。基于上述认识，首先对螺栓孔的螺纹底孔采用高压强制排屑的深孔高速精钻工艺，较满意地提高了加工精度。孔的不直度控制在 0.05/100，孔径误差 0.05mm，同时一次高速精钻代替了通常的钻、扩、铰工艺，表面光洁度达 V5，刀具寿命有了提高，一次刃磨后可以连续钻削 140min，而钻深达 1400mm。

精密钻削的特点是高切削速度和小走刀量。切削速度高，切屑收缩率和已加工表面的冷硬层都减小，切屑变形小，切削热少，不产生积屑瘤且在切削过程中所产生的热量还未来得及传给金属本体时，就被高压油冷却并强制排出，所以可获得高精度和高光洁度。

图版 I2 为精钻头的外观，由钻削头和刀杆两部分以 90° 坡口对焊而成。刀杆可采用无缝钢管压制，在杆身上压有 110° 的 V 形排屑槽（图 2(C)），并可用 45 号钢棒料，经钻孔铣槽而成（图 2(d)）。刀杆末端留有圆柱部分以便装夹在弹簧卡头内用以传递扭矩。本钻头是用于刀具旋转并作进给运动的加工方式，因而在后端须连接冷却液接收器。精钻头的结构见图 2。

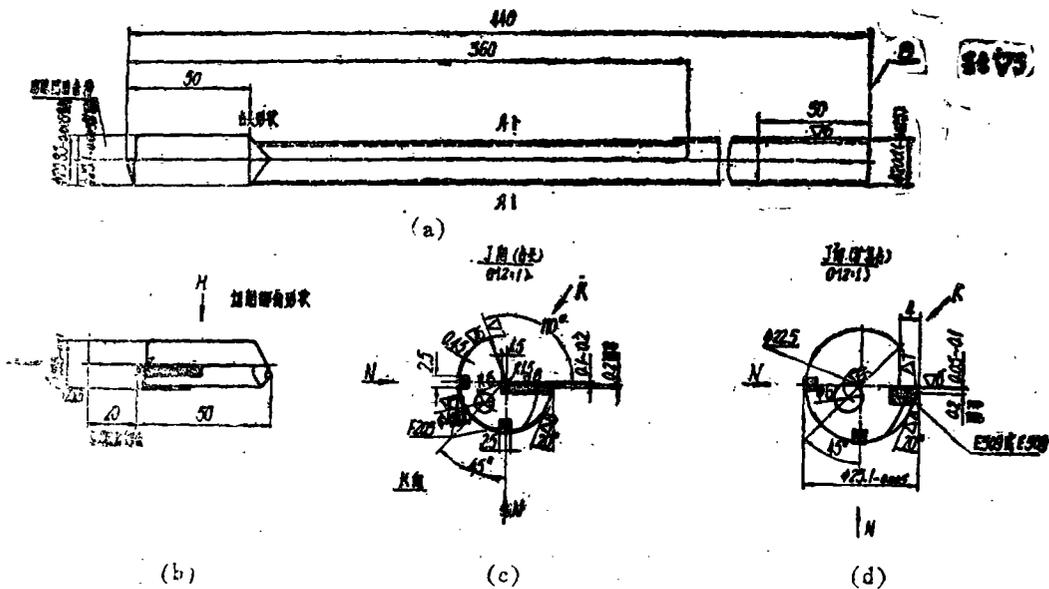


图 2 精钻头结构图

作用在精钻头内外切削刃上的作用力见图3。在钻削过程中始终要求PN径>PT径，这样在切削过程中切削合力挤向已加工表面，而钻头在该侧安置有导向挤压块，可以起到钻头的自我导向并同时使已加工孔挤光的作用。即

$$\left(\frac{D}{2} - e\right) \operatorname{tg} \beta_{\text{外}} > e \cdot \operatorname{tg} \beta_{\text{内}}$$

当取  $e = D/4$  时，则

$$\operatorname{tg} \beta_{\text{外}} > \operatorname{tg} \beta_{\text{内}}$$

通常工件材料的硬度愈低，内外角愈大，反之工件硬度愈高则内外角愈小。取外角  $\beta_{\text{外}} = 25^\circ - 30^\circ$  而内角  $\beta_{\text{内}} = 20^\circ - 25^\circ$ ，其效果较好，切屑的卷圈形及断屑长度均较理想（见图版13）。

