

文章编号 1004-924X(2013)07-1786-09

金刚石切削黑色金属时刀具磨损机理的 摩擦磨损试验

周 明*, 邹 莱

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了降低黑色金属金刚石切削过程中的刀具磨损, 提高表面加工质量和精度, 对刀具磨损机理进行了研究。通过黑色金属金刚石摩擦磨损试验, 模拟了实际切削过程中的刀具磨损行为; 分别采用扫描电镜 (SEM)、X 射线能谱仪 (EDS) 以及拉曼光谱仪 (RS) 对工件表面形貌、实验前后工件表面化学组分变化以及金刚石磨损表面的晶体结构转变进行了检测, 同时提出了用石墨化程度作为试验过程中评价金刚石磨损的指标。试验结果表明: 金刚石的磨损主要与机械力和温度有关, 摩擦速度和工件材料中的含碳量对其影响相对较小; 石墨化磨损、扩散磨损和氧化磨损等磨损机理共存, 其中石墨化为导致金刚石磨损的主要原因。结合红外热像仪测温 and 热传导理论推算, 近似获得了摩擦界面的真实温度, 且随着温度升高 15%, 金刚石石墨化程度显著加剧 83%。作者提出, 应当综合考虑热-力耦合作用下的刀具磨损机理, 以便进一步探寻抑制刀具磨损的工艺措施。

关键词: 超精密加工; 金刚石切削; 黑色金属; 摩擦磨损; 磨损机理

中图分类号: TG501.1; TH117.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1786

Tool wear mechanism of diamond cutting of ferrous metals in frictional wear experiments

ZHOU Ming*, ZOU Lai

(School of Mechanical and Electrical Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: zhouming@hit.edu.cn

Abstract: With the purpose of reducing the tool wear in a diamond cutting operation of ferrous metals and improving the machined surface quality and machining precision, the tool wear mechanism was studied. Experiments of the frictional wear between diamond and steel were performed to imitate the tool wear process in a practical diamond cutting. The wear morphology of workpiece surface, the changes in chemical composition of work samples, and the transformation of crystal structure of diamond specimens were detected by the Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Energy Spectrometer (EDS) and the Raman Spectroscopy (RS). Then, the graphitized degree of diamond was proposed as a criterion for assessing diamond wear in tests. The experimental results reveal that the wear of diamond relies heavily on mechanical forces and temperatures, and less on the sliding speeds and carbon contents of materials in the test. The wear mechanisms of diamond in this frictional wear experiment

收稿日期: 2013-02-25; 修订日期: 2013-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51075094)

include graphitization, diffusion wear and oxidation wear, and the graphitization is found to be the dominant wear mechanism for diamond wear. In addition, the graphitized degree increases up to 83% with temperature rising of 15%. In conclusion, the tool wear mechanism should be considered comprehensively in condition of thermal-force coupling for further exploring technological measures with respect to reduce the tool wear.

Key words: ultra-precision machining; diamond cutting; ferrous metal; frictional wear; wear mechanism

1 引言

黑色金属由于具有其它材料难以替代的性能优势而在模具行业有着广泛的应用前景,其超精密加工的需求也日益增多。例如:许多用于信息通讯的电子和光学器件(如非球面光学透镜、液晶显示器(LCD)的光学导向板、等离子显示器的玻璃衬底、全息光学元件等)所用的材料一般为光学玻璃或光学塑料,这些光学元件多采用模压或注射成型的方法批量生产,所用模具一般用金属制成,其表面质量要求很高,需要具有亚微米级的形状精度和纳米级的表面粗糙度^[1]。对于这些形状复杂、精度要求极高的光学元件钢制模具,目前仍采用传统的磨削、研磨及抛光工艺,虽然可以满足表面粗糙度和加工精度的要求,但加工效率低^[2]。

天然单晶金刚石是世界上公认的超精密切削刀具材料,但因其磨损速率太快而不能在常规条件下用于黑色金属切削^[3-5]。如果能有效地解决金刚石刀具磨损严重这一技术瓶颈,则可以在数控超精密机床上使用金刚石刀具进行黑色金属复杂面形零件的高效超精密微量切削,实现以车代磨来提高加工效率。长期以来,国内外学者试图采用各种工艺方法以降低金刚石切削黑色金属过程中的刀具磨损,如超声振动辅助切削、气体保护切削、超低温切削和表面改性切削等加工工艺^[6-9]。这些方法均在一定程度上减缓了刀具磨损,但仍未达到实际加工的需求。目前,关于刀具磨损机理的研究相对较少且存在着一定的不足。其中,日本学者 Tanaka 和 Ikawa 等人通过静态化学热腐蚀试验,提出了金刚石刀具热化学磨损机理^[10-11]。但实际切削是一个动态过程,该机理忽略了切削力、切削速度等因素对刀具磨损的影响。因此,深入研究黑色金属金刚石切削刀具磨损机理,对扩大金刚石超精密切削技术的应用领域具有重要的意义。

