

# 两种 DLC 涂层对 ZL108 铝合金 干式铣削性能的影响

张而耕, 张致富, 周琼, 黄彪, 陈强, 沈秀国, 陈亚楠

(上海应用技术大学 上海物理气相沉积(PVD)超硬涂层及装备工程技术研究中心, 上海 201418)

**摘要:** **目的** 比较分析氢元素对类金刚石涂层摩擦性能的影响, 研究含氢和无氢 DLC 涂层在铣削 ZL108 铝合金时的切削性能。**方法** 分别采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)和磁控溅射物理气相沉积(MS)制备含氢和无氢 DLC 涂层, 并采用三维形貌仪对涂层基片表面形貌进行表征, 通过切削实验分析两种涂层铣刀的切削性能。**结果** MS 制备的无氢 DLC 涂层结构致密, 无凹坑、针眼等缺陷。在摩擦磨损试验时发现, 无氢 DLC 涂层磨损率( $3.58 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}$ )明显小于含氢 DLC 涂层( $4.62 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}$ ), 即无氢 DLC 涂层的耐磨性能更好。**结论** 采用 MS 制备的无氢 DLC 涂层, 表面无明显缺陷, 并且具有更优异的摩擦性能。在铣削 ZL108 铝合金时, 减摩性、耐磨性以及抗粘附性能均比含氢 DLC 涂层铣刀表现得更加优异, 被加工的铝合金表面质量更好, 产生的切屑表面更加光滑。

**关键词:** 类金刚石涂层; 等离子体增强化学气相沉积; 磁控溅射; 物理气相沉积; 摩擦磨损; 磨损率; 切削性能; 抗粘附性

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)01-0356-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.043

## Effects of Two DLC Coatings on Dry Milling Performance of ZL108 Aluminum Alloy

ZHANG Er-geng, ZHANG Zhi-fu, ZHOU Qiong, HUANG Biao,  
CHEN Qiang, SHEN Xiu-guo, CHEN Ya-nan

(Shanghai Engineering Research Center of Physical Vapor Deposition (PVD) Superhard Coating and  
Equipment, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to compare and analyze the influences of hydrogen on the tribological performance of diamond-like coating, and study the cutting performance of DLC coatings with or without hydrogen. Hydrogen free and hydrogen coatings were prepared through plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) and magnetron sputtering physical vapor deposition (MS). The surface topography of the coatings was characterized by three-dimensional topography instrument, and the cutting performance of two coating milling cutters was analyzed by cutting experiments. The results showed that the hydrogen-free coating had dense structure, without pits, pinholes and other defects. The wear rate of hydrogen-free DLC coating ( $3.58 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}$ ) was lower than that of hydrogen DLC coating ( $4.62 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}$ ), thus hydrogen-free DLC coating showed better wear resistance. Hydrogen-free DLC coating deposited by MS has no apparent surface defects. It has excellent

收稿日期: 2019-04-25; 修订日期: 2019-07-10

Received: 2019-04-25; Revised: 2019-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51971148); 上海市科委重点支撑计划(170905038000); 上海市联盟计划(LM201904)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51971148); Key Support Plan of Shanghai Science and Technology Committee (170905038000); Shanghai Federation Plan (LM201904)

作者简介: 张而耕(1973—), 男, 博士后, 教授, 主要研究方向为超硬纳米微米 PVD 涂层、机械制造、材料失效分析。邮箱: zhangeg@yeah.net

Biography: ZHANG Er-geng (1973—), Male, Postdoctor, Professor, Research focus: superhard nano-micron PVD coating, machinery manufacturing, failure analysis of materials. E-mail: zhangeg@yeah.net

tribological performance. It also shows better wearing resistance, abrasion resistance and adhesion resistance in the milling test against ZL108 aluminum alloy. The machined surface and chip surface quality obtained by applying hydrogen-free DLC coating were better than that obtained by applying a-C:H coating.

**KEY WORDS:** diamond-like coating; plasma enhanced; chemical vapor deposition; magnetron sputtering physical vapor

为响应国家环保、节能、高效的号召,干式切削逐步取代了湿式切削,适当地减少了生产成本、环境污染以及废液处理费用<sup>[1]</sup>。ZL108 铝合金(牌号为 ZALSi12Cu2Mg1)是一种共晶铝硅合金(又是铸造铝合金),抗拉强度  $\sigma_b$  为 195 MPa。由于 ZL108 铝合金在发动机、变速器等汽车加工行业有着广泛应用(如汽车火花塞材料)<sup>[2]</sup>,因此国内外对 ZL108 铝合金进行了深入研究,发现 ZL108 铝合金对刀具的磨损较为严重,同时在干切削的过程中极易出现刀具粘屑现象,进而形成积屑瘤,影响工件的表面质量以及加工精度。积屑瘤会随着堆积的增加而剥落,导致刀具受力不均,从而加剧刀具的磨损,因此 ZL108 铝合金属于加工性能较差的材料<sup>[3-4]</sup>。为了克服在加工 ZL108 铝合金时所遇到的刀具磨损以及粘屑问题,专家学者进行了许多实验研究,发现刀具材料、进给速度、刀具前角和润滑等诸多因素都会影响刀具磨损和粘屑情况<sup>[5]</sup>。

