

# 钻具切割用聚晶立方氮化硼刀具的摩擦学研究

崔金蒙<sup>1</sup>, 孟德忠<sup>\*2,3</sup>, 吴哲<sup>1</sup>, 岳文<sup>1,3</sup>, 王成彪<sup>3,4</sup>, 杨凡<sup>5</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京)郑州研究院, 河南 郑州 451283;

4. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 5. 中安联合投资集团有限公司, 北京 100081)

**摘要:**在钻探工程中遇到孔内事故时,经常采用割刀来切割事故钻具,然而在切割事故钻具的同时也会涉及到切割周边岩石的问题。本研究针对刀具切割岩石的复杂工况条件,设计了不同退火温度下的聚晶立方氮化硼(Polycrystalline Cubic Boron Nitride Compact,简称PCBN)复合片对磨Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球的摩擦磨损试验,采用了光学显微镜和X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、X射线能谱仪(EDS)等表征方法,分析了退火温度对PCBN的影响和PCBN对磨Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球的摩擦学行为。结果表明:高于800℃退火处理,PCBN粘结剂氧化生成TiO<sub>2</sub>。当800℃退火的PCBN对磨Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球时,出现轻微的粘着磨损;900℃退火的PCBN对磨Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球时,粘着磨损现象加重;然而,1000℃退火处理后,磨痕处磨粒磨损和粘着磨损共存。且PCBN对磨Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球时,摩擦系数与退火温度有关。

**关键词:**孔内事故;聚晶立方氮化硼刀具;钻探;摩擦磨损;岩石

**中图分类号:**P634;TH117 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)03-0010-11

## Research on tribological properties of polycrystalline cubic boron nitride tools based on drilling tools cutting

CUI Jinmeng<sup>1</sup>, MENG Dezhong<sup>\*2,3</sup>, WU Zhe<sup>1</sup>, YUE Wen<sup>1,3</sup>, WANG Chengbiao<sup>3,4</sup>, YANG Fan<sup>5</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. School of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Zhengzhou Research Institute, China University of Geosciences, Zhengzhou Henan 451283, China;

4. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou Henan 450006, China;

5. Sinounited Investment Group Corporation Limited, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of accidents in the hole encountered in the drilling project, cutters are used for accident drills. However, rocks could be cut when drills are cut. Therefore, the friction and wear tests of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) against the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball are designed at different annealing temperatures based on the complex working conditions. Optical microscope, X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM), X-ray energy spectrometer (EDS) were used to analyze the influence of heat treatment on PCBN and the tribological behavior of PCBN against the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball. The results show that: After annealing treatment above 800℃, PCBN binder oxidation generates TiO<sub>2</sub>. Furthermore, there is slight adhesive wear after PCBN at annealing treatment

收稿日期:2020-10-29; 修回日期:2021-01-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.03.002

**基金项目:**国家自然科学基金项目“聚晶金刚石摩擦表界面钝化机制与转移膜形成机理”(编号:51875537)、“聚晶金刚石表界面摩擦效应及其微观磨损机制”(编号:41572359);北京市自然科学基金资助项目“苛刻工况下聚晶立方氮化硼摩擦学行为及其影响机制”(编号:3214052);中央高校基本业务费项目“聚晶立方氮化硼高温热损伤及其摩擦学机理研究”(编号:2652019109)

**作者简介:**崔金蒙,女,汉族,1993年生,硕士研究生在读,机械工程专业,从事超硬材料刀具切削磨损性能的研究,cujinmeng@163.com;岳文,男,汉族,1981年生,教授,博士生导师,机械工程专业,工学博士,从事机械摩擦学与表面工程的研究,北京市海淀区学院路29号,yw@cugb.edu.cn.

**通信作者:**孟德忠,男,汉族,1988年生,讲师,工学博士,高压物理专业,从事超硬材料的制备及表征的研究,北京市海淀区学院路29号,meng@cugb.edu.cn.

**引用格式:**崔金蒙,孟德忠,吴哲,等.钻具切割用聚晶立方氮化硼刀具的摩擦学研究[J].钻探工程,2021,48(3):10-20.

CUI Jinmeng, MENG Dezhong, WU Zhe, et al. Research on tribological properties of polycrystalline cubic boron nitride tools based on drilling tools cutting[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3): 10-20.

of 800°C against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball. Adhesive wear is more serious after PCBN at annealing treatment of 900°C against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball. However, abrasive wear and adhesive wear coexist after PCBN at annealing treatment of 1000°C against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball. In addition, friction coefficients of PCBN against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball are associated with the annealing temperatures.

