微米及纳米金刚石涂层扁钻的制备及其切削性能

向道辉，郭振海，冯浩人，姚云龙，刘中云，赵波

（河南理工大学 机械与动力工程学院，河南 焦作 454000）

摘 要：目的 研究微米金刚石薄膜（Microcrystalline diamond film，MCD film）和纳米金刚石薄膜（Nanocrystalline diamond film，NCD film）的微观组织结构和表面质量，以及由两种薄膜涂覆制成的微米金刚石涂层扁钻（MCD coated spade drill）和纳米金刚石涂层扁钻（NCD coated spade drill）在切削碳纤维增强复合材料（Carbon fiber reinforced plastics，CFRP）时的切削性能。**方法** 采用热丝化学气相沉积法在硬质合金扁钻上分别制备 MCD 薄膜和 NCD 薄膜。使用扫描电子显微镜观察金刚石薄膜的表面和横截面形貌，利用白光干涉表面轮廓仪测量薄膜的表面粗糙度值，使用拉曼光谱仪检测薄膜的结构成分，利用 X 射线衍射仪（XRD）检测薄膜的晶体结构和晶面取向，通过切削实验分析无涂层刀具和微、纳米涂层刀具的切削性能。**结果** 制成的 MCD 和 NCD 薄膜涂覆均匀，两种薄膜的厚度都为 8 μm，晶面取向均以(111)面和(220)面为主。MCD 薄膜晶粒棱角分明，平均晶粒尺寸为 2~3 μm，NCD 薄膜的表面更光滑，平均晶粒尺寸为 100 nm。MCD 和 NCD 薄膜测定区域的表面粗糙度值分别为 0.4 μm 和 0.24 μm。在相同的切削条件下，无涂层刀具钻削 30 个孔后，刀具已经达到了报废标准，不能继续使用。两种金刚石涂层刀具各钻削 50 个孔后，MCD 和 NCD 涂层刀具后刀面的最大磨损量分别为 0.192 mm 和 0.093 mm，均没有超过磨钝标准 VB=0.2 mm（后刀面磨损带宽度），其中 NCD 涂层刀具的耐磨性最好。**结论** MCD 和 NCD 薄膜，尤其是 NCD 薄膜，能够有效地提高硬质合金刀具的耐磨性，延长刀具的使用寿命。

关键词：热丝化学气相沉积；MCD 薄膜；NCD 薄膜；扁钻；切削性能

中图分类号：TG174.44 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)08-0113-08

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.017

Fabrication and Cutting Performance of Micro- and Nano-crystalline Diamond Coated Spade Drills

XIANG Dao-hui, GUO Zhen-hai, FENG Hao-ren, YAO Yun-long, LIU Zhong-yun, ZHAO Bo

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

ABSTRACT: The work aims to study microstructure and surface quality of microcrystalline diamond film (MCD film) and NCD film (nanocrystalline diamond film), as well as cutting performance of MCD and NCD coated spade drills made from MCD and NCD films in cutting carbon fiber reinforced plastics (CFRP). The method of HFCVD was used to deposit MCD and NCD films on the surface of cemented carbide spade drills. Scanning electron microscope (SEM) was applied to observe surface and cross-sectional morphology of as-deposited diamond films, white-light interferometry was adopted to measure surface

收稿日期：2018-03-19；修订日期：2018-05-22

Received：2018-03-19；**Revised**：2018-05-22

基金项目：国家自然科学基金资助项目（U1604255）；高性能复杂制造国家重点实验室开放基金（Kfkt2017-09）；河南省自然科学基金（182300410200）

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1604255)；Open Foundation of High Performance Complex Manufacturing State Key Laboratory (Kfkt2017-09)；Henan Provincial Natural Science Foundation of China (182300410200)

作者简介：向道辉（1971—），男，博士，副教授，主要研究方向为化学气相沉积金刚石涂层技术。

Biography：XIANG Dao-hui (1971—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: CVD diamond coating technology.

roughness of the films, Raman spectroscopy was used to assess structural components of the films, X-ray diffractometer (XRD) was used to characterize crystal structure and crystal orientation of the films, and cutting experiment was performed to investigate cutting performance of uncoated tool as well as as-deposited MCD and NCD coated tool. The two kinds of films were evenly coated with diamond grains on the tool, both films were 8 μm thick, and crystal orientations were mainly in direction (111) and (220). The diamond grains of MCD film displayed pyramid structures with sharp edges and corners, the average grain size was about 2~3 μm. MCD film contained angular grains, and average grain size was 2~3 μm; and NCD film had a smoother surface, and average grain size was about 100 nm. Surface roughness value *Ra* of the MCD and NCD films in measured areas was 0.4 μm and 0.24 μm, respectively. Under the same cutting conditions, the uncoated tool reached rejection standardand could not be used any more after drilling 30 holes. After drilling 50 holes, MCD and NCD coated tools sustained the maximum abrasion loss of 0.192 mm and 0.093 mm, respectively on the flank, and none of them exceeded dullness standard VB=0.2 mm (width of flank wear land). The NCD coated tool exhibited the best wear resistance.The MCD and NCD films, especially NCD film, can effectively improve wear resistance of carbide cutting tools and extend service lives of the tools.

