

切削刃数量对球墨铸铁铣削性能及 表面形貌特征的影响

王鹏, 王西彬, 颜培, 焦黎, 陈凯杰, 彭泽宇

(北京理工大学 机械与车辆学院 先进加工技术国防重点学科实验室, 北京 100081)

摘要: **目的** 提高球墨铸铁铣削表面质量和刀具寿命。**方法** 通过刀具轨迹计算和切削试验, 研究球墨铸铁平面铣削过程中切削刃数量对切削性能、刀具磨损和表面形貌特征的影响, 并用分形维数和表面粗糙度共同表征表面形貌。**结果** 刀具轨迹分析表明, 由于铣削过程中, 刀具切削方向和进给方向间的夹角不断变化, 铣削表面不同位置和方向的表面形貌存在差异, 进而导致表面粗糙度存在较明显的差异。通过铣削试验研究切削刃数量对铣削表面不同位置和方向的几何特征的影响规律发现, 随着切削刃数量的成倍增加, 切削力显著增加, 同时刀具磨损量降低了 36.5%, 表面粗糙度值降低了 39.2%, 表面轮廓分形维数值增加了 4.8%。**结论** 增加切削刃数量可以使每齿切削力和刀具磨损均显著减小, 刀具寿命显著增加, 同时表面粗糙度减小, 分形维数增大, 即切削刃数量的增加使表面质量更好, 表面轮廓结构更复杂。

关键词: 平面铣削; 球墨铸铁; 切削刃数量; 铣削性能; 表面形貌; 分形维数

中图分类号: TG506.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0314-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.042

Effect of Number of Cutting Edges on Cutting Performance and Surface Morphology in Face Milling of Nodular Cast Iron

WANG Peng, WANG Xi-bin, YAN Pei, JIAO Li, CHEN Kai-jie, PENG Ze-yu

(Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, School of Mechanical Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the surface quality of nodular cast iron by face milling and the service life of tool. As for the large-scale face milling of engine case and cylinder head with high power density, the high surface quality, high machining efficiency and longer tool life were required. The effects of number of cutting edges on the cutting performance, tool wear and surface morphology in face milling of nodular cast iron were studied by the tool path calculation and the cutting test. The surface morphology was characterized by the fractal dimension and the surface roughness. From the analysis of tool path, the inclination between cutting direction and feeding direction changed continuously during milling and the surface morphology of different positions and directions on the milling surface was also different, thus leading to different roughness values. The effect of number of cutting edges on the surface geometry at different positions and directions was studied through the milling test. It was found that with fold increase of cutting edge number, the cutting force increased, the tool wear amount was reduced by

收稿日期: 2018-06-22; 修订日期: 2018-08-17

Received: 2018-06-22; Revised: 2018-08-17

作者简介: 王鹏 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工技术。

Biography: WANG Peng (1992—), Male, Master, Research focus: advanced machining technology.

通讯作者: 颜培 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为先进加工技术。邮箱: pyan@bit.edu.cn

Corresponding author: YAN Pei (1984—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: precision machining technology. E-mail: pyan@bit.edu.cn

36.5%, the surface roughness value was reduced by 39.2%, and the surface contour fractal dimension value increased by 4.8%. Increasing the number of cutting edges can reduce the cutting force and tool wear of each tooth significantly and increase the tool life, reduce the surface roughness and increase the fractal dimension. The increase of the number of cutting edges makes the surface quality better and the surface contour structure more complex.

KEY WORDS: face milling; nodular cast iron; cutting edges number; cutting performance; surface morphology; fractal dimension

球墨铸铁是一种高强度铸铁材料。通过球化和孕育处理,将片状石墨转化为球状,能降低层片状石墨引起的应力集中,因而可有效提高铸铁的抗冲击性和抗剪强度等力学性能。得益于良好的铸造工艺性以及优良的强度和韧性,球墨铸铁已应用于承载复杂及强度、韧性、耐磨性要求较高的零件,如发动机曲轴、齿轮、缸盖等零部件^[1-3]。