**Key words:** drilling accidents in hole; polycrystalline cubic boron nitride tool; drilling; friction and wear; rock

## 0 引言

《国土资源“十三五”科技创新发展规划》和《自然资源科技创新发展规划纲要》等国家重大战略项目分别制定了“三深一土”和“一核两深三系”等战略<sup>[1-2]</sup>。这些战略的提出已经表明,开展深部钻探领域的研究刻不容缓,它既是解决地学重大基础理论问题的需要,更是国家保证能源资源安全、扩展经济社会发展空间的重大需求<sup>[3]</sup>。但是,钻探工程容易受到地层裂隙、溶洞发育、地层应力集中等地质原因,以及钻孔施工设计不合理、钻探设备配置不当、泥浆冲洗液与地层不符、施工工艺不当等工艺因素的影响,因而导致各类孔内事故的发生,比如:钻杆、岩心管折断,连接螺纹脱扣,套管的磨破、折

断、脱节等<sup>[4-7]</sup>,因此解决孔内事故等技术显得尤为重要。

割刀切割钻具技术是解决孔内事故的重要方法之一,且常用的割刀材料是硬质合金,但是该类型割刀存在硬度低、易磨损、化学稳定性差等缺点,容易导致切割时间长、效率低、更换刀具频繁等情况。另一个行之有效的方法是使用聚晶立方氮化硼(Polycrystalline Cubic Boron Nitride Compact,简称PCBN)刀具,PCBN硬度、耐磨性、热导率、热稳定性等远优于硬质合金<sup>[8-10]</sup>(如表1所示)。且PCBN与铁族元素不反应,经常被用来切削加工各种轴承钢、淬硬钢、球墨铸铁等高硬度难加工的金属材料<sup>[11-13]</sup>。

表1 PCBN和硬质合金性能比较

Table 1 Comparison of properties between PCBN and cemented carbide

材料	密度 $\rho$ / (g·cm <sup>-3</sup> )	热传导率 $\lambda$ / [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	维氏硬度 $H_v$ / GPa	热稳定温度 $\theta$ / °C	热膨胀系数 $\alpha$ / (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
PCBN	3.48	80~100	35~45	1300~1500	3.5
硬质合金	15.10	54	13~15	900~1000	4.5

刀具切割钻具时,会产生大量的切削热,温度的升高可能会降低刀具的硬度,因此研究切削温度对PCBN热损伤的影响是保证刀具顺利切割的重要内容之一。Abrao等<sup>[14]</sup>研究发现,温度随切削速度、进给速度、切削深度和刀具磨损而增加,并且刀具材料的导热率增加会引起刀具温度升高、切削温度降低;切削中心区域的温度最高可达1500°C。Shalaby等<sup>[15]</sup>研究了PCBN切削高速钢和D2工具钢时切削速度与切削温度之间的关系,发现切削温度随着切削速度的增加而逐渐增加,当切削速度超过130 m/min时切削温度可达到1000°C。Ren等<sup>[16]</sup>指出PCBN切削硬质材料时,切削温度的增速受到工件微观组织的影响,较细组织结构促进切削温度的增加。Harris等<sup>[17]</sup>分析了温度对PCBN的影响,发现随着温度的升高,刀具材料的变形机理发生了变化。Chen等<sup>[18]</sup>通过采用两种不同的热电偶测温方

法分析了PCBN对磨GCr15轴承钢时切削速度、切削时间与切削温度之间的关系,表明切削热随着时间的增加而逐渐增加,并与转速正相关,最高温度可达到1000°C。

总结以上研究发现PCBN刀具的切削温度达1000°C,并且PCBN刀具与工件接触时刀面上的压力可达2~3 GPa<sup>[19]</sup>,故刀具发生磨损是不可避免的。使用过度磨损的刀具将会降低其切削效率、提高其切削成本等。因此探究PCBN刀具磨损机理为提高切割效率提供保障很有必要。Cerce等<sup>[20]</sup>分析了PCBN切削灰铸铁的磨损机制,发现在切削边缘及工件间存在硬质颗粒和磨粒,由于金属碳化物硬质颗粒的存在造成磨粒磨损并形成磨削沟槽从而引起了刀具的侧面和前刀面磨损,同时指出高热导率刀具有助于减缓磨粒磨损的发生。Braghini等<sup>[21]</sup>指出在低/中等切削速度下磨削淬硬钢时,磨

损机制是粘着磨损和磨粒磨损的复合形式。Liu等<sup>[22]</sup>研究了PCBN刀具切削GCr15轴承钢的磨损形式,发现粘着磨损是前刀面的主要磨损机制,磨粒磨损是刀具侧面的主要磨损机制。Yang等<sup>[23]</sup>研究了PCBN刀具切削粉末冶金阀门座的磨损机制发现其主要磨损机制为粘着磨损和氧化化学磨损的复合磨损形式。

此外,根据摩擦学基本理论,刀具切削钻具过程可简化为刀具材料与钻具之间在不同工况条件下的摩擦磨损问题<sup>[24]</sup>。为了探究摩擦副之间的粗糙程度,许多研究者探究了PCBN薄膜的摩擦磨损。Watanabe等<sup>[25]</sup>制备了PCBN薄膜,并研究了其与不同对磨副材料的摩擦性能:当对磨不锈钢球时的摩擦系数为0.2;当对磨金刚石时,随着载荷增加摩擦系数减小,最低可达0.065<sup>[26]</sup>;当对磨类金刚石薄膜时,发现其稳定期的摩擦系数只有0.075<sup>[27]</sup>。Chong等<sup>[28]</sup>研究指出PCBN对磨氮化硅时的摩擦系数约为0.42。

