

WC-10Co4Cr 涂层高速磨削力预测研究

撰文 / 江苏徐州工程机械研究院 陈新春 齐伟 王灿 闫乃晴

为了优选 WC-10Co4Cr 高速磨削参数、实现高精度加工,满足实际生产的迫切需求,提出一种基于响应曲面法的磨削力预测方法。从高速磨削工艺系统特点出发,给出面向固定工艺系统的 WC-10Co4Cr 高速磨削力预测原理。结合正交实验数据,建立磨削力预测模型。运用方差分析方法,检验预测模型的拟合度。以平面 WC-10Co4Cr 涂层材料磨削为例,应用上述预测模型和 BP 神经网络分别进行磨削力预测,并同实际加工结果比较。结果表明,本研究中的法向与切向磨削力预测结果与实际加工结果比较,平均误差率分别为 6.29%、5.55%;BP 神经网络预测结果与实际加工结果比较,平均误差率分别为 7.89%、35.16%,证明所提出的磨削力预测方法是有效的,更加满足实际生产的需求。本研究为 WC-10Co4Cr 高速磨削参数优化、高精度加工提供了技术支持。

一、引言

WC-10Co4Cr 涂层材料具有耐磨性好、硬度高、耐腐蚀性好以及耐高温等优点,广泛应用于航空、航天、船舶及工程机械等领域。近年来,随着绿色制造理念的推广,WC-10Co4Cr 开始被用于废旧零件的再制造生产过程中,对零部件表面修复与强化具有良好的效果。

在 WC-10Co4Cr 涂层高速磨削加工的研究中,磨削力是重要的研究对象。磨削力是磨削参数选择过程中重要的参考指标,对磨削系统和磨削质量均有显著的影响。因此,进行 WC-10Co4Cr 高速磨削力预测的研究是十分必要的。

目前,磨削力预测研究的方法主要有解析法和实验法两种。解析法主要依据磨削过程中产生的弹/塑性变形、磨屑形成以及摩擦作用等磨削机理预测磨削力;实验法是根据磨削试验的设定参数及测量结果建立相应的磨削力预测模型。

国内外学者在传统磨削力预测方面开展了大量工作,但尚未形成面向 WC-10Co4Cr 高速磨削力预测的理论及相关模型。对此,本研究通过实验法,运用极差分析法确定高

速磨削参数对磨削力的影响程度,并运用方差分析法及响应曲面法,建立幂指数型高速磨削力预测模型。通过与神经网络法预测模型进行比较和实验验证,证明幂指数型磨削力预测模型的有效性。

二、磨削力预测原理

高速磨削加工是一个复杂的材料去除过程。磨削力受很多因素影响,如磨削液、砂轮特性、工件材料、工件尺寸、机床精度、砂轮线速度、工件速度和磨削深度等。上述因素可以归纳为以下三方面:砂轮特性、工件特性和磨削参数。在实际生产中,工件特性是固定不变的,砂轮特性可以通过磨削经验和简单的对比试验确定最佳参数。相比之下,磨削参数的选择对磨削力有着更为重要的作用。因此,研究固定工艺系统的磨削力预测具有更为重要的实际应用价值。

目前,磨削力的预测没有统一的数学模型,而国内外学者在实验研究中常采用幂指数型模型。据此,本文采用幂指数型模型进行磨削力的预测计算。磨削力幂指数型预测模

型的数学表达式为:

$$F = k v_s^a v_w^b a_p^c \quad (1)$$

式中, F 为磨削力; k 为系数; v_s 为砂轮线速度; v_w 为工作台速度; a_p 为磨削深度; a 、 b 、 c 为参数指数。

从公式 (1) 可得, 幂指数模型如下:

$$\ln F = \ln k + a \ln v_s + b \ln v_w + c \ln a_p \quad (2)$$

由公式 (2) 可知, 本研究主要目的之一为确定 k 、 a 、 b 和 c 。计算过程如图 1 所示。通过最小二乘法进行数据的回归拟合, 获得相应的回归拟合方程。对获得的回归拟合方程进行残差分析, 检测统计数据中是否存在误差较大的数据, 即奇异数据。若存在奇异数据, 去除奇异数据后重新进行数据拟合, 以避免奇异数据对预测结果造成的影响。在确定没有奇异数据后, 利用方差分析法检验此时回归拟合方程的显著性。若回归拟合方程的显著性较弱, 则说明该模型不适合磨削力的预测, 需要重新选择预测模型。若回归拟合方程的显著性较强, 即可获得最终的磨削力预测模型。

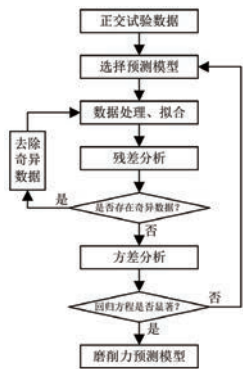


图 1 预测模型的建立流程

三、磨削力预测模型

1. 磨削正交试验

磨削正交试验在湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心 314m/s 数控超高速平面磨削试验台上完成, 机床如图 2 所示。

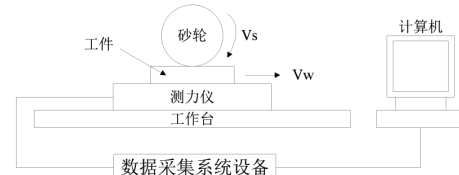


图 2 314m/s 数控超高速平面磨削试验台

试件: 超音速火焰喷涂硬质合金 WC-10Co4Cr 涂层试块, 涂层面积为 $44 \times 20 \text{mm}^2$, 厚度 0.35mm。

砂轮: 奥地利泰利莱金刚石砂轮, 树脂结合剂, 粒度为 400#, 直径为 350mm, 浓度为 100%。

测力仪: 瑞士 KISTLER 公司 9257B 测力仪。整个磨削力测量系统如图 3 所示。



(a) 磨削力测量系统原理图



(b) 测力仪实物图

图 3 磨削力测量系统示意图

试验设计: 基于项目组长期的研究基础, 设计采用三因素五水平 $L_{25}(5^3)$ 的正交试验方式, 以获得最佳工艺参数组合, 各参数试验数据如表 1 所示。考虑到磨削力可以分解成沿垂直于工件表面和平行于工件表面两个方向的力, 在本研究中, 分别检测两个方向的力。最终获得试验数据, 如表 2 所示。

2. 极差分析

对表 2 中记录的正交试验数据进行极差分析, 根据极差分析结果可以直观地了解各个磨削参数对磨削力的影响程度。极差分析过程及结果如表 3 所示。表 3 中 K_i 为各磨削参数第 i 水平所对应实验结果之和; Z 为各磨削参数的水平数; k_i 为各磨削参数第 i 水平所对应实验结果的平均值, $k_i = K_i / Z$; D 为极差。

表 1 磨削参数试验数据表

位级	砂轮线速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	工作台速度 $v_w / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	磨削深度 $a_p / (\text{mm})$
1	70	700	0.008
2	90	1400	0.015
3	110	2100	0.02
4	130	2800	0.04
5	150	3500	0.06