改变刀具的几何形状或在刀具表面进行涂层沉积,均能有效地抑制切屑对刀具的粘附。改变刀具的几何形状即在刀具表面设计合理的微条纹纹理<sup>[6]</sup>,此法虽然能够有效地抑制切屑的粘附,但是加大了生产成本,限制了刀具的循环适用性。在刀具表面进行涂层沉积,既降低了生产成本,又保证了刀具的循环利用,是一种价格低廉、有效的解决粘屑问题的方法。碳基涂层和氮基涂层是两种常用的刀具表面涂层。在 Suresh Kannan<sup>[7]</sup>等人的研究中发现,碳基涂层刀具干切削 BSL168 铝合金时,有效地减少了刀具表面的切屑粘附,而其他的氮化物、碳化物基过渡金属以及  $\text{MoS}_2$  涂层在干切削的环境下容易在刀具表面产生积屑瘤,影响加工精度。碳基涂层较其他类别的涂层更适用于刀具涂层,根据制备方法和种类的不同,可以进一步地分为金刚石涂层和类金刚石涂层。由于金刚石涂层的制备工艺比较复杂,成本昂贵,经济价廉的类金刚石涂层成为了首选<sup>[8]</sup>。

类金刚石涂层(DLC)是一类含有金刚石结构和石墨结构的亚稳非晶态物质,主要以  $\text{sp}^3$  和  $\text{sp}^2$  杂化键结合,它具有高硬度、高弹性模量、低摩擦因数、高耐磨性等一系列优良的性能。根据制备过程中是否含氢分为四面体无氢非晶态碳膜和四面体含氢非晶态碳膜,由于两者结构中  $\text{sp}^3$  杂化键含量和氢含量的不同,导致两种涂层在摩擦学以及切削方面表现出了不同的性能<sup>[9-19]</sup>。在 Sheng R 等人<sup>[20]</sup>的研究中发现,含氢 DLC 涂层的石墨化分为两个阶段:一是结构的变化,即由四面体结构转化为层状结构;二是氢的析

出,碳基体的重排和  $\text{sp}^2$  在一个优先方向的聚集,导致晶粒尺寸增大,纳米硬度下降,最终导致涂层的承载能力和磨损率急剧下降。Erdemir A 等人<sup>[21-25]</sup>研究发现,含氢 DLC 和无氢 DLC 涂层在不同气体环境中具有不同的摩擦性能。在潮湿的环境中,无氢 DLC 涂层由于表面悬浮碳键被吸附的水分子钝化,导致表面出现较低的摩擦系数;而含氢 DLC 涂层表面亦会吸附水分子,引起界面的偶极作用和毛细作用,最终导致表面摩擦系数增加。Zhang T F 等人<sup>[26]</sup>研究发现,DLC 涂层在加工铝、镁合金等有色金属时表现出了良好的摩擦性能和抗粘性,但是由于加工环境的不同,导致两种涂层刀具出现不同的磨损和切屑粘附情况。Bhowmick 等人<sup>[27]</sup>发现,在 319 铝合金的干钻过程中,无氢 DLC 涂层的切削力和切屑粘附力均大于含氢的类金刚石涂层,在 319 铝合金近干钻的过程中也发现了同样的趋势。Maslov A R<sup>[28]</sup>在干燥的环境中铣削 D16T 铝合金时发现,含氢 DLC 涂层铣刀在铣削过程中表现出了较低的磨损率,而在潮湿的环境中则出现相反的结果。因此,氢元素存在与否和工作环境中 RH 的大小均会影响 DLC 涂层的摩擦学性能以及实际的切削加工性能。

本文采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)和磁控溅射物理气相沉积(MS)技术制备了含氢和无氢 DLC 涂层,对两类涂层试片进行摩擦磨损实验,分析研究了两种涂层的摩擦磨损性能。然后采用两类涂层铣刀对铝合金材料进行铣削加工,分析两类涂层铣刀的切削加工性能。

## 1 实验

### 1.1 涂层制备

实验采用等离子体增强化学气相沉积(型号 ICS-04 ARC PRO)和磁控溅射物理气相沉积(设备型号 PLASMAADS 400),基材为硬质合金试样及硬质合金铣刀(硬质合金牌号为 YG10C,试片尺寸为  $16\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ,表面粗糙度  $R_a$  为  $0.6\text{ }\mu\text{m}$ ,硬度为 86HRA,铣刀尺寸为  $\phi 10\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 75\text{ L}$ ,两刃  $45^\circ$ ),在基材表面沉积含氢和无氢 DLC 涂层。对 YG10C 硬质合金试片和铣刀涂覆之前,需对其进行酒精清洗、蒸馏水清洗。最后在丙酮溶液中进行 40~50 min 的超声波清洗,清洗结束后,放入烘干室进行烘干处理,确保基材和刀具表面无油渍、锈斑、水渍等影响涂层沉积的因素。烘干后,将其采用专用夹具装夹送入真空炉腔内,两种涂层制备工艺和参数对比见表 1。

表 1 两种涂层制备工艺参数对比  
Tab.1 Comparison of preparation parameters of the two coatings

Coating deposition technique	Depositional coating type	Carbon source	Working voltage/V	Working current/A	Argon flow / $(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	Converter rack bias/V
PECVD	H-DLC	$\text{C}_2\text{H}_2$	21	110	80~100	-80
MS	Ta-C	Graphite	380	0.2	37.3	0

从表 1 中可以发现, PECVD 制备 DLC 涂层的过程是在  $\text{C}_2\text{H}_2$  环境下进行的,  $\text{C}_2\text{H}_2$  在高温下分解, 获得 H 元素和 C 元素, 因此 PECVD 制备的 DLC 涂层是含氢的。MS 制备的类金刚石涂层是在纯氩气的环境下进行的, 因此制备的是无氢 DLC 涂层。

