微动接触中分形粗糙表面的温升分布研究

李玲，田海飞，云强强，麻诗韵，李治强

（西安建筑科技大学 机电工程学院，西安 710055）

摘　要：目的 研究不同分形参数下表面粗糙度对微动接触表面温升的影响。**方法** 通过创建 Python 脚本，将 MATLAB 中利用 Weierstrass-Mandelbrot 函数构造的分形表面轮廓坐标导入 ABAQUS 中，使用样条曲线拟合轮廓坐标，构建包含粗糙表面的二维柱面-平面接触模型，研究表面粗糙度、法向载荷、切向载荷以及材料属性对接触表面温升的影响规律。**结果** 微动接触状态下，温升在接触宽度方向上呈先增后减的趋势，且沿深度方向温升幅值逐渐减小。不同粗糙度的表面节点具有相似的温升分布历程，热影响区主要分布于接触区表层附近，并在此表层产生高的温度场。粗糙接触模型会出现局部温升峰值，同时剪切摩擦应力和接触压力分布具有离散性，与文献中已有结论一致。**结论** 接触表面温升幅值随着粗糙度的增大而增大。当表面粗糙度和法向载荷一定时，随着切向载荷幅值的增大，上试件的相对滑移距离和摩擦热产生率增加，引起温升幅值增大。考虑材料属性时，发现温升幅值大小与材料导热性密切相关，材料导热性能越好，接触表面温升幅值越小。

关键词：柱面-平面接触模型；微动接触；分形理论；粗糙度；温升

中图分类号：TH117　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3660(2019)06-0238-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.06.028

Temperature Rise Distribution of Fractal Rough Surface in Fretting Contact

LI Ling*, *TIAN Hai-fei*, *YUN Qiang-qiang*, *MA Shi-yun*, *LI Zhi-qiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of surface roughness on the temperature rise of the micro-motion contact surface under different fractal parameters. By creating a Python script, the fractal surface contour coordinates constructed by Weierstrass-Mandelbrot function in MATLAB were imported into ABAQUS, and the spline curves were used to fit the contour coordinates. A two-dimensional cylindrical-plane contact model with rough surface was constructed and the influence of roughness, normal load, tangential load and material properties on the temperature rise of the contact surface was studied. The temperature rise first increased and then decreased in the contact width direction and amplitude decreased gradually along the depth direction in the micro-motion contact state. The surface nodes with different roughness had similar temperature rise distribution history and thermal influence area was mainly distributed near the surface and generated a high temperature field of the contact area. The local temperature rise peak appeared in the rough contact model, and the shear friction stress and the contact pressure distribution were discrete, consistent with the conclusions in the literature. The temperature rise amplitude of contact surface in-

收稿日期：2019-01-16；修订日期：2019-04-26

Received：2019-01-16；**Revised**：2019-04-26

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51305327，51475352）；陕西省自然科学基金资助项目（2018JM5066）

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (51305327, 51475352) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province of China (2018JM5066)

作者简介：李玲(1981—)，男，博士，副教授，主要研究方向为接触力学和摩擦学。邮箱：liling@xauat.edu.cn

Biography：LI Ling (1981—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: contact mechanics and tribology. E-mail: liling@xauat.edu.cn

creases with the increase of roughness. The relative slip distance and friction of the upper test piece increase with the increase of the tangential load amplitude when the surface roughness and normal load are constant, thus causing an increase in temperature rise amplitude. In terms of the material properties, the magnitude of the temperature rise is closely related to the thermal conductivity of the material. The better the thermal conductivity of the material is, the smaller the temperature rise amplitude of the contact surface is.

KEY WORDS: cylindrical-plane contact model; fretting contact; fractal theory; roughness; temperature rise

微动是两接触物体间的小幅振动，在微动接触中，摩擦所产生的功耗 85%以上都转化成热能[1]。摩擦发热引起接触表面温度升高，同时出现高闪光温度，并且在接触区域产生相对陡峭的温度梯度。温度变化会对结合面的接触特性产生很大的影响，微动接触中表面温度变化会引发紧固配合零部件失效，已成为近年来研究的焦点。

针对结合面间的微动接触，研究人员已经对微动接触间的摩擦行为[2-5]和摩擦耗散导致的接触表面温升分布进行了研究[6-12]。由于接触表面附近温度的直接测量是不切实际的，因此通常采用分析模型和有限元模型来估算接触表面温度。Wen 等[13]提出了一种理论分析方法，获得半无限空间体在不同振荡热源下的瞬态温度分布，并基于大量模拟分析，推导出求解表面温度的表达式。Jin 等[6,12]根据摩擦产生的热量建立有限元模型，预测了微动接触的温升，并探讨了各种因素对温升的影响，如氧化物碎片层的存在和接触频率。