目前,学者对PCBN切削硬质金属材料的磨损机理及切削热对PCBN的影响等进行了广泛而深入的研究,且取得了大量有益的研究成果。然而PCBN刀具在切削钻具的过程中同样会与岩石发生切削<sup>[24]</sup>,目前对于PCBN与岩石材料的磨损形式及磨损机理还鲜有报道。因此本研究针对钻探工程中钻具处理问题,考虑到切削热的影响,设计了退火温度对PCBN刀具的影响试验;同时针对岩石的主要成分 $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,开展了不同退火温度下的PCBN复合片对磨 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球的微观摩擦磨损试验。该研究为深部钻探中孔内事故处理问题提供了重要的理论指导和技术支持。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

本试验选用的材料是PCBN复合片和氮化硅球( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),两种材料的物理性质如表2所示。所选用的PCBN复合片是由郑州锐利超硬材料有限公司提供的,该复合片为圆盘形,直径为12.7 mm,总厚度为4.0 mm,如图1(a)和(b)所示。从图1(b)可以看出,PCBN层的厚度为1.0 mm,碳化物基底的厚度为3.0 mm。在PCBN层中,立方氮化硼(Cubic Boron Nitride,简称CBN)体积含量约为75%,并且烧结粘结剂为TiN和Al。从图1(c)中可以看出,

CBN晶粒被粘结剂相包围,并且CBN晶粒的平均尺寸为2~4  $\mu\text{m}$ 。本试验所选用的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球,由浙江省宁波市润昌硬质合金有限公司生产,直径为6 mm(如图1d所示)。

表2 PCBN和 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 的物理性质  
Table 2 Physical properties of PCBN and  $\text{Si}_3\text{N}_4$

材料	硬度/ GPa	粗糙 度/nm	杨氏模量/ GPa	热导率/[W·/ (m·K) <sup>-1</sup> ]	泊松 比
PCBN	35~45	40	590~680	80~100	0.19
$\text{Si}_3\text{N}_4$	14~16	20~30	300	16~29	0.25

### 1.2 退火处理

退火处理所使用的电炉是由北京科伟永兴仪器有限公司生产的SX<sub>2</sub>-5-12型箱式高温电阻炉。大量的研究发现聚晶立方氮化硼刀具切削不同材料时产生的温度范围在600~1000  $^{\circ}\text{C}$ 之间<sup>[16]</sup>,因此在大气条件下,将PCBN复合片置于炉中,在600、700、800、900和1000  $^{\circ}\text{C}$ 的温度下退火处理30 min。用Pt-10% Rh热电偶控制温度,偏差为 $\pm 20$   $^{\circ}\text{C}$ ,退火处理后,将样品在环境空气中冷却至室温。将退火处理的PCBN样品分别用丙酮和酒精超声清洗20 min。在该试验中,用未处理的PCBN样品(常温PCBN)比较。

### 1.3 摩擦测试

本试验使用MS-T3001型球盘摩擦计进行摩擦测试,该仪器是由中国兰州华辉仪器技术有限公司制造,其原理图如图2所示。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球是由支架固定,且位于PCBN盘的上侧。在摩擦学测试中,PCBN圆盘以3 mm的旋转半径和300 r/min的旋转速度转动,对应的线速度是94.2 mm/s。滑动时间为30 min,总距离为169.56 m。法向载荷为10 N,相应的平均(初始)赫兹接触压力为1.46 GPa。测试期间的相对湿度约为35%。在摩擦试验之前,将所有 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球和经热处理的PCBN片分别在丙酮和酒精超声清洗20 min。在相似的温度和稳定的湿度下,至少重复两次摩擦测试。在每种情况下,根据重复测试获得数据。

### 1.4 测试表征方法

为了研究PCBN的磨损轨迹和对磨球的磨斑,本试验选用光学显微镜、维氏硬度计、X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和X射线能谱仪