KEY WORDS: HFCVD; MCD film; NCD film; spade drill; cutting performance

金刚石薄膜由于具备耐磨性好、硬度高、摩擦系数低、导热系数高等优点，在机械制造领域被广泛用作刀具的保护涂层[1-2]。化学气相沉积法（CVD）是制备金刚石薄膜的一种有效方法，在众多化学气相沉积法中，热丝化学气相沉积法（HFCVD）由于设备结构简单、成本低廉、易于操作、适合沉积复杂形状刀具薄膜等优点，在制备金刚石薄膜方面得到了广泛应用，其制成的金刚石薄膜性质与天然金刚石接近[3-4]。

碳纤维增强复合材料（CFRP）是一种先进的树脂基复合材料，这种材料的热膨胀系数低、比强度高、耐腐蚀性强，在军事、航空航天、汽车制造业等领域获得了大量应用[5-8]。同时，由于 CFRP 材料的各向异性、层间结合强度低等特点，CFRP 也是一种典型的难加工材料。在使用普通硬质合金刀具加工 CFRP 的过程中，硬质合金刀具磨损严重，加工效率低。另外，CFRP 的加工质量也存在很多缺陷，例如纤维拔出、表面分层、表面粗糙度差等。大量研究表明，将金刚石薄膜用热丝化学气相沉积法涂覆在硬质合金刀具表面制成金刚石涂层刀具，可以明显提高刀具的切削性能和改善工件的加工质量[9-10]。然而，在拥有复杂形状的扁钻刀具表面涂覆微纳米金刚石薄膜，相关研究还比较少。

文中在硬质合金材质的扁钻表面分别涂覆了微米金刚石薄膜和纳米金刚石薄膜，对两种金刚石薄膜进行了表征。切削实验中，使用 CFRP 作为加工材料，对比了无涂层扁钻、微米金刚石涂层扁钻和纳米金刚石涂层扁钻的切削性能，探讨了金刚石薄膜对刀具使用寿命的影响。

1 实验

1.1 涂层刀具的制备

采用热丝化学气相沉积法在硬质合金材质的扁钻上沉积两种不同的金刚石薄膜，分别为微米金刚石（MCD）薄膜和纳米金刚石（NCD）薄膜，热丝沉积装置及其真空反应室如图 1 所示。试验中，硬质合金扁钻的牌号为 YG6，成分为 WC+6%Co（钴的质量分数为 6%），扁钻的长度为 80 mm，刀柄直径为 10 mm，刀头部分长度为 30 mm，采用直径为 0.6 mm 的钽丝作为热丝。

由于硬质合金基体中作为粘结剂的 Co 具有催石墨化特性，在金刚石薄膜的制备过程中，Co 可以使含碳基团以石墨的形式沉积出来，导致金刚石成分不纯，影响膜基之间的结合强度和金刚石薄膜的质量，因此在沉积金刚石薄膜之前，需要对硬质合金基体进行预处理，去除基体表面的 Co，增强基体表面与金刚石薄膜之间的附着强度[11]。采用酸碱两步处理法进行预处理：第一步，在 Murakami 碱溶液（10 g $K_3[Fe(CN)]_6$+10 g KOH+100 mL H_2O）中超声清洗 30 min，目的是刻蚀硬质合金基体表面的 WC，使 Co 暴露在基体表面；第二步，在 30%H_2SO_4+70%H_2O_2（体积比）溶液中去除暴露在基体表面的 Co，时间为 60 s。然后，在金刚石悬浊液中超声振动 60 min，悬浊液由 4~6 nm 和 0~100 nm 的金刚石粉各 0.1 g 与 20 mL 丙酮溶液组成，该过程可以使尺寸较小的金刚石粉末留在基体表面，直接作为金刚石晶核，有利于增加金刚石的形核密度。最后，在丙酮溶液中超声清洗 10 min[12]。

制备 MCD 薄膜时，真空反应室中的反应气体为氢气和丙酮气体，丙酮气体由氢气带入反应室。制备 NCD 薄膜时，除了氢气和丙酮气体，氩气也参与了反应，氩气的引入有利于得到尺寸更小的纳米级金刚石颗粒。在沉积过程中，使用热电偶来测量基体温度，采用红外测温仪（RAYTEK，MR1SC）测量热丝温度，基体温度保持在 850 ℃左右，热丝温度控制在 2200 ℃左右。金刚石薄膜的制备分成两个阶段，即成核阶段和生长阶段。制备 MCD 薄膜时使用成核阶段和生长阶段 I 的工艺参数，制备 NCD 薄膜时使用



a　热丝化学气相沉积装置　　b　真空反应室

图 1　热丝化学气相沉积装置及真空反应室

Fig.1 Hot filament chemical vapor deposition (HFCVD) apparatus (a) and vacuum reaction chamber (b)

