

刀具表面不同角度正弦型沟槽结构的 数值模拟与实验研究

张娜, 杨发展, 姜芙林

(青岛理工大学, 山东 青岛 266250)

摘要: **目的** 分析刀具表面正弦型沟槽结构不同角度对接触表面摩擦学性能的影响。**方法** 利用激光加工设备在硬质合金表面加工出与垂直线成 0° 、 30° 、 60° 、 90° 的正弦型沟槽结构, 并利用有限元软件 FLUENT 对不同角度正弦沟槽结构内的润滑液压力等参数进行仿真分析, 同时将表面带有结构的硬质合金与钛合金球进行摩擦磨损实验, 并通过扫描电镜观察摩擦实验后的表面。**结果** 硬质合金表面四种不同角度的正弦沟槽结构均能降低与钛合金对摩时的摩擦系数, 且随着速度的增大, 四种结构表面的摩擦系数均出现不同程度的减小, 其中 90° 的正弦沟槽结构在摩擦实验中的减摩效果最为显著, 滑动速度为 20 mm/s 时, 摩擦系数相对于光滑表面减小了 77% 。通过系列摩擦磨损实验结果表明, 正弦沟槽结构产生动压效应的数值模拟结果与减摩降磨实验结果基本一致, 刀具表面不同角度正弦沟槽结构产生动压润滑效果的显著程度为 $90^\circ > 30^\circ > 0^\circ > 60^\circ$ 。**结论** 与钛合金对摩中, 硬质合金表面沟槽结构的存在对降低摩擦系数和减少磨损量具有重要意义, 尤其是 90° 正弦沟槽结构的存在可以大幅改善硬质合金表面的摩擦学特性, 其主要作用机理在于及时有效补充接触表面间的润滑液, 并产生持续的动压润滑效应, 建立并形成连续的摩擦接触界面间油膜, 起到减摩降磨的作用。

关键词: 正弦型结构; 不同角度; 数值模拟; 切削液; 硬质合金; 钛合金; 摩擦磨损

中图分类号: TG115.5+8; TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0083-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.012

Numerical Simulation and Experiment on Sinusoidal Grooved Texture with Different Angles on Tool Surface

ZHANG Na, YANG Fa-zhan, JIANG Fu-lin

(Qingdao University of Technology, Qingdao 266250, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the influence of sinusoidal grooved texture with different angles on tool surface on the tribological performance of contact surface. Sinusoidal grooved textures with 0° , 30° , 60° and 90° to vertical lines were fabricated on the surface of cemented carbide by laser processing equipment. The parameters like lubricant pressure, etc. in

收稿日期: 2019-02-21; 修订日期: 2019-04-24

Received: 2019-02-21; Revised: 2019-04-24

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2018PEE011)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Shandong (ZR2018PEE011)

作者简介: 张娜 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究刀具表面结构的微细加工技术与减摩降磨机理。

Biography: ZHANG Na(1994—), Female, Master, Research focus: microfabrication technology of tool surface texture and mechanism of friction reduction and wear reduction.

通讯作者: 杨发展 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究高速高效加工、刀具技术、激光加工及作用机理。邮箱: fazhany@163.com

Corresponding author: YANG Fa-zhan (1981—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: high speed and high efficiency machining, tool technology, laser machining and its mechanism. E-mail: fazhany@163.com

sinusoidal grooved textures with different angles were simulated and analyzed by finite element software FLUENT. At the same time, the friction and wear experiments of cemented carbide and titanium alloy balls with textures were carried out. The surface results after the friction experiment were observed by scanning electron microscope. The sinusoidal grooved textures with four different angles on the surface of cemented carbide could reduce the friction coefficient with titanium alloy, and with the increase of sliding speed, the friction coefficient of four types of cemented carbide textured samples decreased in varying degrees. 90° sinusoidal textured sample had the most obvious antifriction effect, and the friction coefficient decreased by 77% compared with smooth sample. At the same time, a series of experimental results showed that the numerical simulation results of the sinusoidal grooved texture were basically consistent with the experimental results. The sinusoidal grooved texture with different angles on the tool surface produced different hydrodynamic lubrication effects, with a significance of $90^\circ > 30^\circ > 0^\circ > 60^\circ$. The existence of groove texture on the surface of cemented carbide is of great significance to reduce the friction coefficient and wear amount in the friction with titanium alloy. Especially, the existence of 90° sinusoidal groove texture can greatly improve the surface tribological properties of cemented carbide. The main mechanism is to replenish the lubricant on the contact surface effectively, and continuously produce the hydrodynamic lubrication effect, establish and form a continuous oil film between the friction contact interfaces, which can reduce friction and wear.