本文通过黑色金属-金刚石摩擦磨损试验,模拟了实际切削过程中的刀具磨损,以此研究机械力、温度、摩擦速度以及材料含碳量等因素对金刚石磨损影响的主次关系及规律。分别采用扫描电镜(SEM)检测工件表面磨损形貌、X射线能谱仪(EDS)分析试验前后工件表面化学成分的变化以及拉曼光谱仪(RS)判定金刚石磨损表面的化学结构转变。以此为基础分析金刚石磨损的特征及机理,为进一步探寻抑制刀具磨损的措施提供理论基础。

2 试验部分

2.1 试验装置

试验用机床为 S1-225 型超高精度车床,主轴为液体静压轴承支撑,其径向和轴向跳动均不大于 $0.05\ \mu\text{m}$,主轴转速 $0\sim 2\ 500\ \text{r/min}$ 无级可调,机床底部安装有四脚底座用以隔振;试验用测力系统由 Kistler9256A1 型高灵敏度压电式三向测力仪、DynoWare System 数据采集系统软件、5019B 多通道电荷放大器、5261 型 A/D 转换卡、主机及显示系统等组成。

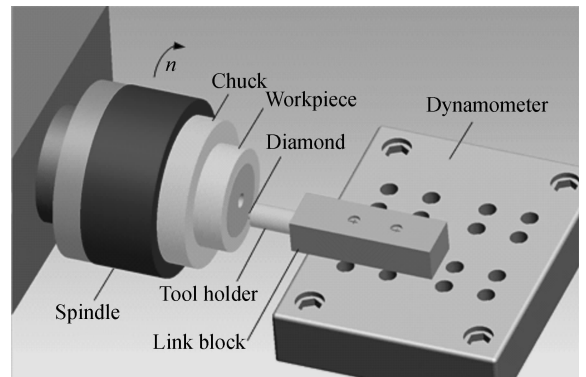


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental set up

图1为黑色金属金刚石摩擦磨损试验装置示

意图。如图所示:将黑色金属试样固定装夹在车床主轴上,由主轴旋转带动其做回转运动;金刚石刀具由自行设计的夹具固定,并通过连接块安装在测力仪上;微调车床横向进给使金刚石刀具与黑色金属接触产生一定的正压力,以实现黑色金属金刚石刀具摩擦运动。

2.2 试验材料的选择

摩擦磨损试验中所选择的试样为应用较广泛的奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和马氏体不锈钢 2Cr13 及 45 钢,其直径均为 $\Phi 25$ mm。表 1 为试

验工件材料的化学组份。试验前,使用丙酮溶液对金刚石和黑色金属试样在超声波清洗机中进行清洗。

天然单晶金刚石具有高硬度、高强度、高耐磨性、良好的导热性以及化学稳定性等优点,被认为是最理想的超精密切削用刀具材料。为了排除人造金刚石中杂质元素对试验结果的影响,本试验选择天然单晶金刚石颗粒。试验前先在金刚石表面磨出一个光滑的平面,图 2 为试验用金刚石表面在扫描电镜下的检测图片。

表 1 试验用工件材料的化学成份

Tab. 1 Chemical composition of work samples used

Workpiece	Chemical composition (W_i %, balance Fe)							
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Ti
1Cr18Ni9Ti	0.07	1.21	0.37	0.01	0.03	8.071	7.99	0.402
Cr13	0.27	0.39	0.56	0.01	0.02	0.141	2.40	...
45 steel	0.45	0.65	0.28	0.30	0.25	...

