

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2018.06.003

球墨铸铁高速铣削加工工艺参数优化实验研究

晏岱¹, 崔明稳², 江吉彬³, 陈丙三¹

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118; 2. 衡水学院 学报编辑部, 河北 衡水 053000;
3. 福建信息职业技术学院, 福建 福州 350003)

摘要: 针对难加工球墨铸铁材料进行高速铣削工艺参数优化研究, 设计了四因素四水平正交实验, 以获得铣削用量对加工过程力和表面粗糙度的影响关系, 并利用多元回归分析建立铣削分力和粗糙度的经验模型。研究表明: 每齿进给量对粗糙度值影响最为显著, 铣削参数设置不同, 产生的铣削分力不同, 背吃刀量对铣削分力影响最大。针对最小铣削力与最小粗糙度的目标, 分别得出最优的铣削用量参数。

关键词: 球墨铸铁; 高速铣削; 正交实验; 粗糙度; 工艺参数优化

中图分类号: TH162

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)06-0520-06

Experimental study on process parameter optimization for high speed milling of ductile iron

YAN Dai¹, CUI Mingwen², JIANG Jibin³, CHEN Bingsan¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Hengshui University, Journal Editorial Department, Hengshui, 053000, China ;
3. Fujian Polytechnic of Information Technology, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Aiming at the optimization of high-speed milling process parameters for difficult-to-machine ductile iron materials, a four-factor four-level orthogonal experiment was designed to obtain the impacts of milling amount on machining process force and surface roughness, and multi-regression analysis was used to establish an empirical model of the milling force and roughness. Results show that the per-tooth feed has the most significant impact on the roughness value. Different milling parameters will produce different milling forces. The amount of back cutting depth has the greatest influence on the milling force. Optimal milling parameters are obtained respectively for the goal of a minimum milling force and a minimum roughness.

Keywords: ductile iron; high speed milling; orthogonal experiment; roughness; process parameter optimization

目前, 针对球墨铸铁的研究多集中在材料性能和铸造工艺方面^[1-3], 而球墨铸铁因含有球形石墨在切削中易造成前刀面和切屑摩擦, 属于难加工材料, 当前对于球墨铸铁的高速切削研究尚处于起步阶段: 佟艳娇研究了负倒棱 PCBN 刀具在球墨铸铁加工中的作用, 通过实验获得最佳刀具角度, 并分析切削过程中刀具磨损成因^[4]; 高

艳利用仿真手段分析了球墨铸铁铣削过程应力和应变云图, 并通过实验优化球墨铸铁工艺参数^[5]; JAGD Sousa 等从可加工性和成本控制角度出发, 研究了球墨铸铁铣削过程力和表面粗糙度^[6]。J A Ghani 等开展了球墨铸铁干式加工对刀具寿命和表面光洁度影响的实验研究, 结果表明湿式切削在刀具寿命方面的性能优于干式切

收稿日期: 2018-07-20

基金项目: 福建省科技重大专项(2017HZ0003-1); 福建省教育厅项目(JA14208, JA14216)

第一作者简介: 晏岱(1964-), 男, 福建宁化人, 高级工程师, 研究方向: 机械工程, 流体传动与控制。

削,但表面质量相近^[7]。本文拟利用正交实验法对具有高硬度、难加工的球墨铸铁材料开展高速切削工艺参数优化研究,以获取合适的工艺参数。

1 实验装置

1.1 铣削测试系统

实验采用德玛吉五轴立式加工中心-DMU 60,机床具有操作简便、加工精度高等特点;刀具采用 $\Phi 8$ 的 TiSiN 涂层硬质合金 4 刃铣刀,可承受最高转速为 12 000 r/min;加工中心高速铣削主轴转速在 10 000~18 000 r/min,为保证铣削稳定性和机床寿命,在满足实验加工要求的前提下,按逐步提高法,主轴转速分别选取 10 000、10 700、11 400、12 000 r/min。

铣削加工实验过程中,使用的刀具与工件表面产生摩擦,在切屑分离时,零件的表面层金属发生塑性变形,同时由于整个加工工艺系统会产生振动,而使被加工的表面层金属不同层次地留下深浅,疏密等形状各异的痕迹,这个不平度就是被加工后零件的表面粗糙度。表面粗糙度是评价铣削质量常用参数之一。本文采用 MR20 表面粗糙度仪,在每组试样的已加工表面按图 1 中标示 1、2、3 点及测量方向进行表面粗糙度测量,然后求平均值;取样长度 0.8 mm,评定长度 5.6 mm。

