

# 硬态干切削中切削参数对铣削力的影响

唐德文<sup>1,2</sup>, 彭聪<sup>1</sup>, 张家雨<sup>1</sup>, 吕希建<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南华大学; <sup>2</sup>湖南省核燃料循环技术与装备协同创新中心

**摘要:** 采用多元线性回归分析方法研究了切削速度、进给量和切削深度对铣削力的影响规律,借助最小二乘法原理对切削力经验公式回归系数进行参数估计和优化,并对经验公式进行相关性检验。检验结果表明,相关显著性很高。

**关键词:** 切削参数;切削力;最小二乘法

**中图分类号:** TG53;TG501;TG115.6+3

**文献标志码:** A

## Influence of Cutting Parameter on Milling Force in Hard Dry Cutting

Tang Dewen, Peng Cong, Zhang Jiayu, Lv Xijian

**Abstract:** By using multivariable linear regression method, the influences of the cutting speed, feed rate and cutting depth on the milling force are investigated. By means of least square method, the regression coefficients in the empirical cutting force formula are estimated and optimized. The correlation test for the empirical formula is also carried out. The test result shows that the correlation saliency is highly significant.

**Keywords:** cutting parameter; cutting force; least squares method

## 1 引言

40CrMnMo属于高强度钢,高强度钢是合金钢经过淬火和回火处理后的合金钢,具有较高的强度、硬度以及一定的韧性和塑性<sup>[1]</sup>。影响铣削加工重要的参数是切削力,切削力的大小不仅直接影响刀具寿命和工件加工质量,还对研究切削机理有着重要作用<sup>[2]</sup>。因此,研究切削力的变化规律对于分析切削机理、优化切削参数和刀具结构参数以及提高加工精度具有积极意义。

张显银等<sup>[3]</sup>研究了TiAlN涂层刀具对40CrNi钢进行干式切削试验,并对切削过程中的切削力进行分析,得出切削参数对切向力的影响大于轴向力和径向力影响的结论。杨毅青<sup>[4]</sup>、高毅<sup>[5]</sup>、孙士雷<sup>[6]</sup>等从铣削力的预测、铣削力的试验分析以及多种铣削力模型的分析比较等方面研究了切削参数对铣削力的影响规律。

经验法是建立铣削力模型时的一种简单实用方法,是铣削力建模最常用的方法之一。先根据试验测量出切削力,再通过切削参数确定出数学表达式,最后用回归分析的方法建立切削力模型<sup>[7,8]</sup>。目前,铣削建模方法中还存在很多难点问题,尤其是微

铣削力建模还较多待研究的内容<sup>[9]</sup>,本文基于切削参数对切削力的影响进行研究,选择经验法建立切削力模型。

## 2 试验条件

试验材料为高硬度、高强度钢40CrMnMo,工件尺寸100mm×100mm×10mm。

### 2.1 试验系统

选用中国台湾捷高精机有限公司生产的JC-30Ca四轴联动立式加工中心,其主轴最大转速可达24000rpm,X、Y、Z三轴最大行程分别为510mm、300mm、300mm,X、Y、Z三轴快速移动速度分别为48m/min、48m/min、60m/min。冷却方式为空气自然冷却,铣削方式为顺铣加工。

刀具采用四刃直柄平底立铣刀(D8×20×60×4F),材质为整体硬质合金,切削刃部分为TiAlN涂层。采用涂层刀具能够有效降低切削温度和提高刀具寿命,从而节约试验成本。

采用瑞士Kistler(奇石乐)公司生产的Kistler9272测力仪测量铣削力,电荷放大器采用Kistler5070A,X和Y方向的量程为±5KN,Z方向的量程为-5~20KN,数据采集软件采用Kistler公司的DynoWare(2825A)。切削力测量系统原理如图1所示,试验现场如图2所示。

### 2.2 铣削力试验

采用单因素进行试验,试验切削参数:切削速度

基金项目: 湖南省自然科学基金(2015JJ5023); 湖南教育厅优秀青年项目(5B206); 湖南省科技重大专项(2012FJ1007); 湖南省研究生科研创新项目(CX2017B525)

收稿日期: 2017年9月

$V_f = 300 - 500 \text{ m/min}$ , 每转进给量  $f = 0.1 - 0.3 \text{ mm/r}$ , 切削深度  $a_p = 0.4 - 0.8 \text{ mm}$ , 切削宽度  $a_p = 8 \text{ mm}$ 。共进行 27 组试验, 测量平均铣削力。

