

高性能发动机用蠕墨铸铁铣削工艺优化研究

王才成¹ 李广田¹ 祁小玲¹ 丁泽² 闫聪³

(1.内燃机与动力系统全国重点实验室,潍坊 261001;2.山东大学,济南 250000;3.林德液压(中国)有限公司,潍坊 261061)

摘要:为得到蠕墨铸铁最优铣削工艺参数,通过BP神经网络优化设计方法,在不同切削速度、进给速度和背吃刀量的组合下进行铣削试验,研究分析了高速铣削蠕墨铸铁(RU450)的切屑形成和工艺参数对铣削表面质量的影响。结果表明,通过BP神经网络优化出最佳的铣削工艺参数为切削速度2.8~3.1 m/s,进给量760~780 mm/min,背吃刀量0.1 mm。通过扫描电子显微镜观察切屑形态为螺旋形和“C”形弯曲形状;铣削工件表面石墨呈现完整的蠕虫状和球状,石墨边缘清晰可见;铣削表面粗糙度为1.0~2.0 μm ,铣削样品满足工艺指标要求。

关键词:蠕墨铸铁 铣削试验 BP神经网络 表面形貌 表面粗糙度

中图分类号: TG501; TG506.9

文献标识码: B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230166

Study on Milling Process Optimization of Vermicular Graphite Cast Iron for High Performance Engine

Wang Caicheng¹, Li Guangtian¹, Qi Xiaoling¹, Ding Ze², Yan Cong³

(1.National Key Laboratory of Internal Combustion Engine and Power System, Weifang 261001; 2. Shandong University, Jinan 250000; 3. Linde Hydraulic (China) Co., Ltd., Weifang 261061)

Abstract: To obtain the optimal milling process parameters of vermicular graphite cast iron, milling test was conducted by using the BP neural network optimization design method at various combinations of cutting speed, feed rate and back feed volume, the chip formation of vermicular graphite cast iron (RU450) and the influence of process parameters on surface quality during high-speed milling was studied and analyzed. The results indicate that the optimal milling process parameters, as optimized by the BP neural network, consist of a cutting speed range of 2.8~3.1 m/s, a feed rate of 760~780 mm/min, and a back feed rate of 0.1 mm. The milling process resulted in chips with a helical and "C"-shaped curved shape, as observed by Scanning Electron Microscope (SEM). The graphite on the workpiece surface has a complete worm-like and spherical shape, with the graphite edge clearly visible. The milling surface roughness measures 1.0~2.0 μm , and the milling samples meet all process indicator requirements.

Key words: Vermicular graphite cast iron, Milling test, BP neural network, Surface morphology, Surface roughness

1 前言

蠕墨铸铁是下一代大功率柴油机的新材料^[1]。蠕墨铸铁具有优异的抗拉强度、耐热性、耐磨性和抗疲劳性,可以减轻发动机质量、提高气缸压力^[2]。据报道,蠕墨铸铁发动机的质量比灰铸铁

发动机的质量约低9%^[3]。当前蠕墨铸铁已经用于福特F-150皮卡车、3.3L奥迪V8 TDI和4.0L宝马V8发动机,表明蠕墨铸铁发动机的性能优于灰铸铁^[4-5]。

蠕墨铸铁是介于灰铸铁和球墨铸铁之间的中间材料。蠕墨铸铁的力学性能与球墨铸铁相近。

作者简介:王才成(1969—),男,高级工程师,学士学位,研究方向为机械制造工艺及自动化。

参考文献引用格式:

王才成,李广田,祁小玲,等.高性能发动机用蠕墨铸铁铣削工艺优化研究[J].汽车工艺与材料,2023(11):22-29.

WANG C C, LI G T, QI X L, et al. Study on Milling Process Optimization of Vermicular Graphite Cast Iron for High Performance Engine[J]. Automobile Technology & Material, 2023(11): 22-29.