表面完整性是描述加工表面上所有因素的总和,它由表面的几何值(表面粗糙度)、物理性能(表面残余应力、硬度)等构成^[4-6]。其中,影响面铣加工的表面粗糙度的因素有很多。LIU 等^[7]研究了高速铣削高碳钢和铸铁过程中,切削参数对表面粗糙度的影响。研究发现,进给量和切削速度的提高降低了铣削表面粗糙度值。Yan 等^[8]通过试验得出结论:进给速度的增加在提高材料去除率的同时,也增大了表面粗糙度值。Lacalle 等^[9]通过试验得出随着切削速度的增加,表面粗糙度值先增加,然后随着刀具的磨损而下降的结论。FELHO 等^[10]对面铣不同位置及方向的表面形貌进行了分析,并提出了一种针对面铣表面形貌的预测算法。

现有研究主要是针对传统切削过程中,切削参数对表面粗糙度、刀具磨损等指标的影响,对于明确切削加工原理和指导切削加工有一定理论和现实意义,但传统切削加工方法越来越无法满足制造业对于加工效率及质量的高要求。球墨铸铁属于难加工材料,切削过程中,切削力大,切削温度高,刀具磨损严重^[11]。此外,高功率密度发动机缸盖等零件的铣削加工不仅要求高的几何精度,更要在大平面一次性铣削过程中,保证刀具磨损在合理范围内,控制各处表面质量。现有研究表明,增加盘铣刀的切削刃数量不仅可以提高切削效率,更能保证稳定的加工质量,降低生产成本^[12-13]。但目前对于切削刃数量对球墨铸铁铣削性能及表面几何特征的影响研究较少,密齿铣削机理不够明确,影响了密齿铣刀的实际应用。

因此,本文针对典型的高功率密度发动机箱体和缸盖等零部件的大尺寸高效精密铣削,分轨迹仿真和切削试验两部分,着重研究切削刃数量对球墨铸铁铣削性能及表面几何特征的影响,并将分形维数和表面粗糙度结合,更加全面地表征大平面铣削加工后不同位置的表面几何特征,对超密齿铣削技术和高功率密度发动机箱体、缸盖等大尺寸平面的铣削加工技术研究具有重要的指导意义。

1 试验

1.1 试验材料

本文的主要研究对象为用于高功率密度发动机缸体的球墨铸铁 QT400-15。这是一种抗拉强度≥400 MPa、延伸率≥15%、屈服强度≥250 MPa 的铁素体球墨铸铁,其主要成分见表 1。

表 1 QT400-15 主要元素成分
Tab.1 Main elements of QT400-15

wt%						
Element	C	Si	Mn	S	P	Ni
Content	3.6~3.9	2.5~2.9	≤0.5	≤0.08	0.03	0.04~0.06

1.2 铣削试验

切削试验在 DMU 80 mono BLOCK 立式五轴加工中心上进行。所选择的刀盘为直径 80 mm 的 Sandvik 盘铣刀(S-60-080Q27-09HX),满齿数量为 12。刀片型号为 Sandvik Coromant HNEF 09 05 04-KL 1020,其刀口半径为 0.4 mm,前角 0.5°,后角 7.5°,涂层材料为(Ti,Al)N。为保证切削过程中,每个刀刃切削深度的均匀性和高精度的动平衡性,经 Zoller 对刀仪多次对刀调整之后,各个刀刃的高度差为 8 μm。试验过程中采用 Kistler Type 9257B 三相平板测力仪在线测量铣削过程中的切向力、径向力和轴向力,主要工艺参数见表 2。

表 2 主要的切削工艺参数范围
Tab.2 Main cutting process parameters

Cutting edges number z	Cutting speed $v/(m \cdot min^{-1})$	Feed per tooth f_z/mm	Cutting depth a_p/mm
3, 6, 12	180	0.10	0.20

磨损试验中,以铣削工件的长度作为基本单位,每切削一定的行程即停机取下刀片,在 Keyence VK-100 形状测量激光显微镜下,观察其后刀面磨损状况。试验所用切削参数如表 3 所示。

表 3 刀具磨损试验方案
Tab.3 Scheme of tool wear test

Cutting edges number z	Cutting speed $v/(m \cdot min^{-1})$	Feed per tooth f_z/mm	Cutting depth a_p/mm
3, 6, 12	240	0.10	0.20

1.3 表面质量表征

大直径盘铣刀铣削表面不同位置和方向的形貌存在差异。本文对铣削表面形貌进行了较为全面地分析,并采用粗糙度值和分形维数来表征表面质量和复杂程度。采用 Keyence VK-100 形状测量激光显微镜对已加工表面形貌进行拍摄和分析。

