doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160803002

高速球铣路径对淬硬钢SKD11表面摩擦特性的影响

黄为民^{1,2},赵 军^{1,2},艾 兴^{1,2},王大伟^{1,2},王桂杰^{1,2}

(1.山东大学机械工程学院,济南 250061; 2.山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室,济南 250061)

摘 要:通过高速铣削试验与环-块摩擦磨损试验,借助白光干涉仪、超景深三维显微镜、显微硬度计等分析检测设备,研究了走刀路径对淬硬模具钢SKD11表面摩擦特性的影响。结果表明:球铣加工表面摩擦特性具有方向性,当走 刀方向与摩擦方向垂直时,摩擦因数最小,磨痕宽度最窄,当二者夹角成45°时,摩擦因数最大,磨痕宽度最宽。球 铣走刀路径影响加工表面形貌取向,表面形貌通过改变接触应力和磨屑捕捉能力来影响犁耕效应和黏着效应,进而 影响摩擦特性。干摩擦工况下,主要磨损机理是磨粒磨损与氧化磨损,试验15 min后表面微沟槽形貌均已消失;而润 滑工况下,表面微沟槽依然清晰,走刀路径与摩擦方向夹角成0°与45°试样表面出现磨粒磨损特征,而夹角成90°试样 表面无明显划痕,表明采用该路径进行球铣加工具有较好的减磨效果。

关键词:高速球铣;刀具路径;摩擦因数;磨损形貌;磨损机理

中图分类号: TG543; TH117.1

文献标志码:A

文章编号:1007-9289(2017)03-0058-08

Effects of Tool Path on Tribological Behavior of High-speed Ball Milled Surface of Hardened SKD11 Steel

HUANG Wei-min^{1,2}, ZHAO Jun^{1,2}, AI Xing^{1,2}, WANG Da-wei^{1,2}, WANG Gui-jie^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061; 2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: Effects of cutting tool path on tribological behavior of high speed ball milled surfaces of hardened SKD11 steel was investigated through ring-on-block friction and wear tests with the help of white light interferometer, super-high magnification lens zoom 3D microscope and microhardness tester. The results show that tribological behavior of ball milled surface has direction tendency. A minimum friction coefficient and wear width is reached when the sliding direction is perpendicular to the tool path direction. However, a maximum friction coefficient and wear width is achieved when the intersection angle between siding direction and tool path direction is 45°. Topography direction of ball milled surface is determined by the cutting tool path, which influences the contact stress and ability of trapping wear debris and then the ploughing and sticking effect. Main wear mechanism is dominated by abrasive wear and oxidative wear under dry sliding condition. In addition, micro-grooves induced by ball end milling process vanishes absolutely after sliding for 15 min. Nevertheless, micro-grooves are clearly observed though some abrasive wear characteristics are presented on the samples where the intersaction angle equaled to 0° and 45°. Samples obtained with the angle 90° scarcely show any scratches, which indicat a good anti-attrition ability. **Keywords:** high speed ball milling; cutting tool path; friction coefficient; wear topography; wear mechanism

收稿日期: 2016-08-03; 修回日期: 2017-05-08

- 网络出版日期: 2017-05-08 16:46; 网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170508.1646.004.html
- 通讯作者: 赵军(1967—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 高效加工技术及数控刀具技术; E-mail: zhaojun@sdu.edu.cn 基金项目: 山东省科技发展计划项目 (2014GGX103041)

Fund: Supported by Science and Technology Development Program of Shandong Province (2014GGX103041)

引文格式: 黄为民, 赵军, 艾兴, 等. 高速球铣路径对淬硬钢SKD11表面摩擦特性的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 58-65.
 HUANG W M, ZHAO J, AI X, et al. Effects of tool path on tribological behavior of high-speed ball milled surface of hardened SKD11 steel[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 58-65.

0 引 言

冷作模具钢SKD11具有强度高、硬度高、耐 磨性好等特点,在汽车模具制造业中应用广泛^[1]。 该类模具传统生产工艺复杂,存在生产周期长、 成本高等问题。刀具技术、高速机床技术的发展使 得高速硬切削淬硬模具钢技术的应用日趋广泛^[2], 采用硬切削技术不仅可以简化模具生产工艺,而 且能保证加工质量与加工精度。

