

基于粗糙度形成机理的曲面高速铣精加工参数选用

项筱洁

(温州职业技术学院 机械工程系, 浙江 温州 325035)

摘要: 为在曲面精加工中获得理想的表面粗糙度, 通过分析表面粗糙度的形成机理, 建立了粗糙度与走刀行距、进给率关系的数学模型; 通过实验, 建立了高速曲面铣削时粗糙度与加工倾角、主运动线速度关系的图谱, 实现了在生产过程中按照加工目标的表面粗糙度确定相应的走刀行距、进给率、加工倾角、主运动线速度等加工参数。研究表明, 该研究对提高加工表面的质量, 避免反复试切影响生产效率及降低成本有重要意义。

关键词: 高速铣; 球头铣刀; 表面粗糙度; 切削参数

中图分类号: TH161

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)04-0436-04

Parameters selecting in high-speed milling of surface based on formation mechanism of roughness

XIANG Xiao-jie

(Department of Mechanical Engineering, Wenzhou Vocational and Technical College, Wenzhou 325035, China)

Abstract: In order to gain better roughness in surface high-speed milling, on the basis of analyzing the formation mechanism of surface roughness, the relationship between parts surface roughness and cutting parameters such as step-over, feed rate, machining inclination and main shaft speed angle was derived. The relationship spectrum between surface roughness and cutting parameters was proposed through test. Then the optimized processing parameters could be gotten from the spectrum according to the designed surface quality of parts in the manufacturing process. The study will provide a guidance in the machining process to avoid repeated trial cut, improve the production efficiency and lower the cost of product.

Key words: high-speed milling; ball-end mill; surface roughness; cutting parameters

0 引 言

表面粗糙度是衡量零件已加工表面质量的重要指标, 在曲面精加工过程中, 由于机床性能、加工方式、工件材料、刀具类型及切削参数等因素影响, 要想获得理想的表面粗糙度需要经过多次尝试。对于企业生产来说, 此类尝试无论对于生产进度保障还是生产成本控制都是不利的。

影响表面粗糙度的因素分为几何因素和物理因素。几何因素指按照几何关系进行数学推导的影响因素, 即将切削刃看作理想几何线段并相对于工件运动, 形成已加工表面的残留高度, 粗糙度值取决于残留高度的大小。由几何因素决定的表面粗糙度称为理论粗糙度。物理因素是指机床刚性、刀具性能、材料切削工艺性、夹具系统刚性、切削力、切削热等影响表面粗糙

度的因素。高速铣削加工的表面粗糙度主要受几何因素的影响。

笔者主要探讨了基于粗糙度形成机理的曲面高速铣精加工参数选用。本研究在瑞士 GF 公司原装、型号为 MIKRON UCP800 的高速加工中心上进行, 选用了 ISCAR 硬质合金涂层-R6 球头铣刀精铣加工 45 钢零件的曲面。在这一加工条件下, 曲面表面粗糙度主要由几何因素即残留高度决定^[1], 物理因素对表面粗糙度的影响通过实验方法得到。

1 走刀行距对表面粗糙度的影响

被加工曲面是刀具沿各切削行进给运动时由切削刃轨迹包络出来的, 走刀行距的大小是影响曲面加工质量和效率的重要因素。行距越小则表面残留越少, 即表面粗糙度值越小, 但行距过小将导致零件程序的

过度庞杂,增加数控机床控制系统内存的压力,同时加工时间成倍增加;行距过大则表面残留高度增大,无法达到理想的表面粗糙度。为同时满足表面粗糙度及生产率的要求,应选用合适的走刀行距。