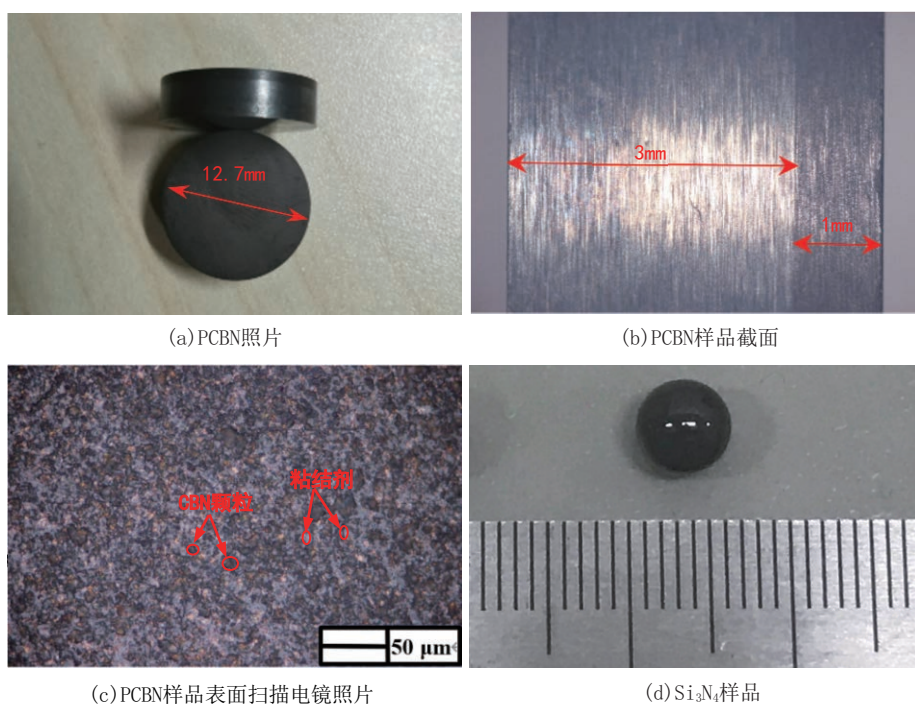


图1 CBN样品表征  
Fig.1 The image of PCBN

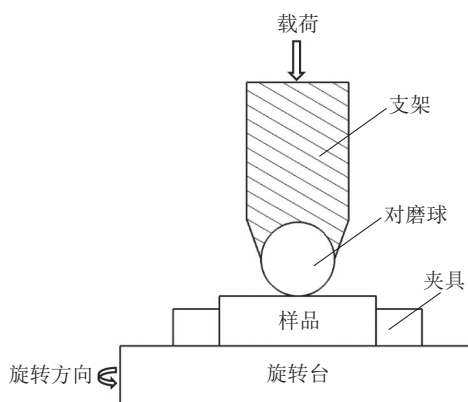


图2 T3001型摩擦磨损试验机原理示意  
Fig.2 The principle diagram of T3001 friction and wear testing machine

(EDS)分析退火温度对PCBN的影响和PCBN对磨Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的摩擦学行为。

其中本试验采用的光学显微镜是由日本奥林巴斯(Olympus)生产的BX51型。XRD型号为D/max2500(Cu K $\alpha$ ,  $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ), 主要目的是研究各种退火温度下PCBN的相组成。SEM和EDS是为了检查退火后PCBN的微观形貌和元素分布。维氏硬度计是由Buehler公司生产的Micromet-6030型, 测量硬度时的负载为9.8 N, 保持时间为30 s, 本

实验在每个样品上检查5个位置并计算平均硬度, 并按照1 HV等于9.8 MPa进行单位换算。

## 2 试验结果与讨论

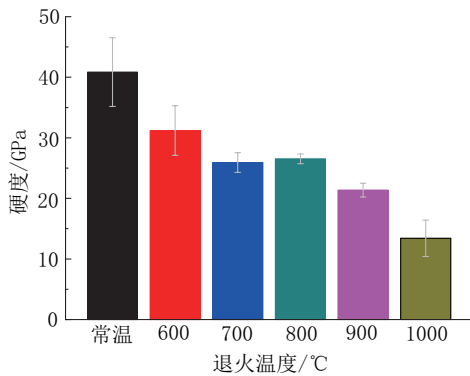
### 2.1 退火PCBN的性能特征

#### 2.1.1 硬度和表面粗糙度

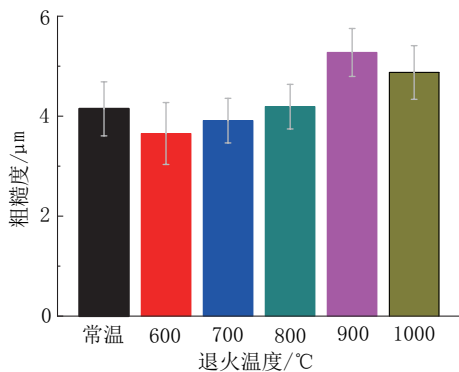
图3(a)显示了不同退火温度后PCBN的硬度变化。总体而言, PCBN的硬度随着退火温度的升高而降低。但是800 °C退火处理后样品的硬度较700 °C稍有增加, 推测800 °C退火处理后有少量氮化物生成, 而氮化物较硬所以导致硬度稍有增加。900 °C和1000 °C时生成了较软的氧化物, 因而硬度不断下降。常温PCBN的硬度为40 GPa, 经过1000 °C的退火后硬度下降至13 GPa, 且下降趋势在900 °C和1000 °C时急剧上升。这与Liu等<sup>[29]</sup>的研究结果类似, 据推测硬度的降低是由于氧化反应引起的。但是硬质合金在700 °C退火后, 表面硬度下降至173 HV ( $\approx 1.7 \text{ GPa}$ ), 远远小于Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的硬度, 这就意味着, 硬质合金在经过700 °C退火后不再适合切削Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>材料。在解决孔内事故时, 由于最高可产生1000 °C左右的切削高温, 不可避免地使割刀硬度下降, 因此使用PCBN要比硬质合金材料更能保证

