

氮化硅表面生长金刚石薄膜及其摩擦磨损性能研究

张珂¹, 姜云浩¹, 陆峰¹, 刘鲁生², 翟朝峰², 黄楠²

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国科学院金属研究所
沈阳材料科学国家(联合)实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要 目的 研究金刚石耐磨涂层的摩擦磨损性能, 以提高工件的使用寿命. 方法 利用微波等离子体化学气相沉积技术在氮化硅陶瓷基体表面制备金刚石薄膜. 采用扫描电子显微镜、原子力显微镜和拉曼光谱仪对不同参数的金刚石薄膜进行结构表征, 利用球-盘式摩擦磨损试验机在干摩擦条件下对薄膜的摩擦学性能进行研究. 结果 制备的金刚石薄膜表面粗糙度小, 结合力良好; 金刚石涂层有效降低了氮化硅表面的摩擦因数与磨损率, 摩擦因数约为 0.12~0.25. 在微波功率 8 kW、腔体气压 6 kPa、甲烷体积分数 8% 的参数下制得的涂层具有最低的摩擦因数(0.12)和磨损率($1.18 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$). 结论 在氮化硅基体表面沉积金刚石薄膜可以提高氮化硅材料的摩擦磨损性能, 提高工件寿命.

关键词 金刚石; 氮化硅; 微波等离子体化学气相沉积; 微观结构; 摩擦磨损

中图分类号 TH161

文献标志码 A

Preparation and Tribology Property of Diamond Film on Silicon Nitride

ZHANG Ke¹, JIANG Yunhao¹, LU Feng¹, LIU Lusheng², ZHAI Zhaofeng², HUANG Nan²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 110016)

Abstract: In order to provide experimental basis for improving the service life and performance of the workpiece, the tribological properties of diamond wear resistant coatings were prepared and analyzed. In this work, diamond films on silicon carbide ceramic substrates are prepared by micro-

收稿日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51202257); 教育部长江学者创新团队发展计划滚动支持项目(IRT15_R45); 辽宁省高校创新团队支持计划项目(LT2014011); 辽宁省自然科学基金项目(20170540757); 国家(地方)联合工程实验室开放基金(SJSC-2015-1); 沈阳建筑大学学科提升项目(xkts2015-41)

作者简介: 张珂(1969—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事工程装备技术、精密加工技术研究.

wave plasma chemical vapor deposition (MPCVD) technique under the various experimental parameters. The scanning electron microscopy (SEM), Atom Force Microscopy (AFM) and Raman spectroscopy were adopted to study the microstructure of the deposited diamond films. The friction tests are conducted on a ball-on-plate type reciprocating friction tester in ambient air using Si_3N_4 balls as the mating materials. The results indicate that as-deposited diamond films at certain conditions have continuous dense, small surface roughness and good adhesion. The friction experiments present that diamond coating lowers the friction coefficient and wear rate, and the friction coefficient of diamond films are 0.12 – 0.25. The coating with the parameters of microwave power 8kW, the cavity pressure 6kPa, the 8% methane concentration has the lowest friction coefficient (0.12) and wear rate ($1.18 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$). It indicates that the diamond coating can improve the friction property of Si_3N_4 bearing and longer the lifetime.

Key words: diamond; silicon nitride; microwave plasma CVD; microstructure; friction and wear

氮化硅陶瓷材料相比于轴承钢而言具有耐高温、密度小、硬度高和耐腐蚀等优点,广泛应用于滚动轴承、切削工具、汽轮机叶片、密封环、模具等机械构件中^[1].但是,高速滚动轴承在启动阶段容易处于干摩擦环境中,具有较高的干摩擦因数(0.4~0.9),会导致氮化硅轴承寿命降低^[2],磨损严重,因此需要在氮化硅表面制备一层具备低摩擦因数、低磨损率的耐磨防护涂层,有效降低部件的机械磨损,延长轴承寿命,确保氮化硅轴承安全、长期和稳定运行^[3].化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)金刚石薄膜的硬度接近天然金刚石,具有摩擦因数低(0.1)、自润滑性能良好和化学稳定性高等优异性能,是一种优异的耐磨、减摩和保护性涂层材料^[4],广泛应用于轴承、切削刀具、拉拔模具和人工植牙等领域^[5-7].同时,氮化硅陶瓷材料与金刚石的热膨胀系数十分接近,可以降低薄膜与基体的热膨胀应力,在两者之间产生良好的结合力^[8].近年来,在氮化硅表面沉积金刚石薄膜用于保护氮化硅轴承表面的工作,已经有一些报道^[9-12].Liu等^[13]通过改变前处理工艺,研究了氮化硅表面金刚石的力学性能,证明金刚石薄膜与氮化硅基体具有很好的结合力,可以起到很好的保护基体的作用.因此,在氮化硅材料表面制备金刚石薄膜可以延长氮化硅轴承寿命.但是,目前关于不同金刚石微观结构对氮化硅表面摩擦磨损性能影响的研究还没有系统报道.