以上研究都是在光滑接触模型下进行的，均未考虑表面粗糙度。研究人员通过大量研究发现，粗糙度会对结合面间的磨损、疲劳和温升产生不可忽略的影响[14-18]。Pereira 等[19]提出了一种多尺度建模方法来研究微动磨损中的粗糙度效应，结果表明，在完全滑移条件下，粗糙度对微动磨损的影响较小。Liu 等[20]采用实验研究了黄铜在不同粗糙度下的摩擦学行为，建立了基于实时磨损率与表面粗糙度的磨损模型，结果发现，摩擦学行为很大程度上取决于实时粗糙度。

为了研究粗糙度对接触模型表面温升的影响，首先要解决的问题是如何精确地描述粗糙表面轮廓。传统的表面粗糙度表征参数都是基于统计学，传统参数随度量区间和测量尺度的变化而变化，具有不稳定性。大量研究表明，分形参数具有尺度独立性，能反映粗糙表面的内禀特性。采用分形参数表征粗糙表面，能有效地反映表面的复杂性、不规则性和粗糙程度，并在一定程度上克服了传统粗糙度参数尺度相关性的不足。因此，许多研究学者基于分形理论研究粗糙接触模型。尤晋闽等[21]以分形接触理论为基础，建立了关于结合面接触刚度法向动态参数的理论模型。姬翠翠等[22]利用分形理论建立粗糙接触模型，研究了接触变形方式与接触载荷以及总的真实接触面积与接触载荷之间的关系等，并简单列举了分形接触模型在机械学科中的应用情况，指出利用分形理论对表面接触行为进行研究是接触理论发展的必然趋势。

许多学者基于分形理论对接触表面温升进行了研究。Wang 等[23]根据分形理论模型推导出接触面上温度分布密度函数和温升累积分布函数，发现最大温升是摩擦因数、滑动速率、热性能参数、接触面积、表面轮廓分形参数等的函数。Qin 等[24]采用有限元法分析了钢-钢微动接触中的摩擦剪切应力和温升分布，同时讨论了材料塑性以及频率对温升的影响。结果发现，粗糙接触模型产生的摩擦剪切应力分布具有离散性，并存在局部应力高度集中，使得温升的峰值大于光滑接触模型，但未基于分形理论研究不同分形参数下的粗糙度对温升分布的影响。

文中主要研究不同分形参数下粗糙接触模型的温升分布规律，同时讨论了法向载荷、切向载荷、接触副材料对温升的影响。利用分形理论构造粗糙表面轮廓，创建 Python 脚本将 MATLAB 中利用 Weierstrass-Mandelbrot 函数构造的分形表面轮廓坐标导入 ABAQUS 中，并使用样条曲线拟合轮廓坐标。同时利用粗糙度计算公式得出不同分形参数下的粗糙度，从而构建出二维柱面-平面的粗糙接触模型，最后对粗糙接触模型进行有限元仿真。

1　模型粗糙表面的特征

分形理论模拟粗糙二维表面轮廓高度由 W-M 函数给出，其模拟二维表面轮廓的函数公式为[24]：

$$Z(x)=G^{D-1}\sum_{n=n_1}^{n_2}\frac{\cos 2\pi\gamma^n x}{\gamma^{(2-D)n}} \tag{1}$$

式中：$Z(x)$为随机表面轮廓高度；x 为轮廓的位置坐标；D 为分形维数（它描述函数 $Z(x)$在所有尺度上的不规则性，但不能确定 $Z(x)$的具体尺寸，即两个完全不同尺度上的分形曲线可以具有相同的维数）；G 是特征尺度系数（反映 $Z(x)$的幅值大小，它决定 $Z(x)$的具体尺寸）；γ^n 为轮廓的空间频率（γ为大于 1 的常数，对于服从正态分布的随机轮廓，γ取 1.5 可适用于高频谱密度及相位的随机性。由于粗糙度轮廓是非稳定的随机过程，轮廓结构的最低频率与粗糙度样本长度的关系为 $\gamma^{n1}\approx 1/L_1$）；n_1 是 W-M 函数的初始项；L_1 为粗糙度样本取样长度，取 L_1=0.6 mm[26]。