成核阶段和生长阶段 II 的工艺参数，制备 MCD 和 NCD 薄膜的工艺参数如表 1 所示。

表 1　MCD 和 NCD 薄膜的沉积工艺参数

Tab.1 Deposition process parameters of MCD and NCD films

Parameters	Nucleation period	Growth period I (for depositing MCD film)	Growth period II (for depositing NCD film)
Acetone/H_2/Ar flow/(mL·min^{-1})	60/200/0	50/200/0	50/250/250
Reaction pressure/kPa	1.8	3.3	1.8
Bias current/A	3.0	2.0	2.0
Deposition time/h	0.5	4	7

1.2　涂层的表征

采用日本 HIROX（浩视）公司生产的 SH-4000M 型扫描电镜（Scanning electron microscope，SEM），观察金刚石薄膜的表面和横截面形貌特征，扫描电镜在高真空状态 SE 模式下工作，加速电压为 20 kV，金刚石薄膜的横截面利用线切割方法获得。使用英国泰勒霍普森公司生产的 Talysurf CCI6000 型白光干涉表面轮廓仪（White-light interferometry）检测制成的 MCD 和 NCD 薄膜的表面粗糙度，扫描方式为线扫描，取 5 组线扫描数据的平均值作为薄膜的表面粗糙度值。采用法国 Horiba Jobin Yvon 公司生产的 Lab-RAM HR800 型拉曼光谱仪（Raman spectroscopy）检测金刚石薄膜的结构成分，拉曼光使用的激光为 Ar^+ 激光，其波长为 632.8 nm。利用德国布鲁克 AXS 公司生产的 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪（X-Ray Diffraction，XRD）检测薄膜的晶体结构和晶面取向。

1.3　钻削试验

无涂层刀具、MCD 和 NCD 涂层刀具的钻削试验在沈阳第一机床厂生产的立式加工中心（VMC-850）上进行，该加工中心的主轴钻速为 50~8000 r/min，主轴功率为 11 kW，进给速度为 1~10 000 mm/min，切削方式为干切削。被加工材料选用碳纤维增强复合材料（Carbon fiber reinforced polymer plastic，CFRP）。碳纤维增强复合材料主要的材料特性以及切削实验的参数见表 2。刀具的使用寿命以最大后刀面磨损量来评估，取磨钝标准 VB=0.2 mm。采用日本基恩士公司生产的 VHX-2000 超景深三维显微镜测量刀具后刀面的磨损量。此外，刀具的磨损形貌也采用此三维显微镜观察。

表 2　碳纤维增强复合材料主要的材料特性以及钻削参数

Tab.2 Main material properties and drilling parametersof CFRP

Base material	Reinforcing material	Laying angel /(°)	Fiber volume fraction/%	Spindle speed /(r·min^{-1})	Feed rate /(mm·r^{-1})
Epoxy resin	T700	±45、0、90、0	60±5	6000	0.02