目前,关于淬硬模具钢SKD11高速切削加工 可行性及切削参数优化的研究促进了高速硬切削 技术在生产实际中的应用。球铣加工,因其加工 特点以及球头铣刀结构特点,会在工件表面引入 特有形貌,如残留高度、微凹坑。已有大量研究 指出,通过光刻技术、飞切加工、微细加工等技 术,在工件表面布局合理尺寸、形貌的微凹坑、 微凸体等特征可改善工件表面的摩擦特性[3-6]。 KIM等人「『研究了微机电系统中微细零件表面微沟 槽特征对摩擦特性的影响,通过销-盘摩擦磨损试 验得出,在小载荷工况下,当滑动方向与微沟槽 方向垂直时, 微沟槽可捕捉微细磨屑, 从而减轻 犁耕作用。MENEZES等人^[8]通过销-盘摩擦试验分 析了由磨削加工引入的表面具有方向性的加工痕 迹对摩擦因数的影响,他们认为随着滑动方向与 磨削痕迹走向间夹角的不断增大,滑动摩擦因数 反而升高。YUAN等人¹⁹发现润滑工况下工件表面 微沟槽形貌对耐磨性有很大影响, 当滑动方向与 沟槽走向垂直时,有助于减轻粘着磨损。因此件 表面微观形貌走向与其摩擦特性有很大联系。

球铣加工模具表面过程中,有多种走刀路径 可选。采用不同的走刀路径时会产生不同取向的 表面形貌,表面层硬度也会有差异,可能导致模 具表面耐磨性具有方向性。文中以提高模具表面耐 磨性为目的,通过高速球铣淬硬模具钢SKD11 试验和环-块摩擦磨损试验,研究干摩擦及润滑工 况下高速球铣走刀路径及表面形貌对模具钢表 面摩擦特性的影响,提出一种最优高速球铣加工 路径,对于实际生产中合理选择球铣加工路径及 改善模具表面耐磨性具有重要意义。

1 试 验

1.1 高速硬铣削试验

高速球铣削试验在DMU60P duoBlock五轴加

工中心机床上进行,最高转速12 000 r/min。工件 毛坯为淬硬模具钢SKD11(61±1 HRC),基本尺寸 为154 mm×102 mm×42 mm。选用2齿SECO TORNADO系列整体涂层硬质合金球头铣刀,直 径为10 mm,型号:111L00-MEGA-64。球铣加工 过程侧偏角、前倾角分别设为+20°、0°。利用盘铣 刀铣削工件毛坯上、下表面,以保证平整性;分别 以相对于工件毛坯宽度方向夹角成A-0°、B-90° 和C-45°的3种刀具路径进行高速球铣试验,如图1 所示。结合刀具生产厂家切削参数推荐值,文中 试验所用切削参数如表1所示。



(b) Milling process for tool path A

图1 铣削过程及刀具路径示意图

Fig.1 Schematic diagram of three different tool paths and milling process

表1 高速球铣淬硬模具钢SKD11切削参数

 Table 1
 Cutting parameters used in high speed ball-end milling hardened SKD11 process

Parameters	Values
Feed per tooth, $f_z / (\text{mm} \cdot z^{-1})$	0.12
Radial depth of cut, a_e / mm	0.30
Axial depth of cut, a_p / mm	0.20
Spindle speed, $S/(\mathbf{r} \cdot \mathbf{min}^{-1})$	6 000

1.2 环块摩擦磨损试验

根据标准GB/T12444-2006,利用电火花线切

割机床切割试样。摩擦磨损试验在MRH-3型高速 环块摩擦磨损试验机上进行,摩擦副接触表面由 试样球铣加工表面与试环构成。试环采用轴承钢 GCr15标准件,其硬度为60 HRC。试验压力载荷 100 N,转速200 r/min。试验前试样、试环由超声 波清洗机分别清洗,以除去表面油污,避免影响 试验结果的可靠性。

摩擦磨损试验分别在干摩擦与滴油润滑条件 下进行,连续摩擦时间均为15 min,数据取样间 隔3 s。试样与试环摩擦副滑动摩擦方向如图1(a)(b) 所示,其中路径A试样进给方向与滑动方向一致, 路径B试样进给方向与滑动方向垂直,路径C试样 进给方向与滑动方向成45°。摩擦因数由稳定状态 下各数据点平均值确定。试验后,分别利用工具 显微镜测量磨痕宽度,并采用大景深显微镜观察 表面磨损形貌与磨损程度。

