

高速干滑动摩擦系数的有限元仿真计算研究

魏兵辉¹, 孙琨¹, 王云鹏¹, 方亮¹, 陈诚²

(1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 中国兵器工业试验测试研究院, 714200, 陕西华阴)

摘要: 针对高速运动下的摩擦副如滑靴与轨道之间存在摩擦磨损且实际工况下摩擦系数难以测定的难题,提出了一种利用有限元计算摩擦系数的数值研究方法。基于 W-M 函数法,利用 MATLAB 对不同粗糙度下的表面轮廓完成了数值模拟分析,采用 ABAQUS 二次开发,实现了在有限元中快速建立粗糙表面模型的功能。以此为基础,对滑靴在运行过程中摩擦系数的动态变化规律进行了研究,得到了摩擦系数与载荷、速度之间的数学关系模型。通过销盘磨损实验对其部分仿真结果进行验证,实验结果与公式预测误差在 10% 以内,证明了该数学关系模型的有效性,为高速下干滑动摩擦特性的研究奠定了基础。

关键词: 摩擦系数;分形理论;双粗糙表面;销盘磨损实验

中图分类号: TG115 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202006011 **文章编号:** 0253-987X(2020)06-0082-08



OSID 码

Finite Element Prediction for Friction Coefficient of High Speed Dry Sliding

WEI Binghui¹, SUN Kun¹, WANG Yunpeng¹, FANG Liang¹, CHEN Cheng²

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Experimental and Testing Institute of Ordnance Industry, Huayin, Shaanxi 714200, China)

Abstract: Considering the difficulty of measuring friction coefficient under actual working conditions, a numerical method for calculating the friction coefficient with finite element analysis is proposed to solve the complex friction and wear phenomenon between the slipper and the track at high sliding speeds. By means of W-M function method, MATLAB is used to complete the numerical simulation analysis for surface contour under different roughness, then the function of quickly establishing rough surface model in the finite element is realized via secondary development of ABAQUS. The mathematical model of friction coefficient, pressure and velocity is obtained by analyzing dynamic variation law of friction coefficient during running of slipper. The simulation results are verified by the pin plate wear experiment and it is found that all errors are below 10%.

Keywords: coefficient of friction; fractal theory; double rough surface; pin disk wear test

对于高速运行中的摩擦副,以轨道-滑靴为例, 由于滑靴和轨道接触面间无良好的润滑作用,会发

生剧烈的干摩擦滑动现象。同时,靴轨之间在高速、高载荷下产生不定向震动冲击力、过载力、大量的摩擦热、气动热以及接触表面微观粗糙峰相互高速冲击造成的塑性变形,这些都会使轨道和滑靴产生非常严重的磨损损伤^[1-2]。其中,引起滑靴磨损破坏最主要的原因就是滑靴系统在高速运行过程中靴和轨之间产生大量的摩擦热,使得滑靴与轨道材料性能降低,从而使其发生一系列的破坏。摩擦热主要与摩擦系数、载荷以及速度这3种因素有关,其中对于载荷和速度的影响国内外已经研究的很多^[3-5],而对摩擦系数这一因素研究的却相对较少。

材料的摩擦磨损过程是在表面微凸体间接触面积上进行的,所以材料的磨损又受到接触区的应力状态以及元件相对移动速度的制约,因而其中涉及的粗糙表面特征、接触力学和动力学是我们关心的主要问题。要研究粗糙表面摩擦过程的动力学问题,就必须在表面表征的基础上建立表面接触模型,分析静态接触和摩擦过程接触状态的接触力学问题。只有了解两个粗糙表面接触时,形状各异、尺寸不同的微凸体如何相互作用,才能对摩擦和磨损的实质过程进行更深入的研究。在考虑粗糙表面的接触理论模型研究中,学者们提出了两种分析方法:统计学接触模型;分形接触模型。其中,最为广泛也最让人们接受的理论方法是分形接触模型理论^[6-8]。

本文深入研究滑靴-轨道滑动副在高速运动状态下的摩擦系数这一物理特性,也包括滑靴在运行过程中的运动状态、温度变化以及摩擦磨损机理。首先建立粗糙表面模型,结合 ABAQUS 有限元分析技术,对某一粗糙度不同工况下的摩擦系数进行计算,最终结合销盘磨损实验进行部分数据验证和误差分析,从而为高速干滑动摩擦系数的探究提供一套有效的理论方法。

