球头铣刀与仿形铣刀加工螺旋曲面经济性比较

■ 大连橡胶塑料机械股份有限公司 （辽宁 116036） 杨 建

摘要：橡塑机械中螺旋元件铣螺槽的加工属于仿形加工。仿形加工中的粗、半精和精加工工序根据追求的目标不同，所使用的刀具也不同。本文以螺旋元件铣螺槽的实际加工为例，介绍所使用的刀具种类，并对仿形刀、球头刀在半精加工中的加工成本、加工效率等进行定量、定性分析。

工程生产中经常遇到一些螺旋面、槽工件的加工，如橡塑机械挤出机螺杆、注塑机螺杆、斜齿轮及密炼机转子等。

由于工程类零件结构大，因此多在大型加工中心或螺杆铣等机床上加工此类零部件，所使用的刀具有球头铣刀、成形铣刀（自制，又名“馒头”刀）。

此外，随着国外一些刀具厂家引入了仿形铣刀以后，近几年圆刀片盘铣刀在螺旋面、槽的加工中得到了普遍应用。常用于螺旋面、槽铣削加工的刀具如图1所示。

1. 刀具的适应性

（1）“馒头”刀。“馒头”刀有整体高速钢式和合金焊接式，属于自制专用刀具。根据刀具的材质和精度，只能用于普通车、铣床螺旋元件的粗铣加工。也就是说，“馒头”铣刀只能用



(a) (b) (c)

图1 螺旋加工用刀示意图

压紧力大、变形也大；精加工时加工余量少、切削力小，因此压紧力也需要的小，能最大程度地减小压紧工件时所产生的变形。③以磨轴承室同工序加工的内孔为校正基面，利用杠杆百分表校正工件的圆跳动在0.01mm以内，能有效地保证双止口与轴承室同轴度0.04mm的设计要求。

3. 结语

通过上述的工艺改进与生产验证，前期存在的因变形导致形位公差超差的现象得到了改善，效果十分显著。经过对工艺改善后的加工产品进行批量抽样检测，可发现最难控制的双止口不规则变形，由原来的0.025～0.07mm缩小到了0.008～0.02mm；轴承室与止口的同轴度则控制在0.02～0.025mm，完全达到设计图样的要求，合格率由原来的86%提高到了现在的100%，从根本上提高了产品的质量。

参考文献：

[1] 杨叔子. 机械加工工艺师手册[M].北京：机械工艺出版社，2001.

[2] 倪森寿. 机械制造工艺与装备[M].北京：化学工业出版社，2003.

[3] 肖继德，陈宁平.机床夹具设计[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

MW（收稿日期：20151215）

于普通机床粗加工。由于普通机床功率大、转速低，可大切深，因此选用“馒头”刀是比较经济、合理的优化方案。

（2）仿形铣刀。仿形铣刀是数控加工用合金铣刀，可根据所加工的工件材料的不同而选择不同的刀片材料和槽形。以山特维克可乐满刀具为例，有适合粗加工的CoroMill 200型刀，用于坚固的面铣和仿形铣；还有既可粗加工又可半精加工的CoroMill 300型刀，用于轻型面铣和仿形铣。根据经验，当工件结构（即螺槽）较窄时，仿形铣刀的应用会受到一定的限制。

（3）球头铣刀。本文指数控机床上使用的机夹球刀，如CoroMill 216型，多用于仿形铣的半精加工以及表面质量不高的仿形精加工。

2. 加工效率比较

由于“馒头”刀用于普通机床加工，与数控机床没有可比性，在此只对仿形铣刀与球头铣刀半精（或粗）加工螺旋面的效率进行比较。

图2所示为螺旋元件实体示意图，按照工艺要求，该件在普通机床上进行粗加工，各面留量为4mm左右。热处理等工序后，再安排到数控加工中心上，进行半精、精加工（或叫数控机床的粗、精加工，以下称半精、精加工）。为了比较方便，将螺旋面简化成斜面，两种刀完成相同的表面粗糙度加工时，所用的时间少者则效率高。

