DOI: 10.3901/JME.2020.03.130

摩擦纳米发电机表面织构的优化设计*

杨潍旭¹ 王晓力² 陈 平¹

(1. 北京科技大学机械工程学院 北京 100083;

2. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081)

摘要: 摩擦纳米发电机是基于自驱动纳米技术并以接触/摩擦起电和静电感应为基础的微/纳机电动力系统, 提高其起电性能的有效手段之一是将微/纳织构制备在接触界面上。采用理论与试验相结合的方法开展摩擦纳米发电机表面织构的优化设计研究。建立摩擦纳米发电机织构界面黏附接触模型, 探讨外载荷、织构面密度及宽度对摩擦纳米发电机起电性能的影响规律, 获得不同外载荷下使摩擦纳米发电机起电性能最优的织构参数, 并制备织构化摩擦纳米发电机, 构建起电性能测试平台, 试验验证摩擦纳米发电机最优织构的设计效果。结果表明: 不同外载荷下使摩擦纳米发电机起电性能达到最优的织构参数不同; 相比于织构宽度, 织构面密度对于摩擦纳米发电机起电性能的影响更为显著; 所构建的理论模型结果与试验结果具有较好的一致性, 可为摩擦纳米发电机表面织构的设计提供理论指导。

关键词: 摩擦纳米发电机; 表面织构; 接触力学; 接触起电

中图分类号: TH117

Optimal Design of Surface Texture in Triboelectric Nanogenerators

YANG Weixu¹ WANG Xiaoli² CHEN Ping¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2. Department of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Triboelectric nanogenerator (TENG) is a micro/nano electromechanical power system which is based on the ideas of self-powered nanotechnology and the mechanisms of triboelectric and electrostatic induction. An effective way to improve power generation of TENGs is to introduce micro-/nano-textures onto the contact surface. The optimum design of surface texture in TENGs is studied by combining simulation with experiment. An adhesive contact model for TENG with textured interface is established to discuss the influence of applied load, texture density and width on the power generation of TENG and obtain optimal texture parameters for maximum TENG power generation under different applied loads. In addition, TENGs with textured surfaces are fabricated and the test platform of electrical output for TENGs is constructed to verify the design effect of the optimal texture of TENG. It is shown that the optimal texture parameters of TENGs under different applied loads vary. Compared with the texture width, the influence of texture density on the power generation of TENG is more significant. In addition, the simulation results are in good agreement with the experimental results, which indicates that the theoretical model can provide the guideline for the texture design in TENG.

Key words: triboelectric nanogenerator; surface texture; contact mechanics; contact electrification

0 前言

摩擦纳米发电机(Triboelectric nanogenerator, TENG)是基于自驱动纳米技术并以接触/摩擦起电和静电感应为基础的微/纳机电动力系统^[1]。法向接触-分离式 TENG 结构简单, 可靠性高, 应用领域广泛,

因此引起研究者的广泛关注^[2]。接触起电的电荷量与接触副表面电荷密度及有效接触面积密切相关, 因此提高摩擦纳米发电机起电性能的一个重要手段是通过将具有微/纳特征尺度的织构制备在接触界面上来增加有效接触面积^[3-4]。例如, FAN 等^[3]在聚合物表面制备均匀规则的微米级织构(线型、立方体、棱锥), 发现相比于光滑无织构表面, 表面具有微米级织构的 TENG 的输出开路电压与短路电流均有显著的提高。然而, 目前表面织构参数的确定多采用经验与试探的手段, 摩擦纳米发电机表面织构的优化设计仍是难题。

* 中国博士后基金(2019M660449)、国家自然科学基金(51735001)和国家重点研发计划(2018YFC0810500)资助项目。20190727 收到初稿, 20191216 收到修改稿