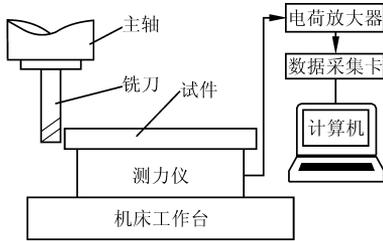


图1 切削力测量原理



图2 试验现场

当  $V_f = 500 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.1 \text{ mm/r}$ ,  $a_p = 0.6 \text{ mm}$  时, 铣削力随时间的变化见图 3。由图可知, 铣削中产生的扭矩和 Z 向铣削力很小, 因此本文不对其进行相关的分析。为保证切削力对切削过程的评估可靠性, 取切削力的平均值进行研究(若无特殊说明, 本文均指平均铣削力), 这样可保证各组试验的条件相同, 以减少误差和提高分析的可靠性。试验所获得的平均铣削力见表 1。

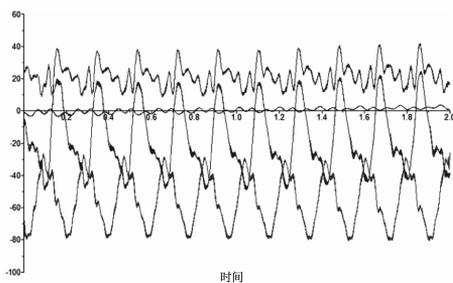


图3 铣削力随时间变化曲线

### 3 铣削力数学建模及多元线性回归分析

#### 3.1 铣削力数学模型

根据金属切削中切削力的经验公式, 在切削加工 40CrMnMo 时的切削力数学模型可通过三元线性回归方程来拟合。X 方向的铣削力的数学模型为

$$F_x = C_F V_c^{b_1} f^{b_2} a_p^{b_3} \quad (1)$$

对式(1)两边取自然对数得

$$\ln F_x = \ln C_F + b_1 \ln V_c + b_2 \ln f + b_3 \ln a_p \quad (2)$$

令  $\hat{y} = \ln F_x$ ,  $b_0 = \ln C_F$ ,  $x_1 = \ln V_c$ ,  $x_2 = \ln f$ ,  $x_3 = \ln a_p$ , 则式(2)变为三元一次线性回归方程

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (3)$$

表1 铣削力试验值及预测值

| 序号 | $V_c$<br>(m/min) | $f$<br>(mm/r) | $a_p$<br>(mm) | $F_x$ (N) |          | $F_y$ (N) |          |
|----|------------------|---------------|---------------|-----------|----------|-----------|----------|
|    |                  |               |               | 实测        | 预测       | 实测        | 预测       |
| 1  | 300              | 0.1           | 0.8           | 29.917    | 48.74021 | 60.904    | 65.85896 |
| 2  | 300              | 0.1           | 0.6           | 22.154    | 38.65443 | 51.470    | 51.88337 |
| 3  | 300              | 0.1           | 0.4           | 13.875    | 27.87965 | 37.001    | 37.07071 |
| 4  | 300              | 0.2           | 0.8           | 30.019    | 59.6     | 77.664    | 100.783  |
| 5  | 300              | 0.2           | 0.6           | 32.821    | 47.26701 | 87.919    | 79.39632 |
| 6  | 300              | 0.2           | 0.4           | 33.916    | 34.09237 | 86.014    | 56.72874 |
| 7  | 300              | 0.3           | 0.8           | 57.895    | 67.04366 | 109.456   | 129.2623 |
| 8  | 300              | 0.3           | 0.6           | 48.768    | 53.17067 | 73.434    | 101.8322 |
| 9  | 300              | 0.3           | 0.4           | 35.499    | 38.34986 | 50.061    | 72.7592  |
| 10 | 400              | 0.1           | 0.8           | 48.103    | 47.0494  | 146.291   | 73.03909 |
| 11 | 400              | 0.1           | 0.6           | 39.250    | 37.31372 | 135.810   | 57.53984 |
| 12 | 400              | 0.1           | 0.4           | 31.134    | 26.91288 | 124.275   | 41.11226 |
| 13 | 400              | 0.2           | 0.8           | 63.503    | 57.53358 | 112.339   | 111.7706 |
| 14 | 400              | 0.2           | 0.6           | 51.298    | 45.62846 | 90.545    | 88.05233 |
| 15 | 400              | 0.2           | 0.4           | 36.059    | 32.90996 | 64.733    | 62.91346 |
| 16 | 400              | 0.3           | 0.8           | 73.222    | 64.71843 | 145.683   | 143.3548 |
| 17 | 400              | 0.3           | 0.6           | 54.885    | 51.32658 | 110.497   | 112.9342 |
| 18 | 400              | 0.3           | 0.4           | 37.254    | 37.01979 | 77.874    | 80.69161 |
| 19 | 500              | 0.1           | 0.8           | 41.213    | 45.7787  | 76.481    | 79.14325 |
| 20 | 500              | 0.1           | 0.6           | 35.976    | 36.30595 | 67.513    | 62.34867 |
| 21 | 500              | 0.1           | 0.4           | 22.988    | 26.18602 | 44.710    | 44.54817 |
| 22 | 500              | 0.2           | 0.8           | 52.655    | 55.97972 | 120.579   | 121.1117 |
| 23 | 500              | 0.2           | 0.6           | 40.018    | 44.39613 | 97.334    | 95.4112  |
| 24 | 500              | 0.2           | 0.4           | 29.962    | 32.02113 | 70.157    | 68.17138 |
| 25 | 500              | 0.3           | 0.8           | 64.719    | 62.97052 | 157.672   | 155.3356 |
| 26 | 500              | 0.3           | 0.6           | 51.733    | 49.94036 | 120.292   | 122.3726 |
| 27 | 500              | 0.3           | 0.4           | 36.254    | 36.01996 | 85.225    | 87.43533 |