在蠕墨铸铁中,复杂的珊瑚状石墨形态和圆形边缘导致石墨和铁基体之间有很强的粘附力,这是蠕墨铸铁机械性能得以改善的主要原因。由于蠕墨铸铁拉伸强度越高、导热系数约为灰铸铁的78%^[6-8],因此,加工中的切削力大^[9]、产生的热量更容易累积,从而增加刀具磨损,从而导致蠕墨铸铁的生产成本更高,这一问题严重阻碍了蠕墨铸铁的大规模生产。以往研究表明,低速加工灰铸铁的刀具寿命($V_c \leq 200$ m/min)是蠕墨铸铁的两倍,而高速加工灰铸铁的刀具寿命($V_c \geq 400$ m/min)比蠕墨铸铁长20倍^[10]。近年来,随着蠕墨铸铁在发动机材料中的应用日益广泛,蠕墨铸铁加工受到了广泛的研究关注。切削参数(线速度 V 、进给速度 V_f 和切削深度 ap)对加工效率、刀具寿命和表面质量起着至关重要的作用。Ni等人^[11]通过田口试验分析了 V 、 V_f 、 ap 和切削力 F_z 之间的关系,并提出了切削力预测模型。结果表明, V 与 F_z 呈负相关,而 V_f 、 ap 与 F_z 呈正相关。Guo等^[12]使用频率调制技术辅助蠕墨铸铁的高速加工,发现切削速度超过500 m/min后,刀具热化学磨损明显减少,刀具的使用寿命比传统加工方法延长至少20倍。Kuzu等人^[13]使用田口方法测试不同的切削参数,结果表明,进给速度 V_f 对表面粗糙度 R_a 的影响最大,在不同的 V 下, R_a 随 V_f 的增加而增加。文献[14]采用单因素实验研究了蠕墨铸铁铣削加工的工艺技术。结果表明,蠕墨铸铁铣削加工的切屑为较规则的螺旋管状;高的切削速度和小的进给量能有效改善切屑背面褶皱和层积现象;蠕墨铸铁铣削刀具的失效机理为粘结磨损、氧化磨损和扩散磨损,并在其相互影响下导致刀具磨损失效,基本未出现崩缺等异常现象。文献[15]通过选择适合加工蠕墨铸铁的切削液,可以有效降低生产成本。试验结果表明俄美达切削液加工蠕墨铸铁效果最好,其后刀面磨损形式是涂层磨损。以上科研工作者针对蠕墨铸铁的切削加工已经进行了许多研究,并优化蠕墨铸铁的加工参数,但是由于蠕墨铸铁材料、刀具和设备的不同,蠕墨铸铁的最佳切削参数尚未得到。

作为高性能柴油机最理想的材料,蠕墨铸铁的加工难度严重阻碍了其批量生产。高性能柴油机对表面质量有严格的要求。根据生产经验,当

表面质量较差时,漏水、漏气、漏油的可能性增大,严重影响高性能发动机的性能。本研究与生产实际相结合,采用BP神经网络优化蠕墨铸铁的铣削工艺,理清铣削工艺对蠕墨铸铁表面的石墨形态、表面粗糙度以及切削厚度的影响规律,为蠕墨铸铁的铣削加工提供技术支持。

2 试验方法

2.1 工件材料

蠕墨铸铁工件的化学成分如表1所示。毛坯尺寸200mm×50mm×50mm。根据GB/T 26656—2023《蠕墨铸铁金相检验》,蠕墨铸铁(CGI)-450蠕墨度可达80。

表1 蠕墨铸铁化学成分(质量分数) %

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Co	Fe
含量	3.40	1.72	0.23	0.04	0.02	0.03	0.01	0.30	0.02	0.02	其余

铣削加工的机床为台湾乔福VMC-1300HD,最大主轴转速:4 500 r/min,三轴行程为1 300/850/710 mm。基于学者对蠕墨铸铁加工刀具的研究,发现在蠕墨铸铁发动机缸体工作面精加工铣削工况下,就刀具寿命而言,铣削蠕墨铸铁时,选取涂层硬质合金刀具比选取陶瓷刀具更好。因此本实验选用的面铣刀刀盘直径63 mm,刀杆型号为EMRW6R,刀片型号RDMT1240MO-TN-ZT30,涂层为TiN的超硬化学气相沉积(CVD)涂层,切削液选用俄美达牌,图1为刀杆实物图。采用扫描电子显微镜SEM(型号为FEI200,FEI公司,美国)观察样品表面形貌。蠕墨铸铁采用苦味酸腐蚀后进行金相检测。



图1 刀杆实物示意

2.2 试验设计

在铣削加工过程中,切削速度 V 、进给速度 V_f

和切削深度 ap 为影响表面粗糙度最主要的加工参数。以蠕墨铸铁 RuT450 加工后的表面粗糙度为目标,对 3 个加工参数选取不同水平值,设计了 25 组实验,采用 MitutoyoSurftestSJ-310 表面粗糙度仪测量粗糙度值。试验参数及因素水平见表 2。在 25 组加工参数不同组合及对应的表面粗糙度数据中,选取前 17 组作为预测模型的训练集,后 8 组为预测模型的测试集。

表 2 蠕墨铸铁铣削因素\试验表			
水平\因素	切削速度 /m·s ⁻¹	进给量 /mm·min ⁻¹	背吃刀量/mm
1	A1-2.0	B1-600	C1-0.06
2	A2-2.6	B2-650	C2-0.08
3	A3-3.2	B3-700	C3-0.10
4	A4-3.5	B4-750	C4-0.12
5	A5-3.8	B5-800	C5-0.14