KEY WORDS: sinusoidal texture; different angles; numerical simulation; cutting fluid; cemented carbide; titanium alloy; friction and wear

目前, 钛合金、镍基合金等难加工材料, 由于具有高温条件下力学性能优良且力学性能随温度升高降幅较小的优点, 因而在航空航天、核电站、深远海、燃气轮机等装备中的应用愈发广泛^[1-3], 但该类材料在加工过程中存在切削热量大、刀屑摩擦现象剧烈、刀具寿命过短和加工成本较高等问题^[4], 严重制约了该材料的应用。大量研究表明, 在刀具表面加工一定的织构以改变刀具表面形貌, 可大幅改善刀具和工件、切屑之间的接触和摩擦状态。

微织构加工技术是指在微米尺度下, 通过物理或化学方法在摩擦副表面加工出凹坑、沟槽或凸起结构^[5], 以改变现有表面形貌的技术。现有研究表明, 在接触表面加工出织构可以有效起到减摩降磨^[6-7]、储油润滑^[8-9]和改变接触状态等作用。目前, 国内外学者对织构类型进行了一系列研究, 学者 DENG 等人^[10]在刀具表面加工出椭圆凹槽织构, 显著降低了切削过程中的切削力、切削温度和刀屑接触界面的摩擦系数。李俊玲等^[11]提出一种葫芦形微凹坑织构, 发现润滑状态下, 葫芦形织构试样的摩擦系数明显低于圆凹坑织构试样和无织构光滑试样。张辉等人^[12]对凹形织构的不规则形状进行了优化, 发现不同织构类型适于不同的运动形式, 子弹形和鱼形织构适于单方向运动, 椭圆形和梭形织构适于往复运动。

此外, 有研究发现, 同一种类型织构在不同方向上可能产生不同的减摩效果^[13-14]。ENOMOTO 等人^[15-16]发现, 平行主切削刀方向的微/纳米沟槽织构刀具的抗粘结性能最好。陈平等^[17]对沟槽型织构角度及排布方式进行了研究, 发现不同工况条件下最适宜的沟槽形状差异较大。正弦形沟槽织构可以明显改善接触表面的摩擦学特性^[18], 而不同方向的正弦沟槽织构可能产生不同的减摩效果。本文将结合数值模拟和摩擦磨

损试验方法, 探究正弦沟槽织构在不同角度下对接触表面摩擦学特性的影响作用及相关机制, 利用 FLUENT 软件模拟硬质合金表面不同方向上的正弦沟槽织构与钛合金材料在有切削液润滑摩擦时润滑膜的压力变化规律。同时, 利用激光加工设备在硬质合金刀具表面加工出与垂直方向成 0° 、 30° 、 60° 、 90° 的正弦沟槽织构, 并与钛合金材料进行不同摩擦速度下的摩擦磨损实验, 探究摩擦界面之间的接触变化规律及摩擦磨损形貌与相关机制。

1 正弦沟槽织构的数值模拟研究

为了探究不同角度正弦沟槽织构在有切削液润滑状态下的减摩降磨作用机理, 本文用 FLUENT 有限元软件模拟钛合金与不同角度正弦沟槽织构硬质合金表面摩擦时润滑液的动压润滑效果。正弦沟槽型织构数值模拟单元如图 1 所示, 其中与润滑液流动方向平行的平面设定为对称边界, 与润滑液流动方向垂直的平面设定为周期边界, 上下面设定为壁面。仿真参数设置为: 油膜厚度 $h_0=10\ \mu\text{m}$, 沟槽深度 $h=15\ \mu\text{m}$, 沟槽宽度 $w=70\ \mu\text{m}$ 。切削液密度为 $875\ \text{kg/m}^3$, 动力黏度为 $0.4572\ \text{Pa}\cdot\text{s}$, 摩擦副上下表面的相对运动速率为 $0.02\ \text{m/s}$ 。

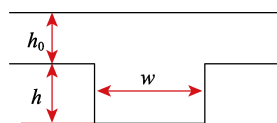


图1 正弦沟槽织构数值模拟单元

Fig.1 Numerical simulation unit for sinusoidal grooved texture

织构的平均压力大小可在一定程度上反映织构的承载能力, 以进一步衡量流体动压润滑状态下正弦

沟槽型结构改善接触表面摩擦学特性的表现。以润滑膜的平均压力 P_z 作为衡量润滑膜承载力大小的指标, P_z 值越大, 说明动压润滑膜的承载能力越大, 摩擦学性能越好^[19-22]。润滑膜平均压力 P_z 的计算如式(1)所示, 其中 $P(x, y)$ 为点 (x, y) 处的压力值, A_t 为结构区域的面积, A_e 为非结构区域面积。

$$P_z = \frac{\iint P(x, y) dx dy}{A_e + A_t}$$

(1)

图 2 为 4 种角度 (运动方向与正弦中心线夹角) 的正弦沟槽型结构表面切削液仿真模型, 图 3 为对应图 2 的正弦沟槽结构表面切削液压力分布。从图 3 中可以看出, 不同角度的沟槽型结构对摩擦副表面带来的压力差较大。其中, 0° 、 30° 、 60° 的正弦结构正负