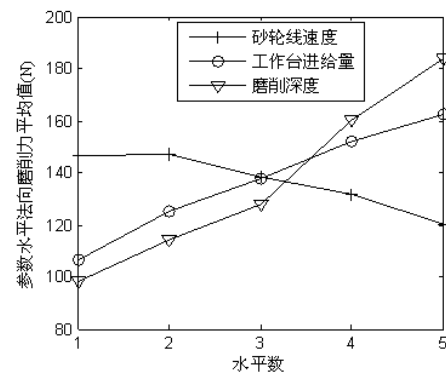
表2 正交实验表

实验号	$v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_w / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$a_p / (\text{mm})$	$F_n / (\text{N})$	$F_t / (\text{N})$
1	70	700	0.008	77.907	5.997
2	70	1400	0.015	106.67	14.020
3	70	2100	0.02	130.631	21.784
4	70	2800	0.04	184.188	47.240
5	70	3500	0.06	234.105	74.759
6	90	700	0.015	96.481	8.733
7	90	1400	0.02	123.085	15.949
8	90	2100	0.04	178.451	39.559
9	90	2800	0.06	220.302	65.597
10	90	3500	0.008	117.424	13.182
11	110	700	0.02	108.06	10.579
12	110	1400	0.04	151.841	27.875
13	110	2100	0.06	180.382	46.439
14	110	2800	0.008	114.293	12.439
15	110	3500	0.015	137.526	20.474
16	130	700	0.04	122.735	16.714
17	130	1400	0.06	158.307	39.144
18	130	2100	0.008	95.24	8.928
19	130	2800	0.015	123.983	18.594
20	130	3500	0.02	159.009	35.153
21	150	700	0.06	126.516	24.647
22	150	1400	0.008	86.122	7.158
23	150	2100	0.015	105.354	16.306
24	150	2800	0.02	118.785	22.697
25	150	3500	0.04	163.252	44.001

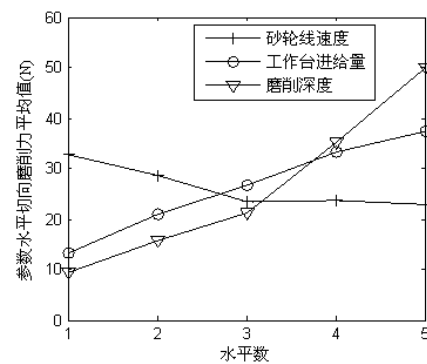
表3 极差分析表

分析项	$F_n / (\text{N})$			$F_t / (\text{N})$		
	$v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_w / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$a_p / (\text{mm})$	$v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_w / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$a_p / (\text{mm})$
K_1	733.501	531.699	490.986	163.8	66.67	47.704
K_2	735.743	626.025	570.014	143.02	104.146	78.127
K_3	692.102	690.058	639.57	117.806	133.016	106.162
K_4	659.274	761.551	800.467	118.533	166.567	175.389
K_5	600.029	811.316	919.612	114.809	187.569	250.586
Z	5	5	5	5	5	5
k_1	146.7002	106.3398	98.1972	32.76	13.334	9.5408
k_2	147.1486	125.205	114.0028	28.604	20.8292	15.6254
k_3	138.4204	138.0116	127.914	23.5612	26.6032	21.2324
k_4	131.8548	152.3102	160.0934	23.7066	33.3134	35.0778
k_5	120.0058	162.2632	183.9224	22.9618	37.5138	50.1172
D	27.1428	55.9234	85.7252	9.7982	24.1798	40.5764

从表3可以看出,磨削深度对法向磨削力和切向磨削力影响最大;其次是工作台速度造成的影响;最后是砂轮线速度造成的影响。具体影响情况如图4所示,法向磨削力和切向磨削力均随着磨削深度和工作台速度的增大而增大,而随着砂轮线速度的增大而减小。



(a) 法向磨削力随磨削参数变化图



(b) 切向磨削力随磨削参数变化图

图4 磨削力随磨削参数变化图

3. 预测模型

按照式(2)所示,令 $x_1 = \ln v_s$, $x_2 = \ln v_w$, $x_3 = \ln a_p$, $y_1 = \ln F_n$, $y_2 = \ln F_t$, 并利用最小二乘法进行数据回归拟合, 获得回归方程为:

$$\hat{y}_1 = 5.0362 - 0.1839x_1 + 0.2512x_2 + 0.3121x_3 \quad (3)$$

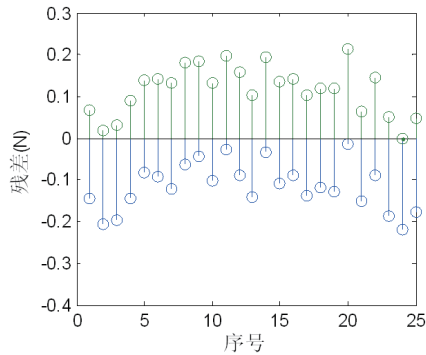
$$\hat{y}_2 = 2.4179 - 0.1974x_1 + 0.6134x_2 + 0.8056x_3 \quad (4)$$

式中, $\hat{y}_1$ 和 $\hat{y}_2$ 分别是 y_1 、 y_2 的预测值。假设 $\hat{y}_1$ 和 $\hat{y}_2$ 两个预测值是理想值, 通过残差分析检验拟合数据误差。

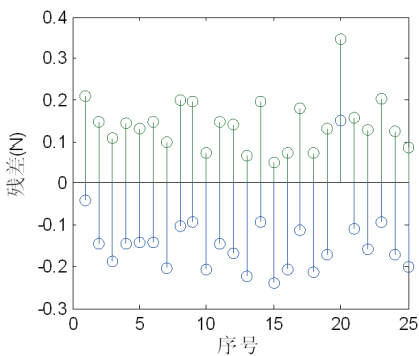
残差指的是预测误差与允许误差之差; 残差区间就是残差可能存在的范围。残差区间表达式为:

$$d_i = [\varphi_i - r_i \quad \varphi_i + r_i] \quad (5)$$

式中, φ_i 为某点的预测误差; r_i 为该点的允许误差。图5是置信水平为 $1-\alpha=0.95$ 的残差分析结果。



(a) 法向磨削力预测模型残差区间图



(b) 切向磨削力预测模型残差区间图

图5 磨削力预测模型的残差区间图

图5(a)中24号数据残差区间不包含零点,即预测误差不在允许误差区间之内。对于式(3)所示法向磨削力预测模型来说,24号拟合数据为奇异数据。同理,图5(b)中的20号数据对于式(4)所示切向磨削力预测模型来说为奇异数据。去除奇异数据,重新进行数据拟合,并再次进行残差分析,如此反复,直到去除所有的奇异数据。最后,获得两个新的回归方程分别为:

$$\hat{y}_{M1} = 4.8735 - 0.1598x_1 + 0.2580x_2 + 0.3109x_3 \quad (6)$$

$$\hat{y}_{M2} = 2.7331 - 0.2288x_1 + 0.5907x_2 + 0.8082x_3 \quad (7)$$

进一步通过方差分析检验回归方程的显著性,从而判断 y_1 和 y_2 与变量 x_1 、 x_2 、 x_3 之间是否呈线性关系。本文使用F检验,检验水平 $\alpha=0.05$,方差分析结果如表4所示。表中显示,回归方程(6)的F检验值 $F_1=187.6$,回归方程(7)的F检验值 $F_2=1530.8$,故有 $F_2 > F_1 > F_1(0.95, 3, 20) = 3.0984$,说明回归方程(6)和回归方程(7)的显著性较强,也说明 y_1 和 y_2 与变量 x_1 、 x_2 、 x_3 之间均呈现明显的线性关系。综上所述,回归方程(6)和回归方程(7)是非常具有实际意义的。

表4 方差分析表

项目	方差	平方和	自由度	均方	F值
$\hat{y}_{M1}$	回归	1.8117	3	0.6039	187.6
	剩余	0.0644	20	0.0032	
	总和	1.8760	23	—	
$\hat{y}_{M2}$	回归	11.1500	3	3.7167	1530.8
	剩余	0.0486	20	0.0024	
	总和	11.1986	23	—	

