

# 空心轴类零件深孔加工中的刀具振动分析

周巍

上海汽车变速器有限公司 上海 201815

**摘要：**通过以双离合变速器中的输入外轴试制加工为例，对现场调试过程数据和加工原理进行研究，详细分析了刀片角度、刀杆材料、转速及进给量对刀具振动的影响，选择合适材质的加工刀杆、采用 $90^\circ$ 主偏角刀尖圆弧小的刀片、合理的夹具结构、合适的转速及进给量等方式，有效消减深孔加工中的刀具振动问题，提升零件质量，降低产品报废率。

**关键词：**深孔；刀具振动；刀杆材料；主偏角；加工参数；夹具

## 1 序言

在变速器新产品齿轴类零件试制过程中，空心轴类零件的深孔加工往往成为整个零件交样过程中的瓶颈工序，影响到整机装配的节点。孔深与孔径之比 $>5$ 的孔加工即为深孔加工，而深孔加工中最突出的问题就是加工过程中的振刀。振刀在零件加工中是一种十分有害的现象，严重影响零件的表面质量及使用性能；刀具与工件间会产生相对位移，整个工艺系统将持续承受交变载荷的作用，使刀具极易磨损甚至崩刃，正常加工过程往往会通过减少切削用量来减少刀具振动，但是加工效率也会相应降低。因此，分析空心轴类零件的深孔加工过程中的刀具振动问题并提出有效减振、消振的方案很有必要。

## 2 刀具振动产生的原因

在进行DCT输入外轴试制过程中，精车工序镗深孔，由于刀具振动，内孔孔径尺寸和深孔轴向尺寸不稳定，尺寸调整量与实际变动量不同，导致零件不能满足工艺要求。

分析车刀杆加工内孔过程，主要原因如下。

1) 深孔加工处于半封闭环境，不能直接观察刀具的切削过程和走刀情况，同时在相对封闭的状态加工，不利于排屑及散热，可能导致被加工零件受

热变形和堵屑。

2) 刀具切削工件产生的切削力会使刀杆产生弹性变形，而切削产生的切屑断掉之后该弹性变形又会恢复，在这个过程中会形成有规律变化的镗削力 $F$ 。 $F$ 呈正弦波动， $F$ 的存在导致车削加工中的刀片出现颤动现象，当镗削力 $F$ 的变化频率在刀具的固有弹性变形频率范围内时，产生共振，刀杆的弹性变形加剧，颤动现象变为振动。

## 3 刀具振动对零件质量的影响

零件的加工精度主要由机床、夹具、刀具组成工艺系统在加工过程中的各种误差来决定。可分为两方面：一是在加工开始之前机床、刀具、夹具本身的制造误差或者安装误差；二是在调试加工和刀具切削过程中因切削力、切削热或者堵屑造成的加工表面划伤而产生的误差。

在输入外轴深孔加工工序，由于刀具振动产生的误差对零件质量的影响主要有以下两个方面。

(1) 表面粗糙度值大 精车深孔加工过程中由于易产生堵屑及过热，未及时排出的切屑刮伤零件表面，如图1所示。同时，刀具振动使工件和刀具之间产生让刀现象，形成波纹甚至挖刀痕，如图2所示。零件表面粗糙度不能满足精度要求，并且振刀情况不可控，有时候会造成无法返工的超差或报废。

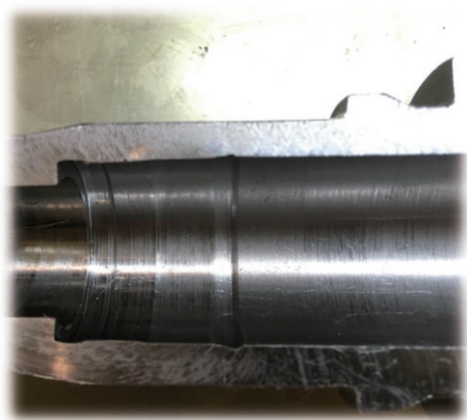


图1 内孔刮伤

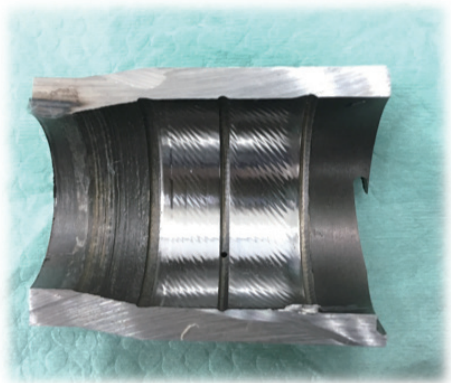


图2 波纹及挖刀痕

(2) 尺寸难以保证 零件的加工工艺尺寸要求如图3所示。振刀情况下刀具每次切削量不均匀，内孔可能出现锥度，且调整返工走刀过程中很难消除。图3中 $\phi 28.06\text{mm}$ 油封孔的轮廓报告如图4所示，