接触力学的核心是建立外载荷与接触面积的关系,因此接触力学与接触起电密切相关,可以作为摩擦纳米发电机表面结构设计的理论基础。对于表面具有微/纳结构的摩擦纳米发电机而言,接触区域小到微/纳米尺寸,经典接触理论不再适用,需要考虑两表面间的黏附力(例如范德华力和静电力)建立黏附接触力学模型^[5-6]。目前黏附接触力学模型主要包括解析模型和数值模型。解析模型如 JKR^[7]、DMT^[8]、MD^[9]主要针对球体与光滑平面或两光滑球体间的黏附接触,将两物体间的黏附作用简化为其相邻表面之间的黏附作用,因而不适用于分析结构化摩擦纳米发电机中光滑平面与微/纳结构表面的黏附接触。数值模型如基于 Lifshitz-Hamaker 方法^[10-11]的模型通过对物体间所有分子间的相互作用进行累加求和来获得两物体间的黏附力,因此可以被扩展应用于摩擦纳米发电机结构界面黏附接触的分析。然而,目前相关的表面结构的优化设计与试验研究尚少,难以为工程中改善摩擦纳米发电机起电性能的结构优化设计提供依据。

本文采用理论与试验相结合的方法开展摩擦纳米发电机表面结构的优化设计研究。建立摩擦纳米发电机结构界面黏附接触模型并数值求解,探讨外载荷、结构面密度及宽度对摩擦纳米发电机起电性能的影响规律,获得不同外载荷下使摩擦纳米发电机起电性能最优的结构参数,并制备结构化摩擦纳米发电机,搭建起电测试平台,试验验证摩擦纳米发电机最优结构的设计效果。

1 黏附接触力学模型

图 1a 和 1b 分别为法向接触-分离式摩擦纳米发电机的接触与分离状态,其中 V_{oc} 代表接触电极与背部电极之间的开路电压, d 为接触电极与聚合物

图 1 法向接触-分离式摩擦纳米发电

薄膜之间的距离。由于表面结构均匀分布,为简便起见,取单一结构单元与电极的接触作为分析对象,如图 2a 和 2b 所示。

图 2 接触电极与聚合物薄膜单一结构单元黏附接触模型

由于金属接触电极与聚合物薄膜的弹性模量相差较大,因此黏附接触计算时将接触电极视为刚体,而结构化聚合物薄膜视为弹性体。接触电极与结构聚合物薄膜的间距 $h(x,y)$ 可以表示为

$$h(x,y) = -\alpha - h_s(x,y) + u(x,y) \quad (1)$$

式中, α 为接触电极底部与 $z=0$ 平面之间的距离,称为接近距离。当接触电极位于 $z=0$ 平面之上时,定义 $\alpha < 0$, 否则 $\alpha > 0$ 。 $h_s(x,y)$ 为结构高度分布,对于常应用于 TENG 的四棱锥结构,如图 3 所示, $h_s(x,y)$ 可以表示为

$$h_s(x,y) = \begin{cases} b - \frac{b(|x+y|+|x-y|)}{a} & |x|, |y| \leq \frac{a}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, a 、 b 分别代表棱锥结构的宽度及高度, c 为结构单元宽度,则结构面密度为 $S_p = a^2/c^2$ 。

图 3 单一棱锥结构单元示意图

式(1)中 $u(x,y)$ 代表结构表面的弹性变形量,根据 Boussinesq 公式^[12]可表示为

$$u(x,y) = \frac{1}{\pi E^*} \iint \frac{p(\xi,\eta) d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} \quad (3)$$

式中, $E^* = E/(1-\nu^2)$, E 和 ν 分别代表聚合物薄膜的弹

性模量和泊松比。 $p(x,y)$ 为接触表面之间的黏附接触应力, 可以表示为

$$p(x,y) = \begin{cases} p_{vdw}(x,y) + p_{rep}(x,y) + p_{ele}(x,y) & (x,y) \in \Omega \\ p_{vdw}(x,y) + p_{rep}(x,y) & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $p_{vdw}(x,y)$ 为范德华吸引作用力, 起源于材料中分子的固有极化; $p_{rep}(x,y)$ 为排斥接触作用力, 起源于分子间距较小时电子云的相互重叠, 基于 Lifshitz-Hamaker 方法^[10-11], 接触电极与聚合物薄膜之间的范德华吸引力和排斥接触力可以通过对描述间两非键合分子之间相互作用势的 Lennard-Jones 势函数进行两步体积分获得, 可以表示为