微波等离子体化学气相沉积技术是比较成熟的一种制备金刚石薄膜的方法,制得的金刚石薄膜质量好且纯度高^[14].笔者以氮化硅陶瓷材料为基体,采用微波等离子体化学气相沉积技术在氮化硅表面沉积金刚石薄膜,通过对制备参数的调节获得不同结构的金刚石薄膜结构,并对涂层的表面形貌和成分组成进行表征.同时,通过在干摩擦条件下的摩擦磨损试验,探讨氮化硅表面不同结构的金刚石薄膜的摩擦学性能及其保护作用,达到提高其表面硬度、降低摩擦因数、提高耐磨的目的.

1 实验方法

1.1 金刚石薄膜的制备

笔者采用 915 MHz 微波等离子体化学气相沉积设备在氮化硅基体表面制备金刚石及其复合薄膜,基本装置如图 1 所示.微波源产生的微波通过波导传到反应腔体,微波与反应腔体中的反应气体(氢气和甲烷)发生作用并产生等离子体球,等离子体球的尺寸与微波的功率成正比,与反应腔体内的气压成反比,等离子体球稳定在基底上方制备均匀金刚石薄膜.

试验目的是将金刚石薄膜应用于陶瓷轴承中,不仅要保护陶瓷轴承的内外圈,还要保护滚动体的寿命,保证滚动体在沉积金刚石薄膜的沟道中工作时不会被金刚石磨平,产

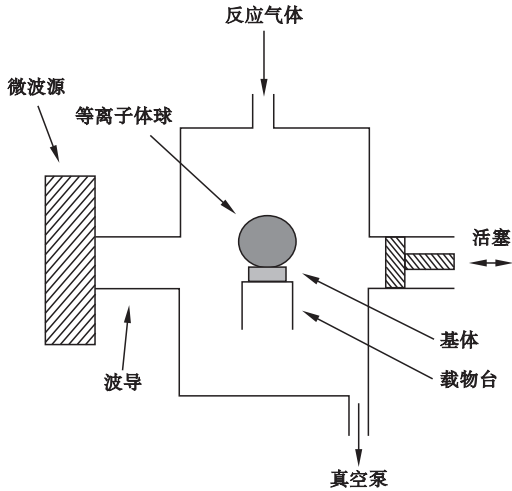


图1 微波等离子体化学气相沉积装置图

Fig.1 Sketch of microwave plasma CVD setup

生大量的切屑,降低陶瓷轴承的寿命. 影响金刚石薄膜质量的主要因素是甲烷浓度,制备金刚石薄膜时的气体是 CH_4/H_2 , 甲烷的主要作用是提供金刚石生长所需的碳原子,甲烷与氢气的体积比大小决定了金刚石的质量. 原子氢刻蚀石墨结构的速度远大于刻蚀金刚石结构的速度,因而有效地限制了石墨相的生长,创造有利于金刚石生长的条件. 但由于需要的不是纯度高的金刚石薄膜,所以在参数设计时适当加大甲烷浓度的比例,在固定的微波功率和腔体气压条件下,逐渐增大甲烷浓度,在金刚石薄膜中会产生石墨相,随着甲烷浓度的增加,薄膜的表面结构、表面粗糙度、化学成分组成都会有不同的变化.