## 1.2 性能表征及摩擦磨损测试

采用 Taly surf CCI 非接触表面轮廓仪对两种涂层的表面粗糙度进行测试, 为了保证测试数据的准确性, 选取了 6 组 DLC 涂层试片进行测试 (其中无氢 DLC 涂层试片的编号为 1—3, 含氢 DLC 涂层试片的编号为 4—6)。采用干湿球湿度计对测试环境以及切削加工环境进行检测, 测得相对湿度  $RH$  为 40%。采用球-平面往复式 HRS-2M 型高速摩擦磨损试验机测试两种涂层在相同的摩擦速度以及相同的试验环境下 ( $RH=40\%$ ) 与 GCr15 钢球 ( $\phi 6 \text{ mm}$ , 硬度为 25.8 HRC) 配副的摩擦性能。为了保证实验的准确性, 选用了 6

组 DLC 涂层试片 (含氢和无氢 DLC 涂层试片各 3 组), 对其进行摩擦磨损试验, 记录每组试片不同测试时间 (15、30、45、60、75 min) 时的摩擦系数, 测试参数见表 2。为进一步研究两种涂层摩擦磨损情况, 采用非接触表面轮廓仪对试验后的两种涂层试片进行测试, 通过式 (1) 计算两种涂层的磨损率。

$$\omega = \frac{\Delta V}{sF_n} \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为磨损率;  $\Delta V$  为涂层磨损体积;  $s$  为对磨副滑动距离;  $F_n$  为对磨副上的正压力。

## 1.3 铣削实验

本次铣削试验采用的是立式机床 (HARDINGE VMC-1000II), 具体的机床参数和切削技术参数见表 3, ZL108 铝合金的化学成分见表 4。采用手持式粗糙度仪 (TR220) 对被加工的铝合金表面粗糙度进行测试, 测试参数见表 5。

表 2 摩擦磨损测试参数  
Tab.2 Friction and wear test parameters

Load/N	Wearing in period/min	Reciprocating frequency/Hz	Run length/mm	Test temperature/°C
30	15, 30, 45, 60, 75	8	2	20

表 3 刀具参数及切削技术参数  
Tab.3 Tool parameters and cutting technical parameters

Processing method	Workpiece Material	Machine Tool	Cutting parameters
Model and origin: HARDINGE VMC-1000II, America	ZL108 aluminum alloy	Diameter: 10 mm Cutting edge: 2, Helical angle: $45^\circ$ Materials: Diamond-like coated milling cutter with and without hydrogen	Turn the spindle speed: 4000 r/min Feed speed: 800 mm/min Turning back: 2 mm Cutting width: 10 mm

表 4 ZL108 铝合金的化学成分  
Tab.4 Chemical composition of ZL108 aluminum alloy wt. %

$\omega_{\text{Si}}$	$\omega_{\text{Cu}}$	$\omega_{\text{Mg}}$	$\omega_{\text{Mn}}$	$\omega_{\text{Al}}$
11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0	0.3~0.9	Bal.

表 5 粗糙度测试参数  
Tab.5 Roughness test parameters

Measurement range/ $\mu\text{m}$	Resolution / $\mu\text{m}$	Indication error/%	Measuring point position/m
0.005~16	0.001	10	4, 8, 12

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层的物理性能

几组涂层试片的表面粗糙度  $Ra$  (平均值) 情况如图 1 所示。显然无氢 DLC 涂层试片的  $Ra$  更小。选取了 2 组表面形貌相差较大的涂层试片, 其表面形貌如图 2 所示。由于涂层过程中存在宏观大颗粒, 造成无氢 DLC 涂层表面存在微凸起, 能有效地释放涂层局部的应力。除此之外, 无氢 DLC 涂层表面无凹坑、针眼等缺陷。含氢 DLC 涂层试片表面有明显的凹坑缺陷, 不但会影响涂层的表面质量, 也会加剧涂层的

磨损。由此得知, 无氢 DLC 涂层的表面质量更优于含氢 DLC 涂层。

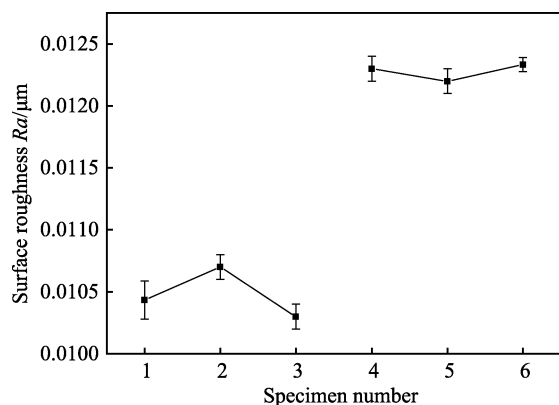
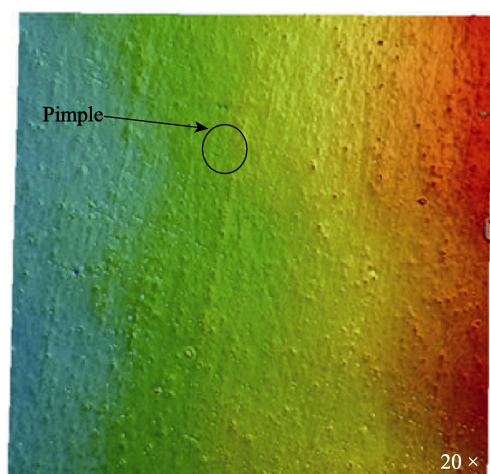
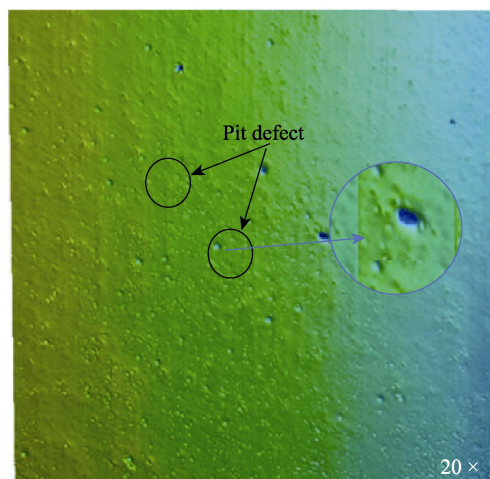