1.3.1 表面粗糙度

表面质量是机械零件加工质量的重要组成部分,表面粗糙度又是最重要的一种微观几何形状误差之一,影响着机械产品的可靠性、使用寿命、安全性等^[14]。用 Keyence 激光显微镜对已加工表面进行分析,在不同位置和方向分别测量表面粗糙度值,并取平均值。相较于线粗糙度 Ra ,面粗糙度 Sa 能更好地评价表面粗糙度,其计算公式为:

$$Sa = \left(\frac{1}{NM} \right) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |Z_{ij}| \quad (1)$$

式中, N 为直角坐标系中 x 轴方向上的取样点数; M 为 y 轴方向上的取样点数; i 为 x 轴上第 i 个取样点; j 为 y 轴上第 j 个取样点; Z_{ij} 为点 (i, j) 的 z 向坐标(轮廓高度)。

1.3.2 分形维数

基于工程粗糙表面的微观形貌具有统计自相似性。近年来,分形理论逐渐被应用于工程表面的微观结构和表面粗糙度的表征和研究当中^[15-16]。粗糙表面轮廓曲线是表征表面形貌的一种重要方法,其具有不光滑、不规则和自相似等特征。分形维数 D 和表面特征长度的尺度系数 G 是表面形貌表征中最为重要的两个参数。 D 越大说明轮廓细节越丰富; G 的大小则反映单位尺度内,表面平整性的好坏^[17]。分形维数 D 的计算方法有很多种,如功率谱函数法、结构函数法、尺码法、盒维数法、方差法以及协方差法等^[18]。本文采用结构函数法计算分形维数,因为其具有计算方法简便、精确度高等优点。

将轮廓曲线视为一个时间序列 $Z(x)$,则具有分形特征的时间序列能使其采样数据的结构函数 $S(t)$ 满足:

$$S(t) = [Z(x+t) - Z(x)]^2 = ct^{4-2D} \quad (2)$$

式中, t 代表数据点的间隔个数,无量纲; $S(t)$ 是 t 的函数; x 为轮廓曲线上的横坐标; $Z(x)$ 为坐标 x 上所对应的轮廓高度; $[Z(x+t) - Z(x)]^2$ 表示差方的算术平均值; c 为常数,无量纲。

针对若干个 t ,对轮廓曲线的离散信号计算出相应的 $S(t)$,在坐标系中得到 $\lg S(t) - \lg t$ 拟合直线的斜率 α ,则 D 与 α 的转换关系为:

$$D = 2 - \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

用 Keyence 激光显微镜拾取已加工表面轮廓曲线,计算结构函数 $S(t)$,用 MATLAB 编程实现 $\lg S(t) - \lg t$ 曲线图的绘制,并进行线性拟合,求直线斜率 α ,进而得到分形维数 D 。

2 结果及讨论

2.1 刀具轨迹

在刀具几何参数确定的情况下,刀具切削轨迹对平面铣削表面形貌影响显著,即当刀具轨迹密集时,刀具重复切削更加明显,铣削表面残留高度降低,进而使表面粗糙度值降低。

盘铣刀铣削过程中相邻两切削刃上点 a 、 b 的运动轨迹方程分别如式(4)、(5)。

$$x_a = ft + R \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$y_a = R \cos(\omega t)$$

$$x_b = ft + R \sin(\omega t - \theta) \quad (5)$$

$$y_b = R \cos(\omega t - \theta)$$

式中, x 为进给方向坐标; y 为切向坐标; f 为进给速度; t 为时间; R 为切削半径; ω 为角速度; θ 为两切削刃的角度差。

首先用三维建模软件对铣削表面形貌进行仿真,如图1所示。由于铣削运动是切削方向运动和进给方向运动的合成运动,故切削方向与进给方向的夹角不同时,会使表面残留高度不同,进而导致表面不同位置的表面形貌特征不同,且随着铣刀直径的增加,这种差异愈发明显,故后续研究中,均分别对不同位置的表面形貌进行分析。由图1可知,当刀具切削方向和进给方向垂直时,表面残留高度最高,表面粗糙度值最大。