#### 3.2 多元线性回归分析及数据处理

利用 MATLAB 对试验数据进行回归分析, 初步计算结果见表 2。

表2 回归模型的初步计算结果

| 回归系数  | 回归系数估计值 | 回归系数置信区间          |
|-------|---------|-------------------|
| $b_0$ | 1.8183  | [-0.4175, 4.0542] |
| $b_1$ | 0.5071  | [0.1368, 0.8773]  |
| $b_2$ | 0.4594  | [0.2888, 0.6301]  |
| $b_3$ | 0.7306  | [0.4583, 1.0028]  |

$R^2 = 0.7623, F = 23.2804, P < 0.05, s^2 = 0.0378$

由表 2 可知,  $b_0$  的置信区间为 [-0.4175, 4.0542], 包含 0, 并且左边值为 -0.4175, 接近 0, 所以  $b_0$  取接近 0 的值的可能性非常大; 如果  $b_0$  取接近 0 的值, 则式(3)中的原函数第一项就接近 0。由此可知, 常数项对式(3)的影响很小, 即常数项对因变量  $\hat{y}$  的影响不太显著。

由表 2 可知, 本次拟合的  $R^2 = 0.7623 < 0.8$ ,  $F = 23.2804 > F_{1-0.05}(3, 23) = 3.0280, P < 0.05$ , 由此

可以得出所得线性回归模型不是很适合。

残差  $e_i = y_i - \hat{y}_i (i=1, 2, \dots, n)$  是各观测值  $y_i$  与回归方程所对应得到的拟合值  $\hat{y}_i$  之差, 实际上也是线性回归模型中误差  $\varepsilon$  的估计值。通过残差分析并观察图4的时序残差可知, 残差大都分布在零附近, 分布较好。图4中第2、3、4三个样本点的残差偏离原点较远, 可以认为是由于测量或者其他原因造成的奇异点, 应当进行剔除。

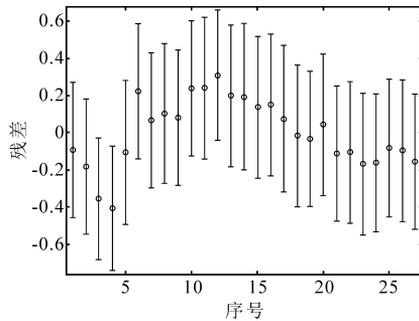


图4 时序残差

由上述分析可知, 初步回归分析得到的回归模型还需要进一步优化。剔除异常点后, 再次进行回归分析, 得到改进后的回归模型系数、系数置信区间与统计量(见表3)。

表3 改进后的回归模型计算结果

| 回归系数  | 回归系数估计值 | 回归系数置信区间          |
|-------|---------|-------------------|
| $b_0$ | 5.4344  | [4.0079, 6.8609]  |
| $b_1$ | -0.1227 | [-0.3637, 0.1183] |
| $b_2$ | 0.2902  | [0.1910, 0.3895]  |
| $b_3$ | 0.8059  | [0.6585, 0.9533]  |