图 1 两种涂层试片的表面粗糙度  
Fig.1 Surface roughness of two coating specimens



a 无氢DLC涂层



b 含氢DLC涂层

图 2 两种涂层的微观形貌  
Fig.2 Microstructure of the two coatings: a) DLC coating without hydrogen; b) hydrogen DLC coating

## 2.2 摩擦磨损性能

通过摩擦磨损试验测得两类 DLC 涂层试片的摩

擦系数随时间变化曲线如图 3 所示。在 15~45 min 之间, 由于对磨副和涂层表面的摩擦作用, 使涂层表面微凸起被磨平, 摩擦系数均有所下降。同时受工作环境的影响 ( $RH=40\%$ ), 吸附在 DLC 涂层表面的水分子, 在摩擦力和热的作用下分解出  $H^+$ 。这一方面钝化了含有碳悬键的无氢 DLC 表面, 进一步降低了无氢 DLC 的摩擦系数; 另一方面使含氢 DLC 涂层表面产生偶极作用和毛细作用<sup>[22]</sup>, 因此无氢 DLC 的摩擦系数下降速率大于含氢 DLC。当  $t=45$  min 时, 含氢 DLC 涂层在温度和接触应力的共同作用下, 其内部结构逐步由三维结构转化为平面结构 ( $sp^3 \rightarrow sp^2$ ), 接触表面润滑性进一步提高。虽然表面粘附的水分子会使表面产生一定的偶极作用<sup>[26]</sup>, 但其作用远小于石墨化作用, 含氢 DLC 涂层的摩擦系数达到最低。此时无氢 DLC 涂层摩擦系数继续下降, 但未达到最小值。随着摩擦时间的进一步延长, 由于凹坑缺陷的进一步扩展, 对磨副将含氢 DLC 涂层磨穿。此时摩擦系数逐渐升高, 而无氢 DLC 涂层随着摩擦时间的延长, 表面石墨化程度加剧。当  $t=60$  min 时, 摩擦系数达到最低。当  $t=75$  min 时, 两种涂层均被磨穿 (如图 4 所示), 摩擦系数均升高。由图 3 可以得出, 在相对湿度  $RH=40\%$  的工作环境中, 无氢 DLC 涂层的摩擦系数小于含氢 DLC 涂层。

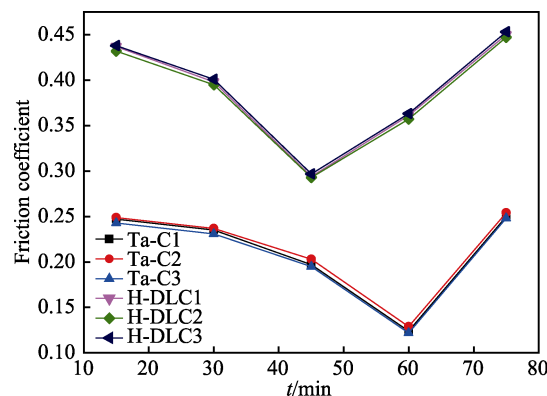


图 3 两种涂层随时间增加的摩擦系数的变化  
Fig.3 Changes in friction coefficients of the two coatings over time

为了进一步研究两种涂层的耐磨性, 选取了几组摩擦磨损后的涂层试片, 通过 Taly surf CCI 非接触表面轮廓仪进行测试。经过计算, 得出两类涂层的平均磨损体积: 含氢 DLC 涂层的磨损体积  $\bar{V}_1 = 2.77 \times 10^5 \mu m^3$ ; 无氢 DLC 涂层的磨损体积  $\bar{V}_2 = 2.15 \times 10^5 \mu m^3$ 。由式 (1) 可以得到两类 DLC 涂层的磨损率大小: 含氢 DLC 涂层  $\omega_1 = 4.62 \times 10^{-6} mm^3/N$ , 无氢 DLC 涂层  $\omega_2 = 3.58 \times 10^{-6} mm^3/N$ 。显而易见, 无氢 DLC 涂层的磨损率更低, 耐磨性更好 (与上述摩擦系数曲线结果吻合)。通过上述两种涂层的摩擦性能表征以及磨损情况比较, 得到无氢 DLC 涂层较含