$$p_{vdw}(x,y) = -\frac{A_H}{6\pi h^3(x,y)} \quad (5)$$

$$p_{rep}(x,y) = \frac{A_H l_0^6}{90\pi h^9(x,y)} \quad (6)$$

式中, A_H 为 Hamaker 常数; l_0 为物体间平衡间距。 $p_{ele}(x,y)$ 为静电吸引作用力, 起源于具有不同得失电能力的接触电极与聚合物薄膜之间电荷转移而产生的接触电荷。根据平行板电容器模型, 可以表示为^[13]

$$p_{ele}(x,y) = -\frac{\sigma(x,y)^2}{2\epsilon_3} \left(\frac{B_1}{B_1 + h(x,y)} \right)^2 \quad (7)$$

式中, $\sigma(x,y)$ 为聚合物薄膜的表面电荷密度; ϵ_3 为接触电极及聚合物薄膜所处介质的介电常数; $B_1 = T_1/K_1$, T_1 和 K_1 分别为聚合物薄膜的厚度和相对介电常数。若忽略电荷的耗散作用, 静电作用仅存在于接触或已经发生过接触的区域。本文将接触应力为压应力的区域定义为接触区域 Ω , 接触区域内棱锥织构表面的表面积为参与接触起电的有效接触面积 S_c ^[14]。则接触电极与织构化聚合物薄膜之间的总黏附相互作用力为

$$F = \iint p(x,y) dx dy \quad (8)$$

在求解过程中, 保持织构化聚合物薄膜不动, 使接触电极从一初始间距逐步接近织构化聚合物薄膜, 即逐步减小接近距离 α , 计算每一 α 值下的弹性变形 $u(x,y)$ 、黏附接触应力 $p(x,y)$ 、总黏附相互作用力 F 及接触区域 Ω , 直到总黏附作用力 F 达到设定的施加载荷值 F_{app}/n_u , 其中 F_{app} 代表 TENG 器件的外载荷, n_u 为 TENG 内织构单元个数, 若假设 TENG 器件尺寸为 S_d , 则 $n_u = S_d/c^2$ 。根据接触区域计算此施加载荷 F_{app} 下参与接触起电的有效接触面积 S_c 以及输出开路电压 $V_{oc} = \sigma S_c d / \epsilon_0 (a+c)^2$, 其中, ϵ_0 为真空的介电常数。计算流程如图 4 所示, 计算中主要采用非精确牛顿法、二次共轭梯度稳定算法以及

FFT 快速算法^[15]。

图 4 电极与聚合物薄膜黏附接触计算流程图

2 理论计算结果与讨论

利用理论模型, 探讨外载荷、织构面密度及宽度对于 TENG 有效接触面积及开路电压的影响规律, 获得不同外载荷下使 TENG 起电性能最优的织构参数。计算中, 接触电极及聚合物薄膜材料分别为铜(Cu)和聚二甲基硅氧烷(PDMS), 织构选择为规则分布的四棱锥阵列, 相关计算参数如下: 等效弹性模量 $E^* = 1.5 \text{ MPa}$, Hamaker 常数 $A_H = 3.34 \times 10^{-13} \text{ J}$, 平衡间距 $l_0 = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$, 表面电荷密度 $\sigma = 2.78 \text{ }\mu\text{C/m}^2$, 器件尺寸 $S_d = 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 。

2.1 外载荷的影响

本节探究外载荷对棱锥织构 TENG 有效接触面积及输出开路电压的影响, 织构尺寸参数为: 织构面密度 $S_p = 45\%$, 织构宽度 $a = 10 \text{ }\mu\text{m}$, 织构高度 $b = 0.7a$ ^[16]。有效接触面积随外载荷的变化如图 5 所示, 可以发现, 随着外载荷的增加, 有效接触面积先显著增加, 后缓慢增加。当外载荷较小时 ($F_{app} < 100 \text{ N}$), 棱锥织构表面与金属电极尚未完全接触, 随着外载荷的增加, 接触区域显著增加, 如图 5 中 20 N、40 N 及 100 N 外载荷下棱锥织构表面的接触应力分布图所示, 其中深色区域代表接触应力为负的区域, 即非接触区域, 因此此时有效接触面积随外载荷的