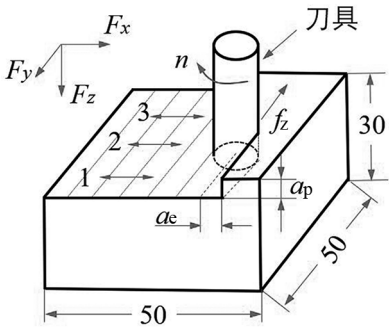


图 1 铣削过程示意图(单位:mm)
Fig.1 Milling process(unit: mm)

1.2 试验材料

以 QT500-7 球墨铸铁为切削对象,进行标准样块处理,尺寸为 50 mm×50 mm×30 mm,其化学成分见表 1。

表 1 球墨铸铁的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the ductile iron						
化学成分	C	P	Ti	Si	Cu	Mn
质量分数/ %	0.8	≤	≤	2.7	0.5	0.2
	~1.2	0.05	0.06	~3.0	~0.7	~0.5

2 实验设计

在高速铣削球墨铸铁实验过程中,主要切削参数有:主轴转速 n 、进给量 f_z 、背吃刀量 a_p 、侧吃刀量 a_e ,不同因素取值不同就会产生不同的结果。由于因素多,数值可选范围宽,本文在参考文献基础上,对各因素进行取值限定^[8]:①进给量的确定:高速铣是常规铣削速度的 5~10 倍,所以进给量的变化范围是动态的, f_{\min} 为 2~25 m/min;而本设备最大每齿每转进给量为 0.1 mm,由公式 $V_f=n \times z \times f_z$ 把对应最低值 $f_{\min}=2$ m/min 转化,得到 $f_z=0.0425$ mm,得出每齿进给量的取值范围 f_z 为 0.0425~0.1 mm,按逐步提高法,选取 f_z 为 0.0425、0.0625、0.0825、0.1 mm;②背吃刀量的确定:本实验性质属于精加工研究,背吃刀量建议取值为 0.1~0.5 mm,故选取 0.1、0.2、0.3、0.4 mm;③侧吃刀量的确定:由于实验所用刀具的直径为 8 mm,所以最大切削宽度为 4 mm,按逐步提高法确定侧吃刀量为 2.5、3、3.5、4 mm。正交因素水平取值见表 2。采用正交实验的方法,设计 $L_{16}(4^5)$ 正交实验,实验数据见表 3。

表 2 正交实验因素水平表
Tab.2 Factor levels of the orthogonal experiment

序号	主轴转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	每齿每转进给量 f_z/mm	背吃刀量 a_p/mm	侧吃刀量 a_e/mm
1	10 000	0.042 5	0.4	2.5
2	10 700	0.062 5	0.3	3.0
3	11 400	0.082 5	0.2	3.5
4	12 000	0.100 0	0.1	4.0

表 3 正交实验结果

Tab.3 Results of the orthogonal experiment

序号	主轴转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	每齿进给量 f_z/mm	背吃刀量 a_p/mm	侧吃刀量 a_e/mm	F_x/N	F_y/N	F_z/N	Ra
1	10 000	0.042 5	0.4	2.5	73.033 0	29.034 3	17.770 0	0.442 8
2	10 000	0.062 5	0.3	3.0	71.240 9	28.576 4	25.266 7	0.615 3
3	10 000	0.082 5	0.2	3.5	71.340 0	28.940 2	21.720 0	0.728 0
4	10 000	0.100 0	0.1	4.0	43.291 8	23.289 0	23.806 0	0.608 7
5	10 700	0.042 5	0.3	3.5	64.090 0	34.892 2	20.255 0	0.511 7
6	10 700	0.062 5	0.4	4.0	108.006 0	73.250 0	55.616 0	0.746 8
7	10 700	0.082 5	0.1	2.5	36.508 9	26.754 0	21.706 7	0.518 7
8	10 700	0.100 0	0.2	3.0	86.216 9	33.286 9	45.212 9	0.692 8
9	11 400	0.042 5	0.2	4.0	72.448 0	102.780 2	34.482 0	0.4660
10	11 400	0.062 5	0.1	3.5	45.308 3	43.788 5	20.325 0	0.452 4
11	11 400	0.082 5	0.4	3.0	140.392 9	192.874 9	55.107 1	0.624 3
12	11 400	0.100 0	0.3	2.5	104.438 9	167.785 6	41.540 0	0.630 2
13	12 000	0.042 5	0.1	3.0	27.990 0	42.376 0	13.122 7	0.454 1
14	12 000	0.062 5	0.2	2.5	50.190 0	68.053 3	29.094 4	0.483 8
15	12 000	0.082 5	0.3	4.0	77.148 0	126.593 6	39.788 0	0.795 8
16	12 000	0.100 0	0.4	3.5	118.186 7	266.464 5	100.120 0	0.810 4