2　结果及讨论

2.1　MCD/NCD 薄膜的表征

图 2 为 MCD 和 NCD 涂层扁钻的整体形貌。从图 2 可以看到，两种刀具的表面都均匀地涂覆上了金刚石薄膜，薄膜连续且颜色均匀，无剥落现象。

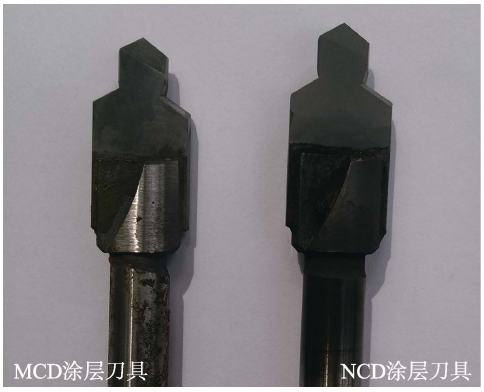
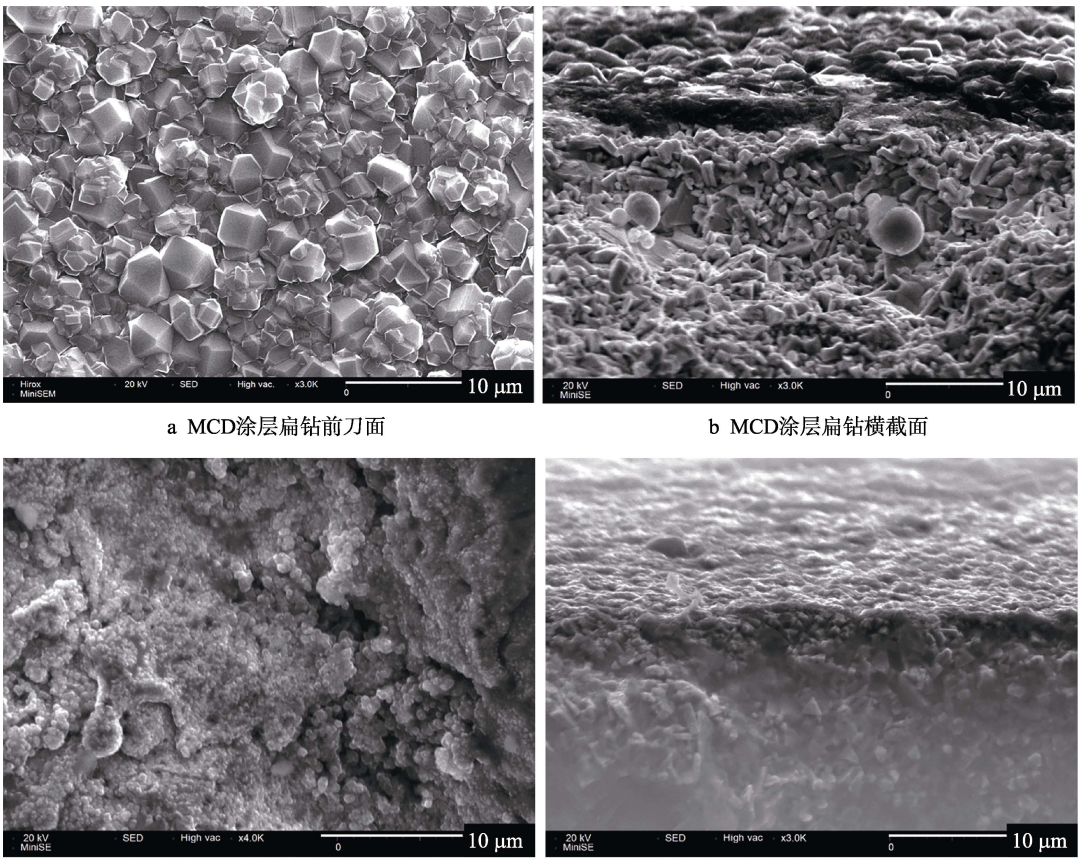


图 2　MCD 和 NCD 涂层刀具
Fig.2 Surface morphology of MCD and NCD coated tools

MCD 和 NCD 涂层扁钻前刀面和横截面的 SEM 形貌如图 3 所示。从图 3a 可以看出，经过 4 h 的连续生长，MCD 薄膜的金刚石晶粒大小均匀，棱角分明，平均晶粒尺寸为 2~3 μm，相邻晶粒之间存在明显的晶界。从图 3b 可以看出，涂覆的 MCD 薄膜的厚度大约为 8 μm。对于 NCD 薄膜而言，表面由许多尺寸较小的纳米金刚石晶粒组成，这些晶粒以菜花状晶粒团簇的形式分布在刀具表面，平均晶粒尺寸为 100 nm，如图 3c 所示。菜花状团簇结构的形成主要是由于在薄膜的制备过程中，金刚石晶粒具有较高的二次成核率所致[2]。图 3d 中 NCD 薄膜经过 7 h 的生长，厚度也为 8 μm。

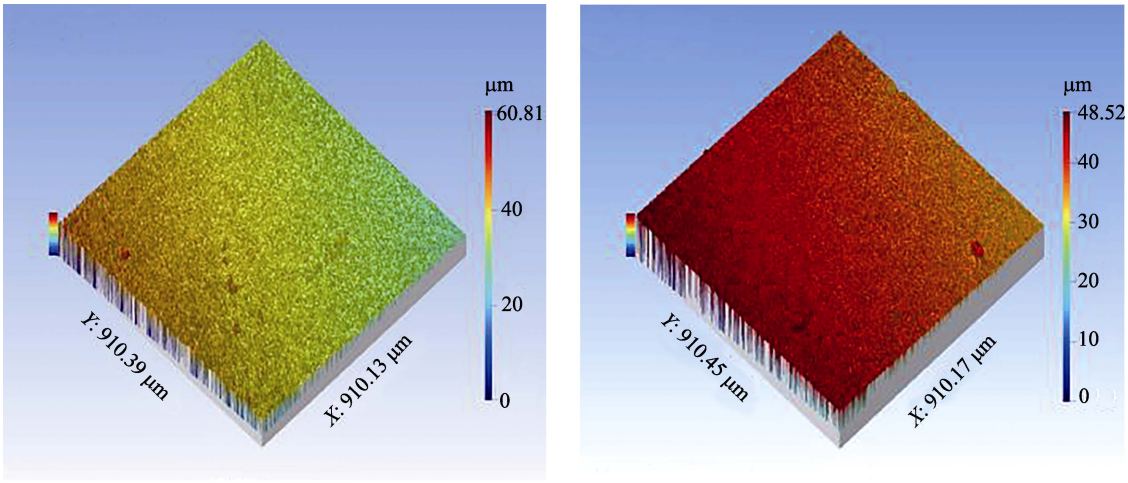
采用白光干涉表面轮廓仪对 MCD 和 NCD 薄膜的表面粗糙度进行检测，扫描面积为 910 μm×910 μm，两种金刚石薄膜的 3D 形貌如图 4 所示。从图 4 可以看出，NCD 薄膜的表面相对于 MCD 薄膜表面更加光滑平整，晶粒也更加细小。对两种薄膜分别进行 5 次线扫描，扫描长度为 6.5 μm，MCD 薄膜 5 次线扫描的 *Ra* 值分别为 0.4222、0.2084、0.4102、0.2128、0.7464 μm，NCD 薄膜 5 次线扫描的 *Ra* 值分别为 0.2019、0.1125、0.2961、0.3027、0.2878 μm，分别对 5 次扫描结果求平均值，得到 MCD 薄膜的表面粗糙度值 *Ra*=0.4 μm，NCD 薄膜的表面粗糙度值 *Ra*=0.24 μm。从线扫描的结果上也可以看出，NCD 薄膜的表面粗糙度更小，表面更加光滑。