顺利切割。

图3(b)显示了不同退火温度后PCBN的表面粗糙度变化,与常温PCBN相比,经过600、700、800℃退火后,PCBN的表面粗糙度值降低,且经过600℃热处理后的表面粗糙度值最低。然而,经过900℃退火后的表面粗糙度值最高,在1000℃时又降低。进一步说明了经过1000℃退火后,PCBN的物相发生了很大变化。



(a) 不同退火温度后PCBN的硬度变化



(b) 不同退火温度后PCBN的表面粗糙度变化

图3 不同退火温度后PCBN的性能变化

Fig.3 Changes in PCBN after annealing at different temperatures

### 2.1.2 物相分析

为了进一步探究退火温度对PCBN的影响,测量了PCBN的物相变化(如图4所示)。可以看出在800℃以下,峰的位置和强度几乎没有变化,因此表明PCBN具有良好的耐热性。此外,从常温PCBN曲线可以看出,PCBN的粘结剂相是TiB<sub>2</sub>、AlN和TiN。但是随着退火温度的升高,峰的强度发生了改变。在900℃和1000℃下明显检测到新的TiO<sub>2</sub>峰,另外TiO<sub>2</sub>的强度在1000℃时增加,而CBN、

TiN和TiB<sub>2</sub>却显示出相反的趋势,这表明在经过退火处理过程中出现了TiO<sub>2</sub>的相变,这与之前的研究结果类似<sup>[29]</sup>。

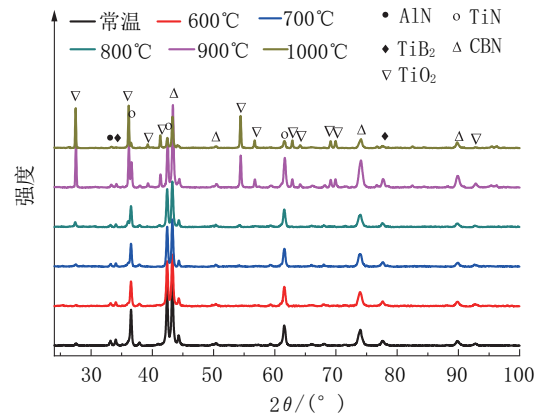


图4 不同退火温度下的XRD

Fig.4 XRD patterns after annealing at different temperatures

### 2.1.3 表面形貌分析

图5显示了退火后PCBN的表面形貌。总体而言,表面形貌取决于退火温度,尤其是温度超过800℃时。与图5(a)中的常温PCBN相比,当退火温度为600℃(图5b)和700℃(图5c)时,表面形貌变化不明显。但是经过800℃退火处理后,PCBN表面出现白色区域,且可以观察到细小的白色晶须,如图5(d)所示。当退火温度提高到900℃时,这些晶须变得越来越长,并且在表面上不断延伸,如图5(e)所示。在图5(f)所示的1000℃退火的样品中可以看出,样品表面上铺满了白色晶须。

## 2.2 摩擦测试

### 2.2.1 摩擦特性

不同退火温度后PCBN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的摩擦系数(Friction coefficient,简称CoF)如图6所示。不难发现,常温PCBN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的CoF变化很平稳,最终稳定值在0.45左右。但是经过600、700、800℃退火处理后,PCBN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的CoF与常温PCBN样品相比稍有增加,而彼此之间变化并不明显,CoF稳定以后,数值处于0.47~0.49范围内。但是经过900℃退火处理后,PCBN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的CoF最终稳定在0.68左右。显然常温样品和600~800℃退火处理的样品相比存在极大差异,远远高于800℃以下的样品。