1 分形粗糙表面的数值模拟

建立粗糙表面轮廓的方法有 midpoint 位移法、逆傅里叶变换法以及 W-M 函数法 3 种,其中 W-M 函数法具有参数物理意义明确、应用广泛、操作简单以及模型建立准确等特点。本文采用 W-M 函数法进行分析,表达式^[9-11]如下

$$Z(x) = G^{D-1} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos(2\pi\gamma^n x)}{\gamma^{(2D)n}} \quad (1)$$

式中: $Z(x)$ 为对应轮廓高度; x 为轮廓的位置坐标; G 为尺度系数; D 为分形维数($1 < D < 2$); γ 为空间尺度系数。

由式(1)可以得到如下关系式

$$Z(\gamma x) = \gamma^{(2-D)} Z(x) \quad (2)$$

这就说明 W-M 函数法所生成的粗糙表面轮廓具有自仿射性。其中,分形维数 D 、特征系数 G 以及起始点 n_1 均可由功率谱求得

$$S(\omega) = \frac{G^{2(D-1)}}{2\ln\gamma} \frac{1}{\omega^{(5-2D)}} \quad (3)$$

将式(3)取对数,得

$$\ln S(\omega) \propto (2D-5) \ln \omega \quad (4)$$

当分形维数 $D_1=1.4$ 、 $D_2=1.6$ 、 $D_3=1.9$ 时,参数 $G=0.5 \mu\text{m}$ 、 $\gamma=1.5$ 、 $n_1=3$,基于 W-M 函数法通过 MATLAB 数值计算得到的不同粗糙度下的粗糙表面轮廓见图 1。由图 1 可知,随着分形维数的不断增大,粗糙表面轮廓图形表现的细节越来越丰富,更加接近实际表面。

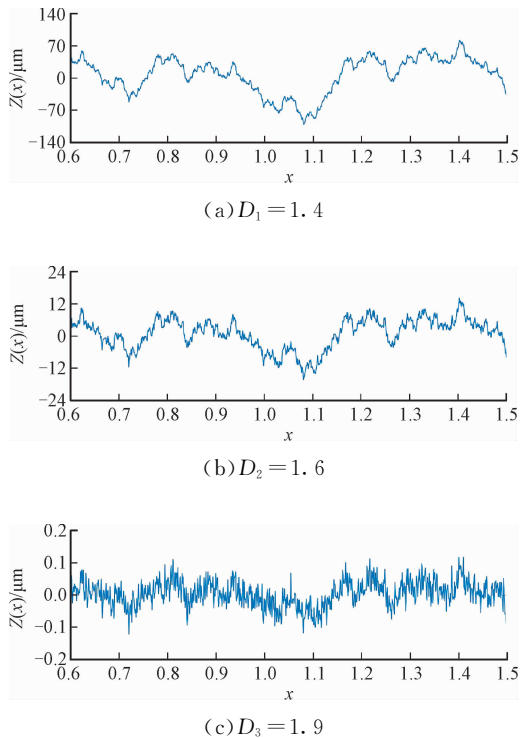


图1 不同分形维数下的分形粗糙表面轮廓

2 基于 ABAQUS 粗糙表面二次开发

基于粗糙表面的有限元仿真现在已经越来越受到国内外学者的关注,但目前商业有限元软件对于粗糙表面这类复杂模型建模能力相对薄弱,所以在有限元中创建一个高效建立粗糙表面模型的方法对于研究摩擦磨损的仿真具有重大意义^[12]。

利用有限元软件建立含有粗糙轮廓模型主要有两种方法:①使用三维建模软件(Pro. e、Solidworks 等)建立好相对应的模型,再转换为有限元软件的格

式导入其中;②使用有限元分析软件自带的编程功能进行建模,将模型转换为数字化模型,再导入建模程序中。这两种建模方法各有优势与缺点,前者在建模上比较方便,具有随时可视性,但建立复杂的模型会比较麻烦,不易表现精细的模型细节,尤其是在粗糙轮廓模型上的建立;后者则可以使用编程的形式将模型的特点非常丰富地表现出来,一旦程序编好,后期只需要更改关键字修改模型,缺点就是前期的编程比较耗时,出现错误需要反复修改^[13-15]。

本文利用 ABAQUS 软件的二次开发功能,创建一个可以快速高效建立粗糙表面模型的 ABAQUS/CAE 图形用户界面。运行 ABAQUS/CAE 后,打开 Really Simple GUI Dialog Builder 可看到 GUI 与 Kernel 两部分。利用此对话框构造器不但可以创建对话框,而且可以将对话框中的参数和关键字与内核脚本关联,完成插件程序注册,然后在 GUI 界面中建立如图 2 所示的图形用户界面。