可以看出油封孔两段孔径是由同一刀具加工，但由于刀具振动导致孔径大小不同。在输入外轴精车及热后硬车油封孔的试制过程中出现反复调整，但工件的内孔尺寸及同轴度等尺寸无法保证的情况。超差零件测量数据见表1。

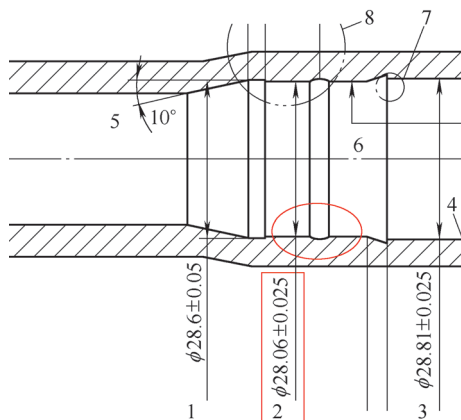


图3 零件工艺尺寸要求

注：图中1~8表示图样上控制计划的位置。

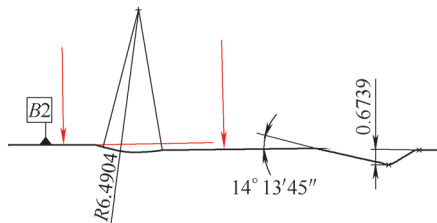


图4 油封孔轮廓报告

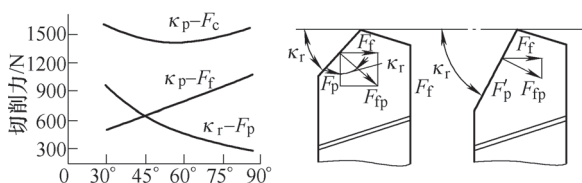
表1 输入外轴调试过程测量数据统计

| 热前油封孔调试过程检测 |             |         |         |         |         | 热后油封孔振纹零件检测 |             |             |         |
|-------------|-------------|---------|---------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|---------|
| 工艺尺寸要求      |             | 零件1测量尺寸 |         | 零件2测量尺寸 |         | 工艺尺寸要求      |             | 零件3测量尺寸     |         |
| 工艺尺寸        | 要求数值        | 油封孔1内   | 油封孔2外   | 油封孔1内   | 油封孔2外   | 工艺尺寸        | 要求数值        | 油封孔1内       | 油封孔2外   |
| 直径/mm       | 28.06±0.025 | 27.9431 | 27.8756 | 28.1051 | 28.1701 | 直径/mm       | 28.26±0.025 | 28.2531     | 28.2482 |
| 表面粗糙度值/μm   | 3.2         | 4.3     | 3.8     | 3.6     | 2.8     | 表面粗糙度值/μm   | 0.4~1.6     | 1.68        | 1.46    |
| 同轴度/mm      | 0.015       | 0.0231  |         | 0.0214  |         | 径向圆跳动/mm    | 0.05        | 0.018       |         |
| 圆弧/mm       | 6.5         | 6.838   |         | 6.43    |         | 圆度/mm       | 0.01        | 0.112       | 0.0065  |
| 槽深/mm       | 0.2         | 0.14    |         | 0.178   |         | 直线度/mm      | 0.01        | 0.0138      |         |
|             |             |         |         |         |         | 平行度/mm      | 0.01        | 0.0319      |         |
|             |             |         |         |         |         | 圆弧/mm       | 5           | 5.0058      |         |
|             |             |         |         |         |         | 角度          | 15°         | 13° 25′ 42″ |         |
|             |             |         |         |         |         | 深度/mm       | 0.5±0.2     | 0.5918      |         |