基体为经过机械抛光的氮化硅方片($18\text{ mm}\times 18\text{ mm}$). 利用丙酮、酒精、去离子水分别超声清洗基片 3 min 进行清洗;清洗后在金刚石悬浊液中超声震荡 30 min ,提高基片表面形核密度;最后在酒精溶液中超声清洗 3 min ,用高压氮气吹干放置于干燥处待表面沉积涂层. 制备金刚石薄膜的反应气源为氢气和甲烷,分别控制反应功率、气压和气体流量控制生长金刚石薄膜,沉积时间 2 h ,具体实验参数见表1.

表1 沉积金刚石薄膜工艺参数

Table 1 Experimental of diamond films by MPCVD technique

微波功率/kW	腔体气压/kPa	氢气流量/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	甲烷流量/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	甲烷体积分数/%
8	6	400	24	6
			28	7
			32	8
			40	10
10	6	400	24	6
			28	7
			32	8
			40	10
10	7	400	24	6
			28	7
			32	8
			40	10

1.2 金刚石薄膜结构表征

利用场发射扫描电子显微镜、高分辨拉曼光谱和原子力显微镜对不同功率、腔体气压和甲烷/氢气比例生长的金刚石薄膜进行结构表征,研究实验参数对薄膜表面形貌、薄膜表面化学成分以及表面粗糙度的影响.

1.3 摩擦磨损实验

利用 MS - T3000 摩擦磨损试验机对氮化硅摩擦副在室温干摩擦环境中的摩擦磨损特性进行实验研究. 通过测量磨痕半径和深度计算磨损率. 具体实验参数见表2.

表2 摩擦磨损实验参数

Table 2 Experimental parameters of friction property

载荷/N	测量半径/mm	测量时间/min	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
3	6.5	120	200