$R^2 = 0.9077, F = 59.0135, P < 0.05, s^2 = 0.0089$

由表3可知,  $x_2$  对式(3)的影响很小, 即  $x_2$  对  $\hat{y}$  的影响不太显著, 即每转进给量对  $X$  方向的铣削力影响最弱。由表2和表3可知, 当  $R^2$  从 0.7623 增大到 0.9077,  $F$  统计量从 23.2804 增大到 59.0135, 回归模型得到改进。

优化后的回归模型为

$$\hat{y} = 5.4344 - 0.1227x_1 + 0.2902x_2 + 0.8059x_3 \quad (4)$$

对式(4)的三元一次线性回归方程进行转化, 得

$$F_x = 229.1553V_c^{-0.1227}f^{0.2902}a_p^{0.8059} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 在指数函数中, 与速度  $V_c$  相关的系数为 -0.1227, 与每转进给量  $f$  相关的系数为 0.2902, 与切削深度  $a_p$  相关的系数为 0.8059。通过系数关系  $0.8059 > 0.2902 > |-0.1227|$ , 并结合前文自变量系数的显著性进行分析可得, 三个切削参数中对  $X$  方向铣削力的影响程度从大到小依

次为  $a_p > V_c > f$ 。切削深度和每转进给量对应的系数为正值, 说明其对  $X$  方向的铣削力影响成正相关。

同理可得

$$F_y = 41.8545V_c^{0.3597}f^{0.6138}a_p^{0.8291} \quad (6)$$

由式(6)可知, 三个切削参数中对  $Y$  方向的铣削力影响程度从大到小依次为  $a_p > f > V_c$ 。

根据上述数学模型对 27 组试验中  $X$  和  $Y$  方向的平均铣削力进行预测校验, 其结果见表1。 $X$  和  $Y$  方向的平均铣削力误差分别为 20% 和 14.6%, 均在 20% 以内, 可以认为上述数学模型有效。

## 4 试验结果分析

### 4.1 切削速度和切削深度对 $X$ 方向铣削力的影响

由于每齿进给量对  $X$  方向的铣削力影响最小, 当每齿进给量取 0.3mm/r 时,  $X$  方向的铣削力与切削速度和切削深度之间的关系见图5。

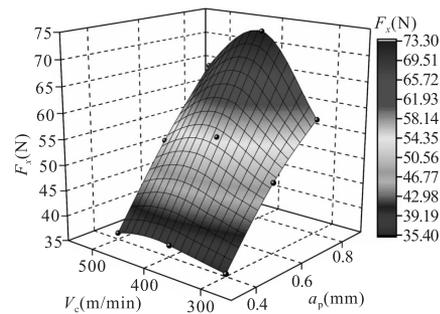


图5  $X$  方向切削力  $F_x$  与切削速度  $V_c$  和切削深度  $a_p$  之间的关系 ( $f=0.3\text{mm/r}$ )

由图5可知:

(1) 随着切削速度的增加,  $X$  方向的铣削力先增大后减少, 但变化幅度不大, 其拐点出现在 400m/min。出现拐点的主要原因: 当切削速度超过 400m/min 后, 切削温度的影响占据了主导地位。切削温度的升高使刀-屑摩擦系数下降和变形系数减小, 切削力呈现出下降趋势; 切削速度的提高还使切削产生的热量来不及传入工件就被切屑带走; 随着切屑带走的热量越来越多, 切削热对工件的变形影响也随之减弱, 其结果是加工精度和加工效率也随之提高。

(2)  $X$  方向的铣削力随切削深度的增加而增加, 且增加比较明显。随着切削深度的增加, 最大切削面积也随之增大, 因此切削力呈现增大的趋势。

从图5可直观看出, 切削深度对  $X$  方向铣削力的影响比切削速度大, 这一结论与前面所得经验公

式的规律一致。因此,铣削力经验公式能很好地反应铣削过程中  $X$  方向的铣削力变化,对实际生产具有重要的指导意义。

#### 4.2 每齿进给量和切削深度对 $Y$ 方向铣削力的影响

由于铣削速度对  $Y$  方向的铣削力影响最小,当铣削速度为  $500\text{m}/\text{min}$  时, $Y$  方向铣削力与切削速度、切削深度间的关系见图 6。由图可知:① $Y$  方向铣削力随着每齿进给量的增大而增大,且增加幅度较大;②不同每齿进给量条件下, $Y$  方向铣削力随切削深度的增加而增加,且增加幅度明显。其原因是随着切削深度的增加,最大切削面积也随之增大,切削区域对未参与切削区域的挤压也增大,从而铣削力呈现增大的趋势。