增加而显著增加; 当外载荷较大时($F_{\text{app}} \geq 100 \text{ N}$), 棱锥织构表面基本完全与金属电极发生接触, 如图 5 中 100 N 及 120 N 外载荷下棱锥织构表面的接触应力分布图所示, 其中深色区域代表非接触区域, 因此此时有效接触面积随外载荷的增加而缓慢增加。

图 5 有效接触面积随外载荷的变化

图 6 为摩擦纳米发电机的输出开路电压随外载荷的变化, 可以发现, 随着外载荷的增加, 开路电压呈现出与有效接触面积相同的规律, 即先显著增加, 后缓慢增加。

图 6 开路电压随外载荷的变化

2.2 织构面密度的影响

本节探究较小外载荷 20 N 以及较大外载荷 120 N 作用下织构面密度对棱锥织构 TENG 有效接触面积及输出开路电压的影响, 织构尺寸参数为: 织构面密度 $S_p=25\% \sim 45\%$, 织构宽度 $a=10 \mu\text{m}$, 织构高度 $b=0.7a^{[16]}$ 。图 7 为 20 N 外载荷时 TENG 有效接触面积随织构面密度的变化, 可以发现此时有效接触面积随面密度的增加而降低, 这是由于棱锥织构表面尚未完全与金属电极接触, 随着面密度的增加, 与金属电极接触的基底区域减少, 因此有效接触面积随面密度的增加而降低, 如图 7 中 20 N 外载荷下面密度分别为 25%、35%以及 45%的棱锥织构表面的接触应力分布图所示, 其中紫色区域代表接触应力为负的区域, 即非接触区域。

图 7 20 N 外载荷时有效接触面积随织构面密度的变化

图 8 为 120 N 外载荷时 TENG 有效接触面积随织构面密度的变化。可以发现, 与 20 N 外载荷时情况不同, 120 N 外载荷时有效接触面积随面密度的增加而增加, 此时棱锥织构表面基本完全与金属电极发生接触, 如图 8 中 120 N 外载荷时不同面密度棱锥织构表面的接触应力分布图所示, 其中紫色区域代表非接触区域, 由于面密度大的棱锥织构表面具有更大的表面积, 因此 120 N 外载荷时有效接触面积呈现出如此趋势。

图 8 120 N 外载荷时有效接触面积随织构面密度的变化

图 9 为 20 N 及 120 N 外载荷时棱锥织构面密度对于 TENG 最大开路电压的影响。随着面密度的变化, 棱锥织构 TENG 开路电压呈现出与有效接触面积相同的规律。当外载荷较小时, 开路电压随面密度的增加而减小, 在本研究范围内使开路电压达到最大的最优织构面密度为 25%; 而外载荷较大时, 开路电压随面密度的增加而增加, 最优织构面密度为 45%。

2.3 织构宽度的影响

本节探究 20 N 及 120 N 外载荷下织构宽度对棱锥织构 TENG 有效接触面积及输出开路电压的影响, 织构尺寸参数为: 织构面密度 $S_p=25\%$, 织构宽度 $a=5 \sim 10 \mu\text{m}$, 织构高度 $b=0.7a^{[16]}$ 。图 10 为 20 N 外载荷时 TENG 有效接触面积随织构宽度的变化, 可以发现此时有效接触面积随织构宽度的增加而略有降低, 这是由于棱锥织构表面尚未完全与金属电

图9 开路电压随织构面密度的变化

极接触,随着织构宽度的增加,与金属电极接触的基底区域略有减少,如图10中20 N外载荷下织构宽度分别为5.0 μm 、7.5 μm 以及10.0 μm 的棱锥织构表面的接触应力分布图所示,其中紫色区域代表非接触区域,因此有效接触面积随织构宽度的增加而略有降低。