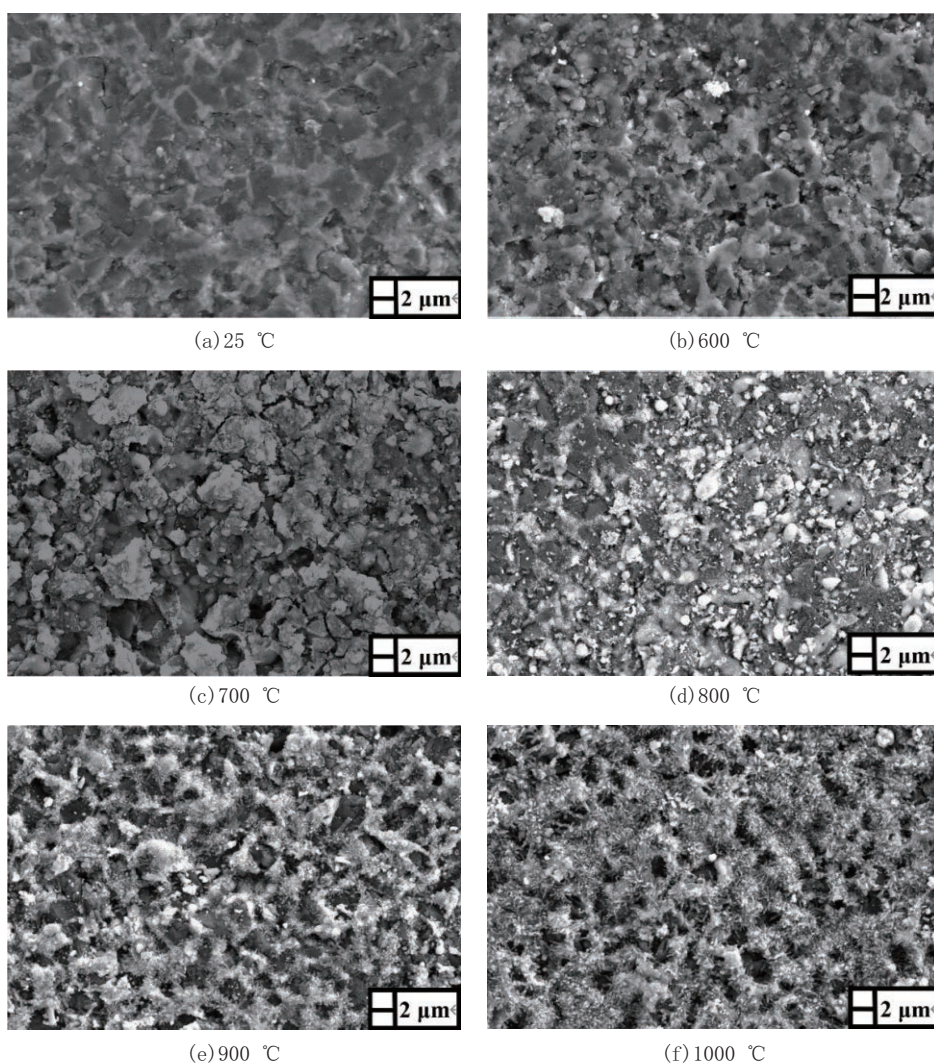


图5 不同退火温度后的PCBN表面SEM图像

Fig.5 SEM images of annealed PCBN at different temperatures

1000 °C热处理后的样品 CoF 稳定值同样高于常温样品和 600~800 °C热处理之后的样品,但是低于 900 °C的 CoF,从 0.5 左右开始上升,达到 0.61 后逐渐稳定。

### 2.2.2 对磨球和PCBN的形貌分析

为了充分理解 CoF 与退火温度之间的关系,对 PCBN 表面的形貌进行了进一步研究。图 7 显示了在 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球体上形成的磨损痕迹形态的光学显微照片,可以看出 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球体的磨斑表面出现彩色涂层。据 Qin 等<sup>[30]</sup>的研究发现,这些彩色涂层是在摩擦过程中形成的转移膜,这些转移膜起到了更好的减摩和耐磨的作用,因此,它被认为是一种减摩剂,同样的其它相关研究也表明彩色转移膜的减磨作

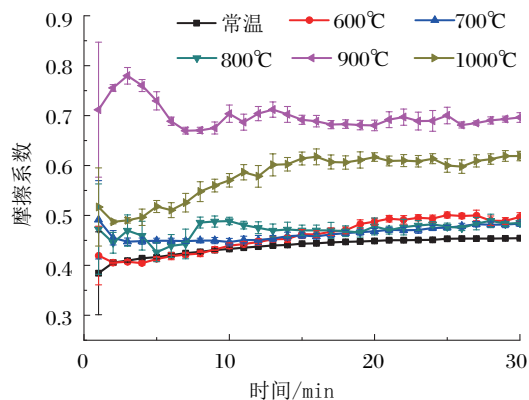


图6 不同退火温度后的PCBN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的CoF

Fig.6 PCBN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> CoF after annealing at different temperatures

用<sup>[31-32]</sup>。从图7中还可以看出,常温PCBN对磨球的磨斑直径最大,约为822 μm,这可能是由于常温PCBN的硬度远远大于Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球的硬度,所以相对较