## 4 消除深孔加工刀具振动的措施

### 4.1 选择合理刀片、刀杆降低切削力

深孔加工中的刀杆采用整体硬质合金或者减振刀杆,切削刀片采用 $90^\circ$ 主偏角 $\kappa_r$ 的刀具可有效减振。深孔加工由于尺寸限制,刀杆的长径比 $>10$ ,需采用具有减振功能的刀杆,刀具的主偏角 $\kappa_r$ 与切削力的关系曲线如图5a所示。由于增大主偏角时径向切削力 $F_p$ 减小,轴向切削力 $F_f$ 增大,故在不影响刀具强度的情况下,深孔加工或者细长轴加工应尽量增大车刀主偏角。



a) 主偏角与切削力变化曲线 b) 主偏角对切削力方向的影响

图5 主偏角 $\kappa_r$ 与切削力的关系

1) 减小刀尖圆弧半径 $r_s$ 。在相同背吃刀量的情况下,由于刀尖圆弧半径越大,切削力越大,刀杆产生振动的可能性越高,故减小刀尖圆弧半径可有效降低径向切削力。

2) 选择刃口更锋利的刀片。机加工刀片按是否涂层可分为涂层和非涂层刀片,由于刀具涂层时为保证刃口涂层的黏结强度,需进行刃口的钝化处理,所以非涂层刀片往往比涂层刀片锋利;涂层刀片中,由于化学涂层材料厚度原因,故PCD(物理涂层)也比VCD(化学涂层)刃口锋利。

### 4.2 调整切削参数减小刀具振动

1) 选择合适的转速 $n$ 。利用数控车床进行深孔加工时,工件的转速直接影响到零件的表面质量、刀具寿命及加工效率。转速过低易造成刀片刃口粘刃,影响表面粗糙度,不满足工艺要求;而转速高于一定值时,会导致切削噪声大、切削热量大、温度高且刀具易磨损等后果。因此调试过程中转速需在合理的范围内,以保证零件质量,同时降低刀具消耗,提高加工效率。

2) 背吃刀量 $a_p$ 和进给量 $f$ 的选择。深孔加工中进给量影响到切屑的形状和长度,进给量过大或者过小都会使切屑断屑不畅,造成堵屑;背吃刀量增大时,切削面积增大导致切削力呈正比增大。由于

两者都直接影响零件表面质量以及加工效率,所以选择合适进给量十分重要。在空心轴的深孔加工中主要根据零件材料、内孔大小并结合机床调整过程中零件表面质量和排屑情况,来综合确定 $a_p$ 和 $f$ 的大小。

### 4.3 根据零件尺寸选择合理的工装夹具

(1) 夹具的选择 在空心轴数控加工中,应选择加长卡爪,使零件尾端中空,便于切屑排出,以避免堵屑、过热等情况。

(2) 装夹方案的优化 装夹定位面及基准的选择是影响零件深孔加工的重要因素,应根据零件结构选择合适的夹紧位置以及基准面,这是后续调试加工满足工艺尺寸的基础。在保证两定位基准精度情况下,合理采用过定位的方式可增加工件在加工中的刚性,减小工件与刀具之间的相对位移。

在输入外轴精车工序镗深孔调整过程中,发现工艺中夹持挡长度过短,且位置与最深的油封挡距离较远(见图6),故镗油封挡时,切削力可能导致零件抖动、让刀等情况,无法保证油封挡尺寸,也无法进行下一步的调试。通过对零件结构与卡爪装夹方案进行分析,由3点夹紧改为3+3的主副夹紧,其中夹持挡为主夹紧位置,旁边一挡外径采用卡爪限位(见图7),减小镗深孔过程中的零件晃动,可有效提高内孔尺寸精度与表面质量。