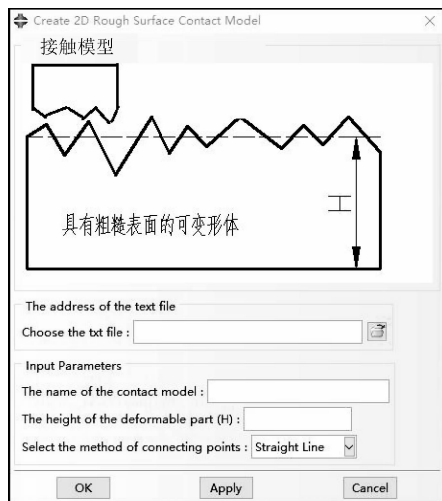


图2 创建粗糙表面接触模型的图形用户界面

图2用户界面由3部分组成:①粗糙表面接触模型示意图;②选择含有粗糙表面坐标信息的文本文档;③输入模型名称、变形体的高度以及选择连接数据点的方式,其中连接数据点的方式,这里可以选择直线或样条曲线。为了方便在后续 Python 程序中调用,所有输入参数在 GUI 中都赋予了一个关键字,并对其数据类型进行定义。

图2所示的界面只相当于调用子程序的接口,若使用其创建模型还需要编制 Python 程序,通过使用 Python 读取 txt 格式的 MATLAB 参数点集合,将其输入到 ABAQUS 粗糙表面建模程序中,然后使用用户界面自定义模型高度以及数据点连接方式,在有限元中生成相应的粗糙表面草图,从而得到

粗糙表面变形体模型,为下一步的摩擦磨损提供数值仿真模型。

3 双粗糙表面接触有限元模型

在建立分形表面之前,必须先对轨道的实际表面粗糙度进行测量,才有利于后期进行摩擦系数的仿真以及磨损量的预测。根据实际情况,对轨道进行实地测量以及多段采样,如图3所示。



(a) 实际轨道



(b) 轨道表面形貌

图3 实际轨道及表面示意图

根据实际轨道所测量的表面粗糙度选择分形参数:尺度系数 $G=1.2\text{ }\mu\text{m}$,分形维数 $D=1.6$,轮廓的空间频率 $r=1.5$,初始项 $n_1=3$ 。选择这个分形维数的原因:一方面是因为这些参数所生成的表面粗糙度符合实际表面粗糙度情况;另一方面是因为这种表面粗糙度在轨道上是最常见。建立的粗糙表面如图4所示,之后使用 ABAQUS 图形用户界面,创建粗糙表面接触模型。图4中因为轨道长度远大于表面粗糙度的高度,导致表面粗糙度的高度反映不是很明显,所以直接用 MATLAB 生成的原始表面粗糙高度点进行对比可以看出,表面粗糙峰平均高度大约为 $6\text{ }\mu\text{m}$,基本符合实际所测轨道表面粗糙度范围,所以通过这种轨道仿真模拟,可以确定滑靴与



图4 表面粗糙度轮廓图

轨道之间的摩擦系数。

3.1 实验参数及材料参数

本研究中的滑靴材料为 18Ni(300)钢,轨道材料则是从滑轨上取样的 U71Mn 钢。二者的一些基本物理、力学性能参数如表 1、2 所示。在有限元前处理阶段,将这些参数分别输入到有限元软件中,为模拟出不同工况下的摩擦系数提供相关参数。

表 1 18Ni(300)钢与 U71Mn 轨道钢的性能参数

力学性能参数	数值	
	18Ni(300)	U71Mn
弹性模量/GPa	190	210
泊松比	0.283	0.3
密度/(kg·m ⁻³)	7 999	7 920
A/GPa	1 956	621
B/GPa	387	2 108
C	0.03	0.17
m	0.8	0.5
n	0.373 7	0.51
熔点/℃	1 412	1 397

注:J-C 本构模型参数 A 为参考应变率和参考温度下的初始屈服应力;B 为材料应变硬化模量;m 为材料热软化指数;n 为材料硬化指数;C 为材料应变率强化参数。

表 2 18Ni(300)与 U71Mn 的热学性能参数

温度 /℃	18Ni(300)		U71Mn	
	导热系数/ (W·m ⁻¹ · ℃ ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ · ℃ ⁻¹)	导热系数/ (W·m ⁻¹ · ℃ ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ · ℃ ⁻¹)
20	21	360	147	472
100	23			
200	26	481	143	480
300	27	599		
400	28	585	138	524
700	30.8			
800			132	615

