

表面摩擦磨损与润滑

# 超声振动辅助铣削加工钛合金表面摩擦 磨损性能研究

马超, 张建华, 陶国灿

(山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061)

**摘要:** **目的** 研究超声振动辅助铣削加工钛合金表面形貌及摩擦磨损性能的优势。**方法** 将 0、6、12  $\mu\text{m}$  的超声振动振幅分别施加到铣削加工的进给方向加工 TC4 钛合金, 得到不同加工参数条件下的表面形貌。用多功能扫描电子显微镜观察不同条件下的微观表面形貌, 并且对不同表面的摩擦磨损性能进行了测试, 分析了超声振动对表面摩擦磨损性能的影响。**结果** 施加超声振动后, 表面微观形貌与传统铣削加工存在较大区别。表面微观形貌不仅存在因进给速度产生的进给划痕, 还存在一定规律的微观织构。摩擦磨损试验分析了干摩擦与润滑脂摩擦两种情况。干摩擦条件下, 超声振动对摩擦系数的影响较明显, 振幅为 6  $\mu\text{m}$  时, 摩擦系数有所减小; 振幅为 12  $\mu\text{m}$  时, 摩擦系数有所增大。脂润滑条件下, 摩擦系数变化较小。**结论** 通过超声振动辅助铣削可以加工出具有一定微观形貌的表面织构, 这些微织构的存在影响了加工表面的摩擦磨损性能, 对于研究表面抗磨减阻性能有一定的作用。

**关键词:** 超声振动辅助铣削; 钛合金; 表面形貌; 摩擦磨损

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)08-0115-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.08.019

## Wear and Friction Properties of Titanium Alloy Surface Subject to Ultrasonic Vibration Assisted Milling

MA Chao, ZHANG Jian-hua, TAO Guo-can

(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture (Ministry of Education), School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study advantage of ultrasonic vibration assisted milling titanium alloy in surface morphology as well as wear and friction properties. The ultrasonic vibration amplitude of 0, 6 and 12  $\mu\text{m}$  were applied to feed direction of milling to process titanium alloy Ti-6Al-4V, and obtain surface morphology provided with different machining parameters. Micro surface morphology under different conditions was observed with SEM. Wear and friction properties of different surfaces were also tested, and effects of ultrasonic vibration on surface wear and friction properties were analyzed. The surface morphology

收稿日期: 2017-01-26; 修订日期: 2017-06-21

Received: 2017-01-26; Revised: 2017-06-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51475275)

Fund: Supported by the National Science Fund of China (51475275)

作者简介: 马超 (1991—), 男, 硕士, 主要研究方向为超声振动辅助加工、仿生表面。

Biography: MA Chao (1991—), Male, Master, Research focus: ultrasonic vibration assisted machining, biomimetic surface.

通讯作者: 张建华 (1964—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为特种加工。

Corresponding author: ZHANG Jian-hua (1964—), Male, Professor, Ph.D. supervisor, Research focus: non-traditional machining.

differed a lot from that of conventional milling after ultrasonic vibration was applied. In addition to feed scratches generated as feed speed was present, the surface morphology included certain regular microtexture. Dry friction and lubricating grease friction were both analyzed during the wear and friction test. Under the condition of dry friction, the effect of ultrasonic vibration on coefficient of friction was more obvious. The coefficient of friction decreased at the amplitude of 6  $\mu\text{m}$  and increased at 12  $\mu\text{m}$ . Under the condition of lubrication friction, the coefficient of friction changed slightly. Surface texture with certain microstructure can be obtained by ultrasonic vibration assisted milling, presence of such microtexture affects wear and friction properties of machined surface, which plays a certain role in studying anti-wear and drag reduction properties of machined surface.