最后,可得到法向磨削力预测模型为:

$$\hat{F}_n = 130.7878V_s^{-0.1598}V_w^{0.2580}a_p^{0.3109} \quad (8)$$

切向磨削力预测模型为:

$$\hat{F}_t = 15.3805V_s^{-0.2288}V_w^{0.5907}a_p^{0.8082} \quad (9)$$

四、结果分析

1. 拟合精度分析

在数据拟合及转型获得磨削力预测模型的过程中,不可避免地会产生一些计算上的误差,为了能够直观地了解这些误差,我们将各个点的实验值与拟合值一一对比,并引入BP神经网络法拟合值进行横向比较,以确定式(8)和式(9)进行磨削力预测的准确性和可信性。本文引入BP神经网络法采用量化共轭梯度法训练模型,隐层含30个神经元,训练时间600s后结束。拟合误差分析结果如表5和表6所示。

从表5和表6中数据可知,利用响应曲面法拟合的两组数据的平均误差率分别为4.29%和3.64%,说明本文所述响应曲面法的拟合精度达到了95%以上,符合实际应用的要求。而利用BP神经网络法拟合的两组数据的平均误差率分别为0.22%和4.94%,亦均符合实际应用的要求。

但是,上述BP神经网络模型训练600s后才达到这样的拟合精度,拟合效率非常低;并且,每次模型训练后拟合的结果都不同,拟合结果的一致性非常差。然而,利用响应曲面法获得的预测模型是一个幂指数型数学模型,计算速度快,结果一致性高。所以,在实际生产过程中,无论从精度角度、效率角度,还是预测结果的稳定性角度考虑,本文所述响应曲面法都比BP神经网络法更加适合磨削力预测的应用。图6为磨削力拟合值对比图。

2. 预测精度分析

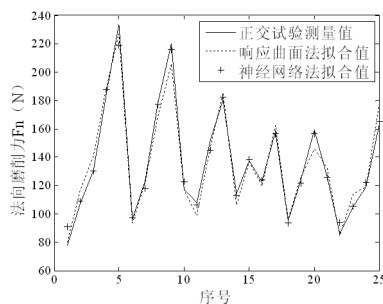
对建立好的磨削力预测模型进行试验验证。根据表7中所示磨削参数组合进行磨削试验,并测量记录相应的磨削

表5 法向磨削力预测模型拟合精度表

序号	验证值	响应曲面法		神经网络法	
		拟合值	误差率	拟合值	误差率
1	77.907	80.1133	2.83%	90.8072	1.84%
2	106.670	116.4797	9.20%	108.7294	0.15%
3	130.631	141.4249	8.26%	130.2407	0.02%
4	184.188	188.9557	2.59%	187.6311	0.12%
5	234.105	227.0463	3.02%	219.1374	0.43%
6	96.481	93.5742	3.01%	97.0872	0.09%
7	123.085	122.3665	0.58%	117.8395	0.37%
8	178.451	168.5359	5.56%	177.4923	0.05%
9	220.302	205.9101	6.53%	216.0846	0.15%
10	117.424	116.5691	0.73%	122.6256	0.15%
11	108.060	99.1019	8.29%	106.5672	0.21%
12	151.841	147.0086	3.18%	144.8046	0.50%
13	180.382	185.1500	2.64%	182.4232	0.10%
14	114.293	106.5762	6.75%	113.4109	0.03%
15	137.526	137.2614	0.19%	138.4852	0.03%
16	122.735	119.7001	2.47%	123.8299	0.16%
17	158.307	162.3702	2.57%	156.4458	0.13%
18	95.240	96.3472	1.16%	93.6543	0.08%
19	123.983	126.1704	1.76%	121.5555	0.09%
20	159.009	146.1526	8.09%	156.4082	0.07%
21	126.516	132.7150	4.90%	125.9335	0.08%
22	86.122	84.8171	1.52%	94.1890	0.58%
23	105.354	114.4981	8.68%	105.3185	0.00%
24	118.785	—	—	122.3648	0.13%
25	163.252	177.2071	8.55%	165.2961	0.06%
平均误差率			4.29%		0.22%