同一工件表面，当表面加工精度相同时，其加工时间与刀轴转速n、进给速度F、背吃刀量a_p以及刀轨数等有关。

（1）刀轨数。假设满足表面粗糙度要求的残余高度值为μμm；盘铣刀刀具直径为40mm，刀片半径为6mm；球刀直径为20mm，R为10mm；此时的步距分别为L_r和L_R，简化计算如下。

在△abc中（见图3），ac为刀半径R，ab为$R-\mu$，bc为$L_R/2$，于是得：$R^2=(R-\mu)^2+(L_R/2)^2$，即$L_R=\sqrt{8R\mu-4\mu^2}$。

由于仿形铣刀的切削刃仍为圆切削刃，因此公式相同，大小为：$L_r=\sqrt{8r\mu-4\mu^2}$。

当斜面（近似曲面，可以算曲面展开长）的长为L时，可算出加工整个螺旋面的表面粗糙度值为μμm时两种刀具各需的刀轨数，分别为L/L_R和L/L_r。为计算方便，假设μ=0.1μm，L=100mm，则刀轨数为

$$M_{仿}=100/\sqrt{8r\mu-4\mu^2}\approx 46（刀）$$

$$M_{球}=100/\sqrt{8R\mu-4\mu^2}\approx 36（刀）$$

即两种刀切削同一平面，表面粗糙度值相同时，仿形铣刀需要走46刀，球刀需要走36刀。

（2）切削参数。根据机床性能、工件材料和刀具材料及刀片槽型确定切削参数如下。

仿形铣刀。仿形铣刀最大切深6mm，切深1～6mm时，每齿进

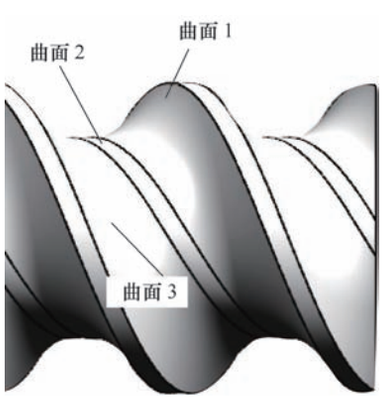


图2 螺旋元件示意图

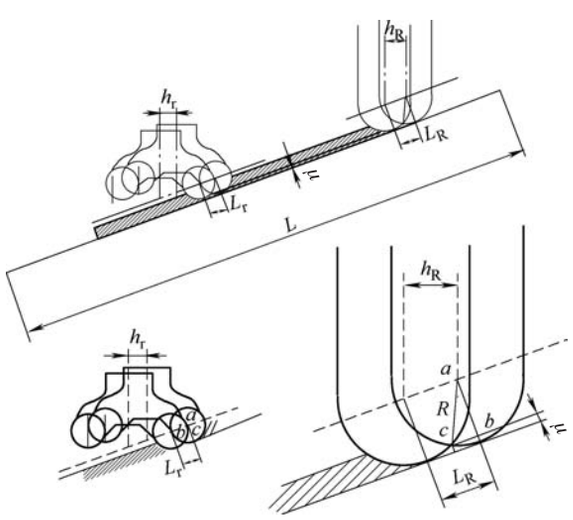


图3 两种刀具步距计算示意图

给f_z=0.15～0.27mm。根据实际工况，取切深a_p=4mm，每齿进给f_z=0.16mm，最大切屑厚0.16mm，此时可在刀具样本上查得最大切削速度V_{max}=140m/min。考虑刀片实际工况与样本上的差异，取有效切削速度V_e=100m/min。

a_p为4mm时，有效切削半径及转速计算如下

$$D_e = D_3 - i_c + \sqrt{i_c^2 - (i_c - 2 \times a_p)^2} = 40 - 12 + \sqrt{12^2 - (12 - 2 \times 4)^2}$$