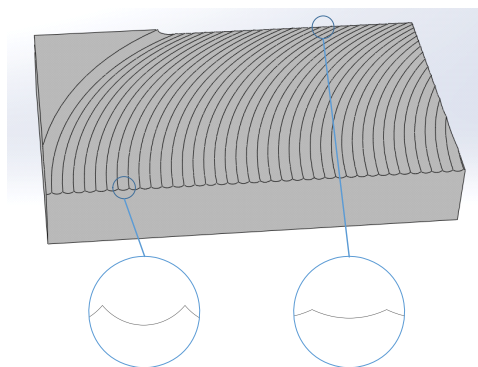


图1 铣削表面不同位置残留高度差
Fig.1 Residual height difference at different positions of milling surfaces

利用 MATLAB 软件对不同切削刃数量下的刀具轨迹进行仿真分析,研究切削刃数量对表面形貌的影响。每齿进给量相同,切削刃数量分别为3和6的切削刃轨迹如图2所示。由于每齿进给量相同,切削刃数量的增加会导致进给速度增加,刀具切削轨迹出现差异,故表面残留高度存在差异。在位置1处,由于切削刃数量的增加导致刀具轨迹更加密集,故表面残留高度降低,表面粗糙度值降低。由图1可知,切削方向与进给方向夹角较小时的表面残留高度差更小,这导致在位置2处进给速度较大时(切削刃数量较多时)的表面粗糙度值更低。综合分析,切削刃数量的

增加使铣削表面刀具轨迹发生变化, 各部分残留高度差和表面粗糙度值均有所降低。

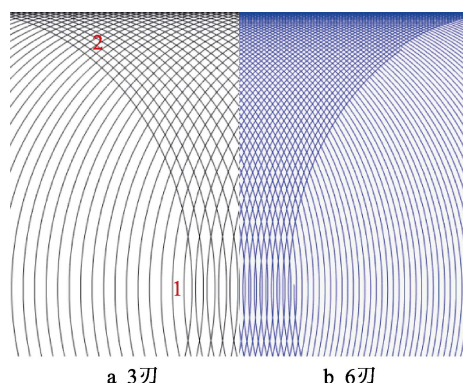


图 2 3 刃和 6 刃铣削的刀具轨迹对比

Fig.2 Comparison of tool path of 3 cutting edges and 6 cutting edges: a) 3 cutting edges; b) 6 cutting edges

2.2 切削性能

2.2.1 切削力

试验过程中, 在线测得的进给方向和切向的切削分力如图 3 所示。由图可知, 在切削参数相同的情况下, 切削刃数量的增加导致进给方向和切向的切削力均显著增加。在切削刃数量由 3 (常规部齿) 增加到 6 (密齿) 的过程中, 两个方向的切削力均增加 1 倍; 但由 6 刃增加到 12 刃 (超密齿) 的过程中, 切削力仅增加了大约 50%。故超密齿铣削较常规铣削而言, 平均每齿的切削力有所减小, 这是由于切削区温度升高, 导致材料受热软化引起的。此外, 切削力的增加导致切削功率增加, 而切削功率受机床主轴功率限制。本试验过程中, 超密齿铣削时的主轴功率占比为 5%~6%, 在合理范围之内。

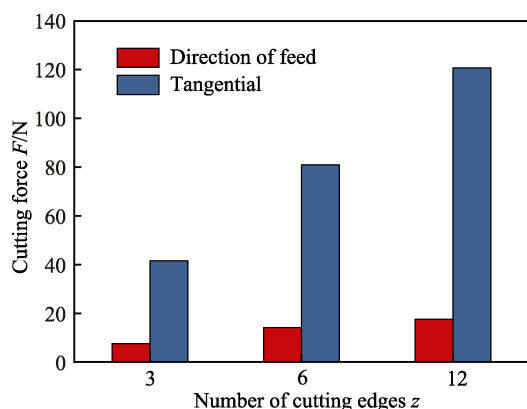


图 3 切削刃数量对切削力的影响

($v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm)