2 结果分析

2.1 高速球铣加工表面形貌

由于刀具形状及进给运动的特点,高速球铣 加工在工件表面引入规则残留高度特征。当采用 不同刀具路径进行球铣加工时,会产生不同走向 的表面残留,图2为利用白光干涉仪Veeco NT9300 获取的加工后3种不同刀具路径试样及抛光试样表 面形貌。由图看出,相邻球铣表面残留高度可构 成明显的微米级沟槽,微沟槽深度在3~4 μm左 右,宽度为0.3 mm,不同路径微沟槽基本尺寸相 差不大。通过铣削参数可实现微沟槽基本尺寸可 控性,减小每齿进给量可改善微沟槽底部的平滑 性,提高径向切深可增大微沟槽的宽度,提高轴 向及径向切深可增大微沟槽的深度。

利用TR200表面粗糙度测量仪获取了各试样



(c) Surface milled with tool path C



(d) Polished surface

图 2 各球铣试样及抛光试样的表面形貌 Fig.2 Surface morphologies of ball-end milled surface and polished surface 一维表面粗糙度,如表2所示。测量方向沿垂直于 滑动摩擦方向,分别在不同位置测量3次,并取平 均值作为最终表面粗糙度。3种路径中,路径A试 样与路径B试样拥有相近的表面粗糙度,分别为 0.53、0.50,而路径C试样表面粗糙度最小,达到 0.41,这主要取决于取样长度内的微观形貌。由 于材料不均匀、切削刃不同位置切削速度不一致 以及切削过程中的振动等因素的影响,微沟槽底 部形貌平滑性较差。与路径A及B试样相比,路径 C试样因微沟槽底部参与粗糙度计算长度最短而具 有较小的表面粗糙度。

表 2 试样表面粗糙度 Ra及干摩擦后表面平均磨痕宽度 Table 2 Average surface roughness Ra and average wear width of the samples after dry sliding test

Sample conditions	Path A	Path B	Path C	Polished
Average surface roughness / µm	0.53	0.50	0.41	0.019
Average wear width / mm	2.28	2.157	2.368	2.436

2.2 摩擦因数

在干摩擦及滴油润滑工况下,各类试样与试 环分别对摩时滑动摩擦因数的变化情况如图3所 示。干摩擦工况下,当球铣试样滑动方向与刀具 路径方向夹角成45°时(Path C)摩擦因数最大,而 当夹角为90°时(Path B)摩擦因数最小,前者摩擦 因数高达0.72,比后者摩擦因数高22%。此外,选 用抛光试样可获得更小的摩擦因数。各试样与试 环构成的线接触摩擦副差异主要体现在实际接触 长度上,一般来说,实际接触长度越长越有利于 降低摩擦因数。抛光试样因表面没有与球铣试样 表面尺寸相当的微沟槽形貌而具有最大的接触长 度,因此摩擦因数最小,这也表明在干摩擦工况 下,光滑表面有利于改善耐磨性。

滴油润滑工况下,3种路径试样摩擦因数差距 减小,路径A与B试样摩擦因数相当。路径C试样 具有最大摩擦因数,可达0.12,与抛光试样摩擦 因数相当,比路径B试样摩擦因数大8%。刀具路 径不仅可改变试样与试环实际接触长度,还影响 润滑油到达摩擦接触区域的能力。3种球铣加工路 径中,路径A试样润滑油可沿微沟槽直接进入接触 区,润滑效果较好,有利于获得较小的摩擦因 数;路径B试样表面残留高度阻碍润滑油进入摩擦 接触区,润滑效果相对较差,但因具有最大的接



图 3 干摩擦及润滑工况下各试样的滑动摩擦因数

Fig.3 Sliding friction coefficient of the samples under dry and lubricated condition

触长度而表现出相对较小的摩擦因数。结果表 明,润滑状态下,刀具路径对表面摩擦性能的影 响程度减弱,光滑表面试样因滞留润滑剂能力差 而导致较高摩擦因数。此外,干摩擦工况摩擦因 数明显大于润滑工况摩擦因数,最高可达7~8倍。 因此,对于球铣加工后模具,为提高耐磨性,降 低磨损率,应尽可能在润滑状态下使用。

2.3 磨损形貌

图4为试验后各试样表面磨损形貌。由图4可 发现,干摩擦工况下,对摩后抛光试样及3种路径 试样表面均出现严重的磨损,由高速球铣加工引 入的表面残留高度均已磨耗完。各试样磨痕内出 现明显的磨粒磨损划痕特征,且3种路径试样中以 路径C试样磨痕内划痕最为密集,路径A试样次 之,路径B试样磨痕最光滑。与各球铣试样磨痕相 比,抛光试样磨痕内划痕深度更深、密度更大、 宽度更宽,磨损程度最为严重。此外,通过观察 颜色发现磨痕内出现红棕色薄层,由此可见,经