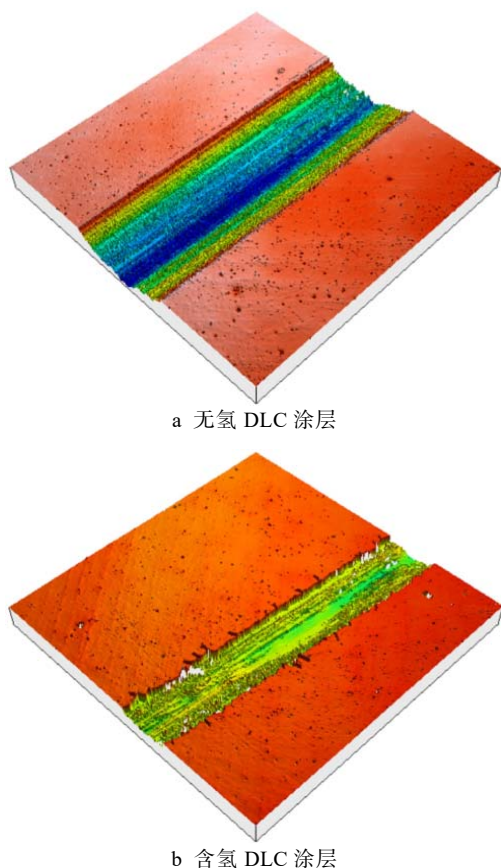


图4 两种涂层摩擦磨损微观形貌图

Fig.4 Wear microstructure of the two coatings a) DLC coating without hydrogen; b) hydrogen DLC coating

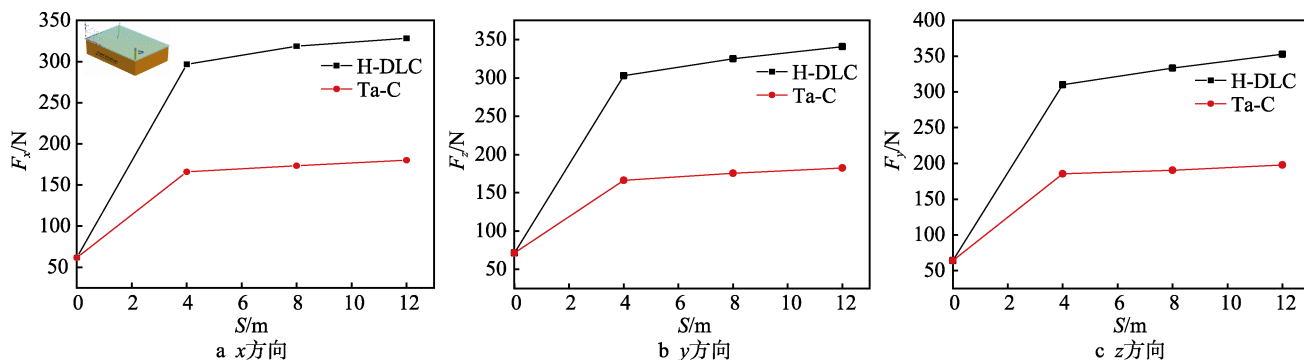


图5 两种涂层刀具不同加工距离下切削力的大小

Fig.5 Cutting forces of two coated cutters at different machining distances: a) x direction; b) y direction; c) z direction

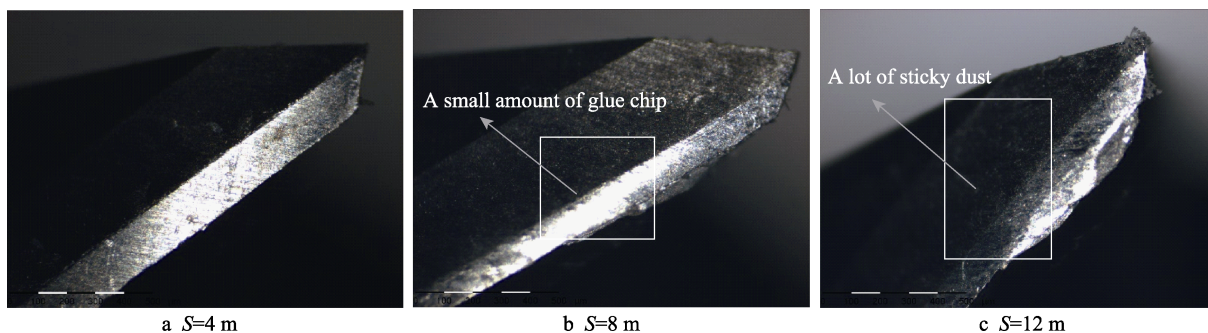


图6 不同加工距离下含氢 DLC 涂层刀具磨损情况

Fig.6 Tool wear of H-DLC coated cutter at different machining distances

氢 DLC 涂层具有较好的微观形貌、较低的摩擦系数以及更高的耐磨性。

## 2.3 刀具切削力

在铣削加工 ZL108 铝合金过程中,采用三向电式动态测力仪对切削力分量进行了实时测量。根据测力仪收集的切削力分量的大小,可以得到铣刀不同加工距离时对应力 ( $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ) 的峰值情况,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,含氢 DLC 涂层铣刀切削力 ( $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ) 每个阶段的峰值均大于无氢 DLC 涂层铣刀。当  $0 < S < 4$  m 时,  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  的变化剧烈。这是由于铣刀在开始切削时,由于被加工材料和切削刀具的相对位置存在一定的误差,切削刃与被加工材料表面未充分接触,因此切削力比较小。随着切削的进行,切削刃与被加工材料表面充分接触,因此切削力急速上升。当  $4 \text{ m} < S < 12$  m 时,切削力变化速率明显下降,此时铣刀表面的涂层起了一定的减摩和抗磨的作用。从图 5 中可以看出,两种涂层铣刀的切削力大小有明显差异,其中 RH 的大小是一个不可忽略的因素。在整个切削过程,含氢 DLC 涂层铣刀的切削力均大于无氢 DLC 涂层铣刀。