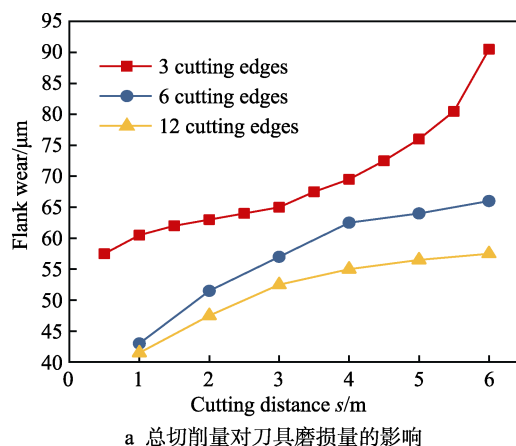
Fig.3 Influence of cutting edge number on the cutting force

($v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm)

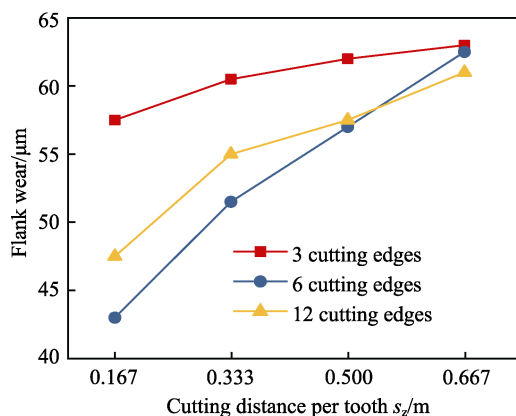
2.2.2 刀具磨损

通过铣削试验发现, 由于球墨铸铁中存在球状石

墨, 铣削加工时的刀具后刀面主要磨损形式为粘结磨损。切削刃数量不同、总切削距离相同、刀具后刀面磨损量和平均每齿切削距离相同时, 刀具后刀面磨损量分别如图 4a、b 所示。由图 4a 可知, 当总切削量相同时, 切削刃数量越多, 平均每齿切削材料体积越小, 刀具后刀面磨损值从 $90.5 \mu\text{m}$ 降低到 $57.5 \mu\text{m}$, 降低了 36.5%, 且 3 刃切削刀具后刀面达到急剧磨损阶段时, 6 刃和 12 刃切削的刀具磨损刚刚进入正常磨损阶段。对比图 4b, 平均每齿切削相同体积材料时, 6 刃铣削的初始磨损值最低, 但随着切削体积的增加, 在每齿切削距离达到 0.5 m 左右时, 超过了 12 刃铣削的磨损值。通过对比铣削力信号发现, 密齿铣削切削力振幅明显减小, 切削过程更加稳定, 故刀具磨损值有所降低。因此, 增加切削刃数量不仅大幅提高了铣削效率, 还可以显著降低刀具后刀面磨损量, 即使平均每齿切削材料体积相同, 刀具磨损值也有所减小, 刀具寿命得到提高。



a 总切削量对刀具磨损量的影响



b 平均每齿切削量对刀具磨损量的影响

图 4 刀具后刀面磨损曲线

Fig.4 Flank wear curve of cutter: a) effect of total cutting amount on tool wear; b) effect of average cutting amount per tooth on tool wear