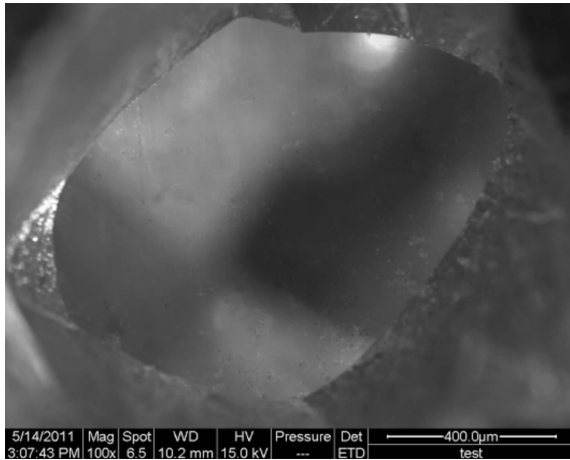


图 2 试验前金刚石表面 SEM 检测图片

Fig. 2 SEM photograph of the diamond surface before test

2.3 试验因素选择

结合试验条件及相关理论指导^[12-14],本文从机械力、温度、摩擦速度及工件材料组份等几个方面进行研究。由于试验过程中摩擦界面温度由正压力和摩擦速度共同决定,每组正压力和摩擦速度的参数组合对应一个确定的温度值,故不能将温度单独列为一个因素。表 2 是正交摩擦试验中因素和水平的选择,其中机械力 F 为黑色金属金刚石接触面的正压力,由测力仪直接测量得出;摩擦速度

v 由金刚石摩擦运动的直径 d 及机床转速 n 共同决定,即 $v = \pi dn / 1000$;工件材料组分在本试验中仅考虑含碳量的影响。

2.4 试验指标选择

摩擦磨损试验很难与实际切削过程一样对金刚石的磨损做出定量描述。由相关文献可知^[15-16],石墨化是金刚石切削黑色金属过程中刀具磨损的重要原因之一。因此,本文提出以金刚石的石墨化程度作为表征金刚石磨损的试验指标。

表 2 正交试验的因素及其水平

Tab. 2 Factors and levels of orthogonal experiment

Level	Factor		
	Mechanical force F/N	Sliding velocity $v/m \cdot s^{-1}$	Carbon content $C/(%)$
1	10	0.84	0.07
2	20	1.05	0.27
3	30	1.26	0.45

金刚石和石墨为碳的同素异构体,由于原子空间结构的差异导致拉曼散射谱的不同。拉曼光谱分析被认为是最有效的鉴别金刚石和石墨晶体结

构转变的测试方法之一,其中拉曼散射强度(拉曼峰的面积)与分析物的浓度成正比,如式(1)所示^[17]:

$$I_R = (I_L \sigma k) P c, \quad (1)$$

式中: I_R 为拉曼散射强度, I_L 为激光强度, σ 为拉曼散射的横截面积, k 为测量常数, P 为试样光路长度, c 为分析物浓度。在保证所有试验结果在同样环境条件下进行分析测试的基础上,定义金刚石的石墨化程度 y 如式(2):

$$y = S_G / S_D, \quad (2)$$

式中: S_G 及 S_D 分别为石墨的拉曼峰面积和金刚石的拉曼峰面积。图3为金刚石和石墨拉曼峰面积的计算原理图,即对阴影部分面积进行积分求解。

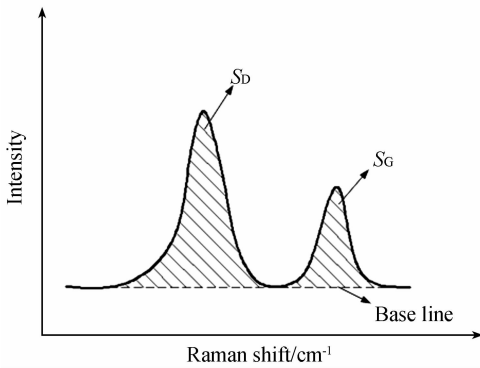


图3 试验指标的计算原理

Fig. 3 Calculation principle of test index

3 试验结果与讨论

基于上述试验因素、因素水平值以及试验指标进行了黑色金属金刚石摩擦磨损的正交试验。为减小试验误差,尽量保证试验条件的一致性。下面将分别从试验结果分析、金刚石磨损预测模型及摩擦界面温度的影响等方面对刀具磨损进行讨论。

3.1 正交试验结果分析

表3是黑色金属金刚石摩擦磨损的正交试验结果。通过极差分析可得 $R_F > R_v > R_C$,即对刀具磨损影响最主要的因素是机械力,其次是摩擦速度,而工件材料组份的影响相对较小。图4为机械力 F 、摩擦速度 v 及工件材料组分 C 对金刚石石墨化程度 y 的影响规律。由图可见,石墨化程度随机械力的增大而显著增大。因为随着机械力的增大,摩擦过程中摩擦热会升高且摩擦表面化学活性