根据式（1）的函数，当 L_1=0.6 mm，γ=1.5，n_1=6，

n_2=90，相同分形维数 D（D=1.57）下取不同的特征尺度系数 G 和相同尺度系数 G（G= 4.35×10^{-11} m）下取不同分形维数 D 时，分别在 MATLAB 软件中编写程序，生成相对应的轮廓曲线坐标代入式（2）中，得出不同特征尺度系数和分形维数下的粗糙度，见表 1。

$$Ra=\frac{1}{L_1}\int_0^{L_1}|Z(x)|\mathrm{d}x \tag{2}$$

表 1　不同分形参数下的表面粗糙度

Tab.1 Surface roughness under different fractal parameters

Fractal parameter	D=1.57			G=1.35×10^{-11} m	
	G=1.35×10^{-11} m	G=4.35×10^{-11} m	G=7.35×10^{-11} m	D=1.62	D=1.67
Ra/μm	0.2	0.4	0.6	0.16	0.05

2　有限元模型

在 ABAQUS 中建立二维柱面-平面间摩擦热-结构耦合模型，如图 1 所示。上试件为圆柱，其半径为 6 mm，下试件的长和宽分别为 12 mm 和 6 mm，上下试件材料相同，材料属性见表 2。模型中假设摩擦功全部转化为摩擦热，摩擦热流平均分配到圆柱试件和长方形试件。忽略因变形和磨屑对接触几何参数和温度场分布的影响，考虑了接触面和周围之间的热对流，考虑了接触区相互导热。

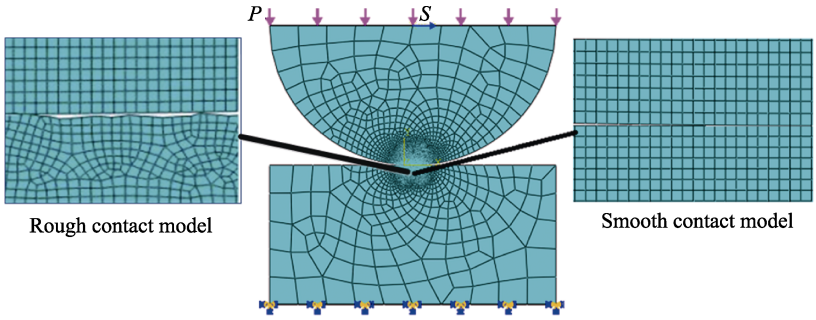


图 1　有限元模型

Fig.1 Finite element model

表 2　材料属性[24]

Tab.2 Material properties[24]

Material	Young's modulus E/GPa	Poisson v	Density ρ /(kg·m^{-3})	Conductivity /(W·m^{-1}·K^{-1})	Specific heat C /(J·kg^{-1}·K^{-1})
Steel	206.8	0.28	7850	39	520
Al	74.1	0.33	2700	237	880

对模型进行边界条件和载荷设置，边界条件为下试件完全固定，在圆柱试件的上表面施加均布载荷 P，并通过多点约束选项（MPC）在圆柱试件中心点施加切向正弦位移载荷 S，频率为 20 Hz，使其在水平方向做往复运动。载荷和位移的加载过程如图 2 所示。图 2 中 0—1 的分析步类型为静力分析步，1—2 为瞬态的热力耦合分析步，步长时间均为 1 s。法向载荷 P 在分析步 1 施加，并在分析步 2 中保持恒定不变。切向位移正弦载荷 S 在分析步 2 中施加，N=20 表示切向正弦位移载荷在热力耦合分析步循环 20 次。

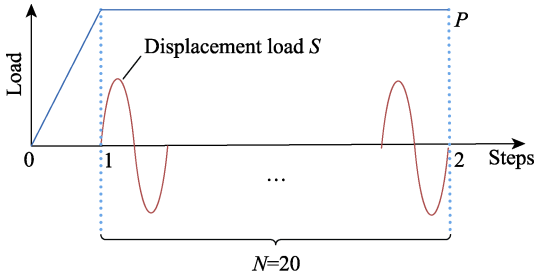


图 2　加载过程

Fig.2 Loading history

对模型进行接触属性设置，并定义柱面-平面间的接触。切向设置为具有各向同性摩擦的库仑摩擦定律计算滑动中引起的摩擦应力。根据参考文献[25]试验可知，微动磨损进入稳态阶段后，摩擦系数为恒定值 0.8，故选取摩擦系数为 0.8[25]。法向设置为硬接触，采用有限滑移算法，并且切向约束设置为罚函数法，这样设置获得的接触应力会更加准确。对试件进行热传导和生热设置，同时对模型进行表面热交换设置，使其在微动接触过程中产生的热达到热平衡。在柱面-平面有限元模型中，采用主-从面设置，定义两个接

