

文章编号: 1004-0609(2006)09-1534-05

碳膜刀具干式钻削 Al-Si 合金的切削性能及其减摩机制^①

白力静^{1, 2}, 朱晓东¹, 肖继明², 何家文¹

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049;

2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘 要: 采用非平衡磁控溅射离子镀技术制备碳膜, 通过对刀具后刀面磨损曲线、切削力以及所加工孔精度的分析, 证明高硬度低摩擦因数碳膜高速钢刀具在干切削条件下钻削铝硅合金时具有良好的切削性能。同时采用 OM、SEM、XPS 和 EDS 等方法对切削过程中碳膜的减摩效应进行探讨, 证明碳膜改善刀具抗粘结能力的本质在于碳元素对铝硅合金的润湿性较差, 而非在摩擦过程中生成碳转移膜。切削过程中碳膜的热稳定性越好, 碳膜刀具的寿命就越长, 一旦碳膜破坏, 则刀具迅速发生粘结失效。

关键词: 碳膜; AlSi 合金; 干式切削; 减摩; 润湿性

中图分类号: TG 501; TH 117

文献标识码: A

Machinability and anti-adhesive wear performance of carbon coated tools in drilling of Al-Si alloy

BAI Li-jing^{1, 2}, ZHU Xiao-dong¹, XIAO Ji-ming², HE Jia-wen¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Machinery and Precision Instrument Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Two kinds of carbon coatings with high hardness and low coefficient of friction were deposited by closed filed unbalanced magnetron sputtered ion plating techniques. By the analysis of flank wear, the cutting force curves and the dispersion of cutting holes and the carbon coated tools show excellent cutting performance in dry cutting of AlSi alloys. Through OM, SEM, XPS and EDS, the low adherence of carbon coated tools can be attributed to the low wettability between the AlSi alloys and carbon instead of forming carbon transfer film during wear. The higher the thermal stability of carbon coating is, the longer of the cutting tools life is. The catastrophic adhesive wear may occur once the carbon coating fails.

Key words: carbon coating; AlSi alloy; dry cutting; low wear rate; wettability

Al-Si 合金是现代工业用途最广的轻金属材料之一, 其密度大约为钢的 1/3, 可以有效地减小系统内高速运动部件的自身质量, 提高系统运行速度, 同时 Al-Si 合金导热性好、易成型, 适用于制造各种复杂的零部件^[1, 2]。特别是汽车行业, 预计到 2010 年将有 25% 的轿车车体结构材料和 20% 的底盘部分材料由铝硅合金制成^[3]。

无润滑干切削因其低生产成本、环保性以及操作者身体的健康性等优点成为现代加工业的研究热点^[4~6]。Al-Si 合金由于硬度和熔点低, 尽管在常规润滑加工时属于易加工材料, 但干式切削时, 在大塑性变形和切削热影响下, 刀具极易粘结失效。因此, 人们普遍认为高速钢刀具无润滑干切削, 特别是常见的钻削铝硅合金是不可能实现的^[7, 8]。

① 收稿日期: 2006-03-01; 修订日期: 2006-05-30

通讯作者: 朱晓东, 副教授; 电话: 029-82668696; E-mail: xdzh@ mail. xjtu. edu. cn

固体润滑可完全隔离刀-件的直接接触, 减少粘结面积, 提高刀具在切削过程中的摩擦磨损性能。尤其是碳膜与铝合金具有良好的摩擦磨损性能, 因此目前加工铝合金的镀层刀具以碳膜为主^[9, 10]。由文献[1, 9-11]可看出, 碳膜提高刀具寿命的原因是由于在摩擦磨损过程中易生成转移膜从而改善刀具的磨损性能。但同时碳元素本身和铝硅合金的润湿性极差, 1 000 ℃以下与碳元素都不会发生粘结^[12]。在降低粘结磨损的过程中, 人们往往似乎更注重减摩效应中转移膜的生成^[13, 14], 并非润湿性起着作用。磁控溅射类金刚石(Diamond like carbon, DLC)和类石墨碳膜(Graphite like carbon, GLC)都具有高硬度和低摩擦因数^[15-17], 因而可提高刀具加工 AlSi 合金的切削性能。本文作者研究了 GLC 和 DLC 碳膜干式钻削铝硅合金的性能, 讨论了加工铝硅合金所需镀层的性能, 并对碳膜在切削过程中减摩效应的本质原因做出探讨。

