

每齿进给量与切屑厚度的关系分析

■ 上汽通用汽车 (200120) 邓红星 林雨芳

摘要: 切削三要素中, 在切削速度和背吃刀量一定时, 进给量的设定起着非常关键的作用, 而切削厚度体现了进给量的大小, 通过分析进给量与切屑厚度的关系, 推导出一种平面铣削、曲轴轴颈外铣和内铣时进给量与切屑厚度的计算公式, 便于新项目规划时设定合理的切削参数, 也可指导现有生产线切削参数的优化, 同样可用于加工中心差补铣轴或者差补铣孔时的计算。

刀具切削三要素为切削速度、进给量和背吃刀量。切削速度主要由刀具材质决定, 背吃刀量由工艺余量决定, 进给量由刀具材质、几何尺寸、工件材质以及机床参数等决定。进给量直接影响着刀具寿命、切削效率、刀具负荷及机床主轴负载。切屑厚度的大小体现了每齿进给量的大小, 在其他条件一定时, 每齿进给量越大, 切屑越厚, 刀具要承受的切削力越大, 机床主轴的切削功率也会越大。本文通过对铣削的分析, 推导出一种平面铣削、曲轴轴颈外铣及内铣时每齿进给量与切屑厚度的关系公式。

1. 切屑厚度

(1) 切屑的形成过程。切屑的形成过程是一种挤压剪切的过程, 被切削的金属主要经历剪切滑移变形, 最终从工件剥离而形成切屑, 如图1所示。



图 1

(2) 切屑厚度。理论切屑厚度取决于刀具几何角度和每齿进给量, 但切屑的形成是一种挤压过程, 切屑形成过程中受到了刀具的挤压, 产生了相应的形变, 如图2所示, 所以实际测量的切屑厚度并不等于理论的切屑厚度。实际变形的程度受刀具前角、倒棱、断屑槽形状及位置和切削速度等众多因素的影响, 本文所分析的是切屑变形前的理论切屑厚度。

2. 车削切屑厚度

车削是典型的连续加工, 形成的切屑厚度是均匀的, 切屑厚度受刀具的主偏角与每齿进给量的影响。当刀具一定时, 每齿进给量 f_z 的大小直接影响着切屑厚度, 如图3所示, 不难得出切屑厚度公式: $h = f_z \times \sin \kappa_r$, 当刀具主偏角 $\kappa_r = 90^\circ$ 时, 理论切屑厚度才等于每齿进给量 f_z 的大小。



图 2

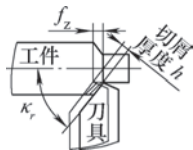


图 3

3. 面铣切屑厚度

铣削不同于车削, 是一种断续切削加工, 切屑也不再是均匀的厚度。如图4所示, 一个齿转一圈时, 刀具中心从B点移动到C点, 切屑厚度从靠近面铣刀中心位置向两边逐渐变薄, 会存在一个最大切屑厚度 $h_{\max}$ 。当工件过面铣刀中心时, $h_{\max} = f_z \times \sin \kappa_r$, 在铣刀主偏角为 90° 时, $h_{\max} = f_z$, 为了简化计算, 在后面的分析计算中, 假定刀具主偏角 $\kappa_r = 90^\circ$ 。

当工件不过面铣刀中心时, 最大切削厚度不等于每齿进给量, 如图5所示, 此时线段MN的长度便为最大切屑厚度, 即 $h_{\max} = MN$, 由勾股定理, 可得出如下公式:

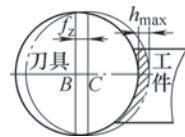


图 4

$$h_{\max} = MN = CM - CN = CM - \sqrt{CE^2 + EN^2} = R - \sqrt{d^2 + (\sqrt{R^2 - d^2} - f_z)^2}$$

式中, R 为铣刀半径 (mm);
 d 为铣刀中心到工件的最小距离
(mm)。

由此公式可知, 在刀具半径
 R 和程序每齿进给量 f_z 一定时, 最大
切屑厚度随着工件离铣刀中心
的距离增大而减小。假设刀具半
径 $R=50\text{mm}$, 用上述公式, 得到
最大切屑厚度与工件离刀具中心
距离 d 的几组数据, 如表1所示。

可以看出, 当工件离刀具
中心距离 $d=40\text{mm}$ 、每齿进给量
为 0.2mm 时, 实际最大切屑厚
度为 0.12mm ; 每齿进给量增大
到 0.34mm , 最大切削厚度达到
 0.2mm 。