3 试验结果与分析

3.1 蠕墨铸铁的微观组织

从图 2 可以看出,铁素体是石墨周围灰色的块状相,珠光体大多呈片状,还具有少量的点状珠光体。由于试样的碳当量应在共晶成分附近,其在发生共析反应的过程中应析出二次渗碳体,但二次渗碳体析出时,铁液中已存在共晶渗碳体,且二次渗碳体单独形核需要很高的结晶条件,故二次渗碳体应吸附在共晶渗碳体表面,促进共晶渗碳体的长大,即自由渗碳体的含量应较少。图 2c 中试样的石墨周围既存在珠光体也存在铁素体,珠光体基本均为片状珠光体,但如箭头标示处也存在少量的粒状珠光体。珠光体的片层细小、均匀、清晰、位相变化多。此外,基体中还存在游离铁素体。

从图 3 可以发现蠕铁中石墨的形状、数量及分布存在明显的差异。试样中存在蠕虫状和球状 2 种形态。图 3a 中 A 区域和图 3c 的石墨呈现短厚,端部圆钝,呈弯曲状,该试样的石墨为典型的蠕虫状石墨,石墨的长宽比约为 5~11。图 3b 的试样石墨呈现球状,内部镶嵌蠕化剂。从图中能够清晰地看到,该试样的球状石墨呈孤立的多边形而存在,其具有鲜明的年轮状结构特征,整个石墨球被一些辐射状条纹划分成多个扇形,表现出了球状石墨的多晶体

特征,以上的诸多特征说明该球状石墨的表面光洁度不太高。此外,还存在少量彼此孤立的、表面不平整的厚片形及直径与片厚度相当的点状石墨。图 3d 为蠕墨铸铁加工前的石墨形态与球化的统计分析,是以直径为 120 μm 、60 μm 、30 μm 、15 μm 为边界,获得的单位面积上石墨个数的统计结果。由图可见蠕墨铸铁内大直径的球状石墨较少,多数集中在 15 μm 左右。

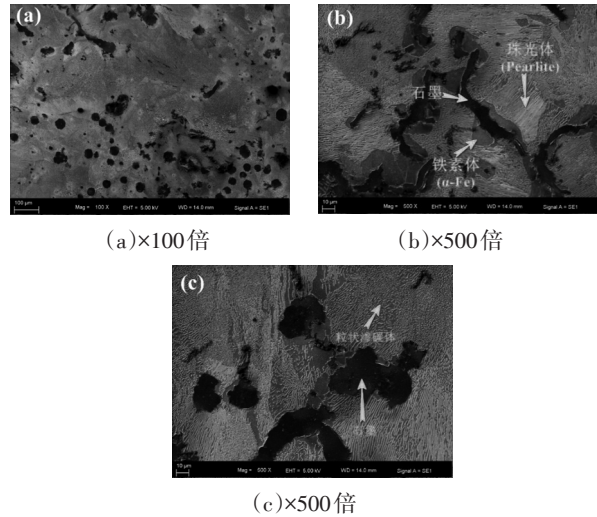


图 2 蠕墨铸铁的微观组织

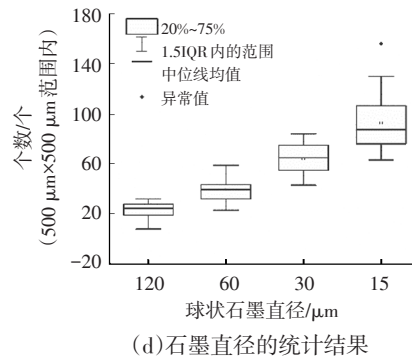
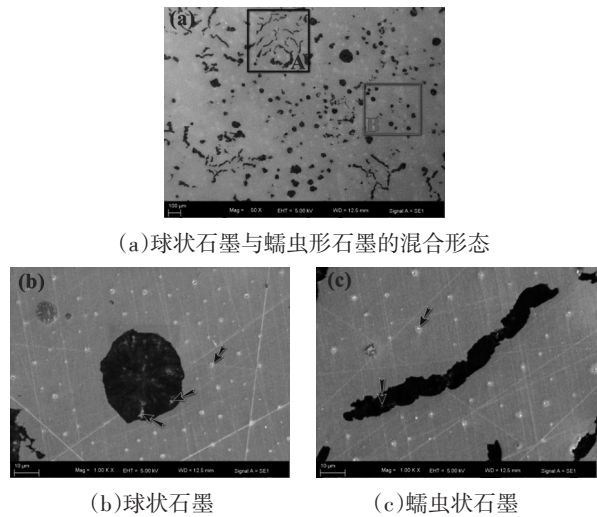