1 实验

1.1 切削实验

采用 Kistler Type 9271A 和信号采集仪(NEC Type RA1200)等测量和采集实验切削力信号, 并与计算机联接输出切削力波形。切削实验为 MCV-510 立式加工中心, 钻头磨损量采用放大率为 30 倍的工具显微镜静态观察测量。

切削实验均在无润滑条件下进行, 切削速度为 61 m/min, 进给量 $f = 0.13 \text{ mm/r}$, 钻削深为 19 mm 的盲孔。实验中钻头的磨钝标准取刀具后刀面磨损值 $VB = 0.128 \text{ mm}$ 。孔加工精度的用标准 H7、H8、H9 和 H10 的塞规来测量。

工件材料为 AlSi 合金(HB66~67), 其主要化学成分为(质量分数, %): Si 4.95~4.96; Cu 3.58~3.65; Mg 0.024~0.030; Fe 0.34~0.33。图 1 所示为 AlSi 合金的金相组织。

刀具选用直径为 6.35 mm 的 M2 高速钢标准麻花钻。

1.2 镀层性能检测

镀层的摩擦磨损实验采用 BDW-3 型球盘磨损实验机, 载荷为 1 050 kg, AlSi 合金加工成 $d2.5$ 的球面, 表面用 1200# 水砂纸打磨, 磨损时线速度为 200 mm/s。实验测得 GLC、DLC 和高速钢(High speed steel, HSS)与 AlSi 合金的摩擦因数分别为 0.57、0.16 和 0.15。

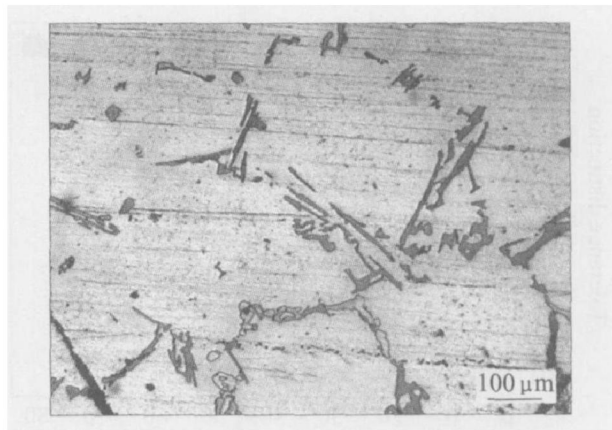


图 1 AlSi 合金金相组织

Fig. 1 Optical metallograph of AlSi alloy

镀层的退火实验采用普通箱式炉, 保温时间为 1 h; 硬度测试采用 MH-5 型显微硬度仪, 载荷 20 g, 加载时间 10 s。GLC 与 DLC 镀层的室温硬度分别为 21.3 和 23.1 GPa。

镀层的形貌观察与成分分析采用 JEOL JSM-6460 扫描电镜和 INCAx-sight OXFORD INSTRUMENTS 能谱仪。对磨的 AlSi 销成分分析采用 AXIS UCTRA 型 X 射线光电子能谱仪, 靶材为 K_{α} 线($E = 1486.6 \text{ eV}$), 采样步长为 0.1; 背底真空为 133 MPa, 分析区域为 300~700 μm 。

2 结果与讨论

2.1 切削实验

切削实验以刀具后刀面上的磨损值达到 0.15 mm 为刀具寿命的判据。实验结果表明碳膜刀具在加工 AlSi 合金时, 加工寿命远远高于高速钢钻头, 其中加工孔数最多为: GLC 镀层钻头可加工 600 个孔, DLC 镀层可加工 400 个孔, 而高速钢钻头仅加工了 80 个孔。

一般而言, 切削铝硅合金由于其易粘刀, 所加工的孔大多数尺寸偏大, 因此考察刀具对铝硅合金的切削性能, 不仅考虑孔的个数, 同时还要考察所加工孔的精度。图 2 所示为所加工孔的精度分布。

由图 2 可知, GLC、DLC 和高速钢所加工的孔中, 在 H7、H8、H9、H10 范围内均是用 GLC 碳膜加工孔的合格率最大, 其中尺寸公差在 H10 以内的孔分别占到 82%、66.75% 和 26.25% (质量分数)。这说明在加工过程中, 镀层明显改善了钻孔的效率和质量。