精钻头外刃N的工作条件与麻花钻的切削刃相似，而内刃T的工作条件与镗刀的工作条件相似。为保证切削条件及一定的后角，因此前面必须低于钻头中心h。

$$h > \frac{S}{2\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha_T}$$

式中，S为走刀量（mm/转）； $\alpha_T$ 为钻头T刃上的后角。通常

$$h = (0.005 - 0.01) D$$

这样在切削过程中就排出直径为2h的一根针状切屑，称为零位心柱。零位心柱压在刀具前面上具有稳定钻削方向的作用。

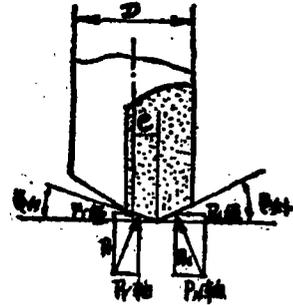


图3 切削力分析

#### 四、内螺纹的挤压攻丝工艺

内螺纹的挤压攻丝是利用无槽丝锥（图版I4）在普通或特别的专业机床上进行。

根据我们使用的经验，建议考虑以下几个工艺问题。

##### 1. 螺纹底孔的尺寸和精度要求

由于内螺纹挤压的过程是将大于螺纹中径的牙根部位金属挤向小于中径的牙尖部位。前者有效体积比后者大，故选择底孔直径也要比螺纹中径大。底孔太大会出现螺纹牙尖缺肉，底孔过小则金属挤满牙尖引起扭力矩的急剧上升，以致损坏丝锥和机床。底孔还应有表面光洁度要求，最好是  $\nabla 5 - \nabla 6$ ，以免挤出碎粒而影响螺纹精度。

底孔尺寸的计算方法多种，建议采用经验公式

$$d_b = d_p + (0.1 - 0.25) \text{ mm}$$

式中， $d_b$ 为螺纹底孔直径； $d_p$ 为螺纹中径。

底孔要有尺寸公差，取同尺寸螺纹内径公差的1/3—1/5为好。

##### 2. 挤丝速度的选取

挤丝速度一般认为在高速下进行，挤丝的效率较高，丝锥的寿命也较长。美国有人建议可以用同尺寸的钻削速度作为挤丝速度。从物理现象上讲，当挤压速度较小时，增加挤压速度对挤压没有影响，但当挤压速度较大时（ $V > 125 \text{ mm/S}$ ）挤压力随着挤压速度的增加而有下

降趋势,因而一般建议 $V=100-400\text{mm/S}$ 。但考虑到具体情况,譬如说盲孔挤丝,攻丝行程控制机构须要在主轴迅速停车下再反向回转退回,设备缺少刹车装置,用的是组合机床多轴挤丝,材质塑性较差而强度较大等等不利条件,因而选取较低的挤丝速度。这种做法虽比较保守,因为攻丝在生产线上往往都不是影响节拍时间的关键工序。为方便起见,常常直接选用切削丝锥对攻丝速度的选择。用特7/8"无槽丝锥对45号钢加工时,在不同的速度下扭矩的变化如图4所示。

### 3. 挤丝扭矩的决定

挤丝扭矩受很多因素的影响,诸如被加工材料的性能、被加工螺纹的大小(直径和螺距)、挤丝的速度,丝锥本身的钝化程度、底孔的大小和选用的润滑冷却液的性能等。虽然后三个因素的影响也很大(图5),但可以认为在正常情况下,挤丝扭矩仍只受被加工的材料性能、螺纹直径和螺距的大小有关,其计算公式可由积累数据统计后得到。建议对42C.M。在调质热处理后计算公式为

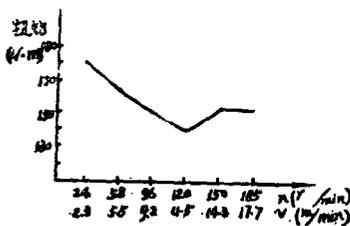


图4 不同转速时,特7/8"无槽丝锥对45号钢的扭矩曲线

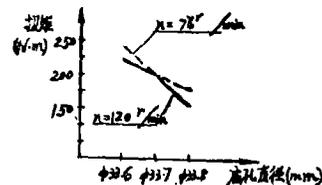


图5 用特1"无槽丝锥对45号钢在不同底孔直径下挤丝扭矩的变化曲线

料性能、螺纹直径和螺距的大小有关,其计算公式可由积累数据统计后得到。建议对42C.M。在调质热处理后计算公式为

$$M_{\text{扭}} = 2.12 \times d^{0.94} S^{1.7} \quad (N \cdot m)$$

式中, $M_{\text{扭}}$ 为挤丝扭矩;2.12为对特定材料(42C.M。)的计算常数; $d$ 为被挤螺纹公称直径(mm); $S$ 为被挤螺纹螺距(mm)。

在同等条件下,挤压攻丝扭矩和切削攻丝扭矩有什么差异呢?国内外资料说法不一,有的说前者大,有的说后者大,总的说是差不多。作者在实践中体会到上述情况都有发生,但多数数据说明挤丝扭矩比切丝扭矩约大30%。

### 4. 润滑冷却液的选择

挤压螺纹时,一般对非铁合金的表面挤压压力可达 $p=4\text{MPa}$ ,而对钢以及合金钢则表面挤压压力更大,达 $p=12.5\text{MPa}$ 以上。同时挤丝速度比较小。在这种情况下就不可能建立起油膜,因为油膜厚度在0.001mm以下时就会破裂,金属和金属之间就要产生直接的接触部分。这种情况称为“边界润滑”。适合挤丝的润滑剂应具有:(1)有良好的极压润滑性能;(2)有一定的热稳定性。因为这里的润滑是要求润滑剂能形成一层薄膜存在于工件和丝锥之间以防止彼此间直接接触。