2 结果与讨论

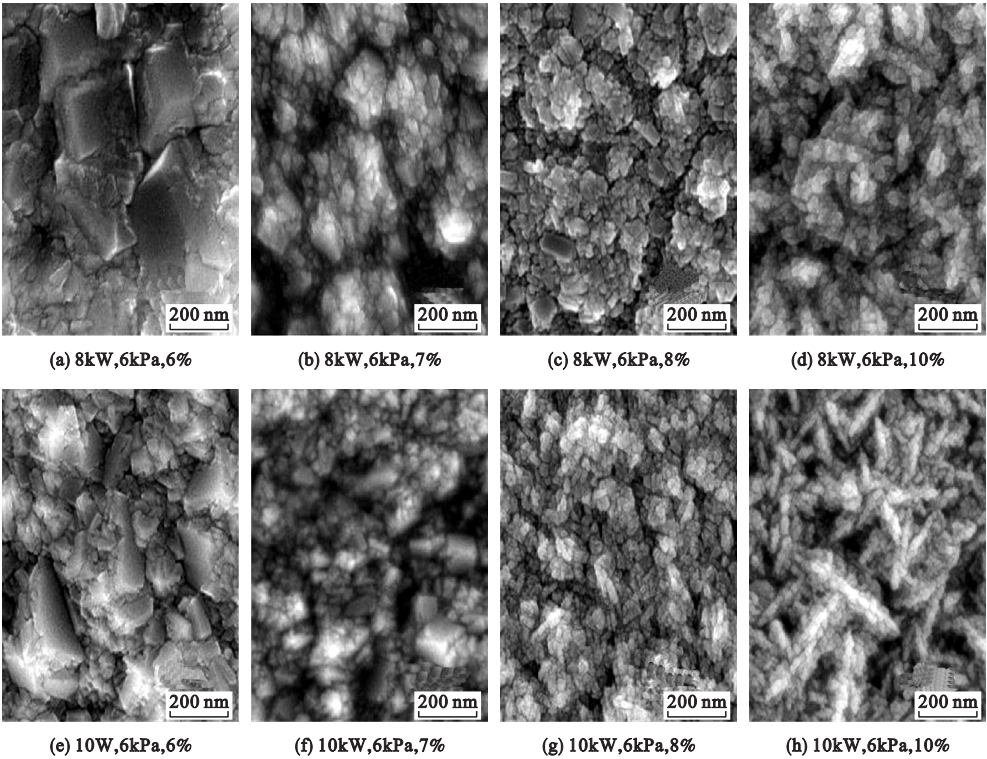
2.1 生长参数对氮化硅表面金刚石薄膜形貌的影响

图2为微波等离子体化学气相沉积法(MPCVD)技术在不同参数下氮化硅表面制

备的金刚石薄膜表面形貌图. 在微波功率为 8 kW,腔体气压 6 kPa,甲烷体积分数为 6% 的条件下(见图 2(a)),薄膜表面晶粒尺寸约为 200 ~ 300 nm,晶界处可以看到纳米金刚石颗粒;增加甲烷体积分数到 7% (见图 2(b))和 8% (见图 2(c)),可以看到薄膜表面晶粒尺寸逐渐减小,为纳米金刚石颗粒;继续增加甲烷体积分数至 10% (见图 2(d)),纳米晶金刚石团聚为线状形貌. 为了探讨金刚石薄膜生长,继续增加微波功率为 10 kW,可以看到,当甲烷体积分数为 6% (见图 2(e))时,薄膜表面颗粒尺寸为 150 ~ 200 nm,晶粒尺寸小于同等条件下的 8 kW 实验样品. 增加甲烷体积分数至 7% (见图 2(f))和 8% (见图 2(g))时,薄膜表面晶粒从微米晶金刚石转变为纳米晶金刚石,与 8kW 实验发现的规律一致;进一步增加甲烷体积分数至 10% (见图 2(h)),可以清楚看到薄膜表面由纳米晶金刚石演化成线状金刚石纳米结构. 当微波功率保证 10 kW 不变,增加腔体气压至 7 kPa,基片温度增加 50 ℃左右,可以

看到在甲烷体积分数为 6% (见图 2(i))时,薄膜已经由纳米晶金刚石颗粒构成;增加至 7% (见图 2(j))时,薄膜由线状金刚石结构构成,说明提高腔体温度,在较低甲烷体积分数下就可以生长线状金刚石纳米材料;当甲烷体积分数达到 8% 和 10% 时,金刚石线状结构更加明显.

综上所述,低温生长时(8 kW,6 kPa 和 10 kW,6 kPa),随着甲烷体积分数的提高,薄膜由微米晶转化为纳米晶,最后生长为线状金刚石结构;而在高温生长时(10 kW,7 kPa),薄膜开始就是由纳米金刚石构成,而后发展为线状金刚石结构. Vlasov 等^[15]在 Ar/CH₄/H₂/N₂ 混合气体里发现金刚石纳米结构,研究认为这是与氮气的添加有关. Arenal 等^[16]在 10% 的氮气下也得到了金刚石纳米结构,认为氮气降低了二次行核率形成 CN 成分,制造了一种金刚石纳米结构生长气氛. 笔者在无氮气的情况下,也制备得到了金刚石纳米结构,这种现象与高温高甲烷体积分数有关,相关生长机制有待深入研究.