图 3 所示为不同镀层刀具的磨损曲线。由图 3 可知, 白钻头几乎没有稳定磨损阶段, 很快进入剧

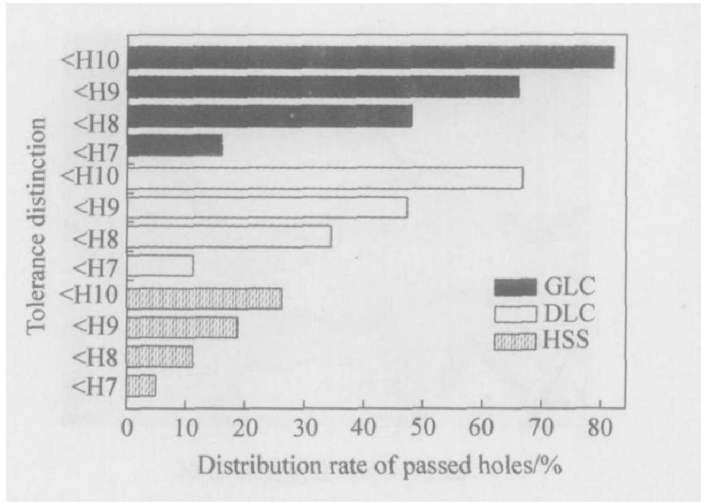


图 2 合格钻削孔的尺寸分布

Fig. 2 Average diameter distribution rate of eligible cutting holes

烈磨损阶段。DLC 膜在加工至 330 孔之后,也迅速进入加速磨损阶段,而 GLC 膜尽管在稳态磨损阶段其相对磨损量略高于 DLC 膜,但稳态区较长,直至 500 个孔才开始进入磨损的第三阶段。刀具磨损初期一般情况下为机械磨损,硬度越高,抗磨损性能越好,3 条磨损曲线也表现出该规律。说明进入稳态以后镀层的低摩擦因数减轻了铝硅合金对刀具的粘结,从而提高了刀具的耐磨损性能。

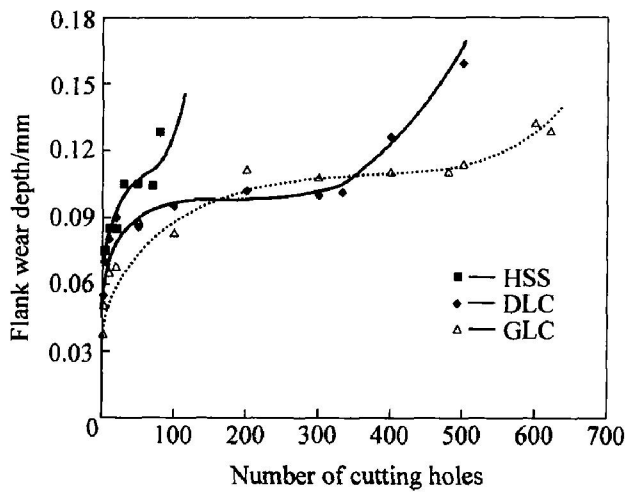


图 3 不同镀层刀具的磨损曲线

Fig. 3 Wear curves of different drills

图 4 所示为不同刀具在切削过程中的切削力与扭矩的变化曲线。由于切削力来源与材料的弹塑性变形以及刀屑、刀-工件之间的摩擦阻力有关,而薄膜对材料的弹塑性变形影响很小,因此摩擦因数应该是影响切削力变化的主要原因之一。摩擦因数越小,产生的摩擦力也越小,但刀具轴向力的变化趋势与刀具的磨损曲线并不一致,可知轴向力的变小

并不是刀具磨损寿命的决定性因素,当 DLC 膜刀具轴向力超过高速钢刀具时,仍可加工近 100 个孔。由此得到结论,在加工类似于铝合金之类的塑性有色合金时,降低镀层的摩擦因数比提高镀层的硬度更为有效。切削过程中刀具上的扭矩与刀具上的粘结情况有着直接的关系,从图 4(b)中可明显看出镀层刀具的扭矩要小于高速钢刀具的。