a MCD涂层扁钻前刀面　　b MCD涂层扁钻横截面

c NCD涂层扁钻前刀面　　d NCD涂层扁钻横截面

图 3　MCD 和 NCD 涂层扁钻前刀面和横截面 SEM 图
Fig.3 SEM images of rake face and cross section on MCD and NCD coated spade drills



a MCD薄膜　　b NCD薄膜

图 4　MCD 和 NCD 薄膜的 3D 形貌图

Fig.4 3D Surface morphology of as-deposited MCD (a) and NCD (b) films

使用拉曼光谱仪检测 MCD 和 NCD 薄膜的结构成分及其表面质量，两种金刚石薄膜检测区域的分析结果如图 5 所示。从图 5 可以得出，MCD 和 NCD 薄膜的金刚石特征峰分别是 1339.97 cm^{-1} 和 1325.98 cm^{-1}，距金刚石的标准峰 1332 cm^{-1} 均出现了少量偏移，这是由于金刚石薄膜在生长和冷却过程中内部产生了残余应力，应力使金刚石的晶格发生变形，从而引起了金刚石薄膜特征峰的偏移[13]。对于 MCD 薄膜，在 1339.97 cm^{-1} 处尖锐的金刚石特征峰表明，金刚石薄膜主要由 sp^3 结构的多晶金刚石构成，其拉曼曲线光滑，表明金刚石的成分纯正，在 1488.29 cm^{-1} 附近还有一个较弱的特征峰，这是由反式聚乙炔引起的[14]。与 MCD 薄膜相比，NCD 薄膜在 1332 cm^{-1} 附近的特征峰更宽，这表明在 NCD 薄膜中，纳米金刚石晶粒逐渐增多[15]。代表石墨相结构的 G 峰（1580 cm^{-1}）也很明显，它是由薄膜中的 sp^2 成分引起的，这是 NCD 薄膜晶粒尺寸达到纳米尺度的重要特征[16]。NCD 薄膜在 1400~1600 cm^{-1} 区域内具有较高的散射密度，表明金刚石晶粒尺寸已达纳米级别。

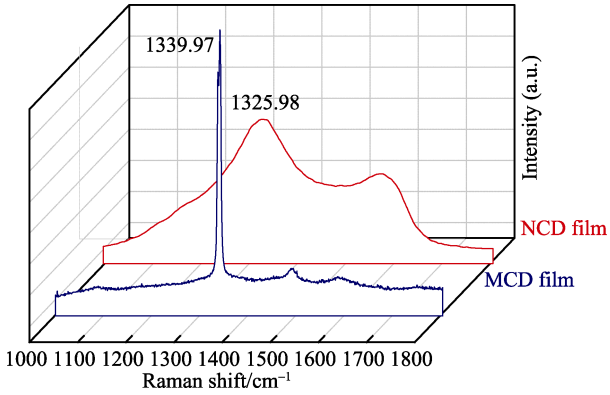


图 5　MCD 和 NCD 薄膜的拉曼光谱图

Fig.5 Raman spectrum of as-deposited MCD and NCD films

薄膜的晶面取向使用 X 射线衍射仪检测，分析结果如图 6 所示。从图 6 可以看出，MCD 和 NCD 薄膜的晶面取向都以(111)面和(220)面为主，这说明它们均具有完整的晶体结构。对于 MCD 薄膜，其尖锐的(111)面特征峰较 NCD 薄膜更强，这导致了 MCD 薄膜具有较大的表面粗糙度。NCD 薄膜(111)面拥有