力数据,结果如表7所示。然后,分别通过响应曲面法预测模型和神经网络法预测模型获得相应的预测值,并计算误差率,结果如表8、表9所示。

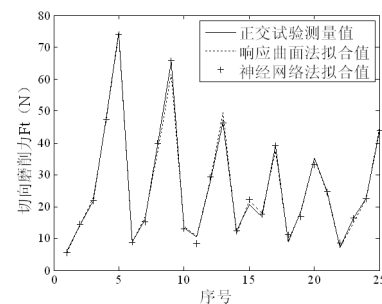
从表8和表9中预测结果可知,响应曲面法预测模型的预测误差率分别为6.29%和5.55%,高于之前的拟合误



(a) 法向磨削力

表6 切向磨削力预测模型拟合精度表

序号	验证值	响应曲面法		神经网络法	
		预测值	误差率	预测值	误差率
1	5.997	5.6344	6.05%	5.5414	7.60%
2	14.020	14.1036	0.60%	14.5641	3.88%
3	21.784	22.6118	3.80%	21.8000	0.07%
4	47.240	46.9292	0.66%	47.2521	0.03%
5	74.759	74.3045	0.61%	73.9012	1.15%
6	8.733	8.8416	1.24%	8.8064	0.84%
7	15.949	16.8013	5.34%	15.2619	4.31%
8	39.559	37.3826	5.50%	39.9032	0.87%
9	65.597	61.4892	6.26%	65.7393	0.22%
10	13.182	13.7656	4.43%	12.9777	1.55%
11	10.579	10.6555	0.72%	8.3574	21.00%
12	27.875	28.1001	0.81%	29.3506	5.29%
13	46.439	49.5513	6.70%	46.3442	0.20%
14	12.439	11.5242	7.35%	12.4433	0.03%
15	20.474	21.8529	6.73%	22.2407	8.63%
16	16.714	17.9589	7.45%	17.6211	5.43%
17	39.144	37.5348	4.11%	39.1679	0.06%
18	8.928	9.3585	4.82%	11.2625	26.15%
19	18.594	18.4358	0.85%	16.7464	9.94%
20	35.153	—	—	33.0807	5.90%
21	24.647	24.1204	2.14%	24.6171	0.12%
22	7.158	7.1280	0.42%	8.5244	19.09%
23	16.306	15.0536	7.68%	16.3222	0.10%
24	22.697	22.5126	0.81%	22.5012	0.86%
25	44.001	44.9756	2.21%	43.9541	0.11%
平均误差率			3.64%		4.94%



(b) 切向磨削力

图6 磨削力拟合值对比图

差率,但两组误差率之间的差别是微小的,在可接受范围之内。而神经网络法预测模型的预测误差率分别为7.89%和35.16%,完全超出了可接受的范围,毫无实际意义。图7为磨削力预测值对比图。

表 7 验证实验表

实验号	$v_s / (m \cdot s^{-1})$	$v_w / (mm \cdot min^{-1})$	$a_p / (mm)$	$F_n / (N)$	$F_t / (N)$
1	60	3600	0.01	131.293	18.704
2	80	3600	0.01	138.087	16.554
3	120	3600	0.01	147.155	14.839
4	160	3600	0.01	123.542	12.783
5	120	1200	0.01	92.503	8.679
6	120	2400	0.01	114.661	11.617
7	120	4800	0.01	132.987	17.748
8	120	3600	0.005	105.366	9.455
9	120	3600	0.03	175.366	36.621
10	120	3600	0.05	211.296	55.937