**KEY WORDS:** ultrasonic vibration assisted milling; titanium alloy; surface morphology; friction and wear

TC4 钛合金是一种比强度高、断裂韧性好、耐腐蚀性好的硬脆材料,因而被认为是一种重要的工程材料<sup>[1-2]</sup>。此外,由于它还具有较好的生物相容性,也被广泛应用于医疗领域<sup>[3-5]</sup>,但其存在硬度低、易磨损等缺点<sup>[6]</sup>。为了提高 TC4 的表面耐磨性,目前已具备多种表面改性技术,如对其合金化处理或者对其表面进行涂层处理。Gao 等<sup>[7]</sup>利用激光涂敷法在钛合金表面制备 TiNi 金属间化合物,以获取摩擦学性能良好的表面。王东生等<sup>[8]</sup>综述了钛合金激光改性技术的研究现状,主要介绍了激光熔覆、激光合金化和激光熔凝技术及其在钛合金表面改性中的应用。然而这些方法也存在一些问题,在改性处理表面可能会形成微裂纹,虽然能够改善表面硬度和耐磨性,但降低了抗疲劳性能。表面形貌对表面性能有重要影响。Erdemir<sup>[9]</sup>综述了表面织构是提高机械零件摩擦学性能的有效方法,各种形状和几何特征的表面织构被广泛应用于耐磨性研究<sup>[10-13]</sup>。

目前,改善钛合金表面性能的方法主要是对其进行二次处理,对于直接通过切削加工来改善表面性能的研究不多。超声振动辅助铣削对于加工难加工材料具有一定的优势,而且利用这种方法可以获得具有一定表面形貌的微观织构。本文利用超声振动辅助铣削加工 TC4 钛合金,研究不同加工参数下的表面形貌,进而研究加工表面形貌对改善表面摩擦磨损性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 超声振动辅助铣削

超声振动辅助铣削加工钛合金实验在数控机床上进行。工件固定在超声振子上,材料为 TC4 钛合金,尺寸为 20 mm×18 mm×2 mm。超声振子通过电源控制能够产生频率为 20 kHz、振幅可调的沿进给方向的超声振动。采用表 1 的工艺参数,研究主轴转速、每齿进给量和超声振动振幅对加工表面形貌的影响,并观察不同加工条件下的微观表面形貌。

表 1 超声振动辅助铣削加工参数  
Tab.1 Ultrasonic assisted milling condition parameters

| 编号 | 切削速度<br>$v_c/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$ | 每齿进给量<br>$f_z/\text{mm}$ | 振幅 $A/\text{mm}$ |
|----|--|--------------------------|------------------|
| A  | 28.26  |                          |                  |
| B  | 47.10  | 0.004、0.008、             | 0、0.006、         |
| C  | 65.94  | 0.012                    | 0.012            |
| D  | 84.78  |                          |                  |

### 1.2 摩擦磨损试验

为了研究超声振动辅助铣削加工表面微观形貌对表面性能的影响,在室温条件下对不同加工参数下的加工表面形貌进行了摩擦磨损实验。实验在 UMT-2 多功能摩擦磨损试验机上进行。载荷施加范围为 0.1 mN~1000 N,误差为 0.01 mN。实验分干摩擦和润滑脂摩擦两种情况,所用润滑脂为常用的黄油,且两种条件的参数相同。实验中,用材料为 GCr15 的硬质合金球摩擦工件表面,球直径为 9.525 mm。考虑到表面承载能力较小,因此选择施加的载荷为 10 N,方向垂直于工件表面。小球以一定的速度往复摩擦,摩擦速度为 5 mm/s,摩擦距离为 8 mm。实验时间设置为 20 min,主要研究摩擦磨损后的表面缺陷,并分析摩擦系数的变化规律。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面形貌分析

利用电子显微镜对不同加工参数下的钛合金表面形貌进行分析,研究主轴转速、每齿进给量、振幅对表面形貌的影响。其中,每齿进给量指铣刀旋转一个齿间角,铣刀相对工件在进给方向的位移。

图 1 是切削速度为 47.10 m/min,每齿进给量为 8  $\mu\text{m}$ ,振幅为 0、6、12  $\mu\text{m}$  的微观表面形貌。由图 1 可知,振幅为 0  $\mu\text{m}$  时,即传统的铣削加工中,表面形貌为因进给速度而产生的进给划痕,划痕间距与每齿进给量的大小有关;振幅为 6  $\mu\text{m}$  时,表面形貌出现了一定规律排布的微观织构。图 1b 的微观形貌类

似于鱼鳞的表面排布。每齿进给量与振幅的不同组合，会形成突起物以及凹坑等微观织构。从图 1 可以看出，超声振幅辅助铣削加工形成的表面微观形貌，主要由进给划痕、刀具结构尺寸引起的微小划痕、突起物和凹坑组成。同时可以看出，在加工表面上会形成熔融球状物。传统的铣削加工机制是刀具切削金属