3 实验分析

3.1 铣削参数对铣削力和表面粗糙度的影响

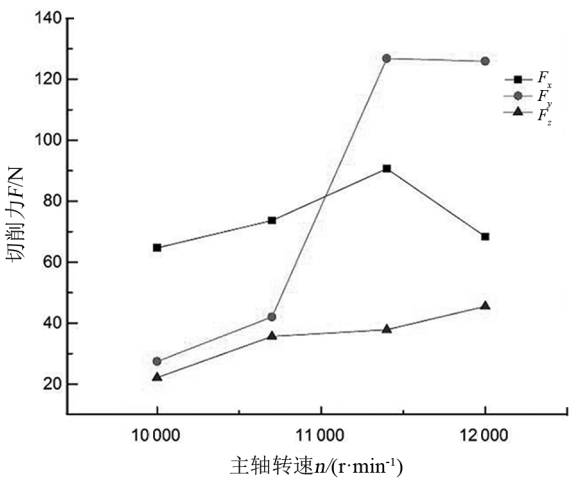
根据表 3 中正交实验结果,结合极差分析可获得铣削参数对铣削分力 F_x 、 F_y 、 F_z 及表面粗糙度的变化关系,由于分析数据较多,文中仅给出铣削分力 F_x 的极差分析表,见表 4。

表 4 铣削分力 F_x 极差分析表

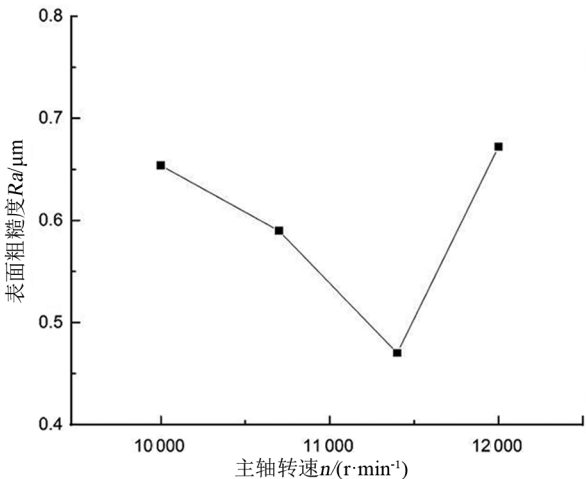
Tab.4 Range analysis of the milling force F_x

项目	主轴 转速 A	每齿 进给量 B	背吃 刀量 C	侧吃 刀量 D
k1	64.746 4	59.390 3	109.904 7	66.042 7
k2	73.705 5	68.686 3	79.229 5	81.460 2
k3	90.647 0	81.347 5	70.048 7	74.731 3
k4	68.378 7	88.033 6	38.274 8	75.223 5
极差 R	25.920 6	28.643 3	71.629 9	15.417 5
因素主次	背吃刀量 a_p >每齿进给量 f_z >主轴转速 n >侧吃刀量 a_e			
最优参数	A1	B1	C4	D1