3.2 接触与边界条件

ABAQUS/Explicit 中的接触模型是基于表面或者接触单元的。根据所建立的滑靴与轨道模型以及研究目的,设置滑靴的下表面和轨道的上表面接触,接触对就是这两个表面。由于使用分形方法所生成的粗糙表面非常不规则,使得在接触分析过程中容易出现大的滑移现象,所以选择接触属性时需要选择有限滑移这一属性。另外,由于所计算的滑靴速度很快,可以视为高速碰撞模型,所以选用 J-C

模型作为本构模型进行仿真^[16-17]。应力场初始条件、边界条件如图 5 所示,约束及表面接触情况如下:

- (1)滑块与轨道的接触面为粗糙表面;
- (2)轨道的 AB、CD 边均设置为对称约束,相当于无限长轨道,BC 边设置为固定约束;
- (3)滑块上表面施加正压力载荷,滑块的运动方向自左向右,初始速度根据工况条件而设置;
- (4)滑块与轨道的接触方式为硬接触、无摩擦。

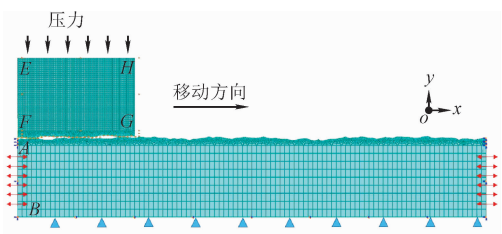


图 5 粗糙表面接触模型

3.3 网格收敛性研究

高质量的网格需要不断进行模拟实验来确定,网格类型则需要根据所研究的对象以及所处工况进行选择。在 ABAQUS 中最为常用的单元格类型有线性完全积分、二次完全积分、线性减缩积分、二次减缩积分 4 种,且都可以对本文所研究的对象进行分析,所以首先分析这 4 种单元格类型对计算结果的影响。计算工况条件为 250、500、1 000、1 500、2 000、2 500 MPa·m/s 分别对应滑靴下表面温度 200、300、500、800、1 000、1 200℃,不同工况条件下摩擦系数如图 6 所示,其中 P 为滑靴与轨道的接触载荷,V 为滑靴运动速度。

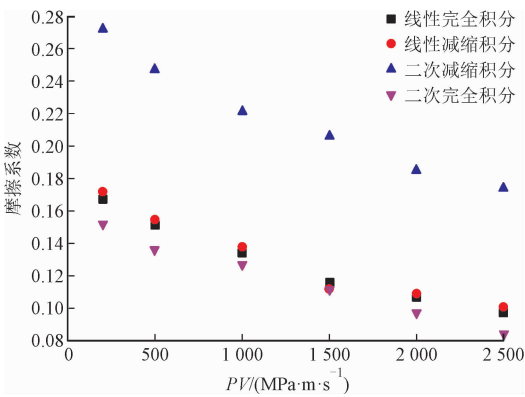


图 6 不同单元类型对摩擦系数影响

从图 6 可以看出,随着 PV 值不断增加,摩擦系数不断减小,说明 4 种网格都可以进行摩擦系数的仿真,但二次减缩单元类型的仿真结果与其他 3 种相比较却大很多,与实验值相差也很多,所以不选择二次减缩积分作为模拟单元类型。从计算效率方面

上看,如图7所示,线性减缩积分所用时间最短,从而选择线性减缩积分来进行模拟仿真。

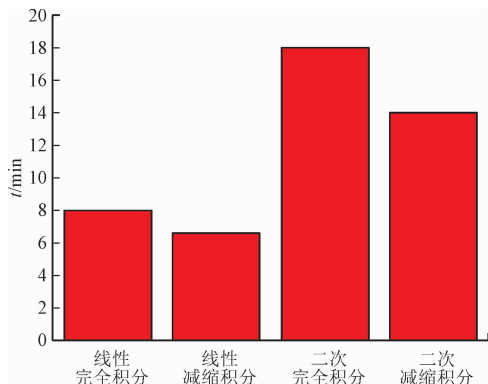


图7 不同单元类型计算时间比较

为了解析结果精确,在分析之前做网格收敛性验证。对模型分别划分了0.2、0.3、0.5 mm单元格,并且在载荷为5 MPa、速度为100 m/s、温度为200 ℃的工况条件下计算其摩擦力,结果如图8所示。可以看出,网格越细小,结果越稳定,但这3种网格所计算出来的平均值几乎都稳定在17 N左右,所以可以得出结论:在这3种网格尺寸模拟仿真中,计算结果与网格尺寸并没有太大影响,所以选择0.5 mm作为划分标准进行计算,提高计算效率。