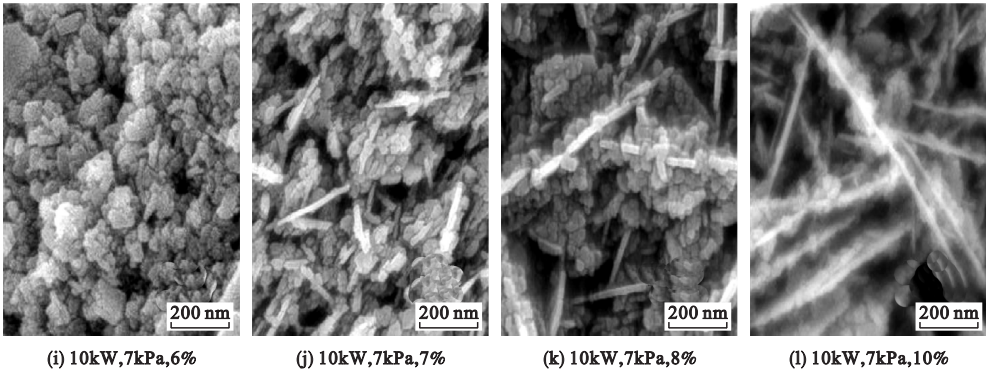


图 2 不同参数下金刚石薄膜表面形貌图

Fig. 2 Surface morphology of diamond films under different parameters

2.2 生长参数对氮化硅表面金刚石薄膜化学成分的影响

图 3 为采用 532 nm 波长激光器测试的金刚石薄膜表面拉曼光谱图。从图中可以看出,在微波功率为 8 kW 时,位于 $1\,332\text{ cm}^{-1}$ 的金刚石的特征峰与位于 $1\,550\sim 1\,580\text{ cm}^{-1}$ 处的 sp^2 键 C 产生的 G 峰清晰可见^[17]。随着甲烷体积分数的提高,G 峰与金刚石峰的比例逐渐增强,表明薄膜内金刚石相在逐渐减少。同理,在微波功率 10 kW、腔体气压 6 kPa 和微

波功率 10 kW、腔体气压 7 kPa 实验条件下,在低甲烷体积分数时,金刚石峰非常尖锐,相对的位于 sp^2 结构的 G 峰较弱,说明金刚石薄膜质量很高。随着甲烷体积分数的升高,金刚石拉曼峰逐渐减弱,位于 $1\,564\text{ cm}^{-1}$ 处的 G 峰增强,说明薄膜中石墨的含量逐渐增多,而文献[18-20]表明石墨可以有效降低金刚石薄膜的磨损消耗,有利于提高工件摩擦磨损性能。

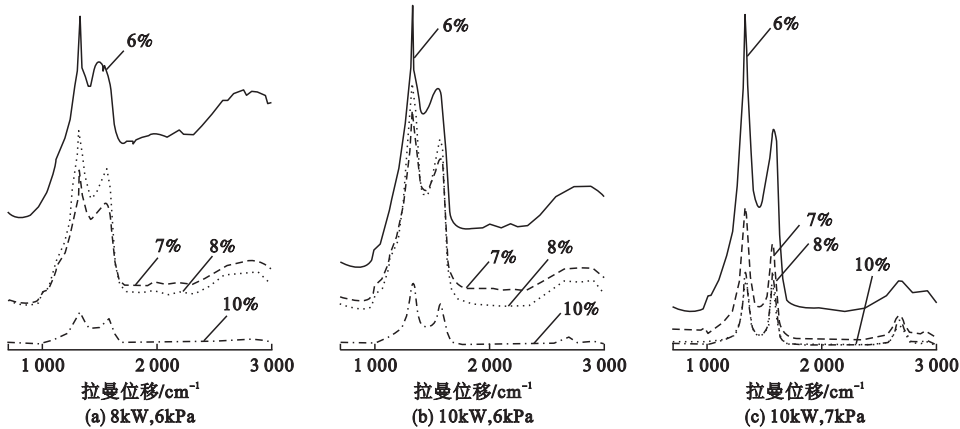


图 3 不同参数下金刚石薄膜拉曼光谱图

Fig. 3 Raman spectra of diamond films under different parameters

2.3 生长参数对氮化硅表面金刚石薄膜表面粗糙度的影响

通过原子力显微镜对金刚石薄膜表面粗糙度进行表征,3 组实验参数下测得的表面粗糙度值见表 3。试验中扫描面积为 $5\times 5\text{ }\mu\text{m}^2$ 。从表 3 可以看到,当微波功率为 8 kW

和 10 kW、腔体气压为 6 kPa 时,薄膜表面粗糙度随着甲烷体积分数 β 的升高先降低后升高,然后再降低。这是由于当甲烷体积分数较低时,薄膜表面晶粒较大,导致薄膜表面粗糙度比较大,随着甲烷体积分数的升高,金刚石薄膜中生长纳米金刚石,所以表面粗糙度先

降低;之后生长线状金刚石结构,表面比较疏松,表面粗糙度会随之升高;随着甲烷体积分数升高到一定程度,疏松的纳米线结构密度增加,导致薄膜表面粗糙度降低.当功率为10 kW,腔体气压为7 kPa时,由于高温生长,薄膜表面粗糙度随着甲烷体积分数的提高先降低后升高.