触面。其中，圆柱试件的下表面设置为主面，下试件的上表面设置为从面，这种设置是为了方便提取仿真模型接触区域中的接触变量。

建立粗糙表面接触模型时，创建 Python 脚本，将 MATLAB 中利用 W-M 函数构造的分形曲线的轮廓坐标数据导入 ABAQUS，并使用样条曲线拟合轮廓坐标，从而在下试件顶面中心区域引入长度为 0.6 mm 的分形曲线来模拟粗糙表面。有限元模型采用四节点平面应变单元（CPE4RT），为使模型的收敛趋于精确解，对柱面-平面模型的接触区域进行网格细化处理，光滑接触区域网格细化后的尺寸为 10 μm×10 μm，粗糙接触模型网格细化后的尺寸为 5 μm×5 μm。

3　仿真结果分析

3.1　粗糙度对温升的影响

施加载荷后，在微动过程中，模型将出现部分滑移阶段和完全滑移阶段。由于部分滑移阶段接触表面温升分布较小，故文中着重研究了模型在微动过程中完全滑移阶段的表面温升。由于摩擦产生大量的热，使其接触区域和接触区域附近的温度升高。当外部法向载荷为 25 MPa 时，分别讨论了光滑接触模型和粗糙接触模型的温升分布。当下试件 Ra=0.2 μm 时，粗糙接触模型和光滑接触模型温升分布曲线如图 3 所示。

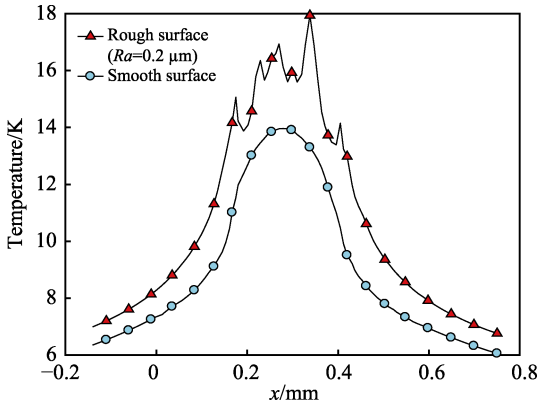


图 3　不同粗糙度下的表面温升分布
Fig.3 Surface temperature rise distribution under different roughness

当法向载荷相同时，可以看出，粗糙接触模型与光滑接触模型的温升分布有明显差异。粗糙接触模型的温升高于平滑接触模型，粗接触区有几个局部温升峰值。这是因为当接触表面光滑时，接触区域均匀接触，微动循环过程中，摩擦生热不断进行，导致接触区温度持续升高。当接触区域发生改变时，所积累的热量就会迅速向周围区域传递，越靠近中心接触区域，微动速度越快，瞬时摩擦产生的热量越高。同时，接触模型在 0.3 mm 深度方向的温升分布如图 4 所示，可以看出，随着深度的增加，温升幅值连续减小，即距离热源越远，其温升越小，这符合热传递的基本规律。当接触区域为粗糙表面时，接触发生在个别凸起的表面峰上。在法向载荷作用下，由于粗糙表面接触中法向载荷被个别凸起的表面峰承担，导致局部应力集中，粗糙接触模型的接触压力和剪切摩擦力远大于光滑接触模型。如图 5 和图 6 所示，粗糙接触模型产生的摩擦剪切应力分布是离散的，并且粗糙接触模型中实际接触面积远小于光滑接触模型，滑动摩擦所

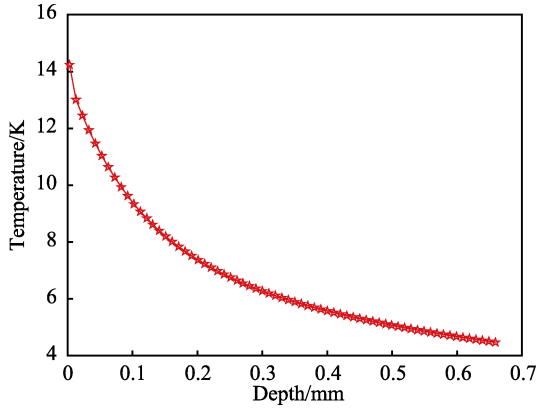


图 4　在 x=0.3 mm 深度方向上的温升分布
Fig.4 Temperature rise distribution in the depth direction of x=0.3 mm