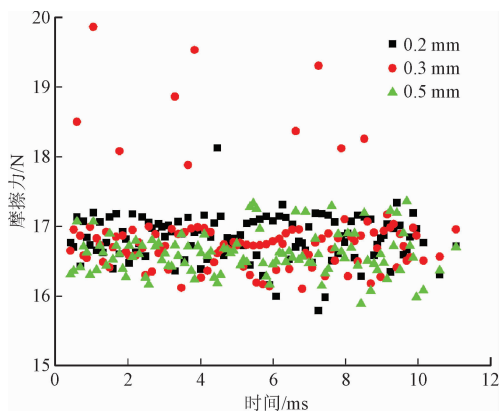


图8 不同单元格尺寸对计算精度的影响

3.4 不同工况下摩擦系数模拟

根据所提供的轨道表面粗糙度 R_a , 利用下式

$$D = 1.894R_a^{-0.089} \quad (5)$$

将表面粗糙度转换为所需要的分形维数,然后根据前期所做的二次开发程序生成所需要的粗糙表面。

在 R_a 为 $6 \mu\text{m}$ 、5 MPa、100 m/s、200 ℃条件下所得到的Mises局部应力见图9。可以看出,滑靴与轨道发生相互运动时,两接触摩擦表面微凸峰间发生相互接触,产生巨大的应力集中在微凸峰尖端处,最大应力可以达到2 159 MPa,并且在接触表面

产生局部塑性变形。通过提取接触位置节点的切应力以及正应力,计算得到摩擦系数以后,可以进一步计算其运动过后表面接触温度,研究局部压力过大是否和闪温现象有关。在滑靴实际运行过程中,滑靴不断受到冲击载荷的影响,受到的应力也将大于本身的屈服强度,最终导致滑靴发生变形,直至损坏^[18-20]。

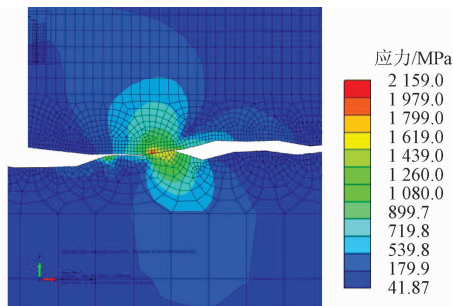


图9 Mises局部应力云图

从图10可以看出,随着温度不断增加,摩擦系数呈指数型减小;随着PV值的不断增加,在20 ℃时,摩擦系数没有太大差别,但随着温度的不断增大,PV值大的摩擦系数越小;到800 ℃时,摩擦系数之间的差别又逐渐减小,最终趋于一个定值。主要原因是,当载荷增大到一定程度,载荷已经不是影响材料性能的主要因素,材料表面的温度上升到一定阶段,摩擦热和材料传热达到动态平衡,摩擦系数最终趋于统一^[21-23]。

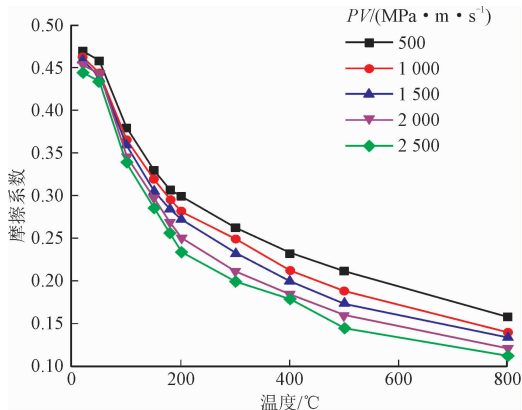


图10 不同PV值和温度下的摩擦系数

对不同工况下计算出的摩擦系数进行统计,结果如图11所示。图中曲线是根据模拟结果所拟合的函数曲线,函数公式如下

$$\mu = 0.2343e^{(-3.38 \times 10^{-4} PV)} + 0.2673e^{(-5.87 \times 10^{-6} PV)} \quad (6)$$

从图11曲线的趋势以及式(6)可以看出,摩擦系数下降速度具有先快后慢的特征,原因是摩擦系数的变化规律与磨损接触表面密切相关。刚开始运动时,由于受到的变形抗力较大,滑靴发生塑性变形