压区域沿正弦结构的中心线分布。而三者中, 0° 正弦结构高低压区域的压力值较小, 同时沿滑动速度方向的间距也较小; 60° 正弦结构正负压区域数值沿滑动方向大于 30° 正弦结构; 90° 正弦结构正负压区域分布在结构中心线两侧, 正负压区域的间距较大, 压力差较大, 表现为出现较大面积的正压分布。从图 4 中不同角度结构油膜的平均压力分布来看, 90° 正弦结构油膜的平均压力达到最大值, 为 182.1019 Pa, 此时油膜的承载能力最强。四种角度的正弦结构中, 油膜的承载能力大小依次为 $90^\circ > 30^\circ > 0^\circ > 60^\circ$ 。从图 5 中 90° 正弦型结构在不同相对滑动速度下的平均压力分布来看, 油膜的平均压力随着相对滑动速度的增大而增加, 在 50 mm/s 时, 平均压力达到最大值 447.4540 Pa, 油膜承载能力最强。

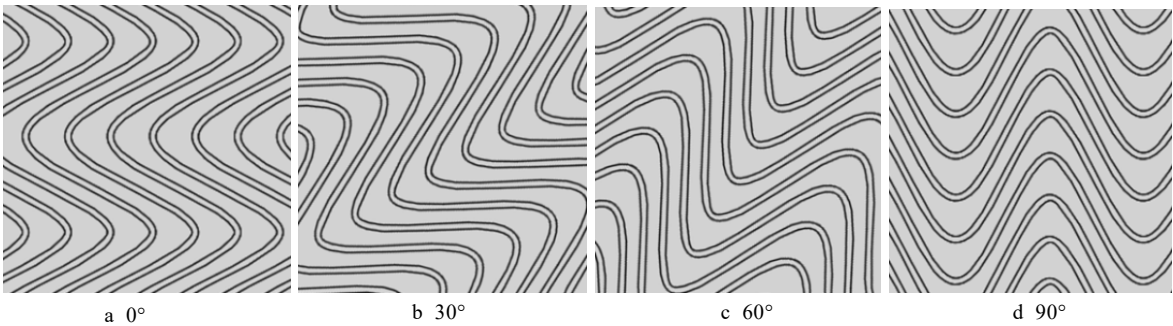


图 2 不同角度正弦沟槽型结构表面切削液仿真模型
Fig.2 Modeling of cutting fluid for sinusoidal grooved textured surface with different angles

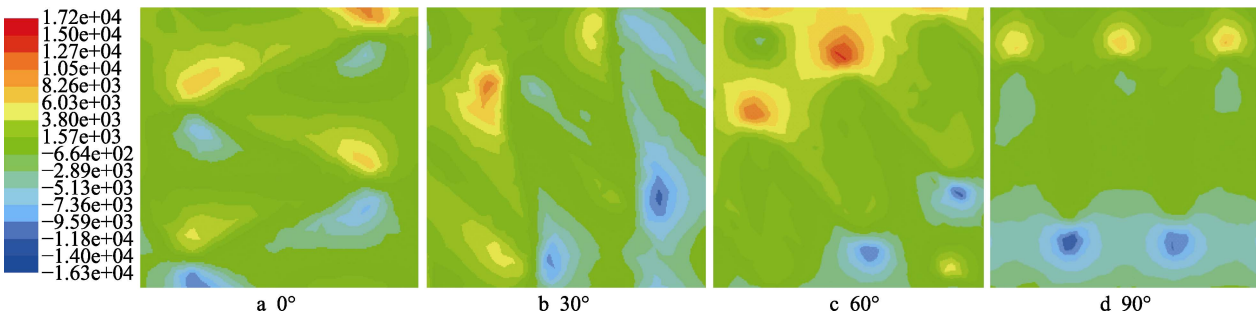


图 3 不同角度正弦沟槽结构表面切削液压力分布图
Fig.3 Cutting hydraulic force distribution map of sinusoidal grooved textured surface with different angles

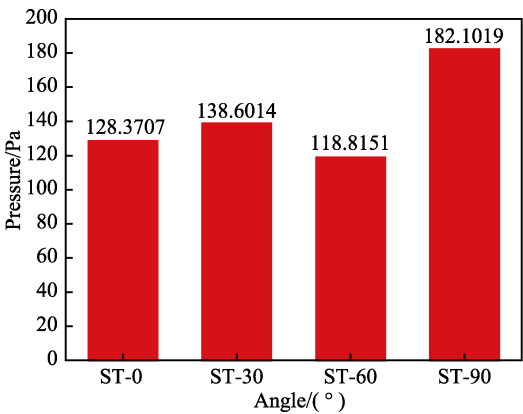


图 4 不同角度正弦结构油膜的平均压力
Fig.4 Average pressure of oil film of sinusoidal texture with different angles