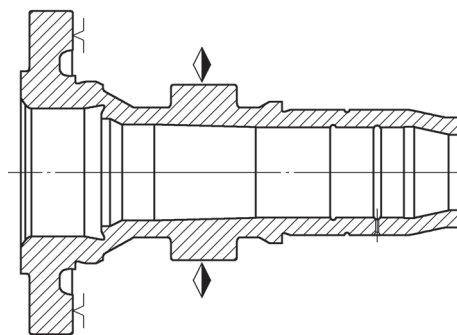


图6 原工艺定位夹紧方式

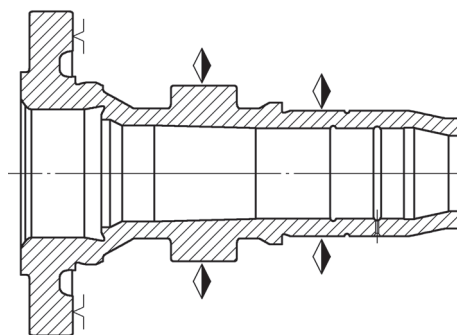


图7 改进后的定位夹紧方式

经过对刀具、夹具、切削参数的综合调整，查阅相关刀具供应商的刀具资料，选择主偏角为 $90^\circ$ 的防振硬质合金刀杆，刀尖圆弧 $r_s$ 为0.4mm的DCMT刀片，同时转速调整为1300r/min，进给量 $f=0.15\text{mm/r}$ ，并采用改进后增加定位的卡爪，在深孔加工前增加一道预车削工序，以保证2个夹紧挡的同轴度。

最终精车零件热前油封挡表面质量，如图8所示；热后硬车油封孔表面无明显振纹，如图9所示。相应检测数据见表2，内孔孔径、同轴度、表面粗糙度等均在工艺要求范围内，从而验证了采取该措施后消除深孔加工中刀具振动的有效性。



图8 热前油封挡成品

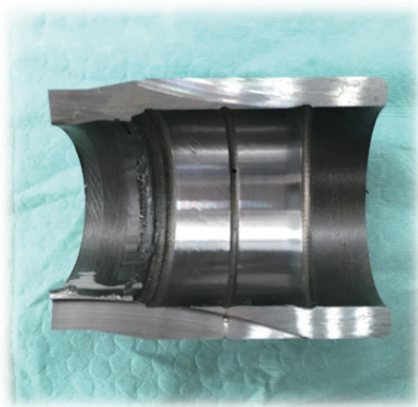


图9 热后油封挡成品

## 5 结束语

基于双离合变速器中输入外轴试制阶段制深孔加工中刀具振动现象，对空心轴深孔加工进行了工艺及加工方案优化的分析。综合考虑刀杆材料、刀具参数、转速和进给量、夹具和装夹方案对零件质量、加工效率和刀具磨损的影响，从刀具、切削参数及工装夹具三方面进行合理选择及优化，有效地减小了切削力及工件和刀具之间的相对位移，从而消除了刀具振动，提高了零件的加工精度，提升了生产效率。

表2 合格零件测量数据

| 热前油封孔合格数据     |             |         |        | 热后油封孔合格数据     |             |             |        |
|---------------|-------------|---------|--------|---------------|-------------|-------------|--------|
| 工艺尺寸要求        |             | 零件2测量尺寸 |        | 工艺尺寸要求        |             | 零件3测量尺寸     |        |
| 工艺尺寸          | 要求数值        | 油封孔1内   | 油封孔2外  | 工艺尺寸          | 要求数值        | 油封孔1内       | 油封孔2外  |
| 直径/mm         | 28.06±0.025 | 28.0681 | 28.054 | 直径/mm         | 28.06±0.025 | 28.258      | 28.262 |
| 表面粗糙度值/<br>μm | 3.2         | 2.6     | 1.8    | 表面粗糙度值/<br>μm | 0.4~1.6     | 1.37        | 1.25   |
| 同轴度/mm        | 0.015       | 0.0142  |        | 径向圆跳动/mm      | 0.05        | 0.018       |        |
| 圆弧/mm         | 6.5         | 6.563   |        | 圆度/mm         | 0.05        | 0.0099      | 0.0089 |
| 槽深/mm         | 6.5         | 0.186   |        | 直线度/mm        | 0.01        | 0.0068      |        |
|               |             |         |        | 平行度/mm        | 0.01        | 0.0069      |        |
|               |             |         |        | 圆弧/mm         | 5           | 5.0216      |        |
|               |             |         |        | 角度            | 15°         | 14° 53′ 55″ |        |
|               |             |         |        | 深度/mm         | 0.5±0.2     | 0.5689      |        |

## 参考文献:

[1] 王侃, 杨艺, 张恒, 等. 轴类零件深孔钻削工艺的

改进[J]. 金属加工(冷加工), 2014(22): 43-44.