1.1 球头铣刀平面精加工走刀行距与残留高度的关系

球头铣刀加工平面时的残留高度形成如图1所示^[2],被加工表面残留高度 H_c 与走刀行距 F_r 及刀具球头半径之间的关系如下式所示:

$$F_r = 2 \sqrt{R^2 - (R - H_c)^2} = 2 \sqrt{2(R - H_c/2)H_c} \quad (1)$$

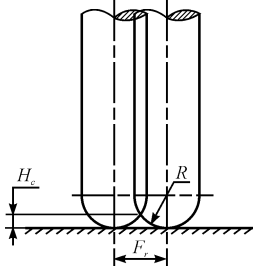


图1 平面铣削残留高度

在实际加工过程中,表面残留高度 H_c 和走刀行距 F_r 的值相差悬殊,即 $H_c \ll F_r$,所以上式中 H_c 的二次方项可以略去,上式简化为下式:

$$F_r \approx 2 \sqrt{2RH_c} \quad (2)$$

1.2 球头铣刀凸曲面精加工走刀行距与残留高度的关系

曲面加工时工件表面残留高度的形成机理与平面加工时一样,只是由于表面形状不同而具有不同的几何关系及相应计算方法。为求得凸曲面精加工时的残留高度,笔者建立了如图2所示的工作坐标系,设定曲面曲率半径为 R_q ,刀具半径为 R ,走刀行距为 F_r ,得到球头铣刀轮廓圆弧的方程如下式所示:

$$(x - d \sin a)^2 + (z - d \cos a)^2 = R^2 \quad (3)$$

式中: $\cos a = \sqrt{1 - (F_r/2R_q)^2}$, $\sin a = F_r/2R_q$, $d = R_q + R$ 。

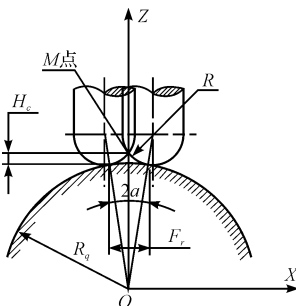


图2 凸曲面残留高度

从图2可看出,若求得 M 点的坐标值,凸曲面精加工的表面残留高度即可获得。联立方程组如下式:

$$\begin{cases} \left(z - d \sqrt{1 - \left(\frac{F_r}{2R_q} \right)^2} \right)^2 + \left(x - d \frac{F_r}{2R_q} \right)^2 = R^2 \\ x = 0 \end{cases} \quad (4)$$

求得上式方程组解为:

$$Z_m = d \sqrt{1 - \left(\frac{F_r}{2R_q} \right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{dF_r}{2R_q} \right)^2} \quad (5)$$

于是求得曲面残留高度如下式所示:

$$H_c = Z_m - R_q = d \sqrt{1 - \left(\frac{F_r}{2R_q} \right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{dF_r}{2R_q} \right)^2} - R_q \quad (6)$$

根据上式得知,如果要求表面残留高度为某一值 H_c ,则走刀行距如下式:

$$F_r = \frac{R_q}{d(R_q + H_c)} \sqrt{2(d^2 + R^2)(R_q + H_c)^2 - (d^2 - R^2)^2 - (R_q + H_c)^4} \quad (7)$$

走刀行距表达式相对复杂,计算量比较大,但在实际加工过程中 $R_q \gg H_c$,可以省略含有 H_c 的某些项的值,因此有近似关系式:

$$\begin{cases} (R_q + H_c)^2 \approx R_q^2 + 2R_q H_c \\ (R_q + H_c)^4 \approx R_q^4 + 4R_q^3 H_c \\ R_q + H_c \approx R_q \end{cases} \quad (8)$$

应用近似关系式(8),得刀具轮廓圆弧与曲面切点形成的走刀行距计算公式简化如下式所示:

$$F_r \approx 2 \sqrt{2H_c R} \sqrt{\frac{R_q}{R_q + R}} \quad (9)$$

由式(9)得知,当 $R_q \rightarrow \infty$,即曲率半径无限大时,曲面衍变为平面,此时的走刀行距计算公式与平面精加工时的走刀行距计算公式一致。