材料，在这个过程中，材料的弹塑性变形去除机制是构成加工表面的主要原因。超声振动的引入改变了这种单一的切削机制。超声振动使得刀具以高频率、小振幅的形式撞击金属材料，因此所加工出来的表面是在弹塑性变形去除和超声撞击的共同作用下形成的，可以通过该方法对一些难加工材料进行切削加工。

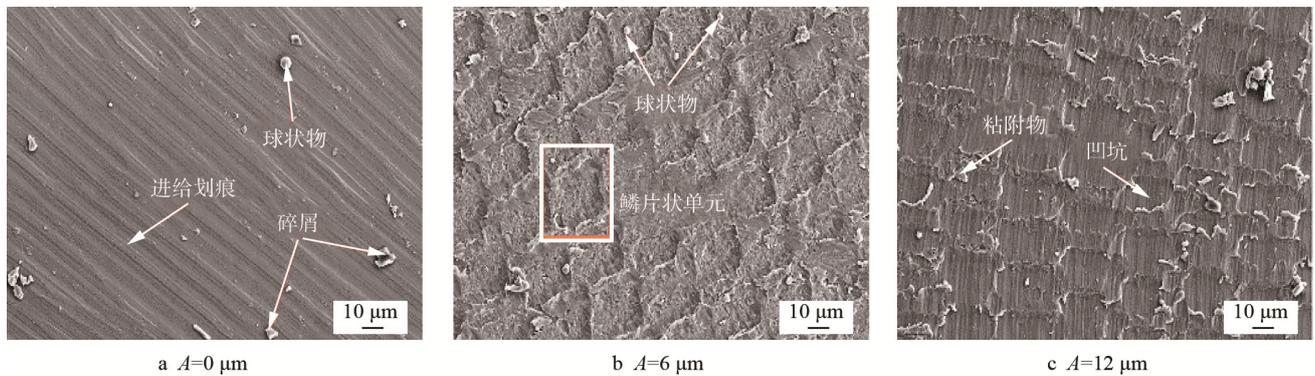


图 1 不同振幅下的加工表面形貌 ( $v_c=47.10$  m/min,  $f_z=8$   $\mu$ m)  
Fig.1 Surface topography at different amplitudes ( $v_c=47.10$  m/min,  $f_z=8$   $\mu$ m)

为了进一步研究这种切削方式对加工表面的影响，在白光干涉仪下对表面粗糙度进行分析。图 2 是不同振幅下表面粗糙度和每齿进给量的关系，可以看出，每齿进给量较小时，表面粗糙度随振动幅度的增加而增大；每齿进给量较大时，表面粗糙度随振幅的增加而减小。由此可以看出，每齿进给量较小时，超声撞击机制起主导作用，振幅越大，表面越粗糙；每齿进给量较大时，弹塑性切削机制起主导作用。两种机制共同作用形成加工表面的最终形貌。

磨损的类型。摩擦过程中，微凸状表面先相互接触，表面织构会发生剧烈的破坏和塑性变形，在这个过程中，表面微观形貌是主要的影响因素。摩擦磨损后的表面如图 3 所示，破损表面会形成一层氧化层。图 3a 和 d 为传统的铣削加工方式，其产生的沟槽划痕较深，破损延伸到较深的表面。破损表面主要为片状粘附物、犁削划痕以及凹坑，从表面形貌的特点可以看出，其磨损机理是典型的粘附磨损。而施加超声振动使摩擦磨损表面的沟槽划痕变浅，表面犁削划痕也变得很有规律，说明表面形貌改善了加工表面的抗摩擦磨损性能。