表3 金刚石薄膜表面粗糙度
Table 3 Roughness of diamond films

微波功率/ kW	腔体气压/ kPa	表面粗糙度/nm			
		$\beta=6\%$	$\beta=7\%$	$\beta=8\%$	$\beta=10\%$
8	6	18.6	15.1	16.2	14.8
10	6	19.2	17.4	22.4	17.5
10	7	52.6	34.6	20.5	25.8

2.4 氮化硅表面金刚石薄膜摩擦磨损性能

“球-盘”式摩擦磨损试验机采用中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室研制的MS—T3000型摩擦磨损试验机.实验在大气室温环境下进行,环境温度20~25℃,相对湿度50%~60%,摩擦副小球采用直径4 mm的氮化硅小球,载荷3 N,工作半径6.5 mm,工作时间120 min,工作转速200 r/min.图4为氮化硅薄膜与表面沉积金刚石薄膜的摩擦因数曲线.从图中可以看出,没有镀金刚石薄膜的氮化硅基体在干摩擦磨损试验中,平均摩擦因数为0.6,而且样品表面不稳定,摩擦因数振动比较大.而镀膜的4个样品,随着甲烷体积分数的升高,摩擦因数的变化趋势为先升高再降低再升高,分别稳定在0.19(6%)、0.24(7%)、0.12(8%)、0.17(10%).图5为甲烷体积分数对磨损率的影响曲线.从图中可以看出未涂敷金刚石薄膜的氮化硅基片磨损率达到 $7.95\times10^{-6}\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$,而涂敷金刚石薄膜的基片磨损率降低了一个数量级,磨损率分别为 $1.67\times10^{-7}\text{ mm}^3/(\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$ (6%)、 $3.48\times10^{-7}\text{ mm}^3/(\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$ (7%)、 $1.18\times10^{-7}/(\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$ (8%)、 $4.43\times10^{-7}\text{ mm}^3/(\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$ (10%).

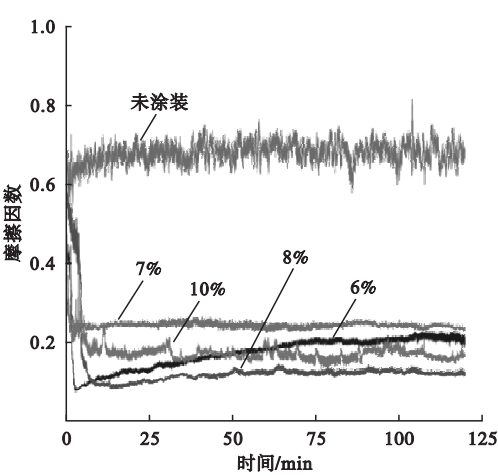


图4 甲烷体积分数对摩擦因数的影响
Fig. 4 Effect of methane levels on friction coefficient

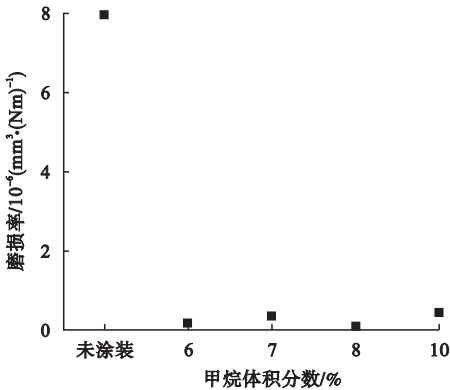


图5 甲烷体积分数对磨损率的影响
Fig. 5 Effect of methane levels on wear rate

综上可以看出沉积薄膜的样品相对于未沉积薄膜的样品,无论是摩擦因数还是磨损率,都有较大的提升.当甲烷体积分数为6%时,摩擦因数并不稳定,随着实验的进行逐渐上升.这是由于相对较低的甲烷体积分数下制得的薄膜中金刚石含量高,石墨含量相对较少,薄膜硬度比较高,根据计算得到的磨损率可以看出薄膜磨损比较小,但是摩擦副小球磨损比较大,接触点被磨平,接触面积逐渐增大,在实际应用中会破坏摩擦副.随着甲烷体积分数升至7%,由于薄膜中石墨含量增加,薄膜硬度略有减小,薄膜磨损率略有上升,然而通过磨合期后摩擦因数非常稳定,可以观察到小球的磨损明显减小,具有实际应