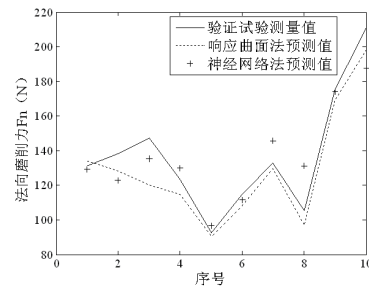
表 8 法向磨削力预测模型预测精度表

序号	验证值	响应曲面法		神经网络法	
		预测值	误差率	预测值	误差率
1	131.293	134.2781	2.27%	129.1408	1.64%
2	138.087	128.2464	7.13%	122.9554	10.96%
3	147.155	120.2024	18.32%	135.4295	7.97%
4	123.542	114.8030	7.07%	130.1732	5.37%
5	92.503	90.5375	2.12%	96.5182	4.34%
6	114.661	108.2646	5.58%	111.4708	2.78%
7	132.987	129.4625	2.65%	145.4906	9.40%
8	105.366	96.8969	8.04%	131.1804	24.50%
9	175.366	169.1495	3.54%	174.1265	0.71%
10	211.296	198.2682	6.17%	187.6088	11.21%
平均误差率			6.29%		7.89%

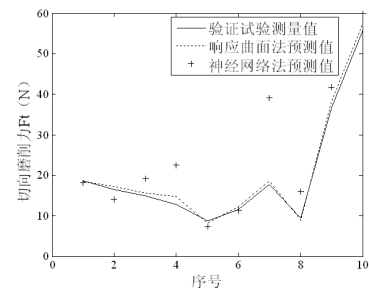
表 9 切向磨削力预测模型预测精度表

序号	验证值	响应曲面法		神经网络法	
		预测值	误差率	预测值	误差率
1	18.704	18.3921	1.67%	18.1206	3.12%
2	16.554	17.2207	4.03%	14.0350	15.22%
3	14.839	15.6953	5.77%	19.0599	28.44%
4	12.783	14.6957	14.96%	22.5192	76.17%
5	8.679	8.2018	5.50%	7.3396	15.43%
6	11.617	12.3522	6.33%	11.2975	2.75%
7	17.748	18.6027	4.82%	39.1400	120.53%
8	9.455	8.9633	5.20%	15.9844	69.06%
9	36.621	38.1411	4.15%	41.6577	13.75%
10	55.937	57.6366	3.04%	59.9166	7.11%
平均误差率			5.55%		35.16

综上所述, 式 (9) 所示法向磨削力预测模型和式 (10) 所示切向磨削力预测模型具有预测精度高、预测效率高、预



(a) 法向磨削力



(b) 切向磨削力

图 7 磨削力预测值对比图

测结果稳定性好等特点。

五、结语

本研究围绕 WC-10Co4Cr 高速磨削力预测, 开展了磨削力预测原理、正交实验、预测模型建立和实验验证等工作, 得出了以下结论。

(1) 在响应曲面法建立磨削力预测模型的过程中, 对预测结果进行残差区间分析, 可以有效地检查并去除奇异数据, 保证预测模型的准确性。

(2) 基于响应曲面方法建立磨削力预测模型, 显著性极高, 具有较高的实际意义。利用该模型对 WC-10Co4Cr 高速磨削力进行预测, 法向与切向磨削力的拟合平均误差率分别为 4.29% 和 3.64%, 预测平均误差率分别为 6.29% 和 5.55%, 置信度达到 95% 以上。

(3) 与 BP 神经网络预测结果相比, 本研究成果具有预测精度高、置信度高的特点, 更加适合于实际生产的需求。

(4) 在 WC-10Co4Cr 高速磨削中, 对法向与切向磨削力, 均为磨削深度影响最大, 其次是工作台速度, 最后是砂轮线速度; 法向与切向磨削力均随着磨削深度和工作台速度的在增大而增大, 随着砂轮线速度的增大而减小。

(5) 本研究为 WC-10Co4Cr 高速磨削参数优化、高精度加工提供了技术支持。IM