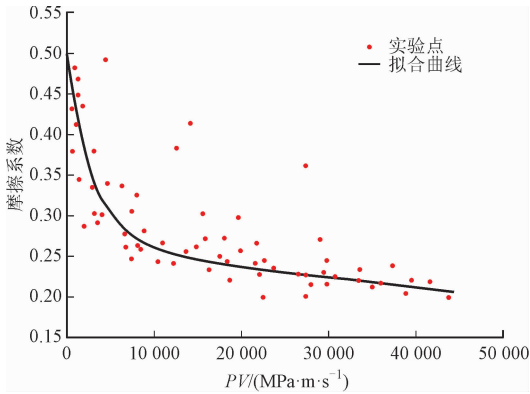


图 11 不同 PV 值下摩擦系数曲线

产生大量的摩擦热,导致表面开始发生软化现象,摩擦系数迅速下降,随着运行时间的增加,接触表面的温度达到了动态平衡,最终使得摩擦系数稳定在某一确定值。

4 数值模拟验证

4.1 销盘磨损实验

由于难以实验测量高速下的摩擦系数,因此本文采用较低速度的销盘磨损实验对其部分模拟结果进行验证分析,实验条件见表 3 所示。

表 3 销盘摩擦磨损实验参数

试样	载荷/N	温度/℃	磨损时间/min	转速/(r·min ⁻¹)
1-1	40	20	20	200
1-2	40	200	20	200
1-3	40	400	20	200
2-1	60	20	20	200
2-1	60	200	20	200
2-2	60	400	20	200
3-3	80	20	20	200
3-2	80	200	20	200
3-3	80	400	20	200

试样装夹采用上销下盘方式,磨盘材料为轨道钢 U71Mn,磨盘试样是直径为 44 mm、厚度为 5 mm 的圆盘;配副的磨销材料为 18Ni(300)钢,是底部 5 mm×5 mm、高度 6 mm 的长方体试样。磨程均为 4 000 r/min,载荷分别为 40、60、80 N 进行摩擦磨损实验。在实验过程中,利用计算机测量摩擦力矩,根据摩擦力矩可以换算出摩擦系数。计算公式如下

$$f = \mu N \tag{7}$$

$$T = fR \tag{8}$$

$$\mu = T/NR \tag{9}$$

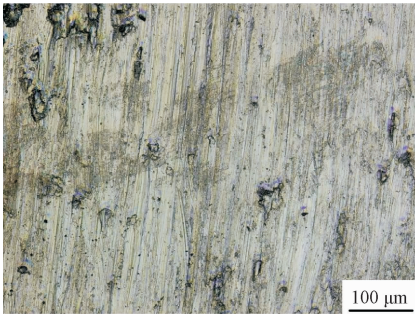
式中: N 为载荷; T 为摩擦力矩。
将计算出的摩擦系数进行整理,和数值模拟得出的结果进行对比^[24-25]。

4.2 表面轮廓的表征

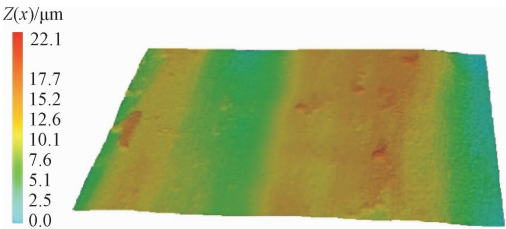
使用三维共聚焦显微镜,如图 12 分别对同一温度下载荷分别为 40、60、80 N 下的磨损形貌进行表征,并测量其粗糙度。

图 12 是室温下不同载荷磨损形貌情况。其中图 12a、12b 表明,载荷为 40 N 条件下,表面粗糙度为 8.7 μm ;图 12c、12d 表明,载荷为 60 N 的条件下,表面粗糙度为 10.1 μm ;图 12e、12f 表明,载荷为 80 N 的条件下,表面粗糙度为 10.6 μm 。这说明在一定载荷下,表面粗糙度随着载荷增大而逐渐增加。

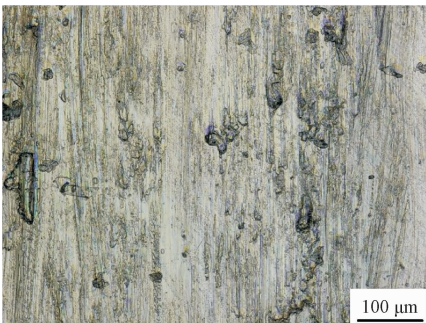
根据测量出的磨损表面轮廓粗糙度选用 $D=1.6$ 拟合出来的摩擦系数计算公式,同时结合销盘磨损实验所得出来的摩擦系数对仿真结果进行分析,结果如图 13 所示。结合表 4 可知:在 PV 值为