用价值。随着甲烷体积分数增加至8%,石墨含量进一步增加,不仅摩擦因数达到最低,薄膜的磨损率也达到最低,这是因为石墨本身是很好的固体润滑剂,薄膜中石墨含量的增加,提高了薄膜本身的自润滑性能。随着甲烷体积分数升至10%,由于石墨的大量增加,薄膜硬度降低,磨损比较严重,摩擦因数相比其他参数下也相对不稳定。在摩擦磨损试验结束后,所有的涂层均没有脱落,说明薄膜与基体直接有良好的结合力。同时对10 kW, 6 kPa和10 kW, 7 kPa样品做了摩擦磨损实验,发现了同样的趋势,即在适当甲烷体积分数下制备的金刚石薄膜具有最佳的摩擦因数与最小的磨损率,但是其摩擦因数与磨损率都没有微波功率8 kW、腔体气压6 kPa、甲烷体积分数8%的样品低。综上所述,氮化硅表面沉积金刚石涂层可以有效改善材料的摩擦学性能,在微波功率8 kW,腔体气压6 kPa,甲烷含量8%这个参数下制得的薄膜相比其他参数可以得到更小最稳定的摩擦因数与最低的磨损率,其各项性能均有利于耐磨涂层在氮化硅陶瓷轴承上的应用,满足耐磨涂层的理想要求。证实在氮化硅表面沉积金刚石薄膜可以有效改善轴承摩擦磨损性能。

3 结 论

(1)通过MPCVD法在氮化硅陶瓷基体上制得了连续致密、表面粗糙度低的纳米金刚石和金刚石/石墨复合薄膜。

(2)在微波功率8 kW,腔体气压6 kPa,甲烷体积分数8%的参数下制得的薄膜摩擦学性能最好,平均摩擦因数稳定在0.12,磨损率为 $1.18 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。制备的金刚石/石墨耐磨涂层有效地降低了氮化硅陶瓷材料的摩擦因数与磨损率,提高了基体表面稳定性,并且有效地改善了氮化硅材料表面的摩擦学性能。

(3)在氮化硅材料表面沉积金刚石/石墨涂层可以改善轴承材料摩擦磨损性能,为

金刚石薄膜在陶瓷轴承上的应用提供了良好的实验基础。

参考文献

- [1] 吴玉厚,张继鹏,李颂华,等.氮化硅陶瓷套圈内圆磨削表面质量的实验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(1):176-179.
(WU Yuhou, ZHANG Jipeng, LI Songhua, et al. Experimental research on surface quality of Si_3N_4 ceramic internal grinding[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(1): 176-179.)
- [2] 文怀兴,孙建建,陈威.氮化硅陶瓷轴承润滑技术的研究现状与发展趋势[J].材料导报,2015,29(17):6-14.
(WEN Huaixing, SUN Jianjian, CHEN Wei. Review on research status and development trend on silicon nitride ceramic bearings[J]. Materials review, 2015, 29(17): 6-14.)
- [3] MARTINHO R P, SILVA F J G, BAPTISTA A P M. Wear behaviour of uncoated and diamond coated Si_3N_4 tools under severe turning conditions[J]. Wear, 2007, 263(7): 1417-1422.)
- [4] 张东灿.金刚石薄膜和类金刚石薄膜摩擦学性能试验及其应用研究[D].上海:上海交通大学,2010.
(ZHANG Dongcan. Study on the tribological properties and applications of diamond and diamond-like carbon films[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.)
- [5] 向道辉,张磊,张玉龙,等.金刚石涂层硬质合金阶梯刀具的制备及钻削特性[J].机械材料,2016,40(10):46-50.
(XIANG Daohui, ZHANG Lei, ZHANG Yulong, et al. Preparation and drilling characteristics of diamond coated cemented carbide step cutting tool[J]. Materials for mechanical engineering, 2016, 40(10): 46-50.)
- [6] 王玉乾,王兵,孟祥钦,等.化学气相沉积法制备超纳米金刚石薄膜[J].材料导报,2009,23(14):54-56.
(WANG Yuqian, WANG Bing, MENG Xianqin, et al. Preparation of ultrananocrystalline diamond film by chemical vapor deposition [J]. Materials review, 2009, 23(14): 54-56.)
- [7] 王松,岳文,李星亮,等.超低摩擦WS₂/W-DLC固体润滑薄膜的制备与性能[J].材料热处理学报,2016,37(2):159-163.
(WANG Song, YUE Wen, LI Xingliang, et al. Fabrication, microstructure and properties of