(a) Tool path A + dry condition

(b) Tool path A + lubricated condition



(c) Tool path B + dry condition

Seallop heights

(d) Tool path B + lubricated condition



(e) Tool path C + dry condition



(f) Tool path C + lubricated condition



(g) Polished + dry condition

(h) Polished + lubricated condition

图 4 干摩擦及润滑工况下试样的磨损形貌

Fig.4 Surface worn morphologies of the samples under dry condition and lubricated condition

对摩后各试样均表现出一定的氧化磨损特征。

滴油润滑工况下,3种试样表面均无明显磨 痕,磨损程度显著下降,由高速球铣加工引入的 残留高度依然清晰可见。试验后路径A试样与路径 C试样表面微沟槽内均出现明显划痕,且路径C试 样表面残留高度出现破坏,残留高度连续性变 弱。路径B试样表面未出现明显划痕,磨痕偏向微 沟槽底部一侧,残留高度连续性没有发生变化, 表明此种路径具有较好耐磨性。由图4(h)可看出, 抛光试样磨痕内存在大量密集划痕,表面磨损严 重,这说明抛光试样耐磨性比球铣加工试样差。

2.4 磨痕宽度

4类试样均是按照标准GB/12444-2006中的要 求制备的,可认为具有相同的基本尺寸,因此可 采用磨痕宽度评价各试样磨损程度。表2给出了干 摩擦工况下4类试样摩擦磨损试验后表面磨痕宽 度,从表2中可看出,抛光试样表面磨痕宽度最 大,尽管其有最小表面粗糙度Ra。3种球铣加工路 径中, 以路径C试样表面磨痕宽度最大, 路径A试 样次之, 路径B试样最小。路径C试样磨痕宽度比 路径B试样大8.9%, 抛光试样比路径B试样大 11.5%。由此看出,表面粗糙度Ra与磨痕宽度没有 明显的对应关系, Ra越小不能保证磨痕宽度越 小。对于路径B试样来说,因加工硬化现象而导致 其表面硬度提高,再加之有利的表面微观形貌, 使其表现出较好的耐磨性。综合看来, 高速球铣 加工路径对工件表面耐磨性有一定的影响, 且对 于给定球铣加工表面,耐磨性具有方向性。

3 讨 论

3.1 接触长度对摩擦力的影响

环-块摩擦副承受集中线载荷,摩擦磨损试验 初期,该集中载荷首先由许多表面微凸起所承 受。球铣表面残留高度通常由进给运动与间歇进 给运动分别引入的残留高度共同构成,但当采用 较小每齿进给量进行铣削时,表面残留高度主要 由后者决定,如图1(a)所示。对于高速球铣加工产 生的工件表面,摩擦副集中载荷由间歇进给运动 产生的残留高度承受,且在载荷作用下易产生塑 性变形。图5为路径A试样简化后(忽略进给残留高 度影响)表面残留高度与试环接触示意图,当给定 滑动方向时,不同铣削路径将导致接触长度差异。



图 5 试环与试样表面残留高度接触示意图

Fig.5 Schematic diagram of contact between surface scallop height and the ring

为方便比较同切削参数下不同刀具路径对实际接触长度的影响,文中引入接触密度概念,并 将单位长度内理论残留高度接触长度定义为接触 密度,如公式(1)所式。

$$\rho = \frac{p_{\text{real}}}{L} \tag{1}$$

式中, *L*为名义接触长度, m; *p*_{real}为理论残 留高度接触长度, m。假设3种路径引入的残留高 度峰顶宽度均为*k*, 球头铣刀进给方向与滑动摩擦 方向夹角为锐角*a*,试样宽度为*l*,则根据式(1)可 得3种刀具路径下接触密度,如表3所示。路径A与 C试样表面分别由不同数量的残留高度承受集中线 载荷,考虑到径向切宽*a*_e远大于初始磨损后残留 高度的峰顶宽度*k*,则路径A试样与路径C试样接 触密度值相当,且远小于1;路径B试样集中线载 荷支撑长度为试样宽度,具有最大接触密度值1。 径向切宽*a*_e越大,则接触密度越小,承受集中线 载荷的接触长度越短。

根据赫兹接触理论,接触区接触应力p为公式(2)^[10]。

$$p = \frac{E'}{4R} \left(\frac{FE'}{2\pi Ra} - \frac{{E'}^2}{16R^2} x^2 \right)^{1/2}$$
(2)