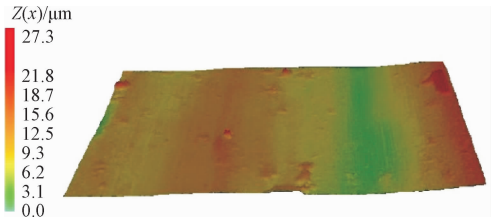
(a)40 N 表面形貌



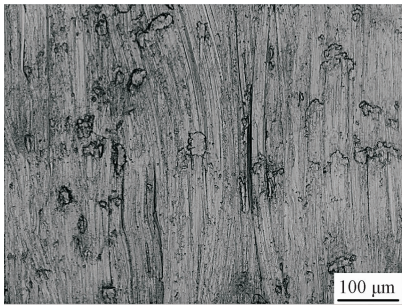
(b)40 N 粗糙表面轮廓



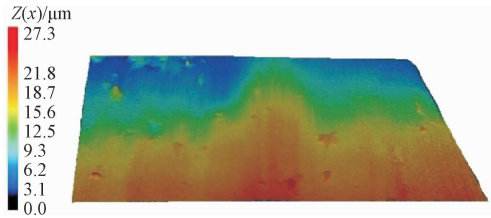
(c)60 N 表面形貌



(d)60 N 粗糙表面轮廓



(e)80 N 表面形貌



(f)80 N 粗糙表面轮廓

图 12 磨损表面形貌情况

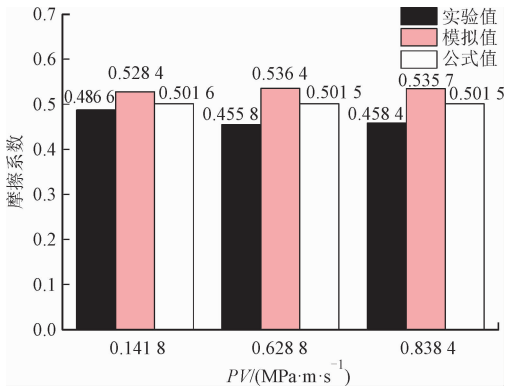


图 13 不同工况条件下的摩擦系数

0.141 8 MPa · m/s 的工况下,摩擦系数的实际测量值与模拟仿真值的误差是 7.91%,实际测量值与公式结果的误差是 2.99%;在 PV 值为 0.628 8 MPa · m/s 的工况下,摩擦系数的实际测量值与模拟仿真值的误差是 15.03%,实际测量值与公式结果的误差是 9.91%;在 PV 值为 0.838 4 MPa · m/s 的工况下,摩擦系数的实际测量值与模拟仿真值的误差是 14.43%,实际测量值与公式结果的误差是 8.59%。从中可以看出,通过数值模拟所得到的结

果经过公式拟合后,其结果与实际摩擦系数误差均在合理的计算范围之内。

表 4 摩擦系数模拟值和公式值的误差比较

载荷/N	温度/℃	模拟误差/%	公式误差/%
40	20	7.91	2.99
60	20	15.03	9.91
80	20	14.43	8.59

5 结 论

(1)利用 W-M 函数法在 MATLAB 中实现了分形粗糙轮廓的数值模拟,建立起与粗糙度相对应的粗糙表面模型。

(2)在 ABAQUS 有限元软件中通过二次开发,创建 ABAQUS/CAE 图形用户界面(GUI),完成了 MATLAB 与 ABAQUS 数据互通,实现了快速建立粗糙表面模型的方法。

(3)建立了靴-轨干滑动过程中摩擦系数的数学模型,得到了摩擦系数与载荷、速度的关系式,并经过低速销盘实验进行相关数据验证,结果误差在 10%以内,进一步证明了数值模拟摩擦系数的方法具有合理性。

参考文献:

[1] 846th Test Squadron, 46th Test Group, Holloman AFB. Holloman high speed test track design manual [Z]. Otero Country, New Mexico, USA: 846th Test Squadron, 46th Test Group, Holloman AFB, 2008.

[2] MINTO D W. The Holloman high speed test track hypersonic upgrade program status [C]// Proceedings of the 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Saint Louis, Missouri, USA: AIAA, 2002.

[3] MOLINARI J F, ORTIZ M, RADOVITZKY R, et al. Finite element modeling of dry sliding wear in metals [J]. Engineering Computations, 2001, 18(3/4): 592-610.

[4] MONTGOMERY R S. Friction and wear at high sliding speeds [J]. Wear, 1976, 36(3): 275-298.

[5] PODRA P, ANDERSSON S. Simulating sliding wear with finite element method [J]. Tribology International, 1999, 32(2): 71-81.

[6] MAJUINDAR A, BHUSHAN B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces [J]. Journal of Tribology, 1990, 112(2): 205-216.