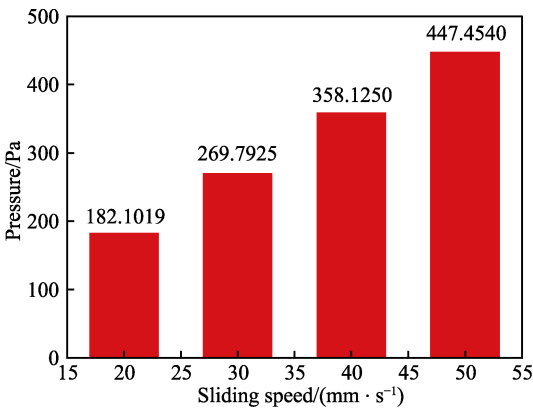


图 5 90° 正弦结构在不同速度下的油膜平均压力
Fig.5 Average pressure of oil film of 90° sinusoidal texture with different sliding speeds

2 实验材料及方法

2.1 材料处理及织构加工

选用直径为 6 mm 的 TC4 合金球, 实验前, 用数控超声清洗机依次在石油醚、无水乙醇中各清洗 10 min, 然后用自控红外烘干炉烘干。选用牌号为 YG8 的硬质合金材料, 其物理与力学性能如表 1 所示, 试样的尺寸为 35 mm×35 mm×5 mm。用激光加工设备在硬质合金表面加工出 0°、30°、60°、90°四种方向的正弦沟槽织构, 激光器加工的参数为: 波长 1064 nm, 脉冲宽度 10 ns, 频率 20 kHz, 功率 40 W, 扫描速度

100 mm/s, 扫描次数 200 次。加工出的沟槽宽度为 80.599 μm 、深度为 14.590 μm 。通过观测发现, 在激光加工织构过程中, 激光的高温作用诱使表面材料出现气化及熔化现象, 继而发生液相爆炸, 致使材料喷出, 熔化喷出的硬质合金熔渣将在加工出的微沟槽周围形成大量熔融物, 堆积在织构两侧形成凸起, 该凸起将增大硬质合金表面的粗糙度, 因此当硬质合金表面织构加工完成后, 需使用 2000 目砂纸对织构表面进行打磨处理, 并进行抛光及超声清洗。处理后的织构二维形貌如图 6 所示, 用体视显微镜观察正弦沟槽织构的三维形貌如图 7 所示。

表 1 YG8 材料性能
Tab.1 Material properties of YT8

Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Hardness(HV)	Modulus of elasticity/GPa	Compressive strength/GPa	Thermal conductivity/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
14.6	1160	580	4.3	75.4