在铣面过程中, 一般刀具直
径不会和铣削宽度相差太大, 如
果有用大直径的面铣刀铣小面的
情况, 可以相应增大每齿进给量
的设定。

4. 曲轴颈铣削时的切屑厚度

(1) 曲轴颈铣削运动分析。
在小排量发动机曲轴加工中,
连杆颈加工一般采用内铣或者外
铣, 曲轴、外铣刀盘及内铣刀盘
如图6、图7和图8所示。外铣连

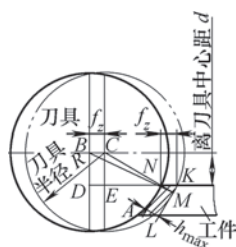


图 5

表1 最大切削厚度与工件离刀具
中心距离数据

离刀具中心 最小距离 d/mm	0	10	20	30	40	40
每齿进给量 f_z/mm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.34
最大切屑 厚度 $h_{\max}/\text{mm}$	0.2	0.196	0.18	0.16	0.12	0.2

颈时, 刀具径向进给到要加工直径位置, 曲轴以主轴径自转的同时, 刀具
跟随运动, 曲轴自转一周后, 刀具径向退刀, 完成一个连杆颈的铣削。

内铣连杆颈时, 根据实际情况可以分为曲轴不旋转和旋转两类: 曲
轴不旋转时, 铣刀自转的同时, 绕连杆颈公转一周, 完成一个连杆颈的
铣削。曲轴旋转时, 铣刀进行随动铣削, 与外铣连杆颈相似。

曲轴主轴颈的加工比较简单, 可以用传统的车削, 也可以铣削, 铣
削时没有刀具的随动, 曲轴自转一周, 完成一个主轴颈的铣削。

(2) 外铣轴颈最大切屑厚度。外铣连杆颈比外铣主轴颈的运动复
杂, 但其本质是一样的, 即刀具旋转的同时, 轴颈旋转一周, 完成一个
轴颈外圆的铣削, 轴颈相对刀具的旋转速度即进给速度。如果把轴颈旋
转一周的长度展开到刀具的圆周上, 每齿旋转一周时, 轴颈旋转角度为
 α , 轴颈与刀具的切入点便由 N 点转到 L 点, 如图9所示, 此时弧长 NL 的
长度等于程序的每齿进给量, 变形前的切屑截面形状如图9所示, 其中
线段 MN 的长度即该切屑的最大厚度 $h_{\max}$ 。

在扇形 ANL 中, 由弧长公式 $f_z = \widehat{NL} = R_1 \alpha \frac{\pi}{180}$, 可得 $\alpha = \frac{180 \widehat{NL}}{\pi R_1}$;

在三角形 ANB 中, 由余弦定理 $BN^2 = AB^2 + AN^2 - 2AN \times BN \times \cos \beta$, 得 β
 $= \arccos \left(\frac{AB^2 + AN^2 - BN^2}{2AB \times AN} \right)$;

在三角形 ANC 中, 同理可得 $NC = \sqrt{AC^2 + AN^2 - 2AC \times AN \times \cos(\beta - \alpha)}$;

则 $h_{\max} = MC - NC = R_2 + a_p - \sqrt{AC^2 + AN^2 - 2AC \times AN \times \cos(\beta - \alpha)} = R_2 + a_p -$
 $\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + R_1^2 - 2(R_1 + R_2) \times R_1 \times \cos \left(\arccos \left(\frac{(R_1 + R_2)^2 + R_1^2 - (R_2 + a_p)^2}{2(R_1 + R_2) \times R_1} \right) - \frac{180 f_z}{\pi R_1} \right)}$ 。

根据公式可知, 外铣时的最大切屑厚度与刀具半径 R_1 、单边切削余
量 a_p 、工件半径 R_2 和 f_z 有关。假设刀具半径为 $R_1=350\text{mm}$, 单边切削余量
 $a_p=2\text{mm}$, 根据此公式计算轴颈半径 $R_2=20\text{mm}$ 和 71mm 时, 不同每齿进给
量下的最大切削厚度 $h_{\max}$, 如表2所示。