1.3 球头铣刀凹曲面精加工走刀行距与残留高度的关系

球头铣刀凹曲面精加工的残留高度示意如图3所示,其计算方法与凸曲面残留高度计算方法类似,得到走刀行距表达式:

$$F_r \approx 2 \sqrt{2H_c R} \sqrt{\frac{R_q}{R_q - R}} \quad (10)$$

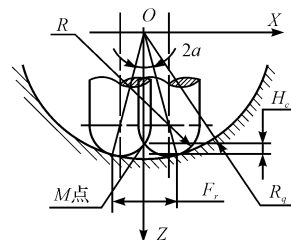


图3 凹曲面残留高度

2 进给率对表面粗糙度的影响

进给残留面积高度和走刀残留面积高度都影响着工件表面粗糙度,前述走刀方向残留面积高度主要由几何因素形成,能方便地推导出残留高度的具体表达式。在进给方向所造成的残留高度,无法直接推导出具体的表达式,根据前人的研究成果,本研究利用计算机仿真结果的曲线拟合法寻求残留面积高度和切削参数之间的关系,设定表达式如下式^[3]所示:

$$H_f = \frac{a \times F_r^b \times F_f^c}{R^d} \quad (11)$$

式中: H_f —设定进给残留高度; F_r —走刀行距; F_f —进给率; R —刀具球头半径; a, b, c, d —待定模型系数。

将方程变换成为线性函数如下式所示:

$$R_a = \frac{H_c \times H_f}{64 \left(R \pm \frac{z \times F_f}{\pi} \right)} = \frac{\left(d \sqrt{1 - \left(\frac{F_r}{2R_q} \right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{dF_r}{2R_q} \right)^2} - R_q \right) \times \left(\frac{0.438 \times F_r^{1.26} \times F_f^{1.014}}{R^{0.847}} \right)}{64 \left(R \pm \frac{z \times F_f}{\pi} \right)} \quad (15)$$

式中: z —刀具的切削刃数,表达式分母的“ \pm ”号中“ $+$ ”表示顺铣,“ $-$ ”表示逆铣,式中的“ \pm ”说明在曲面精加工时顺铣达到的表面粗糙度值相较逆铣更小,能获得更好的表面质量。

4 刀具倾斜角度对表面粗糙度的影响

在选用球头铣刀进行精加工(尤其在铣削曲面平缓区域)时,由于铣刀主切削刃各处有效直径的变化,导致局部出现挤压变形影响表面粗糙度,通常采取使刀具倾斜某一角度的方法进行修正^[5-6],如图4所示。

通常情况下,铣削加工时的主运动线速度按下式计算:

$$V_c = \frac{\pi \times d \times n}{1\ 000} \quad (\text{m/min}) \quad (16)$$

球头铣刀精铣曲面时,此处的 d 值不是固定的刀具直径,而是球铣刀切削刃轮廓曲线与曲面相切处的切点当量直径,其与刀具球头半径关系如下式:

$$d = 2R \sin \theta \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)得:

$$V_c = \frac{\pi \times 2R \sin \theta \times n}{1\ 000} \quad (\text{m/min}) \quad (18)$$

上式表明当刀具轴线与曲面法线方向重合时,切

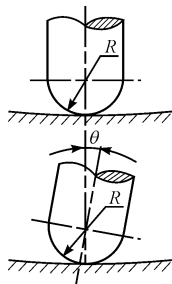


图4 刀具倾角

$$\ln H_f = \ln a + b \ln F_r + c \ln F_f - D \ln R \quad (12)$$

假定 $z = \ln H_f, x_1 = \ln F_r, x_2 = \ln F_f, x_3 = \ln R, b_0 = \ln a, b_1 = b, b_2 = c, b_3 = d$,则回归形式为下式:

$$z = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (13)$$

上式所示线性回归解析方程式的系数通过计算机仿真,利用线性均方曲线拟合确定。运用120组不同走刀行距、进给率和刀具半径的不断变化进行计算机仿真,得出其具体表达式:

$$H_f = \frac{0.438 \times F_r^{1.26} \times F_f^{1.014}}{R^{0.847}} \quad (14)$$