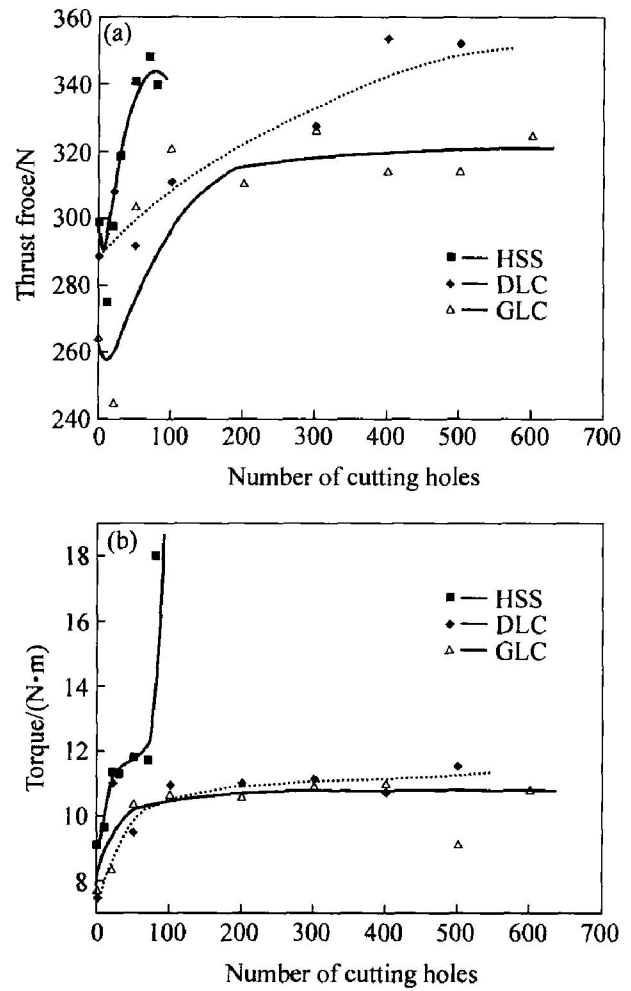


图 4 刀具在切削过程中切削力的变化曲线

Fig. 4 Change curves of cutting force of drills during cutting

2.2 碳膜的作用

综上所述,镀层提高刀具耐磨性能的主要原因是由于镀层具有减摩作用。图 5 所示为镀层在 Pirr-on-Disk 磨损实验后不同对磨幅与 AlSi 销磨损后的图片。由图 5 看出,高速钢磨损表面出现典型的粘结特征,而 GLC 碳膜表面粗糙度也明显要小于 DLC 碳膜,说明由于较低的摩擦因数减缓了高速钢与铝的粘结。

一般认为,切削过程中碳膜的固体润滑作用是由于与对磨件产生了转移膜,使得摩擦磨损发生在碳与碳之间。

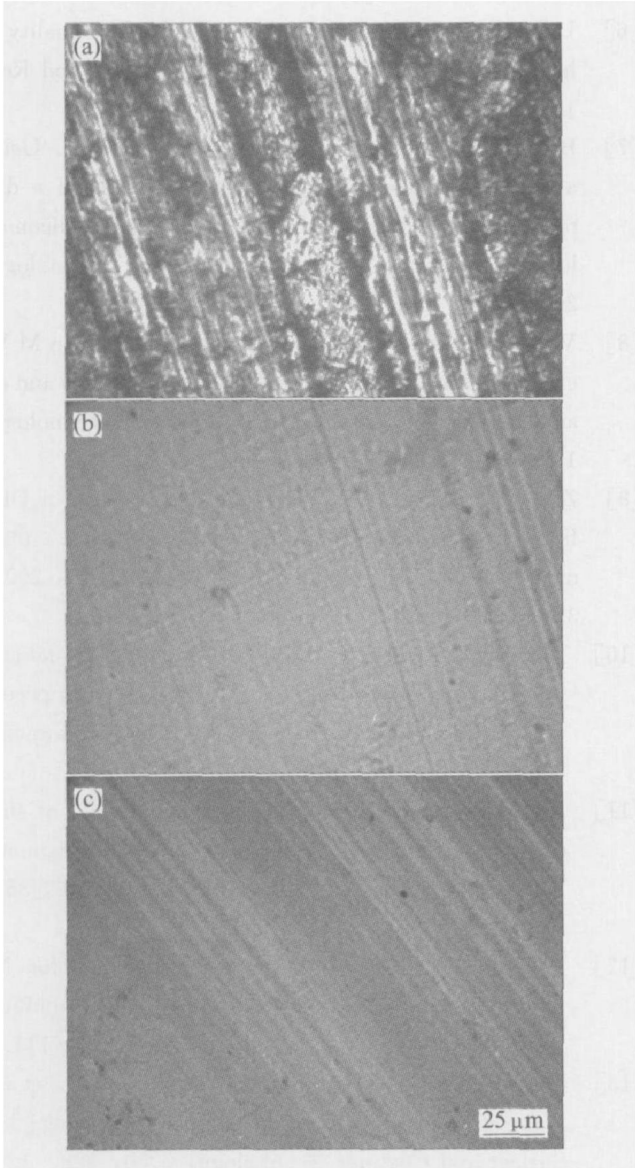


图 5 与 AlSi 合金对磨后不同表面的金相照片
Fig. 5 Metallographs of different disks against AlSi pin
(a) —HSS disk; (b) —GLC disk; (c) —DLC disk