软的Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球在对磨较硬的PCBN样品时磨损比较剧烈。

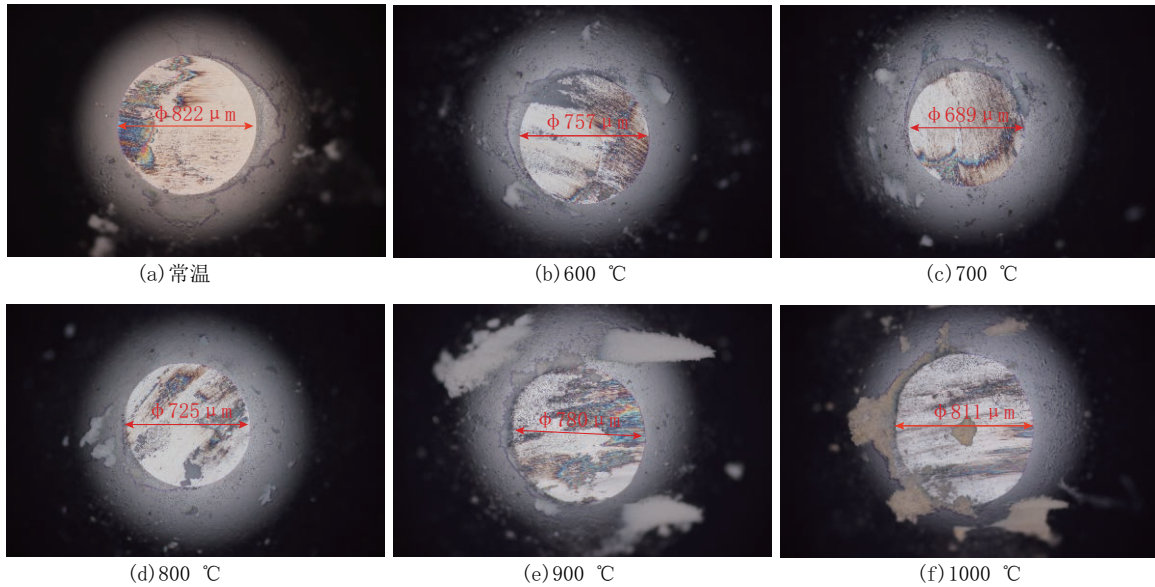


图7 不同温度退火处理后PCBN对磨Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球的磨斑图像

Fig.7 Wear spot images of grinding Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> balls after heat treatment at different temperatures

图8显示了经Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>对磨后,PCBN表面上的磨痕SEM图像。可以看出常温PCBN的磨痕和经过600、700、800 °C退火处理的磨痕相似。然而,在900 °C时,磨损轨迹的形态发生了很大变化,并且随

着磨损的扩大,在轨迹区域形成了粘着。另外观察1000 °C的磨损痕迹发现,磨痕处出现大量的粘着,且在高的应力下发生了剥落。

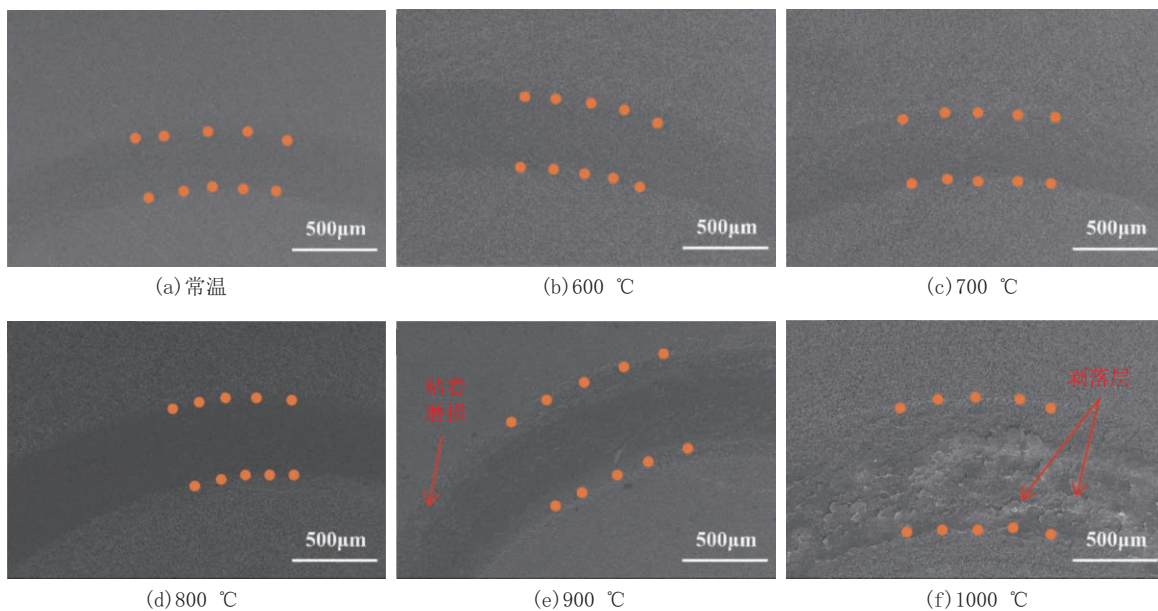


图8 不同温度退火后PCBN样品对磨Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>时的磨痕SEM图像

Fig.8 SEM images of wear scars on PCBN samples after heat treatment at different temperatures after grinding Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

### 2.2.3 磨损分析

为了进一步探究对磨球的特性,计算了对磨球的磨损率(如图9所示)。常温PCBN对磨 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球时,对磨球的磨损率约为 $4.4 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{mm})$ 。经过600、700、800 °C退火处理后,对磨球的磨损率不断下降,逐渐降低至 $2.7 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{mm})$ 。但是经过900 °C退火处理后,磨损率突然升高至 $3.5 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{mm})$ ,而1000 °C退火处理的磨损率为 $4.2 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{mm})$ 。