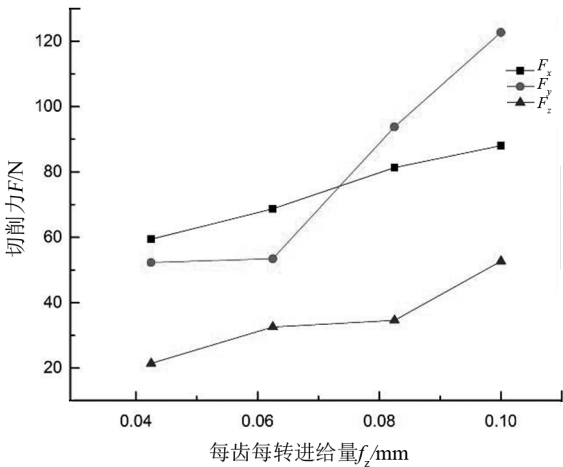
从表 4 可看出,因素影响主次为:背吃刀量 a_p >每齿进给量 f_z >主轴转速 n >侧吃刀量 a_e ,最优方案 $n=10\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 、 f_z 为每转 0.042 5 mm、 $a_p=0.1\ \text{mm}$ 、 $a_e=2.5\ \text{mm}$ 。由极差表可得出 n 、 f_z 、 a_p 、 a_e 与铣削分力 F_x 、 F_y 、 F_z 、 Ra 的极差走势图,如图 2 所示。可以发现,随着 n 的增大, F_z 极差呈现增大趋势, F_x 、 F_y 极差则呈现出先增大后减小趋势,相应条件下,表面粗糙度极差值产生较大波动,表面粗糙度最小出现在 $n=11\ 400\ \text{r}/\text{min}$ 的实验参数下,但此时铣削分力均较大,将会导致刀具的加速磨损;铣削分力 F_x 、 F_y 、 F_z 、 Ra 的极差值均随着每齿进给量 f_z 的增大而增大,随着背吃刀量 a_p 的增大而减小,说明增大每齿进给量会引起切削过程中震颤增大,工件表面粗糙度增大,而增加背吃刀量会加速切削热的扩散,提高工件表面质量,因此可以选择较小每齿进给量和较大的背吃刀量;而侧吃量 a_e 对 F_x 、 F_y 、 F_z 的影响呈现曲线上升趋势,且累加值 F_x 、 F_y 比 F_z 大得多,因此侧吃刀量对于刀具的周向刀刃磨损影响较大,符合铣削特征,此时表面粗糙度累加值逐渐增大,造成表面质量下降。