图 3 未腐蚀蠕墨铸铁的石墨形态

3.2 蠕墨铸铁铣削工艺的优化

蠕墨铸铁铣削工艺优化试验及测量结果见表3。

试验序号	试样编号	因素			试验结果	
		切削速度 /m·s ⁻¹	进给量 /mm·min ⁻¹	背吃刀量/mm	切屑厚度/mm	表面粗糙度 Ra/μm
1	1	A1-2.0	B1-600	C1-0.06	154.714	2.63
2	2	A1-2.0	B2-650	C2-0.08	129.273	2.92
3	3	A1-2.0	B3-700	C3-0.10	152.083	4.16
4	4	A1-2.0	B4-750	C4-0.12	186.315	3.97
5	5	A1-2.0	B5-800	C5-0.14	155.596	5.08
6	6	A2-2.6	B1-600	C2-0.08	150.060	2.17
7	7	A2-2.6	B2-650	C3-0.10	195.183	2.87
8	8	A2-2.6	B3-700	C4-0.12	147.752	2.03
9	9	A2-2.6	B4-750	C5-0.14	171.831	2.66
10	26	A2-2.6	B5-800	C1-0.06	151.708	4.04
11	28	A3-3.2	B1-600	C3-0.10	177.083	1.18
12	10	A3-3.2	B2-650	C4-0.12	202.805	1.23
13	13	A3-3.2	B3-700	C5-0.14	124.042	2.16
14	14	A3-3.2	B4-750	C1-0.06	210.583	2.29
15	15	A3-3.2	B5-800	C2-0.08	158.992	1.81
16	16	A4-3.5	B1-600	C4-0.12	101.485	1.75
17	17	A4-3.5	B2-650	C5-0.14	139.802	2.36
18	18	A4-3.5	B3-700	C1-0.06	126.479	1.48
19	19	A4-3.5	B4-750	C2-0.08	137.278	1.83
11	11	A4-3.5	B5-800	C3-0.10	142.108	1.79
21	21	A5-3.8	B1-600	C5-0.14	140.952	0.92
22	22	A5-3.8	B2-650	C1-0.06	132.375	1.19
23	23	A5-3.8	B3-700	C2-0.08	171.782	1.21
24	24	A5-3.8	B4-750	C3-0.10	151.802	1.16
25	25	A5-3.8	B5-800n	C4-0.12	121.738	1.24

表4是依据表3的实验结果给出的计算结果,其中10个重要参数:K1、K2、K3、K4、K5、S1、S2、S3、S4和S5。Ki(i=1,2,3,4,5)为25列中数字与“i”对应的切削厚度之和。Si(i=1,2,3,4,5)为25列中数字与“i”对应的表面粗糙度之和。范围H1和H2是通过正交试验可以直观分析的主要指标。H1定义为相应系数列中最大K值和最小K值之间的差。H2定义为相应系数列中最大S值和最小S值

之间的差,分别用公式(1)和(2)表示。

$$H1 = \max\{K1, K2, K3, K4, K5\} - \min\{K1, K2, K3, K4, K5\} \quad (1)$$

$$H2 = \max\{S1, S2, S3, S4, S5\} - \min\{S1, S2, S3, S4, S5\} \quad (2)$$

H1和H2反映了各因素对切屑厚度和表面粗糙度的影响程度。一般来说,每列的数值并不相等,这表明每个因素对指数性能的影响是不同的。数值越大,说明指标的影响越大。由表4可知,对于切削厚度而言,切削速度>进给量>背吃刀量;对于表面粗糙度而言,切削速度>进给量>背吃刀量,所以背吃刀量的影响是最小的,但由于有两个目标函数,在满足切削厚度最优值时难以满足表面粗糙度最优。所以正交试验仅验证了各因素的重要性顺序。它只考虑这些实验点之间的最优值,没有考虑整个实验范围的最优值。

试验序号	切削速度/m·s ⁻¹	进给量/mm·min ⁻¹	背吃刀量/mm
K1	0.777 981	0.724 294	0.775 859
K2	0.816 53	0.799 438	0.747 385
K3	0.873 505	0.722 138	0.818 259
K4	0.647 152	0.857 809	0.760 095
K5	0.718 649	0.7301 42	0.732 223
S1	18.76	8.65	11.63
S2	13.77	10.57	9.94
S3	8.67	11.04	11.16
S4	9.21	11.91	10.22
S5	5.72	13.96	13.18
H1	0.226 353	0.135 671	0.086 036
H2	13.04	5.31	3.24

为了进一步研究铣削工艺参数对切屑厚度和表面粗糙度这两个目标的综合影响,利用正交试验结果构建了BP神经网络。将表3中的25组数据选取70%(试验1到17)用来进行训练,这些数据在训练过程会呈现给网络,并根据网络的误差进行调整;15%的数据(试验18到21)被用来测量网络泛化,并在泛化停止改善时停止训练。

BP神经网络模型由输入层的3个神经元和输出层的两个神经元组成。在网络设计中,隐藏层

中的神经元数量设置为 20 个。根据模型的结构和算法对训练样本进行训练。当性能的均方误差 (MSE) 水平令人满意时, 训练停止。根据公式 (3) 计算确定网络性能的均方误差 (MSE)。5 个训练周期后, MSE 为 0.21573。训练误差曲线如图 4 所示。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (y_i - y_k)^2 \quad (3)$$