由表2中数据可以看出, 程序的每齿进给与最大切屑厚度相差较
大, 所以应当根据最大切屑厚度来设定程序的每齿进给量。

(3) 内铣轴颈的切屑厚度。内铣轴颈与外铣轴颈类似, 但公式有所不



图6 曲轴



图7 内铣刀盘



图8 外铣刀盘

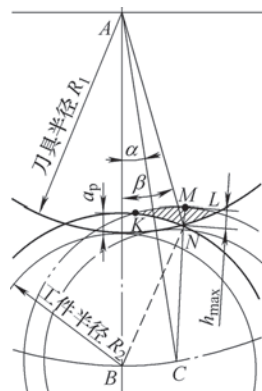


图 9



表2 不同每齿进给量下的最大切削厚度

程序 f_z /mm	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
工件半径 R_2 /mm							
20	0.08	0.12	0.17	0.21	0.25	0.29	0.33
71	0.05	0.08	0.1	0.13	0.15	0.17	0.2

同。切屑变形前的截面如图10中NLK围成的形状所示，弧长NL等于每齿进给量 f_z ，线段MN的长度便是该切屑的最大厚度 $h_{\max}$ 。

在刀具扇形ANL中，由弧长公式 $f_z = \widehat{NL} = R_1 \alpha \frac{\pi}{180}$ ，可得 $\alpha = \frac{180 \widehat{NL}}{\pi R_1}$ ；

在三角形ACL中，由余弦定理 $CL^2 = AC^2 + AL^2 - 2AC \times AL \times \cos \beta$ ，得 $\beta = \arccos \left(\frac{AC^2 + AL^2 - CL^2}{2AC \times AL} \right)$ ；

在三角形ANC中，同理可得 $NC = \sqrt{AC^2 + AN^2 - 2AC \times AN \times \cos(\beta - \alpha)}$ ；

$$\text{则 } h_{\max} = MC - NC = R_2 + a_p - \sqrt{AC^2 + AN^2 - 2AC \times AN \times \cos(\beta - \alpha)} = R_2 + a_p - \sqrt{(R_1 - R_2)^2 + R_1^2 - 2(R_1 - R_2) \times R_1 \times \cos \left(\arccos \left(\frac{(R_1 - R_2)^2 + R_1^2 - (R_2 + a_p)^2}{2(R_1 - R_2) \times R_1} \right) - \frac{180 f_z}{\pi R_1} \right)}$$

同样，外铣时的最大切屑厚度与刀具半径 R_1 、单边切削余量 a_p 、工件半径 R_2 和 f_z 有关，假设刀具半径为 $R_1=105\text{mm}$ ，单边切削余量 $a_p=2$ ，根据此公式计算轴颈半径 $R_2=20\text{mm}$ 和 71mm 时，不同每齿进给量下的最大切削厚度 $h_{\max}$ ，所得数据如表3所示。

表3 不同每齿进给量下的最大切削厚度

程序 f_z /mm	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
20	0.07	0.11	0.15	0.18	0.22	0.25	0.29
71	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.09	0.1

可以看出，程序的每齿进给量与最大切屑厚度同样相差较大。

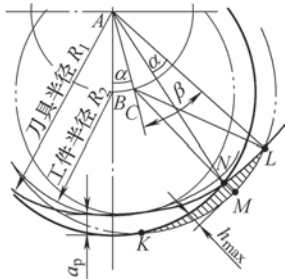


图 10

等经验来设定每齿进给量，应根据最大切屑厚度来设定每齿进给量。

通过分析面铣，曲轴轴颈外铣、内铣，明确了铣削中每齿进给量与切屑厚度的关系，并推导出其公式，经过与供应商提供的切削参数对比，计算结果一致，不再受设备和刀具供应商不提供计算方法的限制，便于新项目规划时设定合理的切削参数，也可指导现有生产线切削参数的优化，同样可用于加工中心差补铣轴或者差补铣孔时的参数设定。

参考文献：

[1] 沈志雄.金属切削原理与刀具[M].北京：机械工业出版社，2006.

MW（收稿日期：20170510）

5. 结语

每齿进给量是切削中的重要因素，影响到切削效率、刀具负载及主轴负载等，他的大小可以反映在理论切屑厚度上。由于曲轴轴颈铣削是断续切削，刀具直径与工件直径差异较大，不能依靠一般的车削、钻削及平面铣削

oelheld
德国欧海工业润滑油

一直被模仿
从未被超越

- 磨削加工
- 放电加工
- 水基产品
- 锻模产品
- 成型冲压



欧海官方微信

欧海工业润滑油（太仓）有限公司
江苏省太仓经济开发区苏州路5号
0512-8278 0027
www.oelheld.com.cn

◆广告 查询编号：3027