图10 20 N外载荷时有效接触面积随织构宽度的变化

图11为120 N外载荷时 TENG 有效接触面积随织构宽度的变化。可以发现,120 N外载荷时有效接触面积基本不随织构宽度的增加而变化,这是由于此时棱锥织构表面基本完全与金属电极发生接触,如图11中120 N外载荷时不同宽度棱锥织构表面的接触应力分布图所示,其中紫色区域代表非接触区域,由于面密度相同时不同宽度的织构表面积均相同,因此有效接触面积不随宽度的变化而改变。

图11 120 N外载荷时有效接触面积随织构宽度的变化

图12为20 N及120 N外载荷时棱锥织构宽度对于 TENG 最大开路电压的影响。随着宽度的变化,棱锥织构 TENG 开路电压呈现出与有效接触面积相同的规律。当外载荷较小时,开路电压随宽度的增加而略有减小,在本研究范围内使开路电压达到最大的最优织构宽度为5 μm ;而外载荷较大时,开路电压随宽度的增加而基本不变。并且,相比于织构宽度,织构面密度对于 TENG 开路电压的影响更为显著。

图12 开路电压随织构宽度的变化

3 试验方法

3.1 制备

制备织构化 PDMS 薄膜主要包括硅模板的制备及复型两大步骤。其中,硅模板为具有指定宽度、高度及面密度的倒棱锥凹坑阵列图形的母模板,主要采用热氧化、光学光刻以及氢氧化钾湿法刻蚀等工艺进行制备;而复型则通过旋涂及揭膜等工艺加工出与硅模板图案相反,即具有棱锥凸起阵列的 PDMS 薄膜。棱锥织构 PDMS 薄膜加工尺寸如表1所示。图13a和13b分别为样品B和C的棱锥织构 SEM图。

表1 薄膜尺寸参数

织构样品	A	B	C
宽度/ μm	5	10	10
面密度(%)	25	25	45

图13 棱锥织构 SEM图

3.2 起电性能测试

摩擦纳米发电机起电性能测试平台如图 14 所示, 主要包括运动控制系统和起电性能测量系统, 其中, 运动控制系统主要包括线性马达、压力传感器、嵌入式控制器以及可编程逻辑控制器(PLC)程序等, 为 TENG 提供可控外载荷的循环接触分离运动; 起电性能测量系统主要包括静电计及计算机, 测量记录 TENG 接触分离过程中产生的电学信号。

起电性能测试步骤如下: ① 将接触电极固定于线性马达滑杆连接件, 贴有背部电极的织构化 PDMS 薄膜固定于压力传感器; ② 在 PLC 程序中设定外载荷参数, 并通过嵌入式控制器传递至线性马达; ③ 启动线性马达, 即可实现 TENG 的循环接触分离运动。运动过程中, 将接触电极及背部电极分别与静电计相连, 即可测量记录 TENG 输出开路电压。

图 14 TENG 起电性能测试平台

4 试验结果与讨论

利用起电性能测试平台, 测量 20N 及 120N 外载荷下不同棱锥织构 TENG 的输出开路电压, 为了对比, 同时测试光滑表面 TENG(编号为 O)的输出开路电压。试验中 TENG 器件尺寸为 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$, 温度 $25 \sim 30^\circ\text{C}$, 相对湿度 $25\% \sim 50\%$ 。

开路电压测试结果如图 15 所示, 可以发现, 当外载荷较小时, 本试验范围内棱锥织构 TENG 输出的最高开路电压为 28.1 V , 相比于光滑表面 TENG 提升了 28.3% , 最优织构面密度为 25% , 最优织构宽度为 $5\text{ }\mu\text{m}$; 当外载荷较大时, 棱锥织构 TENG 输出的最高开路电压为 40.9 V , 相比于光滑表面 TENG 提升了 25.5% , 最优织构面密度为 45% , 最优织构参数的试验结果与理论计算结果一致。