为了确认 BP 神经网络模型的准确性, 剩余的 4 组试验 (表 3 中的试验 22~25) 被用作网络的测试样本, 查看训练后的网络模型的表现。

图 5 显示了训练得到的 BP 神经网络模型测试值与实际值相关性分析, 回归 R 值表示输出和目标

之间的相关性。R 值为 1 表示密切关系, 0 表示随机关系。

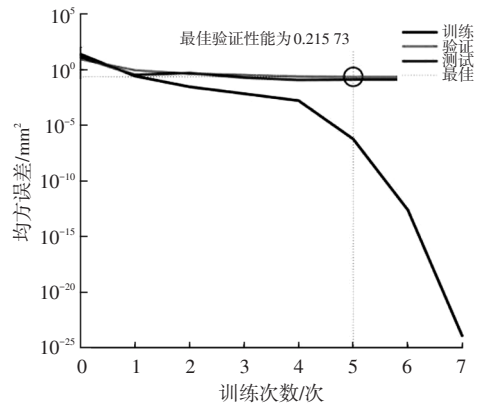
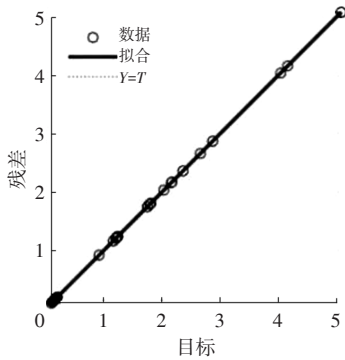
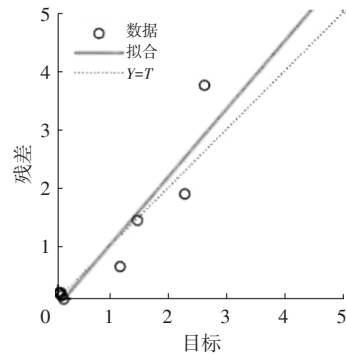


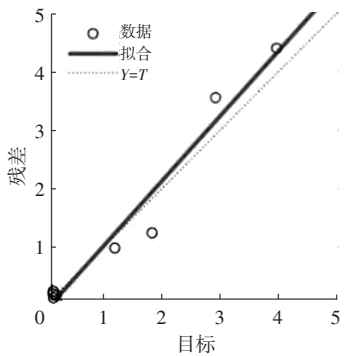
图 4 BP 网络训练过程



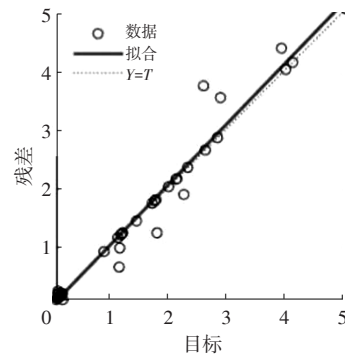
(a) 17 组模型训练预测值与试验值的误差



(b) 4 组泛化预测值与试验值的误差



(c) 4 组测试预测值与试验值的误差



(d) 25 组预测值与试验值的误差

图 5 BP 神经网络模型测试值与试验值相关性分析

从图 5a 可以看出, 通过 BP 神经网络模型能较好地捕捉到符合实际测量值的变化趋势, 训练预测值与试验值有很好的—致性。图 5b 是模型的泛化训练, 即通过数据的外延, 考察训练模型的适应性, 从图中可以看出, 泛化训练的相关性达到 0.93, 说明模型的精度值得信赖。图 5c 是模型的预测值与试验值相关性考察, 从图中可以看出, 预测值与试验值的相关性达到 0.98, 说明预测值与

试验值高度—致。通过 BP 神经网络模型能较好地捕捉到符合试验值的变化趋势, 由图 5d 曲线可知, 25 组预测值与试验值同样具有较好的一—致性。因此, 在蠕墨铸铁的表面粗糙度预测上, 遗传算法能得到更好的预测效果。从图 5c 预测曲线可以直观看出, 预测值与试验值的相关性 R 达到 97.98%。这 25 组正交试验数据在试验和计算中由于每个因素都包含—定的梯度, 这使得精度很差,

影响了试验结果。为了缩小试验数据的范围,更接近全局最优解,在BP神经网络的多目标优化中需要进行细化分析。细化分析的方法基于各种因素的影响程度。对于影响因素较大的,选择细化分析,对于影响因素较小的,选择最佳水平。在上述实验中,影响切屑厚度和表面粗糙度的两个主要因素是切削速度和进给量。所以确定背吃刀量为0.08~0.1 mm范围内变化,只考虑其余两个重要因素。以切削速度和进给量2个因素为自变量,以切屑厚度和表面粗糙度为因变量。根据BP神经网络的预测值绘制三维曲面。三维曲面模型能够实现蠕墨铸铁铣削加工的表面粗糙度的精确预测,可以预先判断加工零件的表面粗糙度值是否符合实际生产的要求,同时也可以得到正确的加工参数与表面粗糙度之间的关系。在实际加工过程中,可通过预测的表面粗糙度值及与加工参数的相关关系,逆向追溯加工参数,进行加工参数的优化,改进零件的表面粗糙度,保持加工过程质量的稳定。