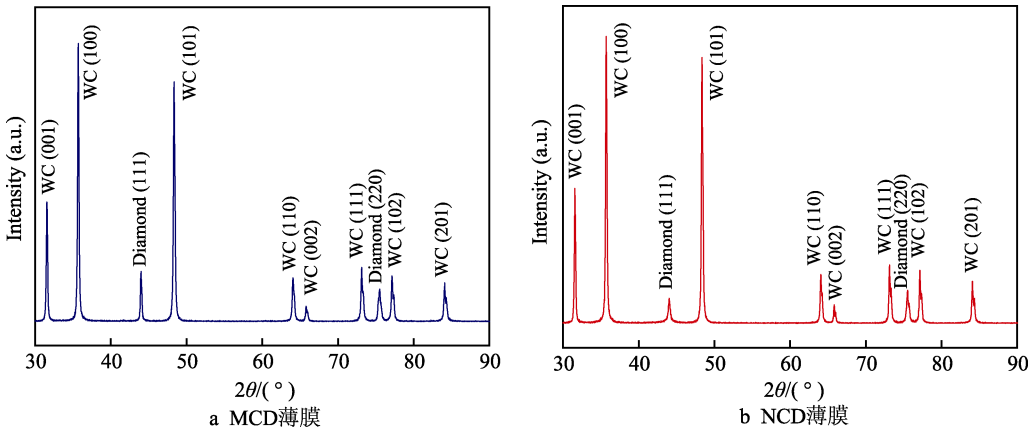


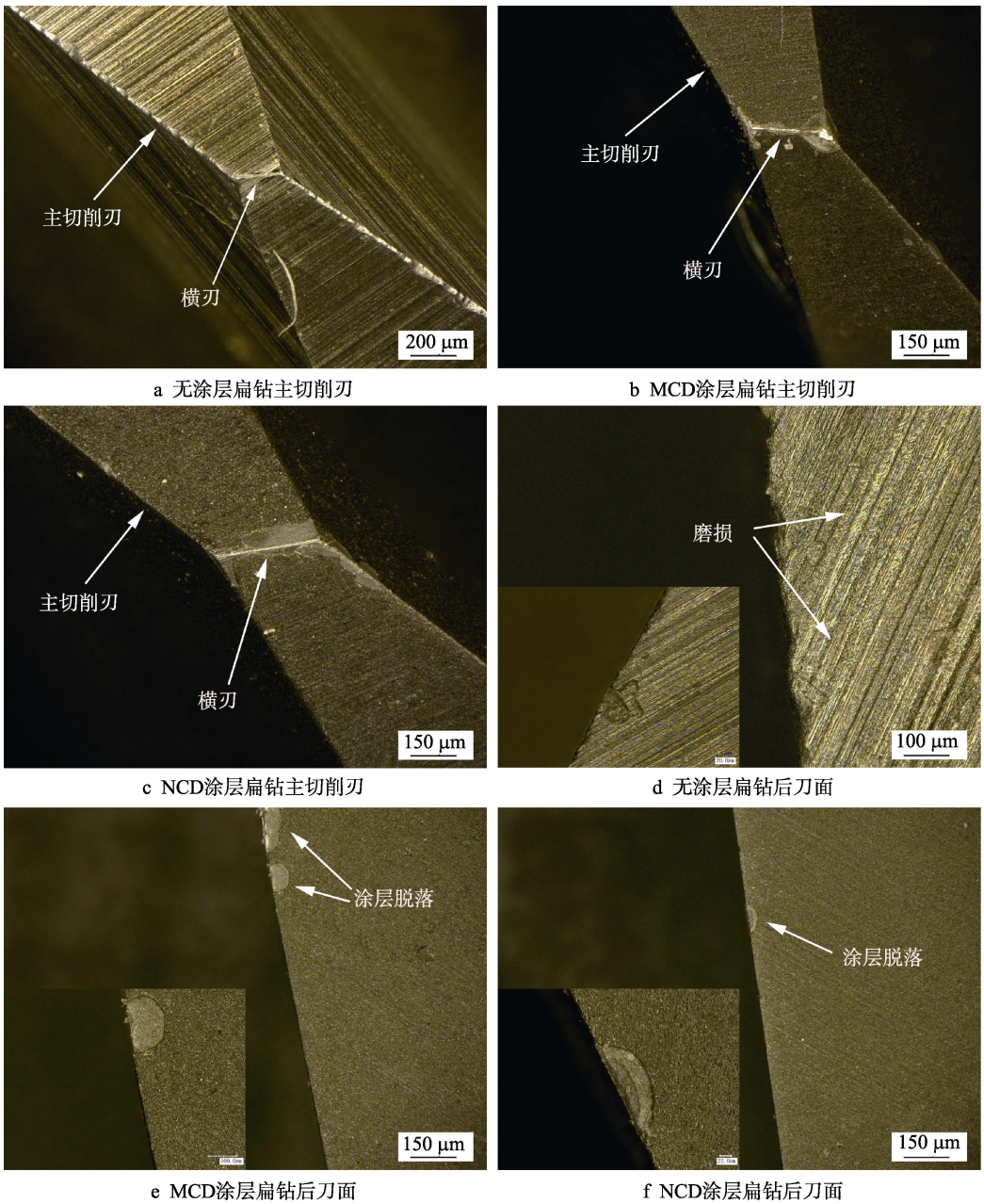
图 6　MCD 和 NCD 薄膜的 XRD 光谱图

Fig.6 XRD patterns of MCD film (a) and NCD film (b)

更宽的衍射峰半高宽，其衍射角度达到了 0.8°，而 MCD 薄膜的衍射角为 0.30°左右，这表明 NCD 薄膜金刚石晶粒尺寸已达纳米级，且薄膜表面含有较多的晶界区域[17]。