提高会导致明显的刀具磨损。因此,机械力对刀具磨损的影响不可忽略,即上文中提到的在研究刀具磨损机理过程中,单独考虑温度对刀具磨损的影响是不全面的^[10]。

表3 正交试验结果及分析

Tab. 3 Results and analysis of orthogonal experiment

Number	F/N	$v/m \cdot s^{-1}$	$C/(%)$	y
1	10	0.84	0.07	0.18
2	10	1.05	0.27	0.19
3	10	1.26	0.45	0.22
4	20	0.84	0.27	0.21
5	20	1.05	0.45	0.24
6	20	1.26	0.07	0.28
7	30	0.84	0.45	0.26
8	30	1.05	0.07	0.30
9	30	1.26	0.27	0.33
K_{avg1}	0.197	0.217	0.253	
K_{avg2}	0.243	0.243	0.243	
K_{avg3}	0.297	0.277	0.240	
R	0.100	0.060	0.013	

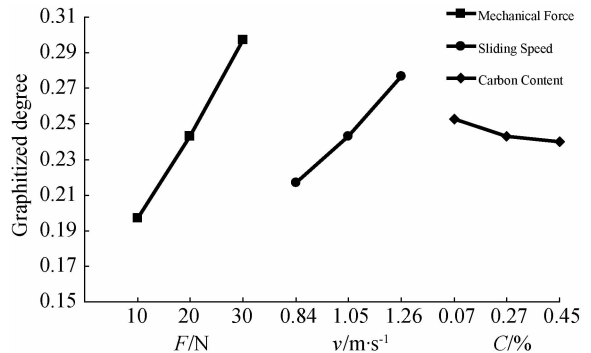


图4 试验因素对石墨化程度的影响规律

Fig. 4 Influence laws of three factors on graphitized degree

另外,随摩擦速度的增大,金刚石表面的温度最终会达到一个较高的值,以致表面发生石墨化转变。但是当切削速度较低时,偶尔也发生石墨化磨损,这主要是由于切削速度的降低使界面化学反应的时间增加,最终发生化学转变。可见,一个合适的切削速度范围对实际切削黑色金属材料是十分

重要的。

本试验中金刚石石墨化程度随工件材料中含碳量的增加而减小,主要是由于低含碳量的黑色金属材料具有相对较高的塑性,易增大摩擦力和摩擦温升,且相对较大的碳浓度差也易造成金刚石的扩散磨损。

3.2 刀具磨损预测模型的建立

为了进一步讨论试验因素对石墨化程度的影响规律以及为刀具磨损的预测提供基础研究,假设金刚石石墨化程度与试验因素之间符合如下指数方程:

$$y = kF^a v^b C^c, \quad (3)$$

式中: k 是石墨化程度的比例因子, a 、 b 、 c 分别是机械力、摩擦速度及工件材料组分的指数因子。通过SPSS(Statistical Product and Service Solutions)软件对上述因变量与自变量的关系进行多元线性回归分析,得到如下所求的刀具磨损预测模型:

$$y = 0.079F^{0.365} v^{0.595} C^{-0.021}. \quad (4)$$

图5为回归方程中金刚石石墨化程度的预测值和实际值的对比,显然,预测值和实际值基本拟合,验证了所建立的预测模型在当前试验条件下的可靠性。然而,由于试验装置的限制,试验过程中参数的选择被局限于一定的范围,从而决定了该预测模型的适用范围。在今后的工作中,需进一步完善该模型的应用范围,最终建立一个全面的、实用的刀具磨损预测模型,为黑色金属金刚石切削刀具磨损的研究提供相应的理论基础。