$$\approx 39.314\text{mm}$$

式中，D_3为刀具直径（mm）；i_c为刀片直径（mm）；a_p为切削深度（mm）；D_e为有效切削半径（mm）。

由此可计算转速

$$n = 1\,000V_e / \pi D_e \approx 810\text{r/min}$$

式中，V_e为有效切削速度（m/min）。

考虑机床性能、加工成本等因素，确定加工时仿形铣刀转速n=800r/min，进给速度F按4齿计算：$F = f_z \cdot z \cdot n$=512mm/min。

现假设螺旋面的长为1 000mm，如此选用仿形铣刀完成宽为100mm工件的加工所需要的时间大约为

$$t = 1\,000/512 \times 46 \approx 90\text{min}$$

球刀。R10mm球刀最大切深可达17.9mm，根据实际工况，取切深a_p=4mm，f_z=0.15mm，切屑厚a_p=0.15mm，刀片为4230（以CoroMill 216为例）时，V_{max}=165m/min。根据实际工况与样本的差异，取V_e=110m/min。当a_p=4mm时，有效切削半径及转速计算如下

$$D_e = 2 \times \sqrt{a_p \times (D_c - a_p)} = 2 \times \sqrt{4 \times (20 - 4)} \approx 16\text{mm}$$

由此可计算转速

$$n = 1\,000V_e / \pi D_e \approx 2\,189\text{r/min}$$

考虑上述相同的原因，确定球头铣刀有效加工转速为2 000r/min，于是算得进给速度F为480mm/min。如此用球头刀加工长度为1 000mm、宽为100mm的工件所需要的时间大约为

$$t = 1\,000/480 \times 36 \approx 75\text{min}$$

式中所有符号意义同仿形铣刀。

通过上述计算可以看出，ϕ40mm仿形铣刀加工效率低于ϕ20mm球刀的加工效率。尽管上述计算是以斜面代替曲面，而且步距是沿斜面方向，但我们仍认为上述计算是合理的，足以比较两种刀具的效率。因为由斜面数据变成与刀轴垂直面内的数据只差一个角度函数，也即两个刀具相当于变化了一个固定的、相等的比例常数。

3. 刀具成本

从刀具成本上，仿形铣刀刀片单价低，且整个圆周都是切削刃，如果工件结构满足要求的情况下，选择仿形铣刀加工螺旋面、槽是刀具成本最优的加工方案。而球头铣刀刀片单价高，切削刃相对较少，尤其是难加工材料，圆刀片几乎都可应对。

4. 结语

以上是以斜面代替曲面得出的两种刀具的理论加工时间，不是实际曲面加工所消耗的时间。但作为一种理论比较，上述简化计算足以说明：就本例中的切削工况，ϕ40mm仿形铣刀所用的加工时间与ϕ20mm球头铣刀相差15min，也即ϕ20mm球刀效率高；刀片成本ϕ40mm铣刀低。那么究竟应该选哪种刀其性价比更高呢？通过计算及实际验证，如果是单件生产而且工件较大时，则应选用仿形铣刀，原因是圆刀片刀具转速低，相对来说机床和刀片磨损都较小，而且刀片一处刃磨损了，可以转个角度再继续加工，既节省了换刀时间，也节省了刀片数，故总体来看，单件产品的生产选仿形铣刀总性价比高；如果是批量生产，而且零件又比较小，那效率就是第一指标，选用球刀性价比较高；对于精加工，由于加工精度的要求，故只能选用球头铣刀；如果是难切削材料，则只要结构允许，选用仿形铣刀是最佳方案。

参考文献：

[1] 赵世田. 自由曲面加工刀具路径轨迹规划算法研究[D]. 南京：南京航空航天大学机械电子工程系，2011.

[2] 晏初宏，李春雄. 数控加工工艺与编程[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

MW（收稿日期：20151214）