## 2.4 刀具磨损及粘屑

将加工不同距离的两刃涂层铣刀用光学显微镜进行观察,如图 6、7 所示。

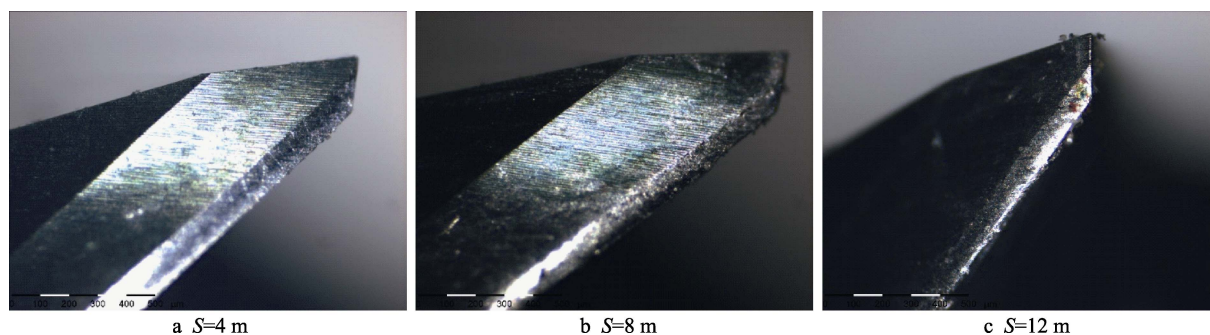


图 7 不同加工距离下无氢 DLC 涂层刀具磨损情况

Fig.7 Tool wear of DLC coated cutter without hydrogen at different processing distances

当加工距离  $S=4\text{ m}$  时,两种涂层铣刀的切削刃保持良好,基本不存在粘屑情况。当加工距离  $S=8\text{ m}$  时,两种涂层铣刀都出现了粘屑情况,而含氢 DLC 涂层铣刀切削刃表面的切屑粘附更多。当加工距离  $S=12\text{ m}$  时,含氢 DLC 涂层铣刀出现了严重的粘屑现象,刀尖也有了一定程度的磨损,而无氢 DLC 涂层铣刀切削刃表面情况良好,只出现了轻微的磨损和粘屑现象,刀尖保持良好。结合图 5—7 可以得出,随着加工距离的不断增大,切削力的各个分力随之增大,刀具磨损和粘附情况加剧,工作环境  $RH$  的大小也是影响刀具磨损的一个因素。在切削过程中,空气中的水分子分解出  $\text{H}^+$ ,一方面可以与无氢 DLC 表面碳悬键结合,钝化涂层的表面,使其表现出更小的切削力、更好的耐磨性以及更小的粘屑量;另一方面可以与含氢 DLC 涂层表面发生反应使表面产生偶极作用以及毛细作用<sup>[22-23]</sup>,从而增大涂层刀具表面的摩擦系数,加剧刀具的磨损和粘屑。

从上述的切削结果可知,无氢 DLC 涂层铣刀较含氢 DLC 涂层铣刀有更好的耐磨性以及抗粘屑性能。

## 2.5 工件表面质量和切屑性能

采用手持式粗糙度测量仪测得工件表面粗糙度随时间的变化趋势如图 8 所示。可以看出,随着加工距离的增大,材料表面粗糙度逐渐上升。两种涂层刀

具完成加工时,ZL108 铝合金的表面情况如图 9 所示。可以看出,无氢 DLC 涂层刀具加工的铝合金表面更加光滑。结合图 8 可知,无氢 DLC 涂层铣刀加工的工件表面粗糙度更小,表面更加光滑。

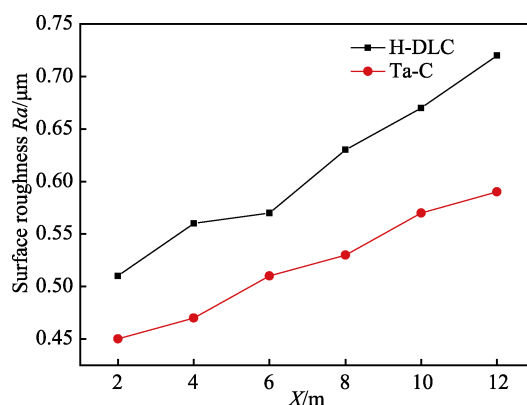


图 8 表面粗糙度随距离变化的曲线图

Fig.8 A histogram of surface roughness varying with distance

分别收集了两种涂层铣刀加工时所产生的切屑,将两种切屑在光学显微镜下进行观察,如图 10 所示。从切屑的宏观形貌可以看出,无氢 DLC 涂层铣刀切削产生的切屑,是工业生产中需要的理想切屑类型,其产生过程中不易到处飞溅,划伤刀具和被加工材料表面;而含氢 DLC 涂层铣刀切削产生的切屑,是崩

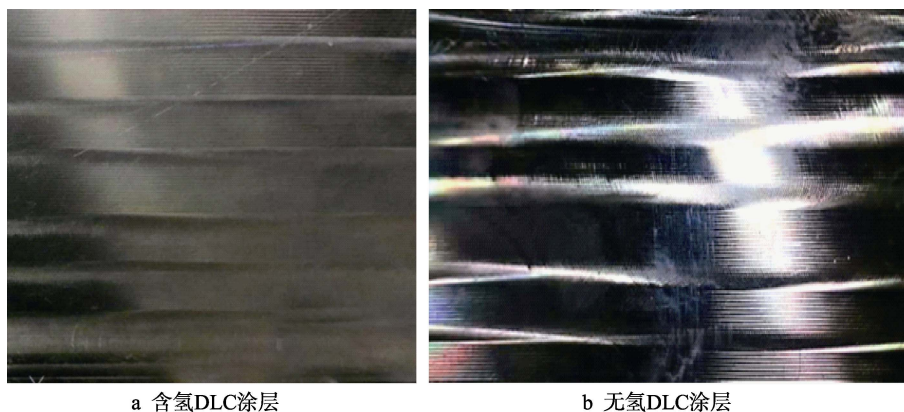


图 9 两种涂层刀具加工的工件表面

Fig.9 Workpiece surfaces processed by two coated cutters: a) H-DLC coating; b) DLC coating without hydrogen