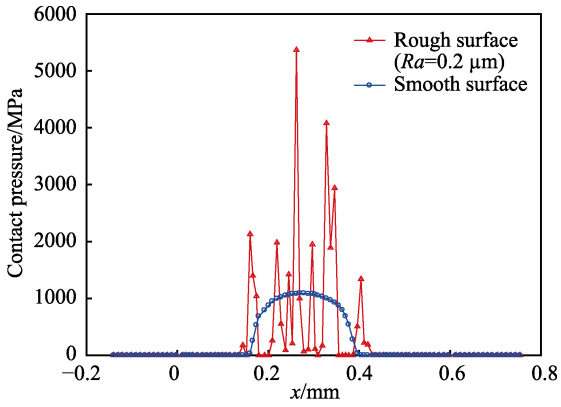


图 5　不同粗糙度下的接触压力分布
Fig.5 Contact pressure distribution under different roughness

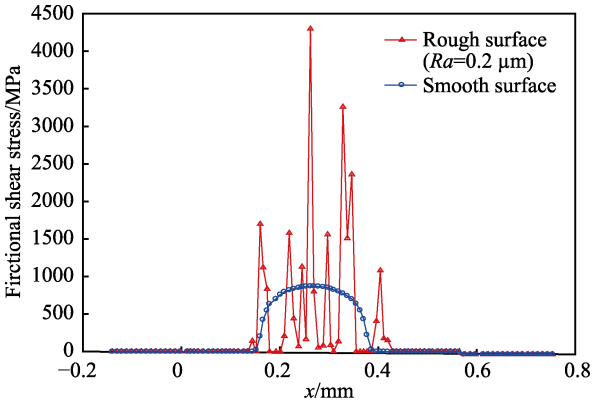


图 6　不同粗糙度下的剪切摩擦力分布
Fig.6 Shear friction distribution under different surface roughness

产生的热量就释放在较小接触区域上，这些特性导致粗糙接触模型的温升分布不同与光滑接触模型。因此在微动接触中，粗糙接触模型会出现局部温升峰值，并且温升远大于光滑接触模型。

基于分形函数公式，获得了不同特征尺度系数（G）和分形维数（D）下的表面轮廓曲线，并导入 ABAQUS 中，得出粗糙度不同的二维接触模型。对其进行摩擦热-结构耦合分析，结果如图 7 和图 8 所示。

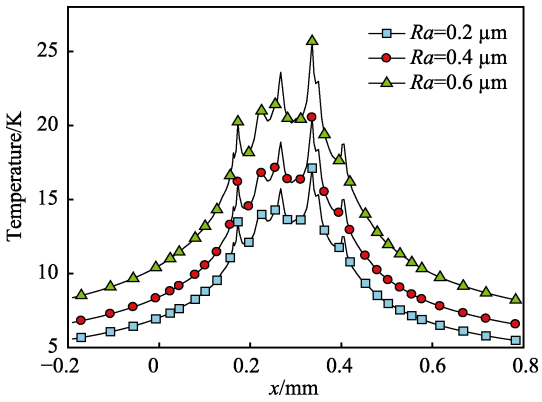


图 7　不同粗糙度（G 变化）下的表面温升分布

Fig.7 Surface temperature rise distribution under different roughness (G variation)

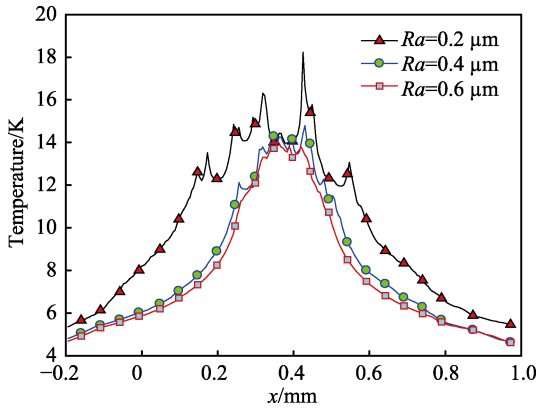


图 8　不同粗糙度（D 变化）下的表面温升分布

Fig.8 Surface temperature rise distribution under different roughness (D variation)

分形维数一定时，随着尺度系数 G 的不断增大，表面轮廓曲线峰值逐渐增大，即表面轮廓越来越粗糙，模型接触表面粗糙度增大。从图 7 中可以看出，随着粗糙度增加，粗糙接触模型表面温升越高。由于随着粗糙度的增大，机械变形起主要作用，使得摩擦阻力随着表面粗糙度的增大而增大。粗糙表面微凸体高低不平，且形状也有所差异，实际接触面积只占公称面积的极小一部分。微动接触时，只有少数微凸体接触，且不连续，同时很小的法向载荷和切向载荷就可产生高的接触压力和较大的相对滑移距离，如图 9 和图 10 所示。根据摩擦生热原理，微动接触时所产生的瞬时热量就累积在微小接触区域上产生热点，并且热点之间存在相互作用，使得接触界面瞬时接触温度升高。微小接触区域分离时，累积的热量向周围区域进行扩散，同时又因为热传导的滞后性，使得接触区域温升高于非接触区域的温升。