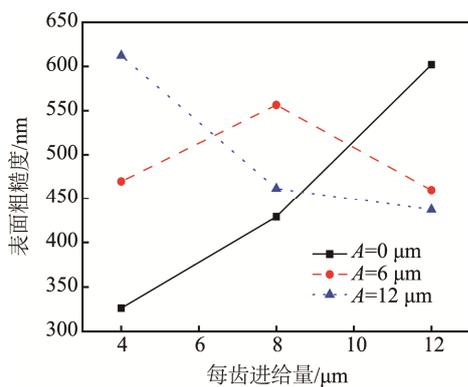


图 2 不同条件下的表面粗糙度  
Fig.2 Surface roughness in different conditions

## 2.2 摩擦磨损分析

摩擦磨损试验主要研究超声振动辅助铣削加工表面微观织构对表面摩擦磨损性能的影响以及摩擦

图 4 为不同振幅条件下，超声振动辅助铣削钛合金表面摩擦系数随每齿进给量的变化规律。在干摩擦条件下，摩擦系数的变化较明显。每齿进给量为 4  $\mu$ m 时，振幅为 6  $\mu$ m 和 12  $\mu$ m 时摩擦系数均从 0.6 下降到 0.3 左右；每齿进给量为 8  $\mu$ m 和 12  $\mu$ m 时，摩擦系数为 0.4 左右。施加 6  $\mu$ m 的振幅时，摩擦系数下降到 0.375 左右；施加 12  $\mu$ m 振幅时，摩擦系数提高到 0.45。在润滑脂润滑摩擦条件下，由于表面的微观形貌尺寸较小，润滑脂覆盖了表面织构，因此摩擦系数的变化不明显。摩擦系数在 0.175~0.25 之间，随振幅的变化，在小范围内改变。摩擦系数的变化说明，TC4 钛合金表面的微观织构能够改变摩擦磨损的性能。摩擦系数的变化受到表面形貌的影响，进一步说明超声振动辅助铣削加工的方式能够改善加工表面的摩擦学性能。