3 表面粗糙度值 R_a 的确定

在已知走刀方向残留高度和进给方向残留高度的情况下,球头铣刀铣削曲面时的理论表面粗糙度用下式^[4]表示:

削刃与曲面切点处的线速度为0,此时刀具与工件表面产生挤压,会导致工件表面粗糙度值的增大。当刀具轴线与曲面法线成一定夹角时,则可以避免挤压变形,保证表面质量。沿刀具进给方向观察,刀具轴线往右侧倾斜时的夹角为正值,此时铣削方式为顺铣。反之则实现逆铣,其夹角为负值。经过试验及软件分析,得到如图5所示系数,在其他加工条件不变的情况下,不同刀具倾角实现的实际表面粗糙度值为理论粗糙度值与该系数的积,即:

$$R_{a(\text{实际})} = q \times R_{a(\text{理论})} \quad (19)$$

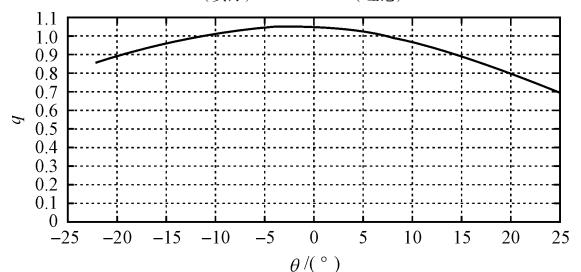


图5 刀具倾角与表面粗糙度的关系

q —刀具倾角表面粗糙度影响系数; θ —刀具轴线与曲面法向夹角

5 切削背吃刀量及主运动线速度对表面粗糙度的影响

背吃刀量对工件表面粗糙度的影响主要来源于切削热和切削变形,在精加工时,由于背吃刀量值较小,

切削热和切削变形对表面粗糙度影响均较小,选择一个相对合适的精加工余量就不会对表面粗糙度产生显著影响。

主运动线速度对表面粗糙度的影响,在一定范围内随着线速度的提高,表面粗糙度的值随之减小,表面质量逐渐提高^[7],即 $R_{a(\text{实际})} = k \times R_{a(\text{理论})}$ 。通过试验及数据分析,得到影响系数基本趋势如图6所示。

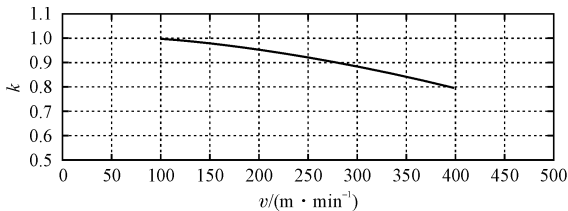


图6 主运动线速度与表面粗糙度的关系

k —主运动线速度表面粗糙度影响系数; v —切削主运动线速度

6 结束语

本研究通过对球头铣刀精铣曲面轮廓时影响表面粗糙度的几何因素和物理因素的分析,给出了走刀行距、进给率、刀具倾斜角度、切削背吃刀量、主运动线速

度对表面粗糙度的影响关系式或关系图。研究结果表明,该研究对提高加工表面的质量、改进切削参数、减少试切次数、控制切削加工周期、降低生产成本等都具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 胡昌明,贺红亮,胡时胜. 45 钢的动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击,2003(3):188-192.
- [2] 任秉银,唐余勇. 数控加工中的几何建模理论及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.
- [3] CHEN J S, HUANG Y K, CHEN M S. Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process[J]. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**,2005,45(9):1070-1076.
- [4] MIZUGAKI Y, KIKKAWA K, TERAH H, et al. Theoretical estimation of machined surface profile based on cutting edge movement and tool orientation in ball-nosed end milling[J]. **Annals of the CIRP**,2003,52(1):49-52.
- [5] 赵晓明,胡德金,赵国伟. 5 坐标数控加工中工件表面形貌的计算机仿真[J]. 上海交通大学学报:自然科学版,2003,37(5):690-694.
- [6] 邓维鑫,周奎,司徒渝,等. 基于 VERICUT 的水轮机叶片主轴联动数控加工仿真技术研究[J]. 机械,2009,36(7):28-30.
- [7] 霍颖. 基于等残留高度法的五轴 NC 加工刀位轨迹规划[D]. 西安:西北工业大学机电学院,2005.