式中, F为摩擦副间压力载荷, N; x为接触 区任一点与接触中心间的距离, m; R为当量曲率 半径, m; E'为当量弹性模量; a为接触长度, m。

摩擦力是由犁耕力和黏着力共同决定的,接 触应力越大,则磨屑及硬质颗粒犁耕作用越显 著,黏着倾向加剧,导致摩擦力增大。从式(2)看 出,随着接触长度的增加,接触应力减小。对于

表 3 3种路径接触长度与接触密度

 Table 3
 Contact length and contact density of the three tool paths

Tool paths	Path A	Path B	Path C
Contact length	$k(\frac{l}{a_{\rm e}}+1)$	l	$k(\frac{l}{a_{\rm e}} + \frac{1}{\cos \alpha})$
Contact density	$\frac{k}{l}(\frac{l}{a_{e}}+1)$	1	$\frac{k}{l}(\frac{l}{a_{\rm e}} + \frac{1}{\cos\alpha})$

采用3种不同加工路径加工的试样,路径B试样表 面在滑动摩擦过程中具有最大接触长度,导致单 位长度残留高度所承受的接触应力小,有利于减 轻表面犁耕作用与黏着倾向,减低摩擦因数。

3.2 表面层硬度对耐磨性的影响

采用不同球铣加工路径不仅会引起试样表面 形貌差异,也带来表面与表层显微硬度差异,二 者均会影响工件表面摩擦特性。图6为分别采用 3种路径高速球铣加工后各试样表面与表层显微硬 度分布情况。由图6可知,3种试样表面均出现明 显加工硬化,且表面硬度相差不大;表层则表现 出不同深度的软化现象,这主要由不同球铣路径 下导致的表层组织纤维化方向不一致所致。一般 来说,表面硬度越高,耐磨性越好[11-12]。对比表2 中抛光试样与球铣加工试样表面平均磨痕宽度可 知,后者由于高速球铣加工引起的表面硬化使其 表现出相对较高的耐磨性,导致磨痕宽度较小。 3种球铣路径试样表面拥有相近硬度,但呈现出不 同的磨痕宽度。此外,由于摩擦磨损实验较短, 试样表面磨痕深度很浅,表层软化现象对耐磨性 的影响不明显,因此磨痕宽度主要受工件表面形 貌影响。由此可看出,当在表面引入合理的表面 形貌有助于减轻工件早期磨损。



图 6 试样表面及表层显微硬度分布

Fig.6 Micro-hardness distribution of the machined surface and surface layer

3.3 微沟槽磨屑捕捉能力对摩擦力的影响

与粗糙表面试样相比,光滑表面试样不一定 具有更好的耐磨性[13],不仅是因为滞留润滑剂能 力差异,还表现在磨屑捕捉能力的差异[14]。淬硬 模具钢SKD11含有大量的高熔点、高硬度碳化 物,在压力载荷作用下,环-块摩擦磨损试验中产 生的部分磨屑会嵌入试样表面而产生犁耕效应, 引起磨粒磨损,造成表面划痕。当试样表面覆有 微米级沟槽,且当沟槽方向垂直于滑动方向时, 由摩擦产生的磨屑可被微沟槽所捕获,从而减轻 型耕作用,降低摩擦力^[7,15]。磨屑首先产生于残留 高度薄弱峰顶,并拥有与滑动方向相同的方向, 磨屑流动方向与微沟槽走向关系影响沟槽磨屑捕 捉能力。对于路径B试样, 磨屑垂直流向残留高 度, 磨屑动能损失最大, 因此磨屑捕捉能力强, 表面犁耕划痕少,表现如图4(b)磨粒磨损划痕最少 和图4(f)试验后未见明显划痕特征。路径C与路径 A试样磨屑捕捉能力较B路径差,表面易产生犁耕 划痕,从图4(a)~(e)和图4(g)中均可观察到明显划 痕。如图4(d)(h)所示,由于抛光试样表面不具有 定向微形貌,从而不具备捕捉磨屑的能力,致使 其在硬质磨屑作用而下产生大量的划痕。

4 结 论

通过高速球铣淬硬模具钢SKD11试验、环-块 摩擦磨损试验,从球铣表面形貌、摩擦因数、磨 痕宽度、磨损形貌等方面,研究分析了干摩擦及 润滑工况下球头铣刀走刀路径对模具钢试样表面 摩擦特性的影响。