在45号钢和42C.M。合金钢的挤压上,曾选用过水溶液的乳化液、10号和20号机油乳化切削液等,效果均不佳。最后找到 $M.S_2$ 油膏最理想,但须加少许蓖麻油并稀释后使用。

### 5. 挤丝设备的选择



意图见图9。

### 3. 丝锥的小径 $d_1$

切削丝锥的小径尺寸由于不参加切削作用，故仅规定其上限尺寸而对下偏差不作规定。但是，无槽丝锥的小径在挤压时起到消除毛刺和挤光表面，使牙型完整的作用。因此小径公差建议取  $+0.05\text{mm}$ 。

### 4. 工作部分锥度切入角 $\varphi$

无槽丝锥的工作一开始就是由齿尖进行挤压。这样必须使丝锥工作部分齿形是全齿形，并且按锥度排列并垂直于轴线。为此锥度部分切入角  $\varphi$  就显得十分重要。

$\varphi$  角过大，则挤压锥部齿数负荷量大，丝锥的导向性能也不好。 $\varphi$  角如果过小，虽单齿负荷量减少，但多次挤压，容易造成工件表面的冷硬现象，因而二者都将最终引起挤压扭矩的增加，对挤压反而不利。

$\varphi$  角的设计应和被加工材料的机械性能有关，也应考虑到螺孔是盲孔或通孔。建议选择  $\varphi = 5^\circ$  为宜。

### 5. 棱边数 $n$

无槽丝锥的截面呈多棱形。棱边数  $n$  越多，变形越平稳，单齿的作用力小。棱边数过多，同样会因多次挤压而带来冷硬现象反而使扭矩增大。此外棱边数还受铲磨量的限制，因此目前国内外常见的是三棱、四棱和六棱。建议 M8 以下用三棱，M16 以上用六棱，M30 以上用八棱。

### 6. 棱边铲磨量 $K$

用于无槽丝锥截面棱边的曲线形状有多种，它和加工材料的塑性、丝锥的强度、棱尖的磨损以及挤丝精度有关。但习惯用阿基米德曲线，其特点是曲线平滑，且制造丝锥用的铲磨凸轮便于制造。因此铲磨量可用下式计算

$$K = \frac{\pi D}{2n} \operatorname{tg} \alpha$$

式中， $D$  为丝锥大径， $n$  为棱边数； $d$  为铲磨曲线落角。建议  $\alpha = 4^\circ - 8^\circ$ 。

至于有关无槽丝锥其余参数的决定，可以参考同尺寸的切削丝锥进行。

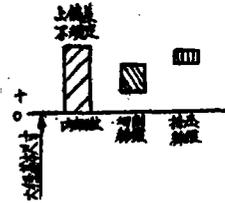


图 8  
丝锥大径公差带示意图

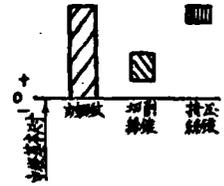


图 9  
丝锥中径公差带示意图

## 参 考 文 摘

- (1) Xia Zheng-quan Shen Zi-yong. Using Crush-Threading with Fluteless Tap for M22×2-1 Internal Thread in the Automatic Line for Connecting Rod of 16240Z Locomotive Diesel Engine, IXth ICPR, Cincinnati U.S.A., Aug. (1987).
- (2) 夏正权, 16240Z 柴油机连杆螺栓孔加工中央立柱式组合机床, 组合机床通讯, 2 (1979).
- (3) 夏正权、陈修兴, 连杆螺栓孔的高速精钻和挤压攻丝工艺, 铸锻焊及机械加工工艺论文集, 中国铁道出版社, (1979).
- (4) 夏正权、沈子镛、陈修兴, 16240Z 柴油机 42C.M. 连杆一级螺纹孔挤压攻丝, 中国机械工程学报, 15, 3—4 (1979).
- (4) 沈子镛、夏正权、陈修兴, M22×2-1 无槽丝锥的研制, 组合机床, 2 (1980).

## A High Precision and Large Diameter Internal Threading by Extrusion

Xia Zhengquan Shen Jiyong

### Abstract

This paper presents a technique of high precision and large diameter internal threading, with the intention of widening the use of internal threading by extrusion. Up to now, its use remains within the limits of non-ferrous metal like Al, Cu, and low-carbon steel, of small diameter ( $<16\text{mm}$ ) threaded hole.

It is assumed that the accuracy of internal thread depends on the accuracy of tap, while the positioning accuracy of threaded hole depends on that of bottom hole before threading.

In view of these, a high-speed precision drilling technic was worked out for preparing bottom hole of a C<sub>45</sub>-M<sub>2</sub> alloy connecting rod, and then the technic of cold tapping with a fluteless tap of large diameter (22—36mm) was adopted.

The results reveals a first grade accuracy of thread and  $\nabla 7$  surface finishment as well as other gains include 20—30% in tensile strength, 5—10% in shearing strength, above 40% in surface hardness, and 0.15mm in hardening depth.