[编辑:张翔]

(上接第 424 页)

3 结束语

针对大型港口起重机难以激振的问题,本研究利用工作模态分析试验技术对 40 t 的港口起重机进行试验模态分析。采用响应点与参考点之间的互功率谱的幅值图代替集总传递函数的幅值图进行模态分析。由所有测点和参考点间的互功率谱,通过拟合各响应点同参考点之间的互功率谱求得各阶模态参数。在自然风的随机激励下,笔者对某一 40 t 港口起重机进行了模态试验和分析。试验结果表明利用环境激励法对港口起重机的模态参数识别是行之有效的,该法可推广应用于其他大型特种设备(如大型游乐设施等)的模态试验和分析。

另外,由于港口起重机尺寸比较大,往往需要很长的电缆线连接传感器和测试系统,这就给传感器的布放带来了诸多不便。特别是在传感器使用数量较多的场合,各条电缆线的互相缠绕是个需要考虑的问题。所以无线传感系统的使用是大型特种设备检验的发展趋势。

参考文献 (References):

- [1] SAMPAIO R P C, MAIA N M M, SILVA J M M. Damage detection using the frequency-response-function curvature method[J]. **Journal of Sound and Vibration**,1999,226(5):1029-1042.

- [2] ZHONG Shun-cong, OYADIJI S O. Crack detection in simply supported beams without baseline modal parameters by stationary wavelet transform[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**,2007,21(4):1853-1884.
- [3] ZHONG Shun-cong, OYADIJI S O. Analytical predictions of natural frequencies of cracked simply supported beams with a stationary roving mass[J]. **Journal of Sound and Vibration**,2008,311(1-2):328-352.
- [4] 王宝元,刘朋科,衡刚,等. 自行火炮工作模态分析试验分析[J]. 兵工学报,2009,30(7):853-856.
- [5] 金新灿,孙守光,邢鸿麟,等. 环境随机激励下高速客车的工作模态分析[J]. 铁道学报,2003,25(5):24-28.
- [6] 姜浩,郭学东,杨焕龙. 环境激励下桥梁结构参数识别方法的研究[J]. 振动与冲击,2008,27(11):126-128.
- [7] JAMES G H, GARNE T G, LAUFFER J P. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structure[J]. **International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis**,1995,10(4):260-277.
- [8] 续秀忠,华宏星,陈兆能. 基于环境激励的模态参数识别方法综述[J]. 振动与冲击,2002,21(3):1-5.
- [9] 申凡,郑敏,鲍明. 用互功率谱进行未知激励下的模态振型识别[J]. 南京理工大学学报,2000,24(2):117-120.
- [10] 杨凯,迟毅林. 基于薄片材料的无损检测方法概述[J]. 机械,2009,36(11):67-68.
- [11] 胡赞,熊小勇,肖斌有. 基于 UG 技术的采棉机变速箱体的模态分析[J]. 机械,2010,37(12):18-20.
- [12] 刘宗政,陈晨,郭隆德,等. 基于环境激励的桥梁模态参数识别[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(3):301-303.
- [13] 陈凯亮,李俊源,姜献峰. 基于 ABAQUS 软件的多轴器动力座模态分析[J]. 轻工机械,2010,28(2):41-43.
- [14] 曹巨江,李龙刚. 基于 ANSYS 软件的弧面凸轮分度箱输出轴的模态分析[J]. 轻工机械,2010,28(3):41-43.

[编辑:张翔]