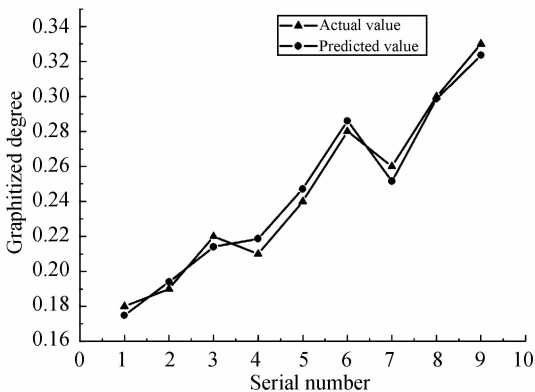


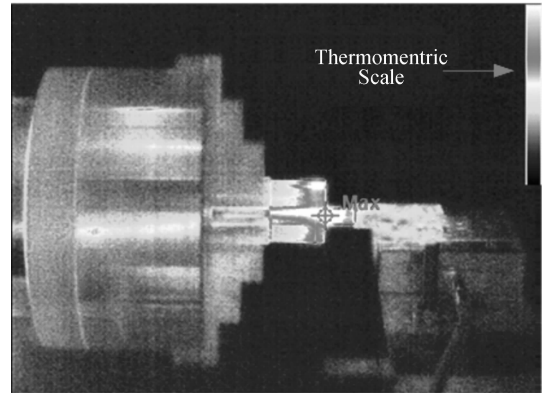
图5 石墨化程度预测值和实际值的对比

Fig. 5 Comparison between predicted value and actual value

3.3 界面温度对刀具磨损的影响

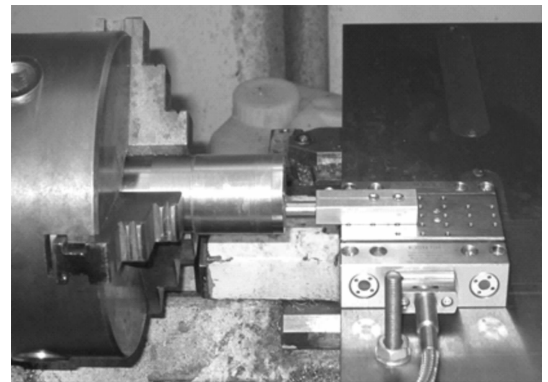
由相关文献可知,金刚石表面的温度与其石墨

化转变之间有着重要的关系^[18]。由于试验过程中界面的真实温度往往很难通过常规方法获得,本试验首先通过红外热像仪对摩擦区温度进行采集。但试验过程中因为受热交换,热像仪测量角度及试验自身误差等因素的影响,所测得的最高温度点将在金刚石摩擦磨损表面边缘的附近。图6(a)为红外测温的示意图,对应的实际装置图如图6(b)所示。



(a)红外测温示意图

(a)Infrared temperature measurement



(b)实际试验装置图

(b)Experimental setup

图6 红外测温与实际装置的对比

Fig. 6 Comparison between infrared temperature measurement and experimental setup

然后结合热传导理论推算,近似的获取试验界面处的温度变化。基于热力学第一定律和傅里叶导热定律,建立导热微分方程如下式:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \hat{Q}, \quad (5)$$

式中: ρ 、 c 、 T 、 τ 、 λ 和 \hat{Q} 分别是金刚石的密度、比热容、热力学温度、导热时间、导热系数以及内部热源。

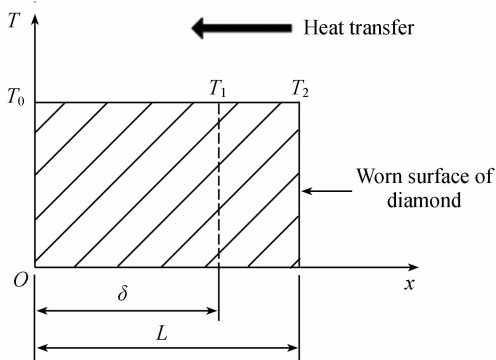


图 7 热传导示意图

Fig. 7 Schematic diagram of heat transfer

摩擦热从金刚石的磨损表面向另一侧的传递过程如图 7 所示。将单晶金刚石导热过程简化为沿 x 方向的一维平壁稳态导热进行求解。由于导热过程中无内部热源存在,假设传热过程中导热系数 λ 保持不变,则导热微分方程可以简化为下式:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0. \tag{6}$$

取温度场的边界条件为:

$$\begin{cases} x = 0, T = T_0 \\ x = \delta, T = T_1 \end{cases} \tag{7}$$

式中: T_0 为金刚石未摩擦端面的温度(室温), T_1 为测量所得的最高温度, δ 为从测量点到未摩擦端面的距离, L 为金刚石沿热传递方向的总长度。对导热微分方程积分并带入上式边界条件进行求解,得到金刚石摩擦磨损表面的实际温度值 T_2 为:

$$T_2 = \frac{T_1 - T_0}{\delta} L + T_0. \tag{8}$$

本试验中,金刚石表面的温度对其石墨化程度的影响规律如图 8 所示。随着界面温度的不断升高,石墨化程度 y 明显加剧,这与之前相关学者研究的变化趋势是一致的^[11]。通过计算可知,当温度由 962 K 升至 1 109 K(即温度升高 15%)时,金刚石的石墨化程度提高约 83%。因此,温度及上文提出的机械力都对刀具磨损有重要影响,是研究热-力耦合作用下的刀具磨损机理的主要研究对象。

3.4 刀具磨损分析

本试验采用 BWS435 型激光共聚焦显微拉曼光谱仪对金刚石磨损表面进行分析。试验用氩离子激光波长为 532 nm,光栅为 2 016 G/mm,分析区域面积约为 $1 \mu\text{m}^2$ 。图 9 所示为一定试验条件