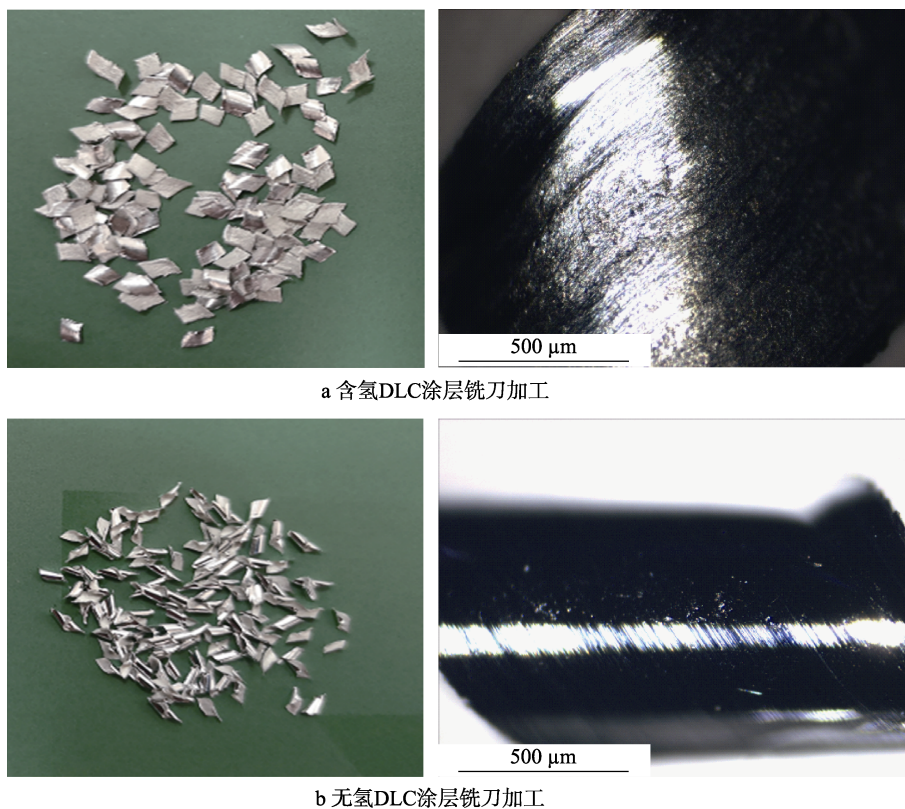


图 10 切屑的宏观和微观形貌

Fig.10 Macroscopic and microscopic morphology of the chip: a) H-DLC coated milling cutter; b) DLC coating milling cutter without hydrogen

碎型切屑，在加工过程中易四处飞溅，在刀具及被加工表面产生划痕，并且有一定的安全隐患。从两种切屑微观形貌可以看出，无氢 DLC 涂层铣刀切削产生的切屑的表面更加光滑，表面质量更高，反观氢化类金刚涂层加工的切屑，表面比较粗糙。由此可知，由无氢 DLC 涂层铣刀铣削加工的工件表面粗糙度更小，表面更加光滑，加工所产生的切屑类型更有利于切削加工，而且切屑表面更加光滑。

### 3 结论

1) 在硬质合金基体及两刃铣刀表面制备的无氢 DLC 涂层比含氢 DLC 涂层更加致密，且无明显缺陷。

2) 摩擦磨损试验时 ( $RH=40\%$ )，无氢 DLC 涂层比含氢 DLC 涂层的摩擦系数更小。当  $t=60$  min 时，无氢 DLC 涂层的摩擦系数达到最低， $f=0.122$ 。通过计算，无氢 DLC 涂层的磨损率明显低于含氢 DLC 涂层，因此具有更高的耐磨性。

3) 在铣削加工 ZL108 铝合金时 ( $RH=40\%$ ) 发现，无氢 DLC 涂层铣刀表现出了更小的切削力、更低的刀刃磨损量以及切屑粘附量，无氢 DLC 涂层铣刀具有更好的减摩、耐磨以及抗粘附性能，所加工的铝合金表面更加光滑、粗糙度更低，而且切削加工过程产生的切屑属于工业生产理想类型，微观表面更加光滑。

### 参考文献:

- [1] 仲为武. 铝合金干切削和少量润滑切削试验及模糊监控研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
ZHONG Wei-wu. Experiment and fuzzy monitoring of dry cutting and a little lubrication of aluminum alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [2] 武仲河, 战中学, 孙全喜, 等. 铝合金在汽车工业中的应用与发展前景[J]. 内蒙古科技与经济, 2008(9): 59-60.  
WU Zhong-he, ZHAN Zhong-xue, SUN Quan-xi, et al. Application and development prospect of aluminum alloy in automobile industry[J]. Inner Mongolia science and technology & economy, 2008(9): 59-60.
- [3] SAHIN Y. Wear behaviour of aluminium alloy and its composites reinforced by SiC particles using statistical analysis[J]. Materials & Design, 2003, 24(2): 95-103.
- [4] 魏国丰. 铸铝合金 ZL108 切削性能的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
WEI Guo-feng. Experimental study on cutting performance of cast aluminum alloy ZL108[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [5] BAO H, STEVENSON M G. An investigation of built-up edge formation in the machining of aluminium[J]. International journal of machine tool design & research, 1976, 16(3): 165-178.