2.3 表面形貌及质量

2.3.1 表面形貌

用基恩士激光显微镜对面铣表面不同位置的三

维形貌进行拍摄,图2中位置1的形貌对应图5a,图2中位置2的形貌对应图5b。由图5可知,面铣不同位置的表面形貌存在差异:位置1处为条纹状,

位置2处为网格状。由于切削方向的变化及重复切削的影响,使得位置2处的平面粗糙度较位置1处的更低,与轨迹仿真结果吻合。

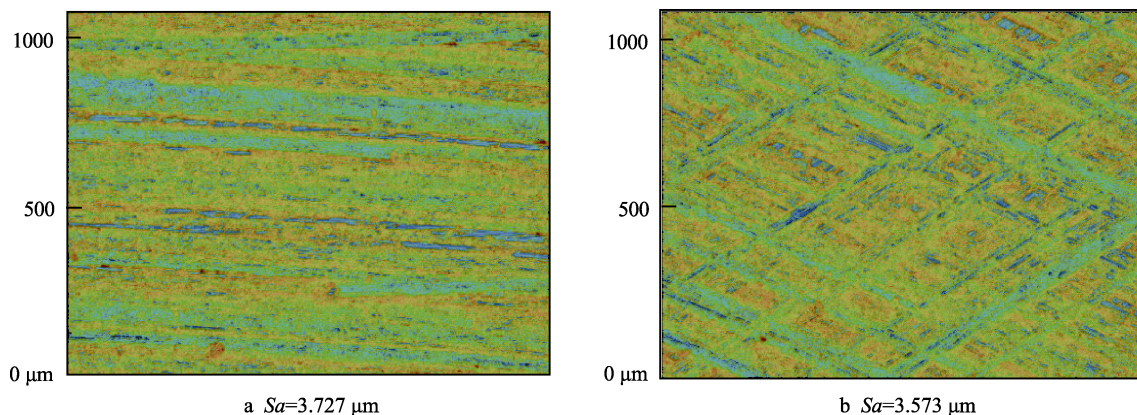


图5 铣削表面不同位置的表面形貌及表面粗糙度值 ($v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm, $z=3$, $200\times$)
Fig.5 Surface topography and surface roughness at different locations of milling surfaces
($v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm, $z=3$, $200\times$)

2.3.2 表面粗糙度

用基恩士激光扫描显微镜多次测量不同切削刃数量时表面位置1和位置2的平面粗糙度,并取平均值 Sa_1 、 Sa_2 ,结果如图6所示。由图可知,随着切削刃数量的增加,加工表面各处平面粗糙度 Sa 值均显著降低,由 $3.65\mu\text{m}$ 降低到 $2.22\mu\text{m}$,降幅达39.2%,加工表面质量显著提高;位置1和位置2的平面粗糙度降低趋势相同,且位置2的表面质量始终比位置1的好。这两点结论与仿真分析结果吻合,也符合平面铣削理论分析结论。此外,由前述分析可知,增加切削刃数量可以提高切削稳定性,从而进一步提高表面质量。

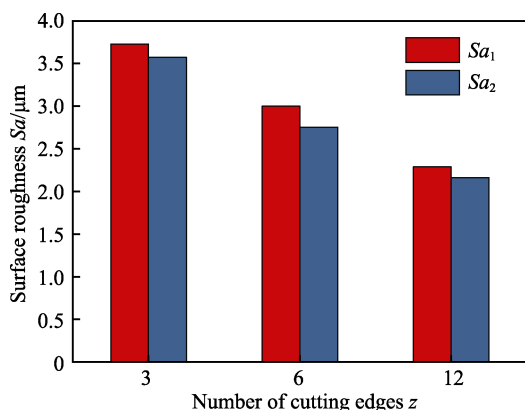


图6 切削刃数量对铣削表面不同位置粗糙度值的影响 ($v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm)
Fig.6 Influence of cutting edge number on the roughness of milling surfaces at different positions ($v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm)

2.3.3 分形维数

用Keyence激光显微镜拾取已加工表面进给方向的轮廓曲线,取样长度为 $1062.863\mu\text{m}$,采样数据点为1536个,采样间隔为 692.419nm 。其中,切削刃数量 $z=3$ 时,其加工表面位置1的轮廓曲线如图7所示。

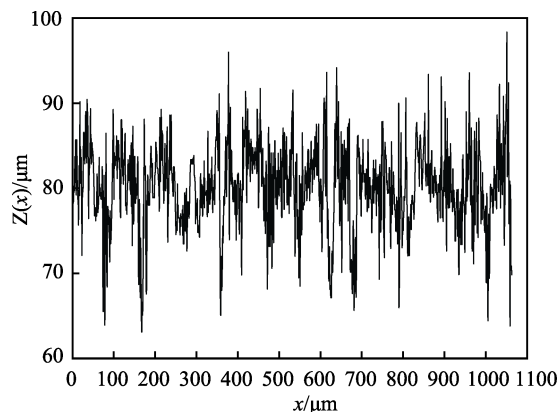


图7 表面轮廓曲线(位置1, $v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm, $z=3$)
Fig.7 Surface profile curve (location1, $v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm, $z=3$)

根据轮廓曲线取样结果,计算结构函数 $S(t)$,绘制 $\lg S(t)-\lg t$ 曲线图。通过计算拟合直线的斜率 α ,进而得到分形维数 D 。 $\lg S(t)-\lg t$ 曲线及其拟合直线如图8所示。