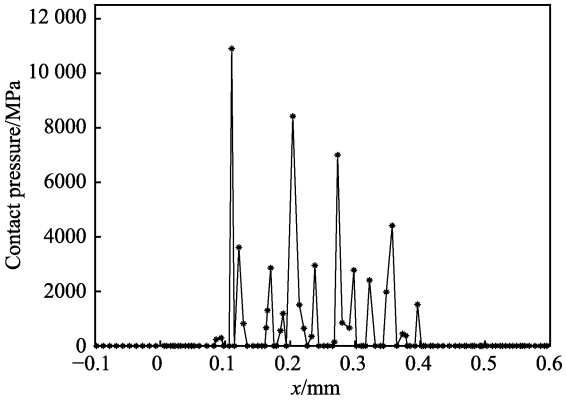


图 9　法向载荷 25 MPa 下的接触压力分布

Fig.9 Contact pressure distribution at normal load of 25 MPa

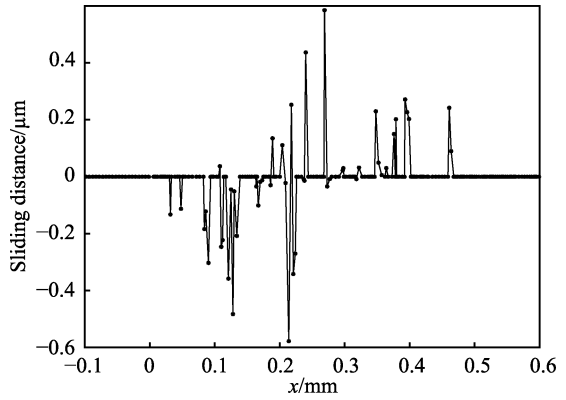


图 10　法向载荷 25 MPa 下的相对滑移距离

Fig.10 Relative slip distance at normal load of 25 MPa

尺度系数 G=4.35×10^{-11} m 时，随着分形维数的增加，表面峰值和谷值逐渐变小，表面轮廓愈加光滑，粗糙度减小。从图 8 中可以看出，随着粗糙度的减小，接触模型表面温升降低。其温升的分布趋势逐渐接近于光滑接触模型，但要高于光滑接触模型，远离接触区域的温升逐渐趋近于一个恒定的值。

3.2　不同条件下的表面温升分布

施加载荷后，模型处于完全滑移状态。接触面在微动过程中，由于接触面间不断摩擦产生的摩擦能，通常以热的形式耗散掉。同时在短时间内会使接触表面的温度升高，而温度急剧升高会影响材料的接触特性等。为了进一步探索微动接触模型温升的分布规律，分别研究切向位移载荷、法向载荷、接触材料对温升分布的影响。

在粗糙度相同、法向载荷一定（P=20 MPa）的有限元模型中，对模型施加不同的切向位移载荷，观察粗糙接触模型不同切向位移幅值下的温升分布，如图 11 所示。从图 11 可以发现，随着切向载荷的增加，

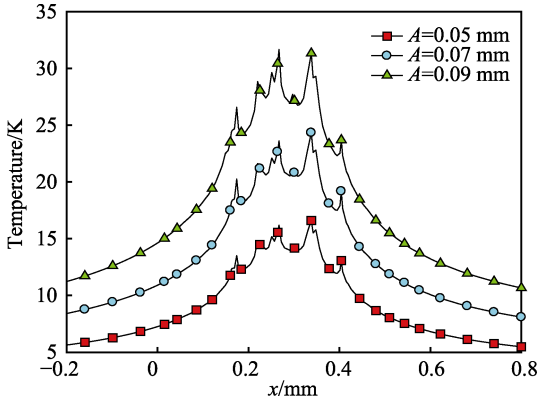


图 11　不同切向位移幅值下的表面温升分布
Fig.11 Surface temperature rise distribution under different tangential displacement amplitudes

模型接触表面的温升增加。由于随着切向载荷的增加，圆柱试件相对滑移距离变大，摩擦热产生率增加，微动接触时产生的热量增加，使接触区域温度升高。同时在微动循环过程中，随着接触点的改变，摩擦所产生的热量向非接触区域进行扩散。由于表面接触是微凸体间相互接触，在微动接触时，微凸体应力集中，相互摩擦产生大量的热。当微凸体间相互脱离接触时，产生的热量向周围传递，引起周围区域有较低的温度。

