

MBF动平衡小孔微米镗刀解决精密小孔镗削

■ 上海松德数控刀具公司供稿

摘要：在高速、高精加工的引导下，专注于孔加工领域，创新研发出一种典型的镗孔刀具——MBF动平衡小孔微米镗刀。

高效和精度一直是机械加工领域的追求目标。伴随着数控机床技术的发展，机械加工技术以日新月异的速度蓬勃发展，各种新技术的开发、创新不断应运而生，并最终转化成新颖、节能、高效的加工技术。同时，优质、高效、节能、低耗和环保的新观念也逐渐深入人心。传统的加工模式已经无法适应产业发展的需要，高速、高精加工正成为一种绿色、高效的加工模式而得到广泛应用。

1. 小孔镗削质量的评判及特点

随着我国航空航天制造业、汽车工业的飞速发展，传统的高精度小孔加工工艺已经不能满足现代化的加工需求，迫切需要一种全新的小孔加工工艺来替代。

将 $D \leq 12\text{mm}$ 的孔定义为小孔，取 $\phi 0.4 \sim \phi 12\text{mm}$ 为可镗削加工区间，基孔制，公差代号H6，查询机械设计手册， $\phi 12\text{H6}$ 孔的公差范围为 $0 \sim +0.011\text{mm}$ ， $\phi 3\text{H6}$ 及以下孔的公差范围为 $0 \sim +0.006\text{mm}$ 。

对一个高质量小孔的评判，要求其具备：良好的表面粗糙度；良好的尺寸精度；良好的形状精度；良好的位置精度。这4个要求中，影响小孔形状精度及位置精度的主要因素是机床主轴精度及系统控制精度，在中高档数控机床较为普及的情况下，暂且忽略这些影响因素。小孔镗刀杆的自身刚性也是影响小孔形状精度的一个因素，我们研发的MBF小孔微米镗刀所配备的镗刀杆直径定义为镗孔深度的3倍，全部采用硬质合金杆制作，所以也忽略此影响因素。重点研究的对象是——MBF小孔微米镗刀，它是如何来保证精密小孔的表面粗糙度及小孔的尺寸调节精度的？加工表面质量的影响因素有：切削液的选择、刀具的质量、工件材料自身的特性及切削参数的选择等，本文将选择刀具动平衡质量与微调进给机构作为研究对象，来研究对孔加工表面质量及尺寸精度的影响。

目前国内外常用于高速切削的主要刀具材料：TiC（N）基

硬质合金（金属陶瓷）、硬质合金涂层刀具、陶瓷刀具、聚晶金刚石（PCD）及聚晶立方氮化硼（PCBN）。在加工铝合金、黄铜及青铜时，切削线速度 V_c 可达 $300 \sim 1\,000\text{m/min}$ 。根据 $V_c = \pi \cdot d \cdot n / 1\,000$ ，取 $V_c = 300\text{m/min}$ ，理论计算在镗削 $\phi 0.4 \sim \phi 12\text{mm}$ 孔时，对应主轴转速为 $8\,000 \sim 238\,000\text{r/min}$ ；取 $V_c = 1\,000\text{m/min}$ ，理论计算在镗削 $\phi 0.4 \sim \phi 12\text{mm}$ 孔时，则对应主轴转速为 $265\,000 \sim 796\,000\text{r/min}$ 。

通过查阅资料及计算，精密小孔镗削的特点有两点：①公差范围窄。②机床主轴转速要求高。

2. 刀具动平衡的研究

在高速切削刀具材料的支持下，追求高转速，从而提升加工效率是大家的共识，但前提是必须有相应的技术支撑，否则，轻则缩短刀具寿命，影响产品质量；重则发生极为恶劣的安全生产事故。离心力的计算公式 $F = M \cdot V^2 / R = M \cdot \omega^2 \cdot R = F_{\text{主轴}} + F_{\text{刀具}}$ ，假设高速机床主轴的动平衡非常好，理想状态下主轴的质心

落在回转轴线上,则有 $R_{\text{主轴}}=0$, $F_{\text{主轴}}=0$,在此忽略它对离心力的影响。研究上述离心力计算公式得出:随着主轴转速的增加,由于刀具系统质量分布不平衡而产生的离心力将呈平方级数增长。若刀具系统质量为10kg,在实际使用过程中,即使质量中心与回转轴线仅出现0.005mm的偏心距,通过计算,在转速为20 000 r/min的情况下,也会产生220N以上的惯性离心力。而当转速增加到30 000r/min时,产生的惯性离心力将剧增到493N以上。在高速回转下,此惯性离心力以高频率状态作用在轴承上,使主轴轴承受力的方向不断发生变化,从而引起机床主轴的振动,导致加工表面粗糙度值的增大,加剧了刀具的磨损,使同批次的工件质量、尺寸无法保证一致,增加企业的制造成本。