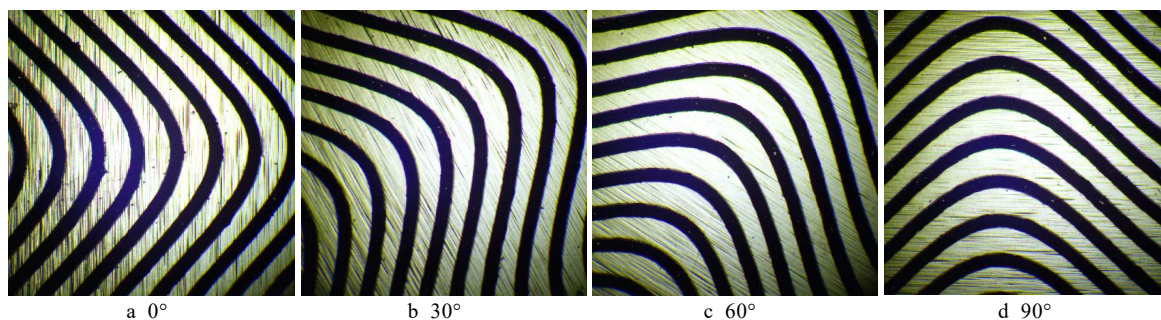


图 6 不同角度的正弦沟槽织构表面形貌

Fig.6 Surface topography of sinusoidal grooved texture with different angles

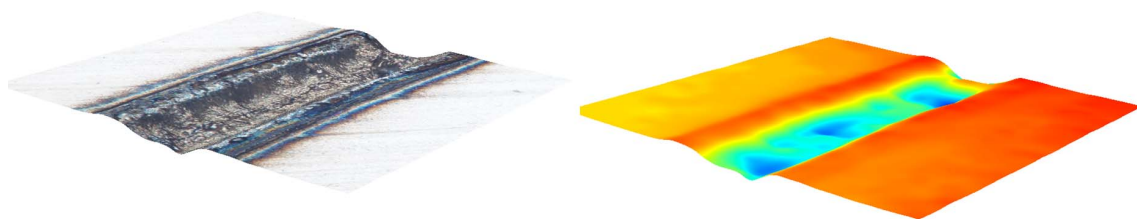


图 7 正弦沟槽织构的三维形貌

Fig.7 Three-dimensional morphology of sinusoidal groove texture

2.2 摩擦磨损实验

进行切削液润滑条件下, 不同角度的正弦织构硬质合金与钛合金球的摩擦磨损实验。实验设备选用电化学腐蚀摩擦磨损试验机, 硬质合金试样固定在底盘的专用夹具上, 钛合金球固定在上端的机械自带夹具上, 通过施加不同砝码改变载荷大小, 加载力垂直作用在钛合金球的正上方, 摩擦副的运动为往复直线运动, 行程为 5 mm。实验初始, 在硬质合金试样表面均匀涂抹一层切削液, 以保证摩擦接触区域充分润滑, 切削液选用 ZJ-846 型, 运动黏度 (40 $^{\circ}\text{C}$) 为 10 mm^2/s 。每组实验的摩擦时间为 30 min, 每组实验重复进行 3 次, 3 次实验测量数据的平均值作为最终的实验值。磨

损后的硬质合金表面用石油醚、无水乙醇进行冲洗, 并用电镜、光学显微镜进行观测。

3 结果及分析

从图 8 可以看出, 与光滑表面相比, 在切削液润滑条件下, 四种不同角度的正弦沟槽织构硬质合金表面均出现明显的减摩效果。在硬质合金和钛合金材料相对摩擦 30 min 内, 光滑表面摩擦系数在前 300 s 时较小且较为平稳, 300 s 后大幅增加, 且出现大幅度的波动。四种角度的正弦织构硬质合金表面摩擦系数在前 400 s 时较大, 400 s 后开始稳定下来且数值较小。这是由于在摩擦过程中, 钛合金产生的磨屑随着切削

液的流动进入到正弦沟槽中, 沟槽中储存的润滑油由于磨屑的进入被挤压到表面, 补充并增加了接触界面间的润滑油。另一方面, 当切削液流过结构时, 由于横截面积的变化, 将顺次出现并产生收敛间隙与发散间隙, 在间隙尺寸变动过程中产生较大的压力差, 进而出现动压润滑效应, 动压油膜将有效隔绝摩擦副之间材料的直接接触, 使得结构表面整体摩擦系数较小也较为平稳。

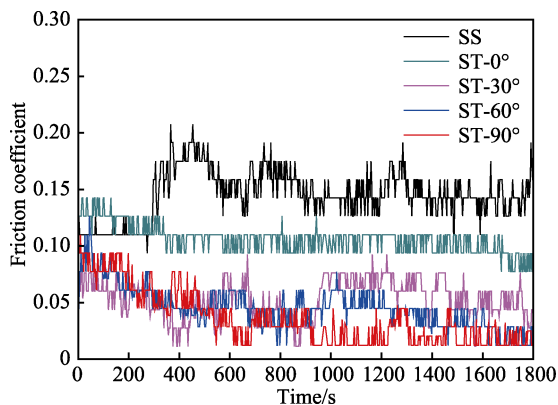


图 8 不同角度正弦结构硬质合金表面摩擦系数
Fig.8 Friction coefficient of sinusoidal textured cemented carbide surface with different angles

当载荷为 2 N、摩擦速度为 20 mm/s 时, 在四种角度的正弦结构表面中, 90°正弦沟槽结构的减摩效果最明显, 摩擦副间的摩擦系数仅为 0.034, 相对于光滑表面与钛合金对摩时的摩擦系数 (0.145) 减小了 77%, 而 30°、0°、60°的正弦沟槽结构相对于光滑表面, 摩擦系数分别减小了 62.1%、29.6%、26.2%, 这与数值模拟结果相一致。硬质合金表面的四种沟槽结构都能有效降低摩擦系数, 减摩润滑效果的明显程度依次为 90°>30°>0°>60°。这主要是由于在硬质合金表面加工出的不同方向的正弦沟槽结构在摩擦过程中, 由于正弦型结构的角速度不同, 切削液流经结构的方向发生变化, 另外切削液流经结构收敛间隙和发散间隙的长度存在差异, 导致摩擦接触的频率也不相同, 因此产生的润滑效果也存在差异。在切削液的流动方向上, 结构角度为 90°时, 滑动速度方向与结构中心线方向垂直, 此时流经的收敛间隙和发散间隙的距离最短, 产生出较好的动压润滑效果, 突出表现为最小的摩擦系数。

从图 9 中可以明显看出, 在切削液润滑条件下, 随着摩擦速度的增加, 硬质合金光滑表面与结构表面间的摩擦系数均出现不同程度的减小, 其中带有结构的表面摩擦系数始终低于光滑表面。在摩擦速度从 20 mm/s 增加到 50 mm/s 的过程中, 硬质合金表面 90°正弦沟槽结构减摩效果最为明显, 其次为 30°、0°、60°正弦结构。根据式(2)雷诺方程所示, 随着表面滑动速度的增加, 流体的压力增大, 表现出随着滑动速度的增加, 摩擦系数减小。此外, 油膜厚度及其变化