在法向载荷不同情况下，分别讨论法向载荷对粗糙接触模型的温升影响，如图 12 所示。随着法向载荷的增大，粗糙接触模型的温升幅值增大。这是因为在相同粗糙度工况下，随着法向载荷的增大，其真实接触面积增大，剪切摩擦力、相对滑移距离和接触压力、模型接触宽度都随着法向载荷增大而增大，微动接触瞬时产生的热量就释放在接触区域上。在法向载荷作用下，粗糙接触模型的真实接触面积远远小于名义接触面积，其实际接触面积为所有微凸体接触面积之和。同时随着载荷的增加，摩擦热源强度会增加，故温升增加。

当法向载荷为 P=20 MPa，接触模型的粗糙度相同，切向位移载荷为 S=0.05 mm 时，分别研究接触副

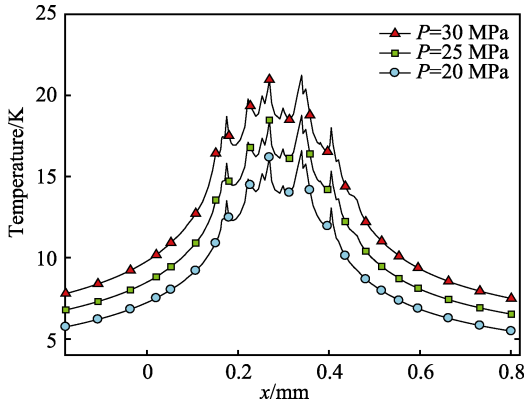


图 12　不同法向载荷下的表面温升分布
Fig.12 Surface temperature rise distribution under different normal loads

材料为 Steel 和 Al 的温升分布规律。如图 13 所示，不同的接触副材料在接触区域产生的温升分布有明显的差异，接触副材料为 Steel 的温升分布明显高于 Al，接触副材料为 Al 的闪点温度接近于恒定温度，而接触副材料为 Steel 的闪点温度较高。这是因为 Al 的导热性能要优于 Steel，摩擦表面能量积累的速度和大小与接触副材料和性能有关，导热性能好的材料能快速地将热能导出，使材料摩擦表面温升不高，并且保持原有的摩擦磨损性能。如果材料的热导性较差，以传导形式消耗的热量就会少，热量在摩擦表面积累，引起温度急剧升高。这也进一步说明材料的导热性能越好，摩擦表面温度越低。

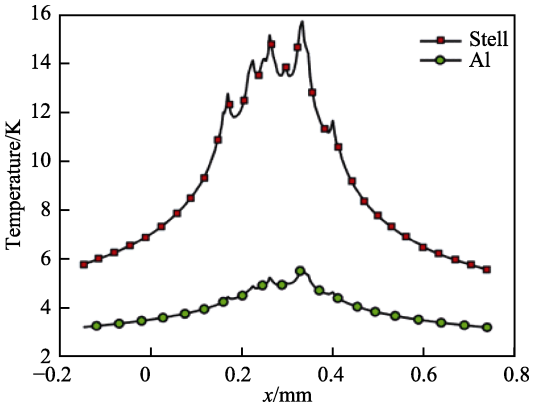


图 13　不同接触副材料下的表面温升分布
Fig.13 Surface temperature rise distribution under different contact pair materials

4　结论

文中基于分形理论模拟了二维粗糙表面轮廓，建立了不同表面粗糙度的微动接触模型，利用摩擦-热结构耦合有限元方法模拟了二维柱面-平面粗糙接触模型的温升分布，得到以下结论：

1）法向载荷和切向位移幅值一定时，随着粗糙度的增大，接触表面温升分布增大。同时粗糙接触模型会出现局部温升峰值，且温升大于光滑接触模型。

2）粗糙接触模型中，切向位移幅值不变时，随着法向载荷增大，表面温升增大。随着法向载荷增大，模型接触宽度、相对滑移距离和剪切摩擦力增大。微动接触时，损耗的热量增加，同时摩擦热源强度增加。

3）法向载荷和粗糙度一定时，随着切向位移幅值的增加，粗糙接触模型温度幅值增大。由于随着切向载荷增加，上试件相对滑移距离变大，摩擦热产生率增加，微动接触时产生的热量增加，使接触区域温度升高。

4）粗糙接触模型中，考虑摩擦副材料属性时，发现接触副材料为 Steel 的温升分布要高于 Al。因为 Steel 的热传导率小于 Al，说明材料的导热性能越好，摩擦表面温度越低。

参考文献：

[1] CZICOS H, DOWSON D. Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication, and wear[M]. Journal of engineering materials and technology, 1978, 11(4): 259-260.