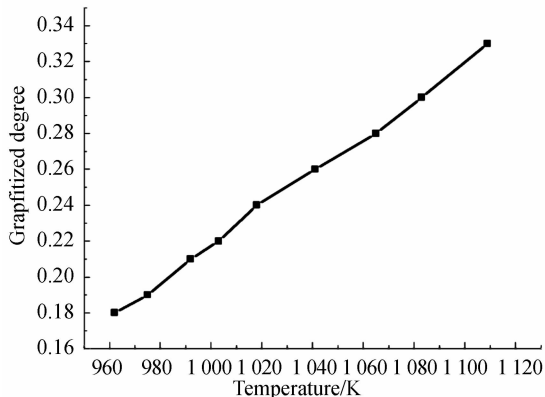


图 8 温度对石墨化程度的影响

Fig. 8 Influence law of temperature on graphitized degree

下的金刚石磨损表面拉曼光谱分析曲线。可见在拉曼频移为 $1\ 331\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 585\ \text{cm}^{-1}$ 处有明显的拉曼散射峰,分别对应具有 sp^3 杂化轨道的金刚石结构和具有 sp^2 杂化轨道的石墨结构^[19]。同时在相对较低的温度下发生一定程度的金刚石石墨化转变,也验证了上述提到的机械力对金刚石磨损的重要作用。因此,在实际切削过程中,伴随刀具切削刃处的金刚石向石墨结构的转变,其刃口强度迅速下降,以致磨损加剧,难以获得所需的加工表面质量和精度要求。另外,在 $1\ 450\ \text{cm}^{-1}$ 处出现的拉曼峰是由 ν^3 结构的反聚乙炔造成的,可能是由试验过程氢原子在金刚石表面的吸附作用引起。

此外,金刚石在常温常压下是碳的亚稳态同素异构体,金刚石之所以能保持其稳定的结构是因为晶格重构的动力学条件难以满足。随着温度的升

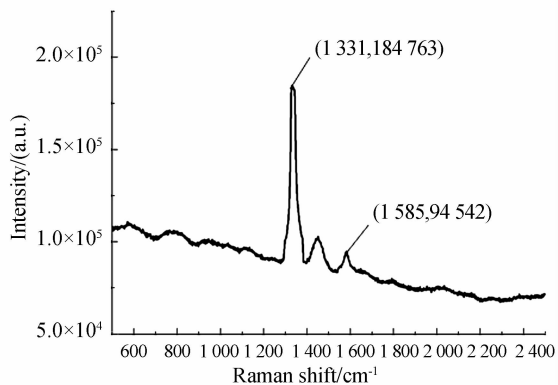


图 9 金刚石磨损表面的拉曼光谱检测曲线

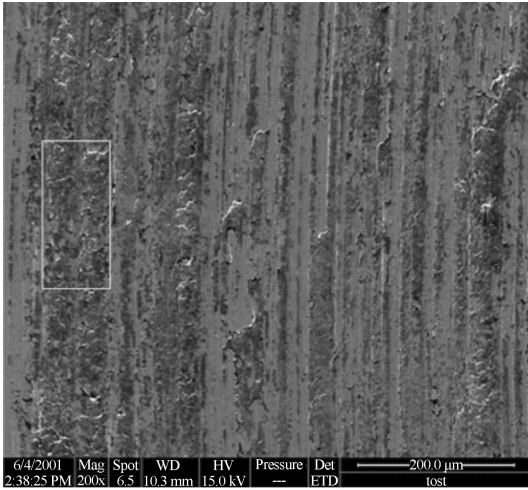
Fig. 9 Raman spectral curve of worn surface on diamond in conditions: $F = 10\ \text{N}$, $v = 0.84\ \text{m/s}$, $C = 0.07\%$

高,从热力学角度分析,金刚石石墨化的吉布斯自由能 ΔG_7^\ominus 与温度 T 的关系如式(9)所示。可见,温度越高,金刚石转化为石墨化的 Gibbs 自由能越低,即发生石墨化越容易,验证了上述所研究的温度对金刚石石墨化程度的影响规律^[20]。

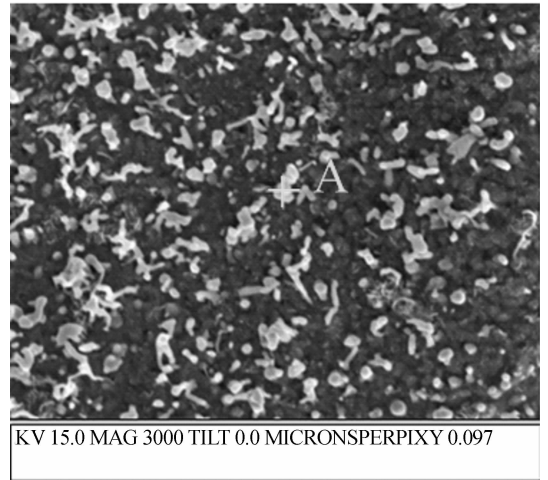
$$\Delta G_7^\ominus \leq -1100 - 4.64T, \quad (9)$$