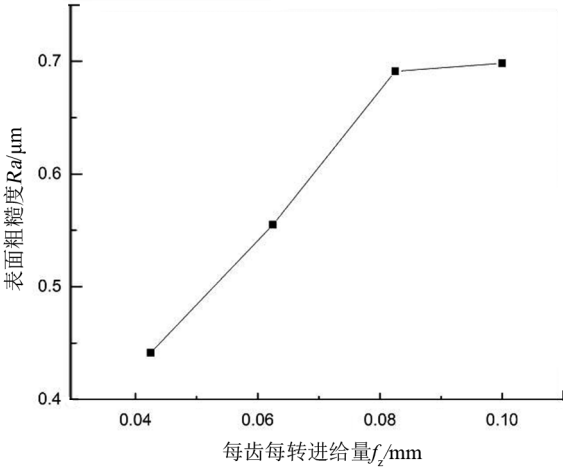
(a) 主轴转速 n 与切削力的关系



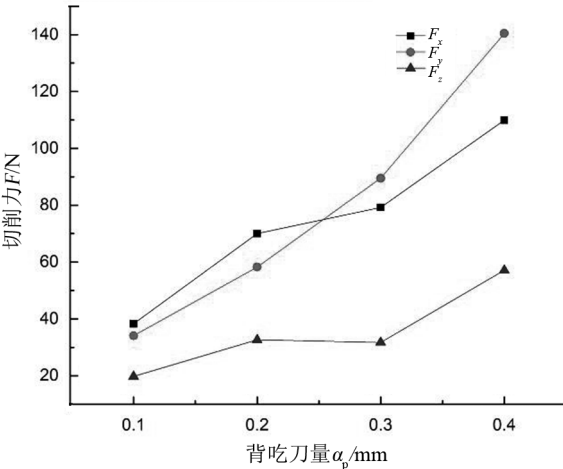
(b) 主轴转速与表面粗糙度的关系



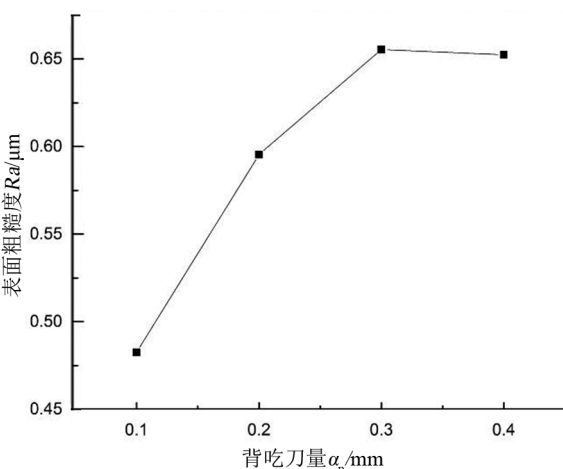
(c) 每齿进给量 f_z 与切削力的关系



(d) 每齿进给量与表面粗糙度的关系



(e) 背吃刀量 a_p 与切削力的关系



(f) 背吃刀量与表面粗糙度的关系

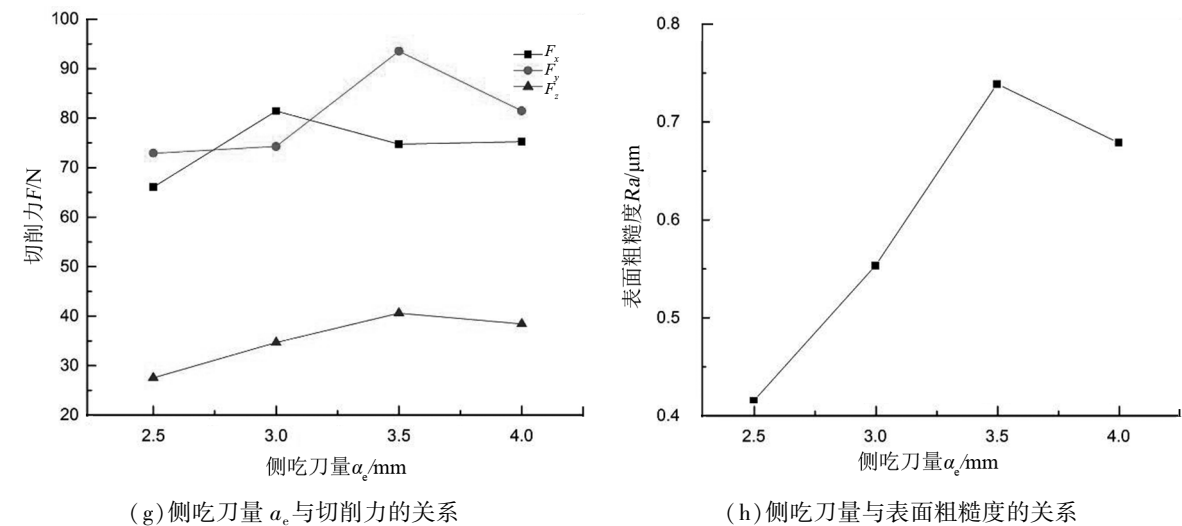


图 2 铣削参数与铣削分力、表面粗糙度的试验趋势曲线

Fig.2 Test curve of milling parameters V.S. milling force and surface roughness

综合表 3、4 和图 2 可知,对铣削分力 F_x 影响的因素主次是:背吃刀量 a_p >每齿进给量 f_z >主轴转速 n >侧吃刀量 a_e ;对铣削分力 F_y 影响的因素主次是:背吃刀量 a_p >主轴转速 n >每齿进给量 f_z >侧吃刀量 a_e ;对铣削分力 F_z 影响的因素主次是:背吃刀量 a_p >每齿进给量 f_z >主轴转速 n >侧吃刀量 a_e ;最优方案为 $n=10\ 000\ \text{r/min}$ 、 $f_z=0.042\ 5\ \text{mm/z}$ 、 $a_p=0.1\ \text{mm}$ 、 $a_e=2.5\ \text{mm}$;对纵向粗糙度因素影响主次为:每齿进给量 f_z >背吃刀量 a_p >侧吃刀量 a_e >主轴转速 n ,最优参数为 $n=11\ 400\ \text{r/min}$ 、 f_z 为每转 $0.042\ 5\ \text{mm}$ 、 $a_p=0.1\ \text{mm}$ 、 $a_e=2.5\ \text{mm}$ 。