2.2　MCD/NCD 涂层扁钻的切削性能

采用碳纤维增强复合材料（CFRP）作为加工材料来比较无涂层、MCD 涂层和 NCD 涂层扁钻的切削性能。图 7 是无涂层扁钻钻削 30 个孔及涂层扁钻钻削 50 个孔后，刀具主切削刃、横刃和后刀面的磨损形貌。图 7a—c 为三种刀具主切削刃和横刃的磨损图，从图中可以看出，三种刀具呈现出了不同的磨损形貌，其中无涂层刀具的磨损最严重，其主切削刃和横刃上出现了明显的崩刃，这种现象大大缩短了刀具的使用寿命，同时严重影响了工件的加工质量。与无涂层刀具相比，由于涂覆在刀具表面的金刚石薄膜具有优良的耐磨性，钻削 50 个孔后，两种涂层刀具的主切削刃和横刃上的薄膜只有轻微脱落，其中，NCD 涂层刀具拥有最好的表面磨损形貌。图 7d—f 为三种刀具后刀面的磨损图，可知无涂层刀具的后刀面在经历了剧烈的磨损后出现了大面积凹坑，两种涂层刀具的后刀面只有涂层脱落，NCD 涂层刀具涂层脱落的面积最小，展现出了最好的耐磨性。这是因为 NCD 涂层刀具表面的薄膜由纳米尺寸的金刚石晶粒组成，这种薄膜拥有更小的表面粗糙度，在加工过程中，其表面摩擦力更小，耐磨性也更好。



a 无涂层扁钻主切削刃　　b MCD涂层扁钻主切削刃

c NCD涂层扁钻主切削刃　　d 无涂层扁钻后刀面

e MCD涂层扁钻后刀面　　f NCD涂层扁钻后刀面

图 7　无涂层扁钻钻削 30 个孔和涂层扁钻钻削 50 个孔后主切削刃和后刀面的磨损图

Fig.7 Wear of main cutting edge and flank of uncoated spade drill after drilling 30 holes and coated spade drills after drilling 50 holes

图 8 为三种刀具后刀面的最大磨损量随钻孔数量变化的曲线。由图 8 可知，无涂层刀具表面由于没有金刚石涂层的保护，后刀面的磨损量在钻削初期急剧增加，钻削 30 个孔后，后刀面的最大磨损量为 0.234 mm，已经超过了 0.2 mm 的磨钝标准，刀具达到报废标准，不能继续进行加工。MCD 和 NCD 涂层刀具后刀面的磨损率要远远小于无涂层刀具，加工 50 个孔后，两种刀具后刀面的最大磨损量均未超过磨钝标准。MCD 涂层刀具在加工 30 个孔后，薄膜开始有明显的脱落，后刀面的磨损率开始增加，最大磨损量由加工 30 个孔时的 0.089 mm 迅速增加到加工 40 个孔时的 0.149 mm，钻削 50 个孔后，后刀面的最大磨损量为 0.192 mm。对于 NCD 涂层刀具，在整个加工过程中，刀具的磨损曲线一直比较平缓，没有出现较大的波动，钻削结束时，其最大后刀面的磨损量仅为 0.093 mm，远远小于无涂层刀具和 MCD 涂层刀具的磨损量。这表明金刚石涂层能够有效地延长硬质合金刀具的使用寿命，其中 NCD 涂层的效果最为明显。

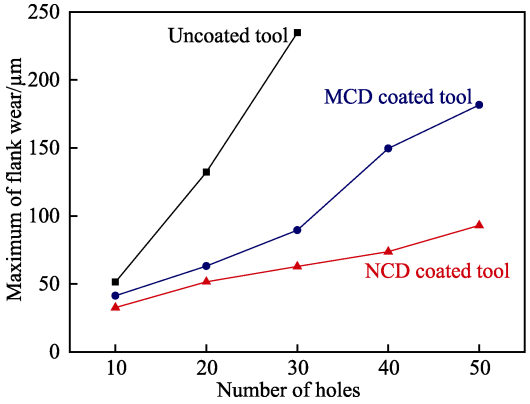


图 8　无涂层扁钻、MCD 和 NCD 涂层扁钻后刀面磨损曲线

Fig.8 Wear curves of flanks of uncoated, MCD and NCD coated spade drills

3　结论

1）采用热丝化学气相沉积法在硬质合金扁钻上分别制备了微米金刚石薄膜和纳米金刚石薄膜，涂覆的金刚石薄膜连续均匀，无明显缺陷，厚度均为 8 μm，表面形貌较好。

2）MCD 和 NCD 薄膜金刚石的晶面取向均以(111)面和(220)面为主，MCD 薄膜平均晶粒尺寸为 2~3 μm，相邻晶粒之间存在明显的晶界，尖锐的金刚石(111)面使 MCD 薄膜具有较大的表面粗糙度。NCD 薄膜表面由纳米尺寸的金刚石晶粒组成，以菜花状金刚石晶粒团簇的形式分布在刀具表面，平均晶粒尺寸为 100 nm，菜花状团簇结构的形成主要是金刚石晶粒具有较高的二次成核率所致。MCD 薄膜的表面粗糙度值 *Ra*=0.4 μm，NCD 薄膜的表面粗糙度值 *Ra*=0.24 μm，NCD 薄膜的表面粗糙度值明显小于 MCD 薄膜的表面粗糙度值。