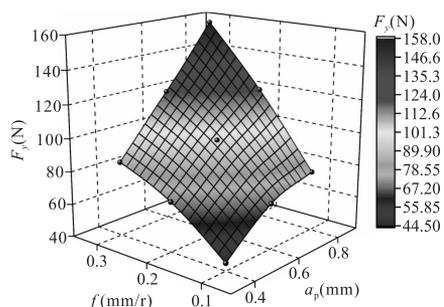


图 6  $Y$  方向切削力  $F_y$  与每齿进给量  $f$  和切削深度  $a_p$  之间的关系 ( $V_c=500\text{m}/\text{min}$ )

#### 4.3 每转进给量和切削速度对铣削力的影响

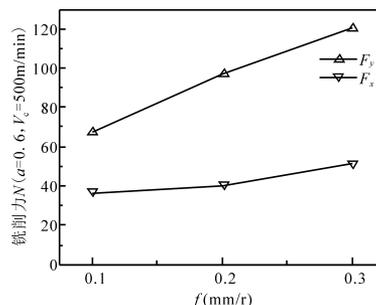
每转进给量和切削速度对铣削力的影响见图 7。由图 7a 可以看出,每转进给量从  $0.1\text{mm}/\text{r}$  增加到  $0.3\text{mm}/\text{r}$  时, $X$  方向的铣削力只是略微增加,且变化平缓,而  $Y$  方向铣削力的增加幅度很大,说明每转进给量对  $X$  方向铣削力的影响不明显,但对  $Y$  方向铣削力的影响比较大。

由图 7b 可以看出,当切削速度从  $300\text{m}/\text{min}$  增大到  $500\text{m}/\text{min}$  时, $Y$  方向铣削力增加缓慢,而  $X$  方向的铣削力先增大再减小, $400\text{m}/\text{min}$  是其拐点,说明切削速度对  $X$  方向铣削力影响不明显,但对  $y$  方向铣削力的影响比较大。

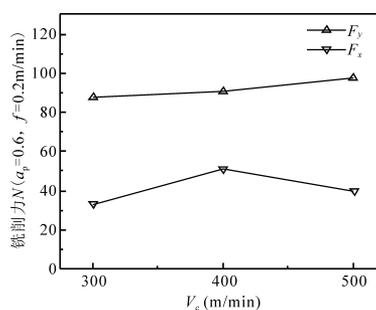
综合分析图 7a 和图 7b 可知, $Y$  方向铣削力明显大于  $X$  方向铣削力,这一点从表 1 中的数据也能得到验证,所以  $Y$  方向铣削力即为主切削力。切削参数对切削力的影响程度与主切削力一致,切削参数对铣削力的影响程度从强到弱依次为:切削深度 > 每转进给量 > 切削速度。

切削加工时,在满足加工要求的情况下应保持较小的切削力。如果切削力过大,会使转矩变大,从

而造成刀具及工件严重变形,影响零件的表面质量和使用性能。因此,在进行平面高速顺铣加工时,宜采用较高的切削速度、较小的每转进给量和切削深度,这样更能保证加工质量。



(a) 每转进给量



(b) 切削速度

图 7 每转进给量和切削速度对铣削力的影响

## 5 结语

本文以高速铣削  $40\text{CrMnMo}$  的铣削力为研究对象,研究了切削速度、每齿进给量、切削深度三个主要切削参数对平均铣削力的影响规律,得出以下结论:

(1)通过高速铣削力单因素试验,对各项铣削力影响因素进行回归分析,得到了铣削力的优化经验公式,经试验数据分析验证了经验公式的准确性;

(2)切削参数对铣削力的影响程度从强到弱依次为:切削深度 > 每转进给量 > 切削速度。在实际生产中制定铣削参数时需要注意正确选取切削深度和每转进给量。

## 参考文献

- [1]庆振华. 高强度钢  $42\text{CrMo}$  硬态切削切屑形成机理的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
- [2]刘衣昌.  $42\text{CrMo}$  高强度钢高速铣削过程中切削力和切削温度的研究[D]. 衡阳:南华大学,2015.
- [3]张显银,李华英,岳启斌,等.  $\text{TiAlN}$  涂层刀具对  $40\text{CrNi}$  钢干切削性能的影响[J]. 工具技术,2017,51(7):32-35.
- [4]杨毅青,张斌,刘强. 铣削建模中多种切削力模型的分析比较[J]. 振动工程学报,2015,28(1):82-90.