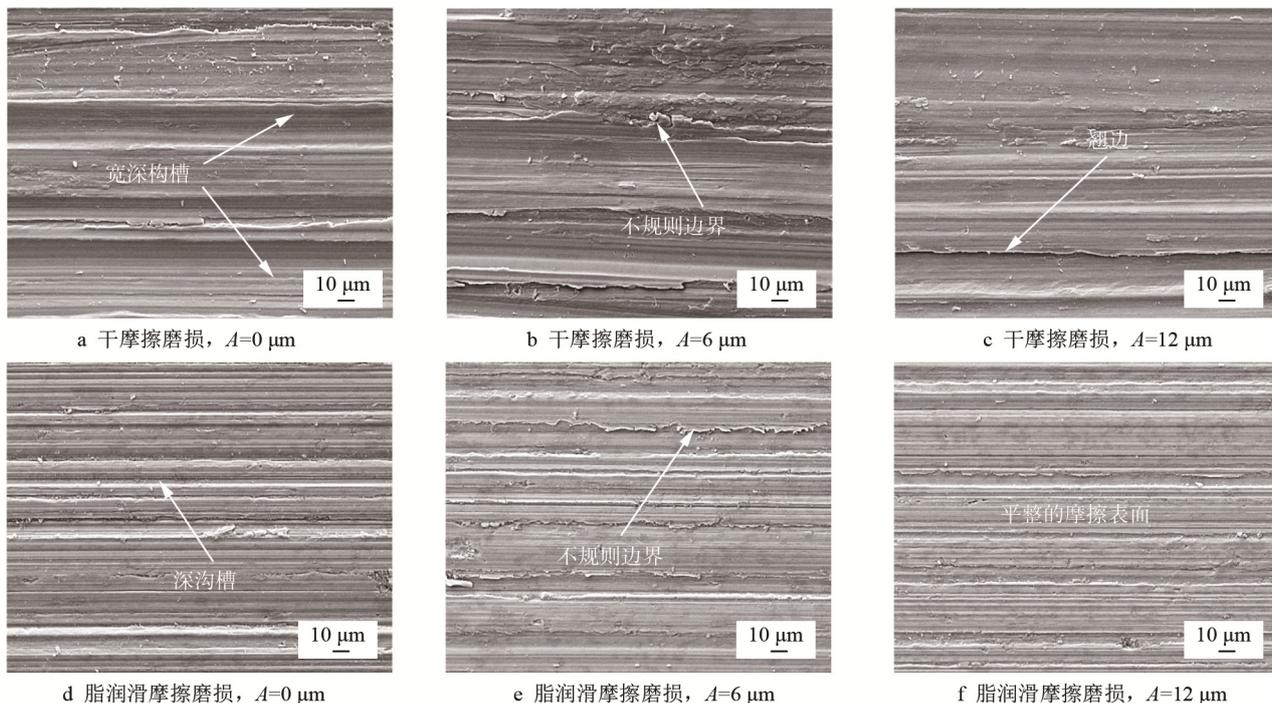


图3 干摩擦和润滑脂润滑摩擦磨损后的表面

Fig.3 The worn surfaces in dry friction and lubrication friction conditions

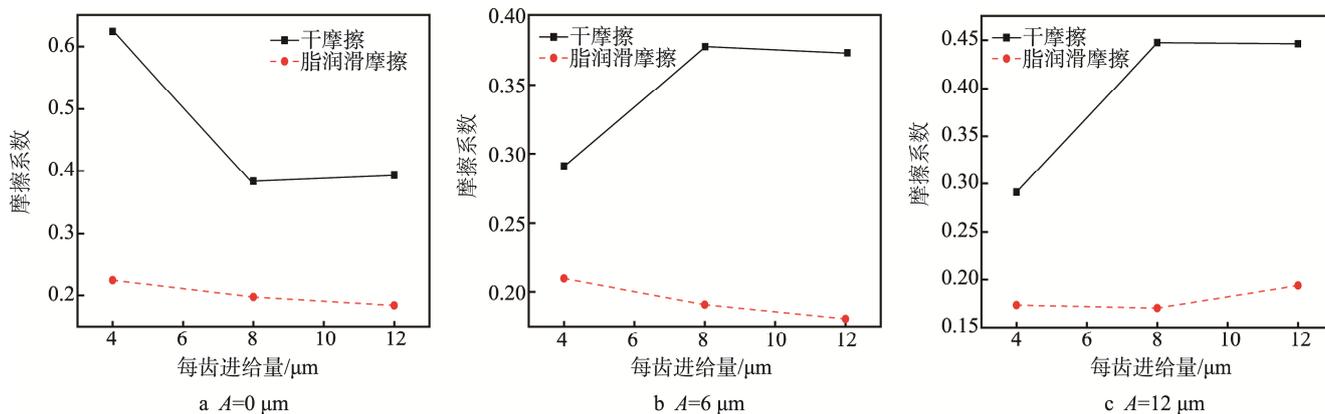


图4 不同条件下的摩擦系数

Fig.4 Coefficient of friction in different conditions

### 2.3 表面织构对摩擦磨损的影响

表面摩擦磨损性能主要受2个因素的影响:一是材料,二是表面微观织构。表面织构一般指摩擦表面上按照一定顺序和尺寸排布的微观形貌,包括几何形状、深度以及分布规律。常见的形貌有凹坑、凸起、鳞片状形貌、矩形形貌等,仿真和实验结果证明,具有一定的表面织构可以明显改善固体表面的摩擦磨损性能<sup>[14-16]</sup>。文中超声振动辅助铣削加工就是通过加工出不同的表面织构,来改善表面的摩擦磨损性能。因为微观形貌的存在,在摩擦磨损时改变了两种物质摩擦的接触方式,表面织构凸起的波峰位置相互接触,在摩擦过程中受剪切力而相互滑动,从而产生摩擦力。另外,由于接触物质的硬度不同,较硬的物质

会侵入另一物质,滑动过程中会产生塑性变形,形成沟槽而产生摩擦力。因此,表面织构对材料的摩擦磨损至关重要,加工出的不同表面织构能够通过改变接触方式而改善表面摩擦学性能。

### 3 结论

1) 利用超声振动辅助铣削加工可以直接加工出具有一定微观表面形貌的表面,表面形貌受振幅、每齿进给量的影响较大。

2) 超声振动改变了传统的切削机制,加工表面的最终形貌是在弹塑性变形去除和超声撞击的作用下形成的。表面粗糙度在小进给量时主要受超声振动的影响,大进给量时主要受切削去除的影响。

3) 摩擦磨损试验表明, 微观表面织构的存在改善了 TC4 钛合金表面的耐磨性能, 磨损的主要方式是粘附磨损和磨粒磨损。摩擦系数分析说明, 表面织构改变了 TC4 表面摩擦的接触方式, 不同的振动参数下, 表面织构能够提高或者降低表面的摩擦系数, 这一规律在干摩擦条件下尤为明显。