3）切削实验中，在相同的加工参数下，无涂层刀具钻削 30 个孔，两种涂层刀具分别钻削 50 个孔。结果表明，无涂层刀具的主切削刃、横刃以及后刀面的磨损率明显高于 MCD 和 NCD 涂层刀具，金刚石涂层对硬质合金刀具起到了较好的保护作用，与 MCD 涂层刀具相比，NCD 涂层刀具的耐磨性更好，纳米尺寸的金刚石晶粒能够有效地降低刀具表面的粗糙度值，延长刀具的切削寿命。

参考文献：

[1] ZHANG Jian-guo, WANG Xin-chang, SHEN Bin, et al. Effect of deposition parameters on micro-and nano-crystalline diamond films growth on WC-Co substrates by HFCVD[J]. Transactions of nonferrous metals society of china, 2014, 24(10): 3181-3188.

[2] SHEN Bin, SUN Fang-hong. Deposition and friction properties of ultra-smooth composite diamond films on Co-cemented tungsten carbide substrates[J]. Diamond and related materials, 2009, 18(2-3): 238-243.

[3] WANG Xin-chang, SHEN Xiao-tian, SUN Fang-hong, et al. Mechanical properties and solid particle erosion of MCD films synthesized using different carbon sources by BE-HFCVD[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2016, 54: 370-377.

[4] WANG Xin-chang, ZHAO Tian-qi, SUN Fang-hong, et al. Comparisons of HFCVD diamond nucleation and growth using different carbon sources[J]. Diamond and related materials, 2015, 54: 26-33.

[5] ZHANG Jian-guo, WANG Xin-chang, SHEN Bin, et al. Effect of boron and silicon doping on improving the cutting performance of CVD diamond coated cutting tools in machining CFRP[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2013, 41:285-292.

[6] LIN S C, CHEN I K. Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed[J]. Wear, 1996, 194(1-2): 156-162.

[7] LLIESCU D, GEHIN D, GUTIERREZ M E, et al. Modeling and tool wear in drilling of CFRP[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2010, 50(2): 204-213.

[8] GAUGEL S, SRIPATHY P, HAEGER A, et al. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)[J]. Composite structures, 2016, 155: 173-183.

[9] DUMPALA R, CHANDRAN M, MADHAVAN S, et al. High wear performance of the dual-layer graded composite diamond coated cutting tools[J]. International journal of

refractory metals and hard materials, 2015, 48: 24-30.

[10] CUI Yu-xiao, WANG Wei-song, SHEN Bin, et al. A study of CVD diamond deposition on cemented carbide ball-end milling tools with high cobalt content using amorphous ceramic interlayers[J]. Diamond and related materials, 2015, 59: 21-29.

[11] 沈彬, 孙方宏, 张志明, 等. CVD 金刚石薄膜涂层整体式刀具的制备与应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011(1): 1-5.
SHEN Bin, SUN Fang-hong, ZHANG Zhi-ming, et al. Fabrication and application of CVD diamond coated cutting tools[J]. Diamondand abrasives engineering, 2011(1): 1-5.

[12] WANG Tao, XIANG Li, SHI Wei, et al. Deposition of diamond/β-SiC/Cobalt silicide composite interlayers to improve adhesion of diamond coating on WC-Co substrates by DC-plasma assisted HFCVD[J]. Surface and coatings technology, 2011, 205(8-9): 3027-3034.

[13] AlMEIDA F A, AMARAL M, OLIVEIRA F J, et al. Nano to micrometric HFCVD diamond adhesion strength to Si_3N_4[J]. Vacuum, 2007, 81(11-12): 1443-1447.

[14] PFEIFFER R, KUZMANY H, KNOLL P, et al. Evidence for trans-polyacetylene in nano-crystalline diamond films[J]. Diamond and related materials, 2003, 12(3-7): 268-271.

[15] FU Yong-qing, YAN Bibo, LOH N L, et al. Characterization and tribological evaluation of MW-PACVD diamond coatings deposited on pure titanium[J]. Materials science and engineering A, 2000, 282(1-2): 38-48.

[16] FERRARI A C, ROBERTSON J. Origin of the 1150 cm^{-1} raman mode in nanocrystalline diamond[J]. Physical review B, 2001, 63(12): 121405.

[17] SHEN Xiao-tian, WANG Xin-chang, SUN Fang-hong, et al. Sandblasting pretreatment for deposition of diamond films on WC-Co hard metal substrates[J]. Diamond and related materials, 2017, 73: 7-14.