3.2 建立铣削力与表面粗糙度的经验模型

根据单因素的实验结果,运用最小二乘法对铣削参数和铣削分力及表面粗糙度进行多元线性回归分析,以更好地获取铣削参数和力及粗糙度的关系。确定切削力 F_i 或 Ra 的经验模型为:

$$F_i/Ra = C_f b_1 f_z^{b_2} a_p^{b_3} a_e^{b_4}$$

式中, F_i 代表铣削分力, $i=x,y,z$; C_f 是常数, 它由加工条件和零件材料所决定; b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 分别为式中各切削用量对应的指数。由实验数据可求得模型系数, 如表 5 所示。运用经验模型可快速求取不同铣削参数下的铣削力和表面粗糙度值。

表 5 经验模型系数

Tab.5 Coefficients of the empirical model

F_i	C_f	b_1	b_2	b_3	b_4
F_x	24.261 765 68	6.791 655 539	0.209 872 685	0.246 299 804	2.0351 619 49
F_y	-22.868 381 58	6.336 506 276	0.300 350 296	0.271 550 891	-1.600 401 815
F_z	-16.738 169 50	4.657 971 806	0.253 101 410	0.056 506 928	-0.805 969 520
Ra	6.459 934 508	-1.442 276 460	0.718 134 320	0.134 423 325	0.155 010 191

3.3 经验模型的显著性检验

依据实验,取显著水平为 0.05, 则 $F_{0.05}(4, 11)=3.36$, 依据计算公式:

$$F = (SS_R/m)/(SS_e/(n - m - 1))$$

式中 SS_R 、 SS_e 分别表示回归平方和、残差平方和。经计算各经验模型的 F 值统计如表 6。

表 6 经验模型 F 值

Tab.6 F value of the empirical model

数值	F_x 预测模型	F_y 预测模型	F_z 预测模型	Ra 预测模型	$F_{0.05}$
F 值	22.21	16.86	8.57	10.23	3.36

由表 6 知,计算所得 F 值均大于 $F_{0.05}$,说明用回归分析获得的经验模型可信。因此该数学模型可以预测球墨铸铁高速铣削加工的铣削力和表面粗糙度实际情况。

4 结论

1)背吃刀量和每齿进给量对铣削分力 F_x 、 F_y 、 F_z 的影响较大,加工中应合理选择参数,针对本文最优参数为: $n=10\ 000\ \text{r/min}$ f_z 为每转 0.042

5 mm、 $a_p=0.1\ \text{mm}$ 、 $a_e=2.5\ \text{mm}$,即 A1B1C4D1。
2)对球墨铸铁工件表面粗糙度影响显著的参数为每齿进给量和背吃刀量,面向粗糙度的最优工艺方案为 $n=11\ 400\ \text{r/min}$ f_z 为每转 0.042 5 mm、 $a_p=0.1\ \text{mm}$ 、 $a_e=2.5\ \text{mm}$ 。
3)基于多元回归分析的经验模型,在实际铣削加工中可以较快得到铣削参数与目标对应关系,以便于合理选择工艺参数。

参考文献:

[1] 李大勇,徐振宇,马旭梁,等.球墨铸铁球化孕育处理动态调控方法及系统[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 54-60.
[2] 徐振宇,李大勇,马旭梁,等. 基于灰色关联理论的球墨铸铁原铁液冶金状态评价模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 37-42.
[3] 郭双桥,杨军,陈美玲. 不同含量改性纳米粉体对球墨铸铁拉伸性能的研究[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 358-360.
[4] 佟艳娇. PCBN 刀具负倒棱作用及其加工球墨铸铁的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
[5] 高艳. 切削参数对球墨铸铁件表面粗糙度影响的研究[J]. 机车车辆工艺, 2013(4): 12-13.
[6] SOUSAJAGD, MACHADO ÁR, SILVA RBD, et al. Study of the variability of the machinability along the cross section of ductile Iron produced by continuous casting[J]. Procedia Manufacturing, 2017(10): 307-318.
[7] GHANIJA, RIZAL M, CHE H C H. Performance of green machining: a comparative study of turning ductile cast iron FCD700[J]. Journal of Cleaner Production, 2014(85): 289-292.
[8] 彭林中,张宏. 机械切削工艺参数速查手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

(责任编辑: 陈雯)