- [6] NOUARI M, LIST G, GIROT F, et al. Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys[J]. *Wear*, 2003, 255(7): 1359-1368.
- [7] SURESH K I, GHOSH A. Dry machining of AA7075 by H-DLC coated carbide end mill[J]. *Procedia materials science*, 2014, 5: 2615-2621.
- [8] COLDWELL H, DEWES L, ASPINWALLA D K, et al. The use of soft/lubricating coatings when dry drilling BS L168 aluminium alloy[J]. *Surface & coatings technology*, 2004, 177-178: 716-726.
- [9] LIU J Q, LI L J, WEI B, et al. Effect of sputtering pressure on the surface topography, structure, wettability and tribological performance of DLC films coated on rubber by magnetron sputtering[J]. *Surface & coatings technology*, 2019, 365: 33-40.
- [10] BEWILOQUA K, HOFMANN D. History of diamond-like carbon films—From first experiments to worldwide applications[J]. *Surface & coatings technology*, 2014, 242(4): 214-225.
- [11] SUTTON D C, LIMBERT G, BURDETT B, et al. Interpreting the effects of interfacial chemistry on the tribology of diamond-like carbon coatings against steel in distilled water[J]. *Wear*, 2013, 302(1/2): 918-928.
- [12] YUE Q, KONCR E, ALPAS A T. Atmospheric effects on the adhesion and friction between non-hydrogenated diamond-like carbon (DLC) coating and aluminum—A first principles investigation[J]. *Surface science*, 2006, 600(15): 2955-2965.
- [13] BHOWMICK S, BANERJI A, ALPAS A T. Tribological behavior and machining performance of non-hydrogenated diamond-like carbon coating tested against Ti-6Al-4V: Effect of surface passivation by ethanol[J]. *Surf coat technol*, 2014, 260: 290-302.
- [14] DONNET C, FONTAINE J, GRILL A, et al. The role of hydrogen on the friction mechanism of diamond-like carbon films[J]. *Tribology letters*, 2001, 9(3/4): 137-142.
- [15] MIZUGAKI Y, TAKAFUJI K, KIKKAWA K, et al. Experimental study of cutting performance and tool wear in dry side milling of aluminum alloy with DLC-coated HSS- Co cutter[J]. *Key engineering materials*, 2012, 523-524: 64-69.
- [16] RONKAINEN H, VARJUS S, HOLMBERG K. Friction and wear properties in dry, water- and oil-lubricated DLC against alumina and DLC against steel contacts[J]. *Wear*, 1998, 222(2): 120-128.
- [17] 张而耕, 黄彪, 何澄, 等. 新型 Ta-C 涂层铣刀切削性能研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(6): 125-130.
- ZHANG Er-geng, HUANG Biao, HE Cheng, et al. Research on cutting performance of novel Ta-C coated milling cutter[J]. *Surface technology*, 2017, 46(6): 125-130.
- [18] GARRELIE F, LOIR A S, DONNET C, et al. Femtosecond pulsed laser deposition of diamond-like carbon thin films for tribological applications[J]. *Surface & coatings technology*, 2003, 163(2): 306-312.
- [19] MESKINIS Š, CIEGIS A, VASILIAUSKAS A, et al. Optical properties of diamond like carbon films containing copper, grown by high power pulsed magnetron sputtering and direct current magnetron sputtering: structure and composition effects[J]. *Thin solid films*, 2015, 581: 48-53.
- [20] SHENG R, LI L, SU D, et al. Effect of unbonded hydrogen on amorphous carbon film deposited by PECVD with annealing treatment[J]. *Diamond and related materials*, 2018, 81: 146-153.
- [21] ERDEMIR A. The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films[J]. *Surface & coatings technology*, 2001, 146(1): 292-297.
- [22] ANDERSSON J, ERCK R A, ERDEMIR A. Friction of diamond-like carbon films in different atmospheres[J]. *Wear*, 2003, 254(11): 1070-1075.
- [23] MARINO M J, HSIAO E, CHEN Y, et al. Understanding run-in behavior of diamond-like carbon friction and preventing diamond-like carbon wear in humid air[J]. *Langmuir*, 2011, 27(20): 12702-12708.
- [24] RONKAINEN H, VARJUS S, KOSKINEN J, et al. Differentiating the tribological performance of hydrogenated and hydrogen-free DLC coatings[J]. *Wear*, 2001, 249(3/4): 260-266.
- [25] ERDEMIR A, ERYILMAZ O L, KIM S H. Effect of tribochemistry on lubricity of DLC films in hydrogen[J]. *Surface & coatings technology*, 2014, 257: 241-246.
- [26] ZHANG T F, WU B J, DENG Q Y, et al. Effect of a hydrogenated interface on the wear behavior of a diamond-like carbon film in a water environment[J]. *Diamond and related materials*, 2017, 74: 53-58.
- [27] BHOWMICK S, ALPAS A T. The role of diamond-like carbon coated drills on minimum quantity lubrication drilling of magnesium alloys[J]. *Surface & coatings technology*, 2011, 205(23/24): 5302-5311.
- [28] MASLOV A R. Influence of diamond-like antifrictional coatings on the reliability of dry milling[J]. *Russian engineering research*, 2017, 37(1): 46-48.