[2] FOUVRY S, DUO P, PERRUCHAUT P. A quantitative approach of Ti-6Al-4V fretting damage: friction, wear and crack nucleation[J]. Wear, 2004, 257(9-10): 916-929.

[3] JIN X, SUN W, SHIPYWAY P H. Derivation of a wear scar geometry-independent coefficient of friction from fretting loops exhibiting non-coulomb frictional behaviour[J]. Tribology international, 2016, 102: 561-568.

[4] LEE H, MALL S. Some observations on frictional force during fretting fatigue[J]. Tribology letters, 2004, 17(3): 491-499.

[5] WANG R H, JAIN V K, MALL S. A non-uniform friction distribution model for partial slip fretting contact[J]. Wear, 2007, 262(5): 607-616.

[6] JIN X, SUN W, SHIPWAY P H. The role of geometry changes and oxide debris layers associated with wear on the local temperature field in fretting contacts[J]. Tribology international, 2016, 102: 392- 406.

[7] KALIN M. Influence of flash temperatures on the tribological behaviour in low-speed sliding: A review[J]. Materials science & engineering A, 2004, 374(1): 390-397.

[8] KALIN M, VIZINTIN J. Comparison of different theoretical models for flash temperature calculation under fretting conditions[J]. Tribology international, 2001, 34(12): 831-839.

[9] ASHBY M F, ABULAWI J, KONG H S. Temperature maps for frictional heating in dry sliding[J]. Tribology transactions, 1991, 4: 577-587.

[10] GREENWOOD J A, ALLISTON-GREINER A F. Surface temperatures in a fretting contact[J]. Wear, 1992, 155: 269-275.

[11] HELMI A M, CAMACHO F. Temperature field in the vicinity of a contact asperity during fretting[J]. ASME publications ped, 1993, 67: 51-61.

[12] JIN X, SHIPWAY P H, SUN W. The role of frictional power dissipation (as a function of frequency) and test temperature on contact temperature and the subsequent wear behaviour in a stainless steel contact in fretting[J]. Wear, 2015, 330-331: 103-111.

[13] WEN J, KHONSARI M M. Transient temperature involving oscillatory heat source with application in fretting contact[J]. Journal of tribology, 2007, 129: 517-527.

[14] LU W, ZHANG P, LIU X, et al. Influence of surface topography on torsional fretting wear under flat-on-flat contact[J]. Tribology international, 2017, 109: 367-372.

[15] KUBIAK K J, LISKIEWICZ T W, MATHIA T G. Surface morphology in engineering applications: Influence of roughness on sliding and wear in dry fretting[J]. Tribology international, 2011, 44(11): 1427-1432.

[16] KUBIAK K J, MATHIA T G, FOUVRY S. Interface roughness effect on friction map under fretting contact conditions[J]. Tribology international, 2010, 43(8): 1500-1507.

[17] SVAHAN F, ÅSA K R, ERIK W. The influence of surface roughness on friction and wear of machine element coatings[J]. Wear, 2003, 254(11): 1092- 1098.

[18] SEDLACEK M, PODGORINK B, VIZINTIN J. Influence of surface preparation on roughness parameters friction and wear[J]. Wear, 2009, 266: 482- 487.

[19] PEREIRA K, YUE T, WAHAB M A. Multiscale analysis of the effect of roughness on fretting wear[J]. Tribology international, 2017, 110: 222- 231.

[20] LIU L, YANG C, SHENG Y. Wear model based on real-time surface roughness and its effect on lubrication regimes[J]. Tribology international, 2018, 126: 16-20.

[21] 尤晋闽, 陈天宁. 结合面法向动态参数的分形模型[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 91-94.
YOU Jin-min, CHEN Tian-ning. Fractal model for normal dynamic parameters of joint surfaces[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 91-94.

[22] 姬翠翠, 朱华. 粗糙表面分形接触模型的研究进展[J]. 润滑与密封, 2011, 36(9): 114-119.
JI Cui-cui, ZHU Hua. Research progress on M-B fractal contact model[J]. Lubrication and sealing, 2011, 36(9): 114-119.

[23] WANG S, KOMVOPOULOS K. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime: Part 1—Elastic contact and heat transfer analysis[J]. ASME journal of tribology, 1994, 116: 812-822.

[24] QIN W, JIN X, KIRK A, et al. Effects of surface roughness on local friction and temperature distributions in a steel-on-steel fretting contact[J]. Tribology international, 2018, 120: 350-357.

[25] MCCOLL I R, DING J, LEEN S B. Finite element simulation and experimental validation of fretting wear[J]. Wear, 2004, 256(11): 1114-1127.