通过以上分析得出结论:在高速加工状态下,要想获得良好的表面质量,刀具动平衡是不可缺少的必要条件。MBF动平衡小孔微米镗刀采用独有的专利技术——可调动平衡环装置。其采用质量不等的双平衡块,在双向调整时产生的不平衡量差值,去补偿刀体自身的质心不平衡量,经过科学严密的计算,从而达到最优化的动平衡状态。

3. 微调机构的研究

高精度数控机床的普及,使人们对于金属加工的切削精度提出了更高的要求,现在数控系统的可控精度已达0.001mm级别。但作为孔加工来说,高精度的加工中心可以解决孔系间位置的精

度、孔的圆度精度等要求,但对孔本身的尺寸精度,则取决于镗孔刀具的调整精度与可靠性。以7级精度的小孔加工为例, $\phi 12\text{H}7$ 公差为 $0\sim+0.018\text{mm}$,只有很窄的加工范围。在一些特殊要求的场合,例如微型轴承孔,小孔的公差要求普遍控制在0.004mm以内,此时,采用普通的调整精度为0.01mm/格的精镗刀,很难满足加工需求。这样就降低了产品质量的可靠性,造成产品不合格率的上升,增加了企业的加工成本工,降低了产品的市场竞争力。

MBF动平衡小孔微米镗刀采用独有的专利技术——斜面微调进给机构。这种斜面微动进给结构解决了现有技术为了得到小尺寸的调整量,牺牲螺杆、螺母刚性的问题。比如,要刻出每格调整 $\phi 0.001\text{mm}$ 精度的刻线,为了操作方便,观测不混淆,相邻刻线预先给到1mm左右。设刻度盘 $\phi 20\text{mm}$,周长 $\approx 63\text{mm}$,设刻线60格,则每转一圈,直径调整0.06mm,对应的螺距为0.03mm,显然,这么小的螺距,加工和检测很困难,即便能保证加工要求,螺母与螺杆的配合刚性也很薄弱,在实际加工中,很容易受到切削力的破坏。

MBF动平衡小孔微米镗刀的微调系统,选用较大螺距的精密螺纹配合与V形斜面相结合,可靠、方便地实现了每格 $\phi 0.001\text{mm}$ 的调整精度。且刀尖在切削过程中所承受的径向压力直接作用在微调螺母的斜面上,精密螺纹副不受切削力的影响,保证了微调精度的长久保持

性。这种结构还有一个显著的优点——结构自锁。一般钢件接触面的摩擦系数 $f=0.05\sim 0.10$ (有润滑),故摩擦角 $\psi=2.86^\circ\sim 5.71^\circ$,对应的升角 $\alpha=5.7^\circ\sim 11.4^\circ$,本斜面结构具有更好的自锁特性,直接表现为调整完刻度盘之后,不需要对微调螺母锁紧,消除了由于锁紧而引起的微调尺寸变化,保证了有效的微调精度。

4. 结果验证

(1) 测试方案1,验证刀具系统动平衡对表面粗糙度的影响。本试验在某立式加工中心上进行,机床结构为“十字”滑台结构,主轴在Z轴实现上下移动,工件在X轴、Y轴水平工作台上移动。

方法描述:利用haimer动平衡仪,通过可调动平衡环,人为干预动平衡等级,每调整一次动平衡,镗3个孔(固定镗孔尺寸 $\phi 11\text{mm}$),取一组数据,计划取10组数据用于分析。

备料:45钢方料,50mm $\times$ 80mm $\times$ 90mm,硬度22HRC,液压平口钳上活,预钻孔30个, $\phi 10.7\text{mm}$ 孔深35mm,孔口倒角 $1\times 45^\circ$ (见图1)。



图 1

备刀柄:将所需的刀柄BT40 K40 $\times$ 50在德国haimer动平衡

仪上做平衡校正，设置参数：
 $n=20\,000\text{r/min}$ ，采用去除材料的方式，使 $G<1.0$ 。

备镗刀：MBF D0.4-12.K40.
Z1.63.C。

备镗刀杆：HT10E D11-12.
WB06.36.C（含刀片）。

备表面粗糙度仪：INSIZE
ISR-S400。

切削参数设置：主轴转速
 $n=5\,500\text{r/min}$ ， $f=320\text{mm/min}$ ，镗
孔 $\phi\,11\text{mm}$ 深 20mm 。