- [7] MAJMMDAR A, BHUSHAN B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. Journal of Tribology, 1991, 113(1): 1-11.
- [8] WANG S, KOMVOPOULOS K. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime [J]. Journal of Tribology, 1994, 116(4): 812-832.
- [9] 何宇航. 基于分形粗糙表面的 MEMS 摩擦学研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 11-28.
- [10] 贺林, 朱均. 粗糙表面接触分形模型的提出与发展 [J]. 摩擦学学报, 1996, 16(4): 375-384.
- HE Lin, ZHU Jun. Fractal model for contact of rough surfaces [J]. Tribology, 1996, 16(4): 375-384.
- [11] 邓可月, 刘政, 邓居军, 等. W-M 函数模型下表面轮廓形貌的变化规律 [J]. 机械设计与制造, 2017(1): 47-50.
- DENG Keyue, LIU Zheng, DENG Jujun, et al. Variation of surface profile topography based on W-M function model [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2017(1): 47-50.
- [12] 张强, 马永, 李四超. 基于 Python 的 ABAQUS 二次开发方法与应用 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31(2): 131-134.
- ZHANG Qiang, MA Yong, LI Sichao. Method and application of second-developed ABAQUS based on Python [J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(2): 131-134.
- [13] 庄茁. ABAQUS/Standard 有限元软件入门指南 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 68-69.
- [14] 刘展, 祖景平, 钱英莉, 等. ABAQUS 6.6 基础教程与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 107-109.
- [15] 刘高航, 刘光明. 工程材料与结构的失效及失效分析 [J]. 国外金属加工, 2006, 1(1): 6-9.
- LIU Gaohang, LIU Guangming. Failure and failure analysis of engineering materials and engineering structures [J]. Journal of International Metal Working, 2006, 1(1): 6-9.
- [16] 范亚夫, 段祝平. Johnson-Cook 材料模型参数的实验测定 [J]. 力学与实践, 2003, 25(5): 40-43.
- FAN Yafu, DUAN Zhuping. Cylinder explosive test and material model of Johnson-Cook [J]. Mechanics and Practice, 2003, 25(5): 40-43.
- [17] 季玉辉, 宋迎东, 胡绪腾. TC4 合金应变率和温度相关变形的 Johnson-Cook 模型 [C]// 中国航空学会发动机结构强度振动学术研讨会. 北京: 中国航空学会, 2008: 323-328.
- [18] 王云. 火箭橇试验滑轨的发展与展望 [J]. 航空科学技术, 2010(1): 30-32.
- WANG Yun. Status and prospect for rocket sled track development in China [J]. Aviation Science and Technology, 2010(1): 30-32.
- [19] 杨兴邦. XB 高精度火箭橇试验滑轨 [J]. 中国工程科学, 2000(10): 23-29.
- YANG Xingbang. XB high accuracy rocket sled test track [J]. China Engineering Science, 2000(10): 23-29.
- [20] 姚淑卿, 邢书明, 邓建新. Al_2O_3 基陶瓷刀具材料摩擦磨损特性及其有限元分析 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(6): 566-569.
- YAO Shuqing, XING Shuming, DENG Jianxin. Behaviors of friction and wear and finite element analysis of three ceramic tool materials [J]. Tribology, 2006, 26(6): 566-569.
- [21] VIGNJEVIC R, HUGHES K, TAYLOR E A. Finite element modelling of failure of a multi-material target due to high velocity space debris impacts [J]. Space Debris, 2000, 2(1): 41-50.
- [22] IOILEV A G, BASHUROV V V, BELOV G V, et al. Multi-layered shielding against hypervelocity space debris: conceptual study of implementation of a high-porous material layer [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 29(1): 357-367.
- [23] BERGH M, GARCIA V. A computational model for assessing high-velocity debris impact in space applications [J]. Shock Waves, 2017, 27(4): 675-684.
- [24] 王云鹏, 孙琨, 杨思泽. 18Ni(300)钢高速干滑动摩擦磨损特性研究 [J]. 摩擦学学报, 2017, 37(2): 218-224.
- WANG Yunpeng, SUN Kun, YANG Size. Friction and wear characteristics of 18Ni(300) steel at high speed dry sliding condition [J]. Tribology, 2017, 37(2): 218-224.
- [25] 薛进进, 孙琨, 方亮, 等. 30CrMnSiNi2A 钢干滑动摩擦磨损特性研究 [J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 614-621.
- XUE Jinjin, SUN Kun, FANG Liang, et al. Friction and wear characteristics of 30CrMnSiNi2A steel at dry sliding condition [J]. Tribology, 2016, 36(5): 614-621.

(编辑 杜秀杰)