图 6 所示为 Pin-on-Disk 实验后对铝硅销摩擦表面做的 XPS 检测曲线。由图 6 可知, 与 GLC、DLC 和 HSS 对磨的 AlSi 销表面都没有出现纯碳结构(金刚石为 285.5 eV, 石墨为 284.15 eV), 说明这时并没有出现转移膜。

表 1 所列为对摩擦磨损后镀层表面的能谱分析结果。由表 1 可知, 磨损后碳膜镀层的表面不存在铝元素, 而高速钢表面出现大量的铝元素, 说明镀层对铝硅合金具有良好的抗粘结性能。由此可以断定, 碳膜起减摩作用的主要是碳元素与铝硅合金的润湿性较差而非转移膜的生成。

在切削实验中, 两种碳膜不仅切削寿命相差 1.5 倍, 加工孔的精度也有明显不同。但这两种碳膜与铝硅合金的摩擦因数相差并不大, 而碳元素对

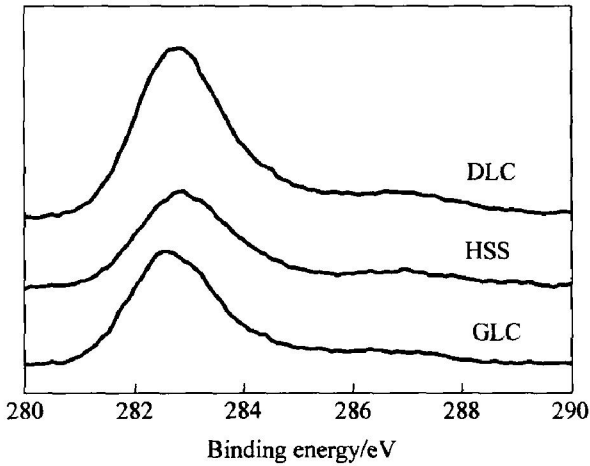


图 6 与不同对磨副摩擦后的 AlSi 销的 XPS 谱
Fig. 6 XPS spectra of AlSi alloy pins against different disks

表 1 不同磨损表面的成分分析
Table 1 Elements distribution of different disks against AlSi pin (mole fraction, %)

Element	HSS	GLC	DLC
C	0.66	81.66	83.95
O	49.74		
Al	40.48		
Si	3.91	0.52	
S	0.20		
Cr	0.41	14.18	14.88
Fe	4.21	3.64	
Cu	0.40		1.18

铝硅合金的润湿性基本相同, 固体润滑覆盖层的耐久性取决于摩擦裂化发展的程度, 即在摩擦时的发展温度和变形作用下引起的破坏, 摩擦镀层的失效大多是在服役条件下由于镀层的剥落、分离以及剥层断裂而导致的^[18]。相对于普通的摩擦磨损, 刀具在钻削过程中, 本身具有高塑变与大剪切应力作用的特点, 同时钻削时的热量难以散发, 温度与形变对镀层和工件的影响更为剧烈。而碳膜的最大不足之处就在于热稳定性, 不同碳膜切削寿命的大小, 必然取决于其热稳定性的大小。在切削过程中, 一旦碳膜被破坏, 由于刀屑接触区中 Al 与 Fe 均为化学活性极强的清洁金属, 它们之间的粘着力高达 2.5 mN, 那么工件与刀具分离表面上发生强烈的粘着磨损, 高速钢刀具很快就达到失效。从刀具的摩擦磨损曲线(图 2)也可看出, DLC 加工了 330 个孔以后, 很快进入加速磨损阶段, 这是由于在切削热的影响下镀层快速氧化失效。图 7 所示为 Si 基片上不同碳膜的退火硬度曲线。