#### 参考文献:

- [1] RAMESH S, KARUNAMOORTHY L, PALANIKUMAR K. Surface Roughness Analysis in Machining of Titanium Alloy[J]. *Advanced Materials and Manufacturing Processes*, 2008, 23(2): 174-181.
- [2] YANG D, LIU Z. Surface Topography Analysis and Cutting Parameters Optimization for Peripheral Milling Titanium Alloy Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2015, 51: 192-200.
- [3] ZHOU R, WEI D, CAO J, et al. Synergistic Effects of Surface Chemistry and Topologic Structure from Modified Microarc Oxidation Coatings on Ti Implants for Improving Osseointegration[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(16): 8932.
- [4] ECHEVERRY-RENDÓN M, GALVIS O, QUINTERO G D, et al. Osseointegration Improvement by Plasma Electrolytic Oxidation of Modified Titanium Alloys Surfaces [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2015, 26(2): 1-18.
- [5] KULKARNI M, PATILSEN Y, JUNKAR I, et al. Wettability Studies of Topologically Distinct Titanium Surfaces [J]. *Colloids & Surfaces B Biointerfaces*, 2015, 129: 47-53.
- [6] NADOLNY K, SIENICKI W, WOJTEWICZ M. The Effect upon the Grinding Wheel Active Surface Condition When Impregnating with Non-metallic Elements during Internal Cylindrical Grinding of Titanium[J]. *Archives of Civil & Mechanical Engineering*, 2015, 15(1): 71-86.
- [7] GAO F, WANG H M. Effect of TiNi in Dry Sliding Wear of Laser Melt Deposited Ti<sub>2</sub>Ni/TiNi Alloys[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(9): 1349-1354.
- [8] 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 钛合金激光表面改性技术研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(6): 24-32.  
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, SHEN Li-da, et al. Research States of Laser Surface Modification Technology on Titanium Alloys[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(6): 24-32.
- [9] ERDEMIR A. Review of Engineered Tribological Interfaces for Improved Boundary Lubrication[J]. *Tribol Int*, 2005, 38(3): 249-256.
- [10] GAHR K H Z, WAHL R, WAUTHIER K. Experimental Study of the Effect of Microtexturing on Oil Lubricated Ceramic/Steel Friction Pairs[J]. *Wear*, 2009, 267(5/6/7/8): 1241-1251.
- [11] BAI S, PENG X, LI J, et al. Experimental Study on Hydrodynamic Effect of Orientation Micro-pored Surfaces [J]. *Sci China Technol Sci*, 2011, 54(3): 659-662.
- [12] COSTA H L, HUTCHINGS I M. Hydrodynamic Lubrication of Textured Steel Surfaces under Reciprocating Sliding Conditions[J]. *Tribol Int*, 2007, 40(8): 1227-1238.
- [13] RAMESH A, AKRAM W, MISHRA S P, et al. Friction Characteristics of Microtextured Surfaces under Mixed and Hydrodynamic Lubrication[J]. *Tribol Int*, 2013, 57: 170-176.
- [14] 赵素芬, 刘晓艳, 潘斌, 等. 浅析无溶剂复合产品摩擦因数的变化[J]. *包装工程*, 2015, 36(5): 56-58.  
ZHAO Su-fen, LIU Xiao-yan, PAN Bin, et al. Variation of Friction Coefficient of Solvent-free Composite Products [J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(5): 56-58.
- [15] 马晨波, 朱华, 历建全. 摩擦副不同表面织构化的润滑减摩性能试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(2): 244-248.  
MA Chen-bo, ZHU Hua, LI Jian-quan. Experimental Study of Tribological Properties of Texture on Different Surfaces of Frictional Pairs[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(2): 244-248.
- [16] 韩中领, 汪家道, 陈大融. 凹坑表面形貌在面接触润滑状态下的减阻研究[J]. *摩擦学报*, 2009, 29(1): 10-16.  
HAN Zhong-ling, WANG Jia-dao, CHEN Da-rong. Drag Reduction by Dimples on Surfaces in Plane-Plane Contact Lubrication[J]. *Tribology*, 2009, 29(1): 10-16.