- super-low friction WS₂/W-DLC solid lubrication film[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2016, 37(2): 159 – 163.)
- [8] SHI Bing. Fundamentals of ultrananocrystalline diamond(UNCD) thin films as biomaterials for developmental biology: embryonic fibroblasts growth on the surface of(UNCD) films [J]. Diamond and related materials, 2009, 18 (2) : 596 – 600.)
- [9] CHEN H G, CHANG L, CHO S Y, et al. Growth of diamond nanoplatelets by CVD [J]. Chemical vapor deposition, 2008, 14 (7/8) : 247 – 255.)
- [10] NETO M A, FERNANDES A J S, SILVA R F, et al. Nucleation of nanocrystalline diamond on masked/unmasked Si₃N₄ ceramics with different mechanical pretreatments [J]. Diamond and related materials, 2008, 17 (4) : 440 – 445.)
- [11] AMARAL M, GOMES P S, LOPES M A, et al. Cytotoxicity evaluation of nanocrystalline diamond coatings by fibroblast cell cultures [J]. Actabiomaterialia, 2009, 5 (2) : 755 – 763.)
- [12] MARTINHO R P, SILVA F J G, BAPTISTA A P M. Cutting forces and wear analysis of Si₃N₄ diamond coated tools in high speed machining [J]. Vacuum, 2008, 82 (12) : 1415 – 1420.)
- [13] LIU J, HEI L F, CHEN G C, et al. Influence of seeding pre-treatments on mechanical properties of ultrananocrystalline diamond films on silicon and Si₃N₄ substrates [J]. Thin solid films, 2014, 556: 385 – 389.)
- [14] SCHWANDER M, PARTES K. A review of diamond synthesis by CVD processes [J]. Diamond and related materials, 2011, 20 (9) : 1287 – 1301.)
- [15] VLASOV I, LEBEDEV O I, RALCHENKO V G, et al. Hybrid diamond - graphite nanowires produced by microwave plasma chemical vapor deposition [J]. Advanced materials, 2007, 19 (22) : 4058 – 4062.)
- [16] ARENAL R, BRUNO P, MILLER D J, et al. Diamond nanowires and the insulator-metal transition in ultrananocrystalline diamond films [J]. Physical review B, 2007, 75 (19) : 434 – 436.)
- [17] SANKARAN K J, KURIAN J, CHEN H C, et al. Origin of a needle-like granular structure for ultrananocrystalline diamond films grown in a N₂/CH₄ plasma [J]. Journal of physics D: applied physics, 2012, 45 (36) : 651 – 657.)
- [18] 沙春生, 李荣斌, 宋晓航, 等. 类金刚石薄膜固 - 液复合润滑体系真空摩擦学性能研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2016 (2) : 136 – 140.)
(SHA Chunsheng, LI Rongbin, SONG Xiaohang, et al. Tribological properties of diamond-like-carbon coatings lubricated with vacuum grease in space environment [J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2016 (2) : 136 – 140.)
- [19] 白越, 黄敦新, 曹萍, 等. 类金刚石薄膜在干摩擦、油和脂润滑条件下的摩擦学性能分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31 (5) : 555 – 559.)
(BAI Yue, HUANG Dunxin, CAO Ping, et al. Tribological characteristics of diamond-like-carbon films in lubricants of oil and greases [J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2011, 31 (5) : 555 – 559.)
- [20] 李雪. 类金刚石膜的制备方法和性能 [J]. 重庆工学院学报 (自然科学版), 2009, 23 (6) : 165 – 171.)
(LI Xue. Preparation method and performance of DLCF [J]. Journal of Chongqing institute of technology (natural science), 2009, 23 (6) : 165 – 171.)