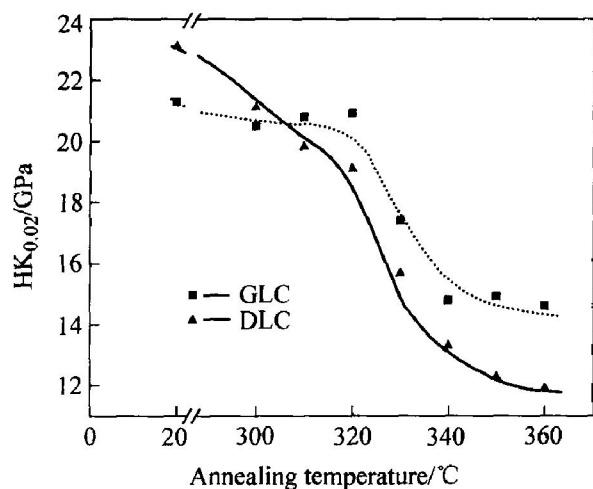


图 7 碳膜的退火硬度随退火温度的变化曲线

Fig. 7 Change curves of hardness of carbon film with annealing temperature

由图 7 可知, 尽管 GLC 膜的硬度在初期小于 DLC 膜的, 但随退火温度的升高, 硬度下降得更慢, 说明 GLC 的热稳定性优于 DLC 的, 因而在切削过程中其寿命也更长。

3 结论

高硬度低摩擦因数的碳膜可以用于干式无润滑钻削铝硅合金, 切削过程中镀层的高硬度有效地防止了低温粘结, 而低的摩擦因数降低了切削过程中的摩擦热, 提高了刀具的抗高温粘结能力, 提高了刀具干切削铝硅合金的寿命。

REFERENCES

- [1] 曾苏民. 我国铝加工业发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(S1): 179-181.
ZENG Su-min. Development of aluminium working industry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(S1): 179-181.
- [2] Gowri S, Samuel F H. Effect of Mg on the solidification behavior of two Al-Si-Cu-Fe-Mg (380) diecasting alloys[J]. AFS Trans, 1993, 101: 611-618.
- [3] Kimberley W. Enlightened process[J]. Automotive Engineer, 2003, 11: 50-51.
- [4] Harris S G, Vlasveld U A C, Doyle E D, et al. Dry machining-commercial viability through filtered arc vapor deposited coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 133-134: 383-388.
- [5] Derflinger V, Brändle H, Zimmermann H. New hard/lubricant coating for dry machining[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 113: 286-292.
- [6] Leep H R, Halbleib E D, Jiang Z. Surface quality of holes drilled into aluminum 390[J]. Int J Prod Res, 1991, 29(2): 391-400.
- [7] Braga D U, Diniz A E, Miranda G W A, et al. Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122: 127-138.
- [8] Vandevelde T C S, Vandierendonck K, Stappen M V, et al. Cutting applications of DLC, hard carbon and diamond films[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 113: 80-85.
- [9] Zhang W, Tanaka A. Tribological properties of DLC films deposited under various conditions using a plasma-enhanced CVD[J]. Tribology International, 2004, 37: 975-982.
- [10] Jarratt M, Field S K, Yang S. Graphite-like and carbon coatings with exceptional tribological properties[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2004, 25(5): 796-802.
- [11] Liu H W, Tanaka A, Kumagai T. Influence of sliding materials on the tribological behavior of diamond-like carbon films[J]. Thin Solid Films, 1999, 352: 145-150.
- [12] Landry K, Kalogeropoulou S, Eustathopoulos N. Wettability of carbon by aluminum and aluminum alloys[J]. Mater Sci Eng A, 1998, 254: 99-111.
- [13] Uglov V V, Kuleshov A K, Rusalsky D P, et al. Wear-resistant metal-carbon composite coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 128-129: 150-155.
- [14] Donnet C, Erdemir A. Solid lubricant coatings: recent developments and future trends[J]. Tribology Letters, 2004, 17(3): 389-396.
- [15] Grimaldis D, Yang S, Bohme O, et al. Carbon based coatings for high temperature cutting tool applications[J]. Diamond and Related Materials, 2002, 11: 176-184.
- [16] Yang S, Teer D G. Investigation of sputtered carbon and carbon chromium multi-layered coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 131: 412-416.
- [17] Yang S, Lib X, Reneviera N M, et al. Tribological properties and wear mechanism of sputtered C-Cr coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 142-144: 85-93.
- [18] Hogmark S, Jacobson S, Larsson M. Design and evaluation of tribological coatings[J]. Wear, 2000, 246: 20-33.

(编辑 李艳红)