(1)高速球铣模具钢表面摩擦因数及耐磨性具 有方向性。当滑动摩擦方向与高速球铣进给方向 夹角成45°时(路径C),摩擦因数最大,磨痕宽度最 宽,夹角为0°时(路径A)次之,夹角为90°时(路径 C),摩擦因数最小,磨痕宽度最小。

(2) 干摩擦工况下,试验后表面形貌已磨耗 完,主要磨损机理是磨粒磨损与氧化磨损,且路 径A与路径C试样表面划痕严重;润滑工况下,试 验后表面微沟槽形貌依然存在,主要磨损机理是 磨粒磨损,且以路径C表面划痕最为严重,路径 B表面未见明显划痕。

(3) 铣削路径主要通过改变摩擦副接触长度与 磨屑捕捉能力来影响工件表面摩擦特性。3种路径 中,路径B试样表面接触长度最大,同时磨屑捕捉 能力最强,因而犁耕效应与黏着效应相对较弱, 摩擦力最小。

(4) 干摩擦工况,表面越光滑越有利于获得小的摩擦因数;而在滴油润滑工况,球铣加工表面可获得比抛光表面更小的摩擦因数。

(5)采用走刀路径B进行高速球铣加工,可在 模具钢表面引入特有微沟槽形貌,这种表面形貌 可改善工件表面耐磨性,尤其是在润滑工况下。

参考文献

- [1] 王君丽, 施雯. Cr12MoV钢表面磁控溅射Ti/TiN涂层的摩 擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(2): 126-129.
 WANG J L, SHI W. Friction and wear behavior of magnetron-sputterred Ti/TiN coating on Cr12MoV steel[J]. Tribology, 2005, 25(2): 126-129 (in Chinese).
- [2] DEWES R C, ASPINWALL D K. A review of ultra high speed milling of hardened steels[J]. Journal of materials processing technology, 1997, 69(1): 1-17.
- [3] 符永宏,李成冬,华希俊,等.激光毛化微凸形模具钢表面 摩擦磨损性能研究[J].摩擦学学报,2009,29(5):475-480.
 FU Y H, LI D C, HUA X J, et al. Study on friction and wear properties of the laser textured mold surface with micro-convex[J]. Tribology, 2009, 29(5): 475-480 (in Chinese).
- [4] RESENDIZ J, GRAHAM E, EGBERTS P, et al. Directional friction surfaces through asymmetrically shaped dimpled surfaces patterned using inclined flat end milling[J]. Tribology International, 2015, 91(11): 67-73.
- [5] BUJ C I, VIVANCOS C J, DOMINGUEZ F A. Surface topography in ball-end milling processes as a function of feed per tooth and radial depth of cut[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 151-159.
- [6] NICOLA G L, MISSELL F P, ZEILMANN R P. Surface quality in milling of hardened H13 steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(1-4): 53-62.
- [7] KIM D E, CHA K H, SUNG I H. Design of surface microstructures for friction control in micro-systems ap-

plications[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(1): 495-498.

- [8] MENEZES P L, KUMAR K, KAILAS S V. Influence of friction during forming processes—a study using a numerical simulation technique[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(11/12): 1067-1076.
- [9] YUAN S, HUANG W, WANG X. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces[J]. Tribology International, 2011, 44(9): 1047-1054.
- [10] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社,
 2008: 29-31.
 WEN S Z, HUANG P. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 29-31 (in Chinese).
- [11] 边培莹, 尹恩怀. 3D打印铝合金材料的摩擦学性能[J]. 中 国表面工程, 2016, 29(3): 74-79.
 BIAN P Y, YIN E H. Tribological properties of 3D printing aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 74-79 (in Chinese).
- [12] SINGH K, KHATIRKAR R K, SAPATE S G. Microstructure evolution and abrasive wear behavior of D2 steel[J]. Wear, 2015, 328: 206-216.
- [13] MAGRI M L, DINIZ A E, Button S T. Influence of surface topography on the wear of hot forging dies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1-4): 459-471.
- [14] BRUZZONE A G, COSTA H L, LONARDO P M, et al. Advances in engineered surfaces for functional performance[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 750-769.
- [15] 林乃明,谢瑞珍,郭俊文,等.表面织构-离子氮化复合处理 改善316不锈钢的摩擦学性能[J].中国表面工程,2016, 29(2):58-68.

LIN N M, XIE R Z, GUO J W, et al. Improvement in tribological property of 316 stainless steel via surface texturingplasma nitriding duplex treatment[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 58-68 (in Chinese).

(责任编辑:陈茜)