也影响着表面流体的压力, 沟槽结构上润滑膜流体动压力分布如图 10 所示, 润滑油压力值在收敛楔的出口处达到最大值。不同角度的正弦结构, 润滑油所形成的收敛楔的长度不同, 动压力也不同。润滑油流经 90°正弦沟槽结构时, 其宽度最小, 高度差梯度最大, 形成的收敛楔长度最短且数值最大, 该情况下的动压润滑性能最好, 因此 90°正弦结构的减摩效果表现最为突出。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{6\eta v}{h^3} (h - h_0) \quad (2)$$

式中: p 为流体动压力; η 为润滑黏度; v 为相对滑动速度; h_0 为最大压力处膜厚; h 为膜厚。

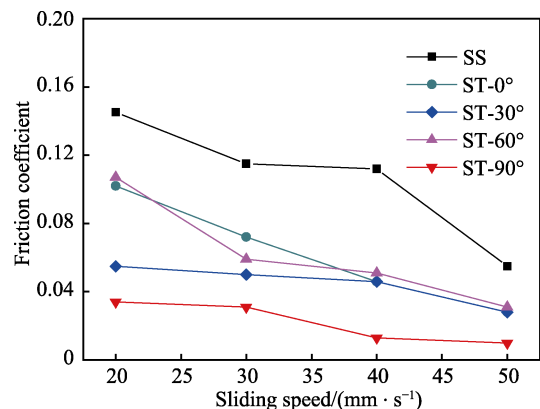


图 9 不同速度下结构硬质合金表面摩擦系数
Fig.9 Friction coefficient of textured cemented carbide at different speeds

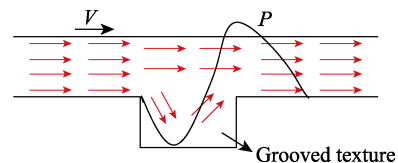


图 10 沟槽结构上润滑膜流体动压力产生示意图
Fig.10 Schematic diagram of hydrodynamic pressure generation on groove texture

图 11 为硬质合金光滑表面及不同角度正弦结构表面与钛合金球摩擦 30 min 后的磨损形貌图。其中图 11a 中, 硬质合金光滑表面的黑色磨屑较多且磨痕较宽; 而图 11b—c 显示, 四种不同角度正弦结构硬质合金磨损表面的磨屑较少且磨痕较浅。图 12 为硬质合金光滑表面与 0°正弦结构摩擦表面的 SEM 图, 可以明显看出光滑表面的磨痕明显宽于结构表面的磨痕, 从表面放大图中可以看到有较多的白色磨屑粘结点, 而结构表面的白色粘结点则较少。图 13 为结构存在时的作用机理示意图, 可以明显看出结构可以有效容留摩擦中产生的磨屑, 大幅减小摩擦副间的磨屑量, 降低了出现磨粒磨损的概率, 进而减缓了磨损速率, 提高了硬质合金的表面质量。另外, 因结构形成的收敛楔形间隙, 使润滑油产生动压润滑效应, 进一步降低了摩擦界面间的摩擦强度。因此, 摩擦系数的降低是一个综合作用的结果。

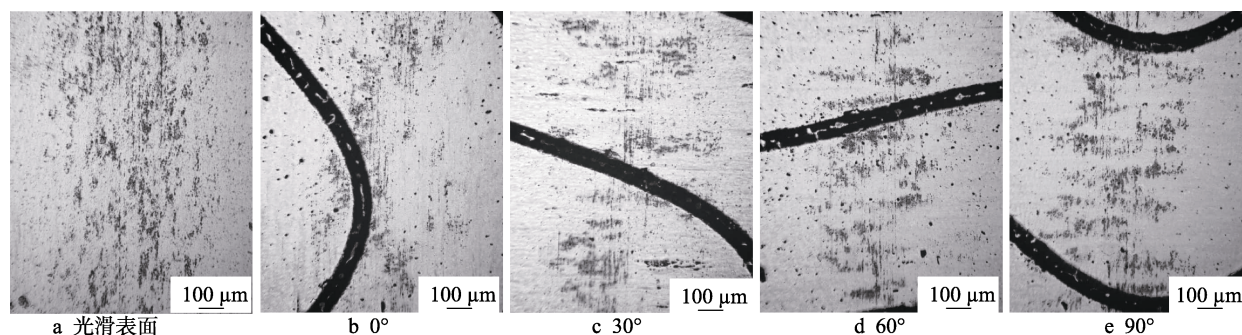


图 11 硬质合金光滑表面及不同角度正弦织构表面磨损后形貌
Fig.11 Wear morphology of smooth surface and sinusoidal textured surface with different angles of cemented carbide: (a) smooth surface