当背吃刀量在0.08~0.10 mm范围内变化时,进给速度和切削速度对表面粗糙度的影响如图6所示。从图6可以看出,切削速度与进给速度对表面粗糙度有较大的影响,切削速度越大,表面粗糙度越小,随着进给速度的增大,表面粗糙度波动较大。当切削速度大于2.8 m/s时,且进给速度选取600/620/640/660 mm/min时,得到的表面粗糙度值 R_a 在1.0~2.0 μm 之间,此时工艺选择窗口较宽。当切削速度大于2.8 m/s时,且进给速度大于700 mm/min时,也可得到1.0~2.0 μm 之间的表面粗糙度值 R_a ,但此时的工艺选择窗口较窄。从加工参数与表面粗糙度的相关关系分析可知,选取较高的切削速度与较低的进给速度以及合适范围内的切削深度,可以在蠕墨铸铁的铣削加工中获得良好的表面粗糙度,但是金属去除效率太低。

图7给出切削速度和进给量对切屑厚度的影响,从图中可以看出在低的切削速度和低的进给量,以及高切削速度和高进给量时,获得的切屑厚度较厚。在底面对角线上,即随着切削速度与进给量的比值减小时,能获得稳定的切屑厚度。图8给出切屑厚度的统计结果,表明62%以上切屑的厚

度在0.09~0.15 mm之间。综合图6~8的加工参数的组合对粗糙度值、切削厚度稳定性、切屑厚度分布的影响结果可知,获得合适的表面粗糙度以及稳定的切屑厚度时,优选的加工参数选择范围是切削速度大于2.8 m/s、进给量大于720 mm/min、背吃刀量为0.1 mm。

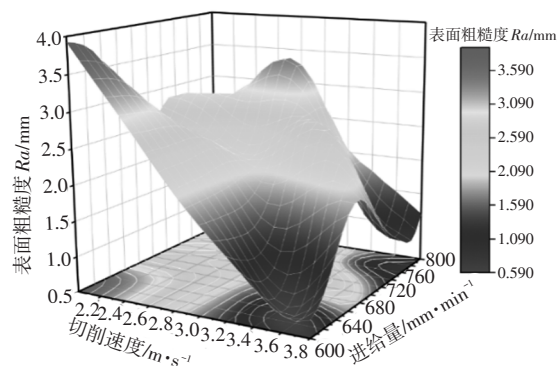


图6 切削速度和进给量对表面粗糙度的影响

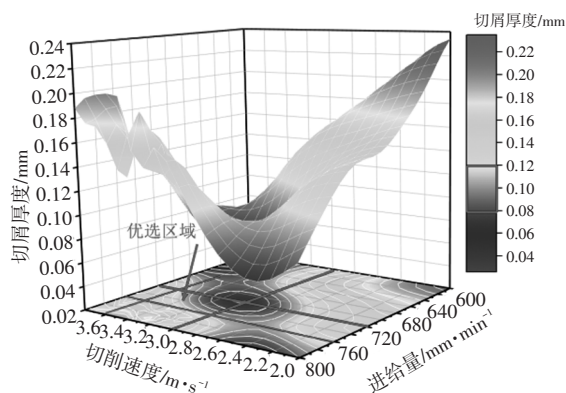


图7 切削速度和进给量对切屑厚度的影响

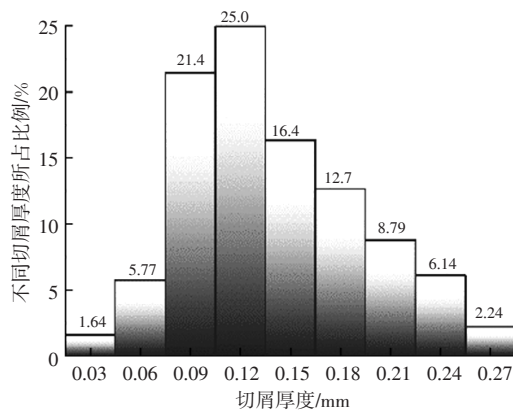


图8 切屑厚度统计

3.3 优选铣削工艺参数的试验验证

在优选参数范围内,随机选择铣削参数如表5进行试验验证。图9给出试验值与模拟值的相关性,由图可见模拟值和试验值之间有很好的—

致性。

表 5 试验验证工艺参数					
编号	切削速度 /m·s ⁻¹	进给速度 /mm·min ⁻¹	背吃刀量 /mm	表面粗糙度测量值 Ra/μm	表面粗糙度预测值 Ra/μm
1	2.8	780	0.1	1.426 286	1.249 5
2	3.0	770	0.1	1.330 375	1.153 2
3	3.1	760	0.1	1.493 714	1.311 8
4	3.2	750	0.1	1.770 857	1.429 8