切削刃数量对表面不同位置的分形维数的影响如图9所示。随着切削刃数量的增加,不同位置和方向的分形维数 D 均逐渐增大,平均值由1.678增加到1.763,增幅为4.8%;平面铣削表面位置1进给方向的表面轮廓的分形维数 D_{1f} 明显大于切向的 D_{1t} ;位置2的轮廓的分形维数 D_2 介于位置1两个方向的轮廓的分形维数之间,但比其平均值大。因此得出结论:密齿铣削表面整体轮廓结构更加复杂,轮廓细节更加丰富;平面铣削位置1的进给方向的表面轮廓结构比切向的更加复杂,轮廓细节更加丰富;平面铣削位置2的表面轮廓结构复杂程度在两个方向上无差异,但比位置1的平均值更复杂,细节更丰富,这主要与刀具切削轨迹有关。

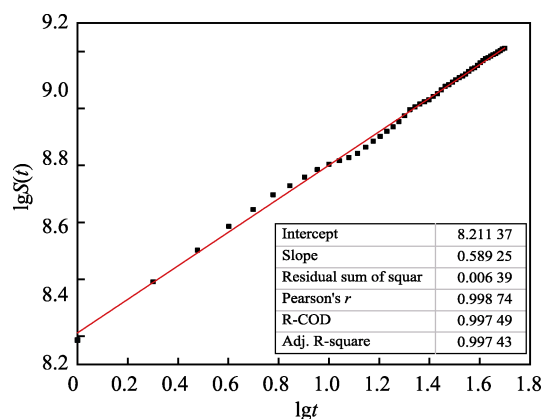


图 8 表面轮廓 $\lg S(t)$ - $\lg t$ 曲线及其线性拟合
Fig.8 $\lg S(t)$ - $\lg t$ curve of the surface profile and its linear fitting

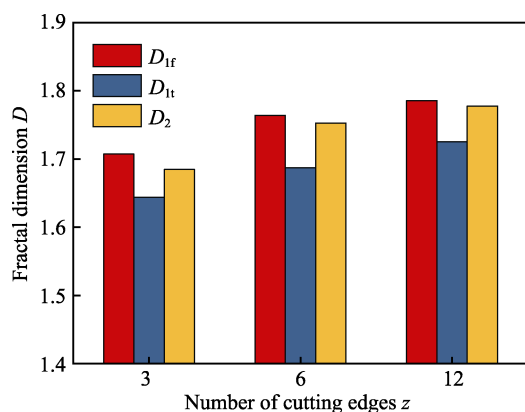


图 9 切削刃数量对铣削表面不同位置分形维数的影响
($v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm)

Fig.9 Influence of cutting edge number on fractal dimension of milling surface at different positions
($v_c=180$ m/min, $f_z=0.1$ mm, $a_p=0.2$ mm)

3 结论

本文通过刀具轨迹仿真和切削试验,发现切削刃数量对球墨铸铁平面铣削性能及表面形貌特征的影响因素主要分为两部分:几何因素和非几何因素。几何因素主要影响刀具切削轨迹及表面形貌特征,非几何因素(包括切削力及切削振动等)主要影响刀具寿命,进而对表面形貌特征也产生一定影响。通过分析,得到以下结论:

1) 刀具轨迹仿真和切削试验结果表明,由于刀具切削方向及重复切削的影响,铣削表面不同方向和位置的表面形貌存在明显差异:切向较进给方向的表面粗糙度小,位置 2 较位置 1 的表面粗糙度小。

2) 增加切削刃数量不仅可以降低平均每齿切削量,提高铣削加工效率,还可以提高切削稳定性,从而使平均每齿切削力和刀具磨损均减小,刀具寿命显著增加。

3) 随着切削刃数量的增加,表面粗糙度值减小,

分形维数值增大, Sa 值与 D 值呈负相关,即切削刃数量的增加使表面质量更好,表面轮廓结构更复杂。

参考文献:

- [1] YAER X B, SHIMIZU K, MATSUMOTO H, et al. Erosive wear characteristics of spheroidal carbides cast iron[J]. Wear, 2008, 264(11-12): 947-957.
- [2] 冯智龙, 邓晓金, 严俊峰, 等. 球墨铸铁气缸盖的铸造工艺[J]. 热加工工艺, 2017(17): 107-109.
FENG Zhi-long, DENG Xiao-jin, YAN Jun-feng, et al. Casting process of cylinder cover of nodular cast iron[J]. Hot working technology, 2017(17): 107-109.
- [3] 潘鹤斌, 孔小东, 苏小红. 两种铸铁的耐蚀性比较[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 20-24, 29.
PAN He-bin, KONG Xiao-dong, SU Xiao-hong. Comparison of the corrosion resistance of two types of cast iron[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(3): 20-24, 29.
- [4] 何柏林, 邓海鹏. 表面完整性研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2015(9): 140-146.
HE Bo-lin, DENG Hai-peng. Research status and development trend of surface integrity[J]. Surface technology, 2015(9): 140-146.
- [5] 袁美霞, 刘少楠, 高振莉, 等. 微细铣削不锈钢 310S 表面完整性试验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 240-244.
YUAN Mei-xia, LIU Shao-nan, GAO Zhen-li, et al. Experimental research on surface integrity of micro milling stainless steel 310S[J]. Surface technology, 2017, 46(7): 240-244.
- [6] 罗智文, 焦黎, 赵文祥, 等. 58SiMn 高强度钢车削表面完整性的试验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 234-240.
LUO Zhi-wen, JIAO Li, ZHAO Wen-xiang, et al. Experimental investigation of surface integrity in turning of high strength steel 58SiMn[J]. Surface technology, 2017, 46(1): 234-240.
- [7] LIU Z Q, WAN Y, LIU J G. The impact of tool materials and cutting parameters on surface roughness in high-speed face-milling[J]. Key engineering materials, 2004, 259-260: 462-465.
- [8] YAN Ji-hong, LI Lin. Multi-objective optimization of milling parameters-the trade-offs between energy, production rate and cutting quality[J]. Journal of cleaner production, 2013, 52(4): 462-471.
- [9] LACALLE L N L D, PÉREZ J, LLORENTE J I, et al. Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys[J]. Journal of materials processing tech, 2000, 100(1): 1-11.
- [10] FELHO C, KARPUSCHEWSKI B, KUNDRAK J. Surface roughness modelling in face milling[J]. Procedia cirp, 2015, 31: 136-141.
- [11] GHANI A K, CHOUDHURY I A. Study of tool life,

- surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool[J]. Journal of materials processing technology, 2002, 127(1): 17-22.
- [12] 林丛立. 密齿面铣刀在柴油机箱体类零件加工中的应用[J]. 装备制造技术, 2016(1): 161-163.
LIN Cong-li. The application of multi tooth milling cutter in machining parts in diesel chassis[J]. Equipment manufacturing technology, 2016(1): 161-163.
- [13] 张俊, 王拓, 张星, 等. 超密齿面铣刀的铣削力波动特性及其影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 543-548.
ZHANG Jun, WANG Tuo, ZHANG Xing, et al. Cutting force fluctuation characteristics of ultra-fine-pitched milling cutters and its influence[J]. Journal of Northeastern University (natural science), 2018, 39(4): 543-548.
- [14] 陈煜达, 潘金芝, 刘鹏涛, 等. 表面粗糙度对动车组车轮钢弯曲疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 172-177.
CHEN Yu-da, PAN Jin-zhi, LIU Peng-tao, et al. Effects of surface roughness on bending fatigue properties of motor train unit wheel steel[J]. Surface technology, 2017, 46(2): 172-177.
- [15] ZHAO Li-ping, QIN Yong-tao, YAO Yi-yong, et al. A system framework of inter-enterprise machining quality control based on fractal theory[J]. Enterprise information systems, 2014, 8(2): 336-353.
- [16] MA Jun-lin, CHUI Ming-wei, WANG Wei, et al. Analysis of micro surface topography based on wavelet transform and fractal dimension[J]. Machinery design & manufacture, 2012(6): 220-222.
- [17] MAO Hai-jun, JIAO Li, GAO Shou-feng, et al. Surface quality evaluation in meso-scale end-milling operation based on fractal theory and the taguchi method[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 91(1-4): 1-9.
- [18] 葛世荣, 索双富. 表面轮廓分形维数计算方法的研究[J]. 摩擦学学报, 1997(4): 354-362.
GE Shi-rong, SUO Shuang-fu. Study on the calculation method of fractal dimension of surface contour[J]. Tribology, 1997(4): 354-362.