图 10 为试验前后对摩擦磨损区域进行的扫描

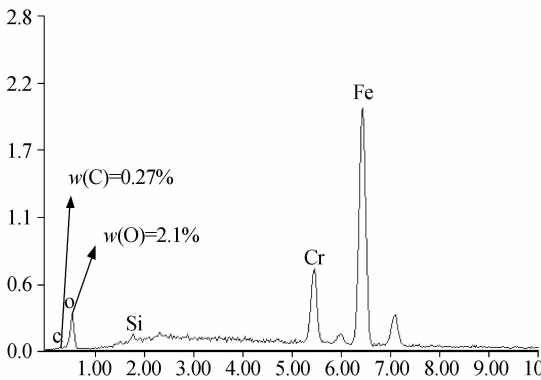
电镜检测和 X 射线能谱分析。可见,工件磨损表面的含碳量只有微小的变化,说明只有小部分碳原子从金刚石表面解离,然后扩散进入工件材料表面。本试验中不明显的金刚石扩散磨损现象,可能与黑色金属-金刚石界面温度有关,而实际切削过程中切削刃处的局部高温更易引起明显的扩散磨损。



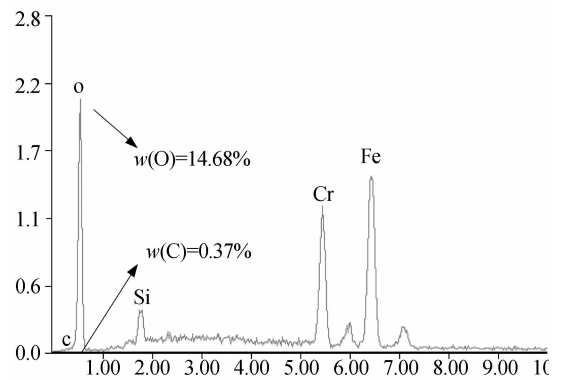
(a) 表面磨损形貌
(a) Morphology of worn surface



(b) 磨损表面形貌的放大图
(b) Enlarged view of worn surface morphology



(c) 试验前磨损表面的能谱分析
(c) EDS of worn surface before test



(d) 试验后磨损表面的能谱分析
(d) EDS of worn surface after test

图 10 工件磨损表面的扫描电镜检测和能谱分析图片

Fig. 10 SEM micrographs and EDS graphs on the worn surface of workpiece

由上图还可以看出试验前后,工件表面氧元素的含量明显增加,且对应图 10(b)中大量的白色颗粒状物质经能谱分析确定为铁的氧化物。可见,摩擦磨损试验过程中界面的化学反应剧烈,导致金刚石、铁以及氧气间发生一系列的氧化还原反应,进而引起金刚石的氧化磨损。

但是,与金刚石的石墨化磨损和扩散磨损相比,金刚石的氧化对刀具磨损的影响相对较小,因为实际切削中切削刃与被加工材料接触致密,只有微量的氧气能够渗入界面引起刀具的氧化磨损,这也正是气体保护切削黑色金属材料未能达到很好效果的重要原因。

5 结 论

通过黑色金属金刚石间的摩擦磨损试验,模拟研究了实际切削过程的刀具磨损。试验结果表明:3个试验因素对金刚石磨损的影响程度由大到小依次为机械力、摩擦速度、工件材料组分。文中提出了以石墨化程度作为评价金刚石磨损的指标,指出随着机械力和摩擦速度的增大,金刚石石墨化程

度加剧;随着工件材料含碳量的增加,金刚石石墨化程度减轻。另外,基于试验结果建立了金刚石磨损的预测模型,并验证了其可靠性,在一定试验条件下为研究刀具磨损机理提供了理论指导。最后,结合红外热像仪测温 and 热传导理论推算,近似获得了摩擦界面的真实温度,且随着温度升高15%,金刚石石墨化程度显著加剧83%,并伴随有微量的扩散磨损和氧化磨损,但本试验中石墨化磨损仍为金刚石磨损的主要机理。

参考文献:

- [1] MCKEOWN P A. The role of precision engineering in manufacturing of the future [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1987, 36(2): 495-501.
- [2] IKAWA N, DONALDSON R R, KOMANDURI R, *et al.*. Ultraprecision metal cutting-The Past, the Present and the Future [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1991, 40(2): 587-594.
- [3] 张文生, 张飞虎, 董申. 光学脆性材料的金刚石切削加工[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2): 139-143.
ZHANG W S, ZHANG F H, DONG S. Diamond cutting of optical brittle materials [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2): 139-143. (in Chinese)
- [4] THORNTON A G, WILKS J. The wear of diamond tools turning mild steel [J]. *Wear*, 1980, 65: 67-74.
- [5] 梁迎春, 郭永博, 陈明君. 纳米加工过程中金刚石刀具磨损研究的新进展[J]. *摩擦学学报*, 2008, 28(3): 282-288.
LIANG Y C, GUO Y B, CHEN M J. New process of research in diamond tool wear of nanometric machining [J]. *Tribology*, 2008, 28(3): 282-288. (in Chinese)
- [6] CASSTEVENS J M. Diamond turning of steel in carbon-saturated atmospheres [J]. *Precision Engineering*, 1983, 5(1): 9-15.
- [7] EVANS C. Cryogenic diamond turning of stainless steel [J]. *Annals of CIRP*, 1991, 40(1): 571-575.
- [8] MORIWAKI T, SHAMOTO E. Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration [J]. *Annals of CIRP*, 1991, 40(1): 559-562.
- [9] BRINKSMIEIER E, GLÄBE R. Advances in precision machining of steel [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2001, 50(1): 385-388.
- [10] TANAKA H, SHIMADA S, IKAWA N, *et al.*. Wear mechanism of diamond cutting tool in machining of steel [J]. *Key Engineering Materials*, 2001, 196: 69-78.
- [11] SHIMADA S, TANAKA H, HIGUCHI M. Thermo-chemical wear mechanism of diamond tool in machining of ferrous metals [J]. *Annals of CIRP*, 2004, 53(1): 57-60.
- [12] 王立江, 郭耀辉, 张雷. 在普通精密机床上用人造多晶金刚石刀具进行镜面切削的研究[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(3): 40-44.
WANG L J, GUO Y H, ZHANG L. A study on mirror turning with man-made diamond cutting tool and ordinary precision lathe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(3): 40-44. (in Chinese)
- [13] KANNEL J W, BARBER S A. Estimate of surface temperatures during rolling contact [J]. *Tribology Transactions*, 1989, 32(3): 305-310.
- [14] 赵岩, 梁迎春, 白清顺, 等. 微细加工中的微型铣床、微刀具磨损及切削力的实验研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 894-902.
ZHAO Y, LIANG Y C, BAI Q S, *et al.*. Micro-milling machine tool, micro-tool wear and cutting forces in micro-machining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 894-902. (in Chinese)
- [15] JIANG Q, PANTEA C, VORONIN G, *et al.*. Partial graphitization of diamond crystals under high-pressure and high-temperature conditions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(3): 1632-1637.
- [16] 吕宪义, 金曾孙, 郝世强, 等. 过渡金属 Fe、Ni 和 Co 对金刚石膜表面腐蚀作用的研究[J]. *新型炭材料*, 2004, 19(2): 141-144.
LV X Y, JIN Z S, HAO S Q, *et al.*. The corro-

sive effect of transition-metal Fe, Ni and Co on the surface of diamond films [J]. *New Carbon Materials*, 2004, 19(2):141-144. (in Chinese)

- [17] BUNDY F P, BOVENKERK H P, STRONG H M, *et al.*. Diamond-graphite equilibrium line from growth and graphitization of diamond [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1961, 35(2): 383-391.
- [18] KOMANDURI R, HOU Z B. A review of the experimental techniques for the measurement of heat

and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology [J]. *Tribology International*, 2001, 34: 653-382.

- [19] JEN F L, JIA W L, PAL J W. Thermal analysis for graphitization and ablation depths of diamond films [J]. *Diamond and Related Materials*, 2006, 15: 1-9.
- [20] JACOB K T. Determination of the Gibbs energy of diamond using a solid state cell [J]. *Solid State Communications*, 1995, 94(9): 763-765.

作者简介:



周 明(1964—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1985 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1988 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,1993 年于香港理工大学获得博士学位,主要从事超精密加工技术,难加工材料高效精密加工技术,微结构功能表面制造技术等方面的研究。E-mail: zhouming@hit.edu.cn



邹 莱(1989—),男,湖北潜江人,博士研究生,2009 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2011 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要研究方向为金刚石超精密切削黑色金属材料。E-mail: zoulai613@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)