# 深海作业抓斗式采样器结构的优化设计

张琼芳,倪凯,王晓浩

清华大学

**摘要:** 针对深海多金属结核的采样设计了一种双液压驱动型抓斗采样器,建立了抓斗理论分析模型,计算出不同结构参数下抓斗所受阻力矩和所需的液压驱动力,得出液压缸最优安装位置。通过分析抓斗的挖掘阻力,得出抓斗底板与侧刃间夹角对挖掘阻力影响最大,并结合抓斗容积大小,得出最优设计夹角为 $70^\circ$ 。最后对抓斗式采样器进行有限元仿真优化,实现了在满足各部件强度的情况下减重12%的目标。

**关键词:** 抓斗;抓挖效率;液压驱动;阻力矩

**中图分类号:** TH122;TP391.9

**文献标志码:** A

## Optimal Design of Grab Sampler for Deep Sea Operation

Zhang Qiongfang, Ni Kai, Wang Xiaohao

**Abstract:** A dual hydraulic-driven grab sampler is designed for the sampling of polymetallic nodules in the deep sea. The theoretical analysis model of the grab is established to calculate the resistance moment and the required hydraulic driving force under different structural parameters, and the best installation position of the hydraulic cylinder is determined. By analyzing the grab's digging resistance, it is found that the angle between the bottom plate and the side edge of the grab has the greatest influence on the digging resistance. With reference to the grab's volume, the optimal angle is set to be  $70^\circ$ . Finally, through the finite element simulation, the weight of grab sampler is optimized to be reduced by 12% under the premise of the strength requirement for each component.

**Keywords:** grab; digging efficiency; hydraulic drive; resistance moment

## 1 引言

众所周知,占地球表面三分之二的浩瀚海洋是一个巨大的能源宝库,蕴含着丰富的矿产资源。据统计,全球海底多金属结核总储量约3万亿吨,15%的海底面积被其覆盖。受海底地貌、洋流活动等环境因素的影响,多金属结核主要富集在4000-6000m的海底沉积层中,相对于多金属硫化物和富钴结壳的分布位置来说更加平坦,但尺寸不一,形状不规则,极其复杂的海洋环境为多金属结核的开采带来了极大的阻碍。在海洋中每下潜100m,压力会

增加1MPa。多金属结核开采区处于低温(接近 $0^\circ\text{C}$ )、高压(40-60MPa)、无光和强腐蚀性的环境中,可能还有周期性的“海底风暴”,水的流速可达13-15cm/s。这些恶劣的环境因素给世界各国的海洋开采带来了巨大挑战<sup>[1]</sup>。

国内外在对深海采样器的研究历程中,先后研制出传统式采样设备如拖网、箱式、无缆自返式抓斗等采样工具以及新型深海采样设备(如电视抓斗、深海岩心取样钻机、水下机器人ROV等)。经过多年的研究工作,目前深海采样技术已相对成熟,但在下潜深度、大型化、可视化、可控化以及操作安全性等方面还需要做更深入的研究,以减少类似“海沟号”和“海神号”丢失事件的发生<sup>[2-4]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金(41427806)

收稿日期: 2017年6月

- [5]高毅,魏兆成,王敏杰. 铣削力预测研究进展[J]. 工具技术, 2016, 50(8): 3-8.
- [6]孙士雷,赵杰,赵灿. 高温合金GH4169 铣削力试验[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(1): 146-149.
- [7] Germain D, Fromentin G, Poulachon G, et al. From large-scale to micromachining: a review of force prediction models [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(3): 389-401.
- [8] Arrazola P J, Özel T, Umbrello D, et al. Recent advances in

modeling of metal machining processes [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2013, 62(2): 695-718.

- [9]朱鲲鹏,李科选,梅涛,等. 微铣削力建模研究进展[J]. 机械工程学报, 2016(17): 20-34.

第一作者:唐德文,教授,博士,南华大学机械工程学院, 421001 湖南省衡阳市

First Author: Tang Dewen, Professor, Doctor, School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China