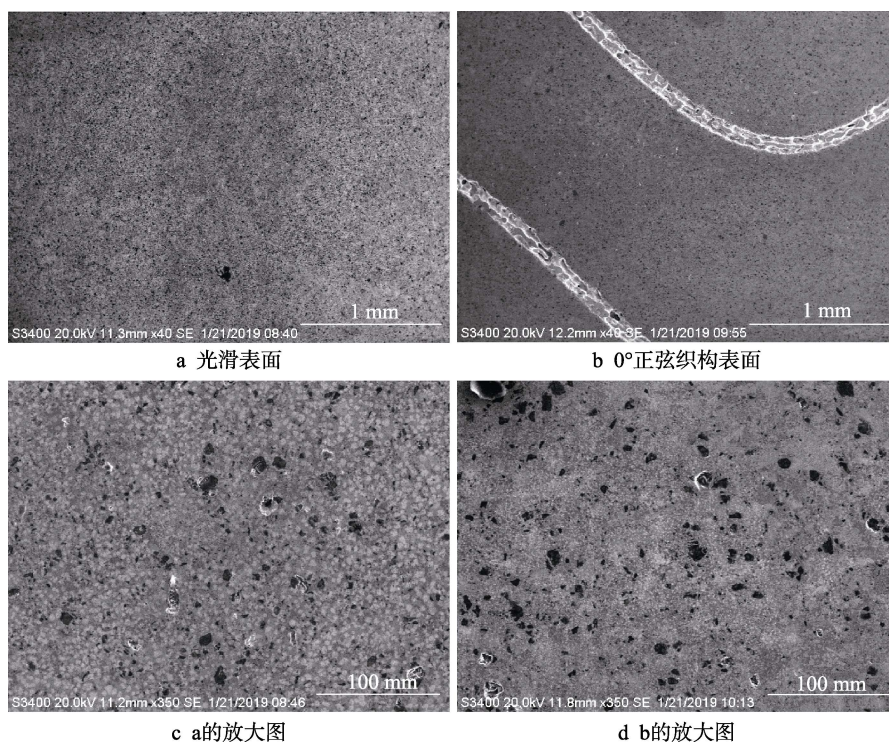


图 12 硬质合金表面 SEM 图
Fig.12 SEM diagram of cemented carbide surface: a) smooth surface; b) sinusoidal texture surface of 0°; c) enlarged view of Fig. a; d) enlarged view of Fig. b

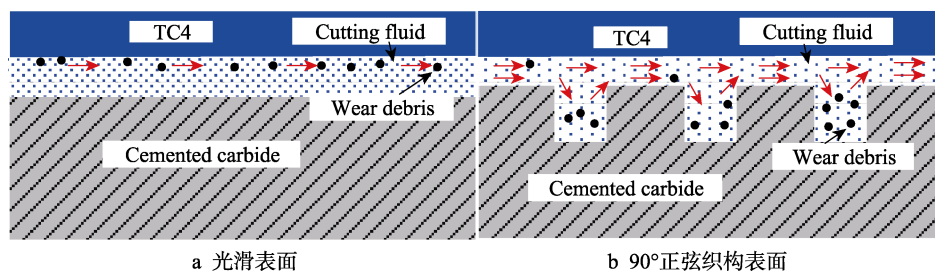


图 13 摩擦副表面示意图
Fig.13 Diagrammatic sketch of the surface of friction pair: a) smooth surface; b) sinusoidal texture surface of 90°

4 结论

1) FLUENT 的仿真结果表明: 在四种角度正弦沟槽织构形成的润滑膜中, 90°正弦沟槽织构润滑膜所产生的平均压力最大, 其承载能力最强。

2) 在切削液润滑条件下, 载荷为 2 N、摩擦速度为 20 mm/s、钛合金球摩擦 30 min 时, 硬质合金表面四种不同角度的正弦织构的存在均能减小摩擦系数, 其中 90°正弦沟槽织构的减摩效果最明显, 在与钛合金球的摩擦实验中, 摩擦系数相对于光滑表面减小了 77%。

3) 随着相对滑动速度的增大, 硬质合金织构表面和光滑表面在与钛合金材料的对摩中, 摩擦系数均出现不同程度的减小, 织构表面的摩擦系数始终低于光滑表面, 且不同角度的正弦织构的减摩效果存在较大差异。减摩效果显著程度为 $90^\circ > 30^\circ > 0^\circ > 60^\circ$, 其最重要的原因是 90° 角时的动压效应最明显, 承压效果最好, 减摩降磨特征最突出。

4) 在硬质合金与钛合金材料的对摩中, 90° 正弦沟槽织构的存在可以大幅改善硬质合金表面的摩擦学特性, 可为后续织构刀具的表面结构设计提供依据和参考。

参考文献:

- [1] RIBEIRO M V, MOREIRA M R V, FERREIRA J R. Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining[J]. Journal of materials processing technology, 2003, 143-144: 458-463.
- [2] CUI C X, HU B M, ZHAO L C, et al. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development[J]. Materials & design, 2011, 32(3): 1684-1691.
- [3] ZHOU L, LUO G Z. Research and development of titanium in China[J]. Materials science & engineering A (structural materials: properties, microstructure and processing), 1998, 243(1-2): 294-298.
- [4] CHE-HARON C H, JAWAID A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6%Al-4%V[J]. Journal of materials processing technology, 2005, 166(2): 188-192.
- [5] 汤勇, 唐恒, 万珍平, 等. 表面织构流体动压润滑性能的研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(9): 1-11.
TANG Yong, TANG Heng, WAN Zhen-ping, et al. Research progress of hydrodynamic lubrication of surface texture[J]. Journal of South China University of Technology (natural science edition), 2017, 45(9): 1-11.
- [6] LING T D, LIU P, XIONG S, et al. Surface texturing of drill bits for adhesion reduction and tool life enhancement[J]. Tribology letters, 2013, 52(1): 113-122.
- [7] ENOMOTO T, SUGIHARA T, YUKINAGA S, et al. Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2012, 61(1): 571-574.
- [8] SHIMIZU I, ANDREASEN J L, BECH J I, et al. Influence of workpiece surface topography on the mechanisms of liquid lubrication in strip drawing[J]. Journal of tribology, 2001, 123(2): 359-370.
- [9] DOBRICA M B, FILLON M, PASCOVICI M D, et al. Optimizing surface texture for hydrodynamic lubricated contacts using a mass-conserving numerical approach[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 2013, 224(J8): 737-750.
- [10] DENG J X, WU Z, LIAN Y S, et al. Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes[J]. International journal of refractory metal and hard materials, 2012, 30(1): 164-172.
- [11] 李俊玲, 陈平, 邵天敏, 等. 葫芦形微凹坑对不锈钢表面摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(2): 207-214.
LI Jun-ling, CHEN Ping, SHAO Tian-min, et al. The effect of gourd-shaped surface texture on tribological performance of stainless steel[J]. Tribology, 2016, 36(2): 207-214.
- [12] 张辉, 董光能, MENG H, 等. 混合润滑状态下表面织构的建模和设计研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 168.
ZHANG Hun, DONG Guang-neng, MENG H, et al. Modeling and design of surface texture under mixed lubrication[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(3): 168.
- [13] 于占江, 蔡倩倩, 王星星, 等. 微织构车刀制备与 SUS304 钢高速微车削试验[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 1-7.
YU Zhan-jiang, CAI Qian-qian, WANG Xing-xing, et al. Preparation of micro-textured turning tools and high speed micro turning test of SUS304 steel[J]. China surface engineering, 2016, 29(6): 1-7.
- [14] 陈碧冲. 微织构刀具的设计与切削性能试验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
CHEN Bi-chong. The design of micro texture tool and experimental research of its cutting performance[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [15] ENOMOTO T, SUGIHARA T, YUKINAGA S, et al. Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2012, 61(1): 571-574.
- [16] SUGIHARA T, ENOMOTO T. Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture[J]. Precision engineering, 2012, 36(2): 229-237.
- [17] 陈平, 项欣, 李俊玲, 等. 沟槽型织构摩擦学性能的数值模拟与实验研究[J]. 材料工程, 2016, 44(6): 31-37.
CHEN Ping, XIANG Xin, LI Jun-ling, et al. Experimental and numerical investigation on tribological performance of grooved texture[J]. Journal of materials engineering, 2016, 44(6): 31-37.
- [18] 张贵梁, 邓建新, 葛栋良, 等. 硬质合金表面正弦微织构对其摩擦磨损性能的影响研究[J]. 工具技术, 2018, 52(2): 12-17.
ZHANG Gui-liang, DENG Jian-xin, GE Dong-liang, et al. Effect of sine-type surface macrotexture on tribological property of carbide[J]. Tool engineering, 2018, 52(2): 12-17.
- [19] SAHLIN F, GLAVATASKIH S B, ALMQVIST T, et al. Two-dimensional CFD-analysis of micro-patterned surfaces in hydrodynamic lubrication[J]. Journal of tribology, 2005, 127(1): 96-102.
- [20] MA C, ZHU H. An optimum design model for textured surface with elliptical-shape dimples under hydrodynamic lubrication[J]. Tribology international, 2011, 44(9): 987-995.
- [21] QIU M, DELIC A, RAEYMAEKERS B. The effect of texture shape on the load-carrying capacity of gas-lubricated parallel slider bearings[J]. Tribology letters, 2012, 48(3): 315-327.
- [22] WOLOSZYNSKI T, STACHOWIAK G W. Evaluation of discretization and integration methods for the analysis of hydrodynamic bearings with and without surface texturing[J]. Tribology letters, 2013, 51(1): 25-47.