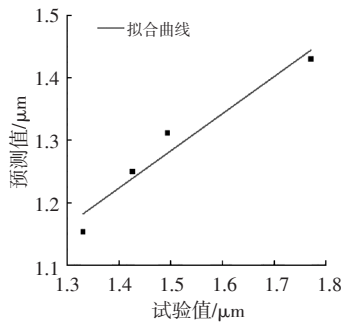


图 9 预测值与试验值的相关性

图 10 为实验验证参数下的铣削工件表面形貌。在优化的铣削速度与进给速度下,铣削工件表面粗糙度变化不明显。当铣削速度为 2.8~3.1 m/s 时,进给速度为 760~780 mm/min,表面粗糙度在试验条件下达到了最小稳定值。由图可见铣削工件表面石墨呈现完整的蠕虫状和球状,石墨边缘清晰可见。当切削速度超过 3.2 m/s 时,蠕虫状和球状石墨不在完整,呈现石墨拖尾现象,石墨边缘不清晰。

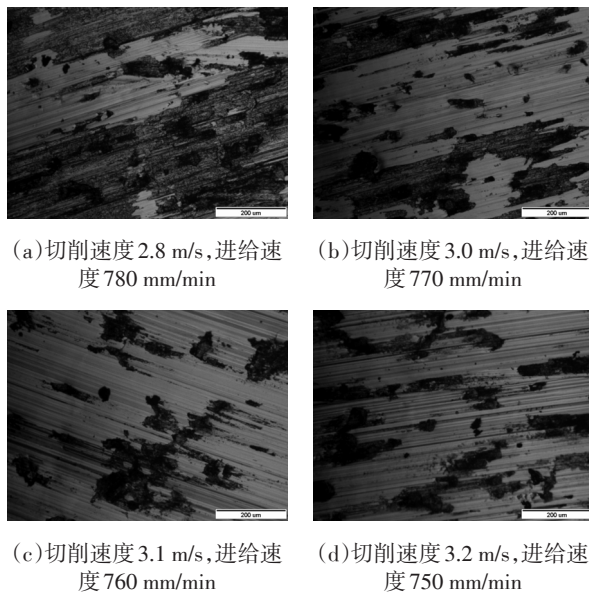


图 10 铣削样品的表面形貌

图 11 给出切屑的 SEM 照片,观察发现在优化的铣削加工参数下所有切屑均呈现“C”形弯曲和螺旋状,这是因为切屑背面的变形率小于正面的变形率。切屑背面较为粗糙,相对滑动引起明显的切屑折叠,并伴有纵向拉伸现象,如图 11a~图 11b。图 11c~图 11e 为切削速度 3.1~3.2 m/s、进给速度 750~760 mm/min 时的切屑正面形貌,由图可见切屑正面某些区域存在微型孔洞,这是因为在加工过程中,特别是铣削速度较高时,已加工表面非常光滑,使铸铁中的蠕虫状石墨从金属基体表面脱落;而在另一些区域由于剪切力和挤压力的相互作用出现了裂纹,切屑沿着石墨裂纹裂开并沿着金属基体产生塑性变形,进而产生塑性硬化效果。低铣削速度下的切屑褶皱显著,刀具振动较大;而高铣削速度下的切屑表面较光滑,加工工件的表面粗糙度也较理想。在高速切削中,切屑颜色与工件相同,说明刀具的高速旋转有效带走了铣削产生的热量,因此热变形很小,铣削力也较为平稳,有效保证了尺寸精度。