图 16 为样品编号为 C 的棱锥织构摩擦纳米发电机在外载荷 20 N 下持续运行 $1\,500\text{ s}$ 所输出的开

路电压结果。可以看出, 织构化 TENG 在 0 s 时刻输出开路电压约为 23.1 V , 在 $1\,500\text{ s}$ 时刻输出开路电压约为 23.2 V , 即, 在循环运行使用后, 仍可以保持稳定的电输出, 说明本文所制备的具有棱锥织构的摩擦纳米发电机具有良好的输出稳定性。

图 15 不同 TENG 样品的输出开路电压

图 16 TENG 开路电压随时间的变化

5 结论

(1) 摩擦纳米发电机有效接触面积及开路电压随外载荷的增加呈现先显著增加, 后缓慢增加的趋势; 外载荷较小时, 有效接触面积及开路电压随织构面密度及宽度的增加而减小; 外载荷较大时, 有效接触面积及开路电压随织构面密度的增加而增加, 随织构宽度的增加而基本不变。

(2) 在本文研究范围内, 不同外载荷下使开路电压达到最优的织构参数不同, 当外载荷较小时,

最优织构面密度和宽度分别为 25%和 5 μm ; 当载荷较大时, 最优织构面密度 45%。

(3) 相比于织构宽度, 织构面密度对于摩擦纳米发电机起电性能的影响更为显著。

(4) 本文所构建理论模型的计算结果与试验结果具有较好的一致性, 可为摩擦纳米发电机表面织构的设计提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] WANG Z L, CHEN J, LIN L. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(8): 2250-2282.
- [2] WANG H, SHI M, ZHU K, et al. High performance triboelectric nanogenerators with aligned carbon nanotubes[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(43): 18489-18494.
- [3] FAN F-R, LIN L, ZHU G, et al. Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 3109-3114.
- [4] TCHO I W, KIM W G, JEON S B, et al. Surface structural analysis of a friction layer for a triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2017, 42: 34-42.
- [5] 韩振华, 石万凯, 肖洋轶, 等. 基于 JKR 模型的粗糙圆柱表面黏着接触分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(19): 116-122.
HAN Zhenhua, SHI Wankai, XIAO Yangyi, et al. Adhesive contact analysis between rough surfaces based on JKR model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(19): 116-122.
- [6] YANG W, WANG X, LI H, et al. Comprehensive contact analysis for vertical-contact-mode triboelectric nanogenerators with micro-/nano-textured surfaces[J]. *Nano Energy*, 2018, 51: 241-249.
- [7] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical and Physical Sciences*, 1971, 324(1558): 301-313.
- [8] DERJAGUIN B V, MULLER V M, TOPROV Y P J. Effect of contact deformation on the adhesion of particles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1975, 53(2): 314-326.
- [9] MAUGIS D. Adhesion of spheres: The JKR-DMT transition using a Dugdale model[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1992, 150(1): 243-269.
- [10] LIFSHITZ E. The theory of molecular attractive forces between solids[J]. *Soviet Physics*, 1956, 2: 73-83.
- [11] ISRAELACHVILI J N. Intermolecular and surface forces [M]. Pittsburgh: American Academic Press, 2011.
- [12] JOHNSON K L, JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [13] HORN R G, SMITH D T. Contact electrification and adhesion between dissimilar materials[J]. *Science*, 1992, 256(5055): 362-364.
- [14] YANG W, WANG X, LI H, et al. Fundamental research on the effective contact area of micro-/nano-textured surface in triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2019, 57: 41-47.
- [15] ZHANG Y, WANG X, LI H, et al. Adhesive behavior of micro/nano-textured surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 329: 174-183.
- [16] JIN C, KAI D S, JONES M, et al. On the contact behavior of micro-/nano-structured interface used in vertical-contact-mode triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2016, 27: 68-77.

作者简介: 杨淮旭(通信作者), 女, 1992 年出生, 博士, 特聘副教授。主要研究方向为 MEMS 黏附接触力学以及接触起电基础。

E-mail: karenyang1992@163.com

王晓力, 女, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为纳米摩擦学、黏附接触力学以及微纳制造。

E-mail: xiaoli_wang@bit.edu.cn

陈平, 女, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械设计及理论、摩擦磨损与系统工程。

E-mail: chenp@ustb.edu.cn