数据统计如图2所示。

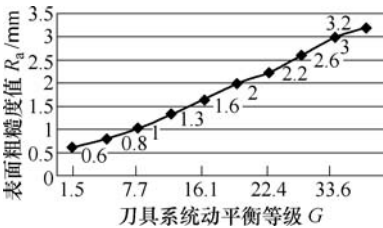


图 2

从图2可以看出，镗孔加工的表面粗糙度受到刀具系统动平衡的影响，且动平衡等级越差，表面粗糙度随之越差。加工表面粗糙度与刀具系统的动平衡在切削参数一定的情况下，呈现一定的线性关系。

（2）测试方案2，验证微调进给机构的稳定性与可靠性。备内径测量表Mitutoyo 10~18.5，分辨率为 0.001mm 。

微调进给机构稳定性测试。
方法描述：利用hammer动平衡仪，通过可调动平衡环，人为干预动平衡等级，将动平衡等级调整至G15（根据VDI加56（DIN/ISO10816）“机械振动评定标准”的规定，将使主轴轴承产生最大振动速度 $1\sim2.8\text{mm/s}$ 的不平衡量作为刀具系统允许不平衡量的上限值，综合考虑高速旋转刀

具的安全要求和使用方便性，工作组提出一个折中的刀具系统平衡等级要求，选取G16作为统一的上限值），镗5个孔为一组，在第一个孔校对千分表零位，测量其余4个孔直径尺寸，做尺寸对比，调整6次，共取6组数据进行尺寸稳定性分析（见表1）。

分析表1数据，在切宽变化的情况下，微调进给机构的依然能

保证优异的稳定性。

微调进给机构的可靠性测试。方法描述：镗5个孔，深 20mm ，镗完第一个孔之后，程序暂停，直接同方向调整刻度盘，不用回间隙，也不用锁紧，再镗下一个孔，依次加工5个孔，内径量表在第一个孔校对零位，测量其余孔的尺寸，记录如表2、表3和表4所示。

表 1

镗孔尺寸/mm	$\phi\,11.10$	$\phi\,11.20$	$\phi\,11.30$	$\phi\,11.40$	$\phi\,11.50$	$\phi\,11.60$
直径实测/mm	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
同批误差	0	0	0	0	0	0

表 2

间隔调大 0.001mm （测试1）			间隔调大 0.002mm （测试2）		
转速/（ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ）	5 500		转速/（ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ）	5 500	
进给/（ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ）	320		进给/（ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ）	320	
序号	理论直径/ μm	实测数值/ μm	序号	理论直径/ μm	实测数值/ μm
1	0	0	1	0	0
2	+1	+1	2	+2	+2
3	+2	+1	3	+4	+5
4	+3	+2	4	+6	+6
5	+4	4	5	+8	+8
最大误差 0.001mm			最大误差 0.001mm		
表面粗糙度质量良好			表面粗糙度质量良好		

表 3

间隔调大0.003 (测试3)			间隔调大0.004 (测试4)		
转速/ (r·min ⁻¹)	5 500		转速/ (r·min ⁻¹)	5 500	
进给/ (mm·min ⁻¹)	320		进给/ (mm·min ⁻¹)	320	
序号	理论直径 / μ m	实测数值 / μ m	序号	理论直径 / μ m	实测数值 / μ m
1	0	0	1	0	0
2	+3	+3	2	+4	+4
3	+6	+6	3	+8	+7
4	+9	+10	4	+12	+12
5	+12	+12	5	+16	+16
最大误差0.001mm			最大误差0.001mm		
表面粗糙度质量良好			表面粗糙度质量良好		

表 4

间隔调大0.005 (测试5)			间隔调大0.006 (测试6)		
转速/ (r·min ⁻¹)	5 500		转速/ (r·min ⁻¹)	5 500	
进给/ (mm·min ⁻¹)	320		进给/ (mm·min ⁻¹)	320	
序号	理论直径/ μ m	实测数值/ μ m	序号	理论直径/ μ m	实测数值/ μ m
1	0	0	1	0	0
2	+5	+5	2	+6	+6
3	+10	+10	3	+12	+12
4	+15	+15	4	+18	+19
5	+20	20	5	+24	+25
最大误差0.001mm			最大误差0.001mm		
表面粗糙度质量良好			表面粗糙度质量良好		

分析以上记录数据得出：①斜面微进给机构是可靠的，自锁性能是可靠的。②连续、同向微调的性能优异，实现了真正意义上每格0.001mm的可控调整。③微米级调整安全，操作方便、可靠。

5. 结语

精密小孔镗削加工，表面粗糙度质量难提高、尺寸难保证，是由多方面因素造成的。本文主要从刀具系统的动平衡与微调进给机构进行说明，并进行了一系列的试验。通过人为地控制刀具

系统动平衡，建立了动平衡与加工表面粗糙度的关系，并通过试验，验证了微调精度的可靠性，为精密小孔镗削技术提供了工艺参考。**MW**

(收稿日期：20151120)