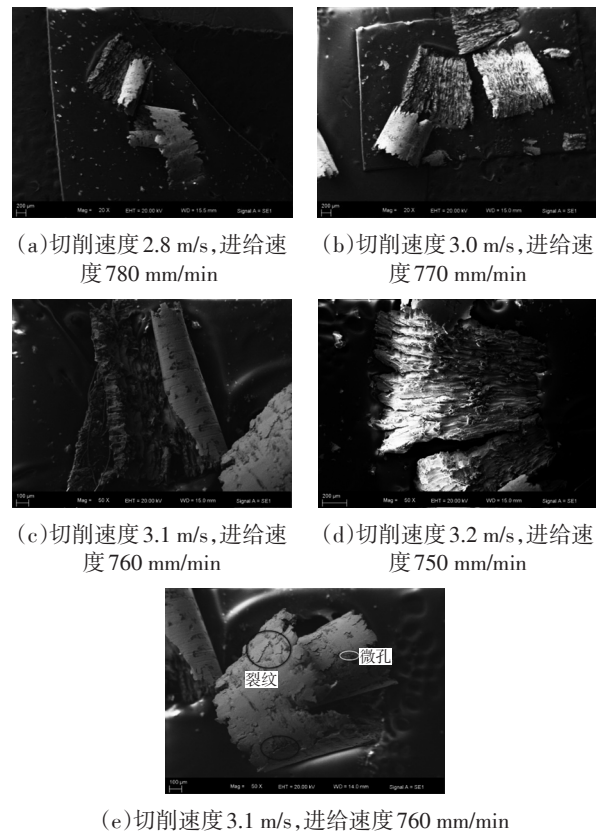


图 11 验证参数的切屑形貌

4 结论

本研究测量了各种铣削工艺参数组合下蠕墨

铸铁(Ru-450)的铣削表面粗糙度和切屑厚度,采用BP神经网络优化了铣削工艺参数范围,并对试验后的表面形貌和切屑形貌进行了分析。主要结果总结如下。

a. 铣削加工蠕墨铸铁的最佳工艺参数为铣削速度为2.8~3.1 m/s,进给速度为760~780 mm/min,背吃刀量0.1 mm。

b. 在优化铣削加工工艺参数下,铣削工件表面石墨呈现完整的蠕虫状和球状,石墨边缘清晰可见;铣削蠕墨铸铁的表面粗糙度值Ra稳定在1.0~2.0 μm 之间;切屑厚度的统计结果表明,切屑厚度在0.08~0.12 mm之间切屑占62%。

c. 铣削蠕墨铸铁时切屑主要呈螺旋形和C形,切削过程中裂纹向石墨方向扩展,颜色接近加工材料初始色且随铣削参数变化不大;提高切削速度和降低进给速度可有效改善切屑背面褶皱及层积现象。

参考文献:

- [1] XU B, RATHOD D, YEBI A, et al. A comprehensive review of organic rankine cycle waste heat recovery systems in heavy-duty diesel engine applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019(107): 145-170.
- [2] LOU M, ALPAS A T. High temperature wear mechanisms in thermally oxidized titanium alloys for engine valve applications[J]. *Wear*, 2019(426-427): 443-453.
- [3] GUO Y, MANN J B, YEUNG H, et al. Enhancing tool life in high-speed machining of compacted graphite iron (CGI) using controlled modulation[J]. *Tribology Letters*, 2012(47): 103-111.
- [4] LIU J C. Ford uses compacted graphite iron diesel engines for its F-150 pickups[J]. *Cast*, 2017, 66(3): 310-316.
- [5] PIERCE D, HAYNES A, HUGHES J, et al. High temperature materials for heavy duty diesel engines: historical and future trends Liu J C. Ford uses compacted graphite iron diesel engines for its F-150 pickups[J]. *Cast*, 2017, 66(3): 310-316.
- [6] MENG F N, DING Z, MENG X D, et al. Research on different cooling methods in the machining of CGI and GCI[J]. *Appl Nanosci*, 2020,10(7): 2177-2188.
- [7] GEORGIU G. High speed machining of compacted graphite iron[J]. *World Manuf Eng Market*, 2005(6): 89-93.
- [8] VARGHESE K P, BALAJI A K. Effects of tool material, tool topography and minimal quantity lubrication (MQL) on machining performance of compacted graphite iron (CGI)[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2007, 20(6): 347-358.
- [9] REJOWSKI ED, SOARES E, ROTH I, et al. Cylinder liner in ductile cast iron for high loaded combustion diesel engines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of the Asme*, 2012, 134(7): 072807.
- [10] ROSA S D, DINIZ A E, ANDRADE C L F, et al. Analysis of tool wear, surface roughness and cutting power in the turning process of compact graphite irons with different titanium content[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2010, 32(3): 234-240.
- [11] NI GM, YIN H, ZHANG J, et al. Experimental study on high speed turning of compacted graphite iron with coated carbide inserts[J]. *Cemented Carbide*. 2017, 34(6): 419-428.
- [12] GUO Y, STALBAUM T, MANN J B, et al. Modulation-assisted high speed machining of compacted graphite iron (CGI)[J]. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013, 15(4): 426-431.
- [13] KUZU AT, BIJANZAD A, BAKKAL M. Experimental investigations of machinability in the turning of compacted graphite iron using minimum quantity lubrication[J]. *Mach Sci Technol*, 2015, 19(4): 559-576.
- [14] 冯义超, 杜勇, 王社权, 等. 蠕墨铸铁铣削加工的试验研究[J]. *硬质合金*, 2015, 32(4): 257-265.
- [15] 胡伟, 孟凡宁, 艾晓南, 等. 不同切削液加工蠕墨铸铁试验研究[J]. *内燃机与配件*, 2021(18): 121-124.