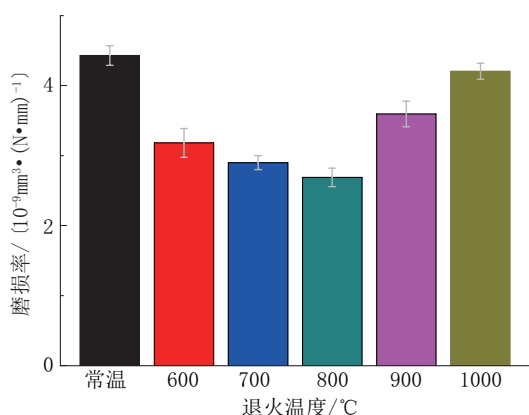


图9 不同温度退火后 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球的磨损率

Fig.9 Wear rate of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  balls after heat treatment at different temperatures

不同温度退火后PCBN对磨 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 时的磨痕形貌和对应的磨痕界面如图10所示。显然常温样品和经过600 °C和700 °C退火处理的样品,其磨痕比较均匀且磨痕较浅,磨痕深度约为 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。但是经过800 °C退火处理的样品,其磨痕处出现磨屑堆积的现象,这种现象在900 °C时加重,堆积厚度可达 $0.8 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 左右,且磨痕深度最深约为 $1 \mu\text{m}$ ,较深的磨痕主要是CBN颗粒被拔出导致的。很明显的可以看出,经过1000 °C退火处理后磨损最严重,磨痕宽度约为其他情况的2倍,PCBN磨痕深度达 $6 \sim 10 \mu\text{m}$ ,远高于其他条件下的磨损深度。这主要是由于1000 °C退火处理后PCBN的硬度最低,所以耐磨性降低,经过摩擦磨损后,CBN颗粒更容易受到应力作用造成剥落。通过以上结果不难发现,经过900 °C和1000 °C退火处理的样品磨损很严重,所以应进一步探究磨痕磨损形式。

### 2.2.4 磨痕形貌分析

为了更加清晰地了解退火处理后磨痕变化,使

用了高倍的SEM图像和EDS元素分析(如图11所示),发现磨痕处出现Si元素。同时发现经过1000 °C退火处理后,其磨痕处的粘着层出现裂纹,因此推测磨粒磨损和粘着磨损同时出现。这与前人的研究类似,当PCBN切削不同材料时,由于切削速度而产生大量的切削热,因此在切削过程中会产生大量的粘着,粘着材料在机械应力的作用下而产生裂纹<sup>[33]</sup>。

### 2.2.5 摩擦磨损模型

界面的相结构和形态决定了摩擦时的CoF。在600~800 °C时达不到TiN、 $\text{TiB}_2$ 和CBN被氧化所需的活化能,因此PCBN的表面没有明显变化。故与常温PCBN相比,600~800 °C时的CoF略有增加。经800 °C退火处理的PCBN对磨 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球时,在高载荷和摩擦高温下,产生了粘着磨损,如图12(a)所示。随着退火温度的进一步升高,PCBN出现了氧化现象,在800 °C退火后有新的 $\text{TiO}_2$ 相的生成,并且XRD图还检测到了新峰(如图4所示)。据调研发现,新生产的 $\text{TiO}_2$ 的硬度低于TiN,且为多孔形状的<sup>[34]</sup>。在高赫兹接触压力下, $\text{TiO}_2$ 、CBN等物体极易剥落,从而导致CoF迅速增加,此时出现了磨粒磨损形式,如图12(b)所示。另外在摩擦热的作用下,不可避免地出现粘着堆积,因此在900 °C和1000 °C的高温退火后,PCBN的磨痕较深且粘着堆积较为严重。

$\text{Si}_3\text{N}_4$ 与PCBN样品对磨时,在磨损开始时, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球的最低点与PCBN进行摩擦,即为点点摩擦,如图12(c)所示。随着摩擦试验的进行, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 与PCBN出现了点面接触的磨损,如图12(d)所示。分析整个摩擦过程不难发现,球的最低点对磨的时间最长,所以PCBN样品与 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球初始接触位置A点(图12c)磨损次数最多,即出现了如图10所示的磨损形状。当 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 与PCBN达到点面接触的状态时,材料可能出现片状剥落的状态,即图8(f)所示。

## 3 结论

本文依据PCBN割刀切削岩石理论,探究了不同退火温度对PCBN的影响和PCBN对磨 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 球时的摩擦特性,得出以下结论:

(1)当退火温度 $>800 \text{ °C}$ 时,PCBN的粘结剂会发生相变,与氧元素反应生成 $\text{TiO}_2$ 。随着退火温度的升高, $\text{TiO}_2$ 的生成量变多。



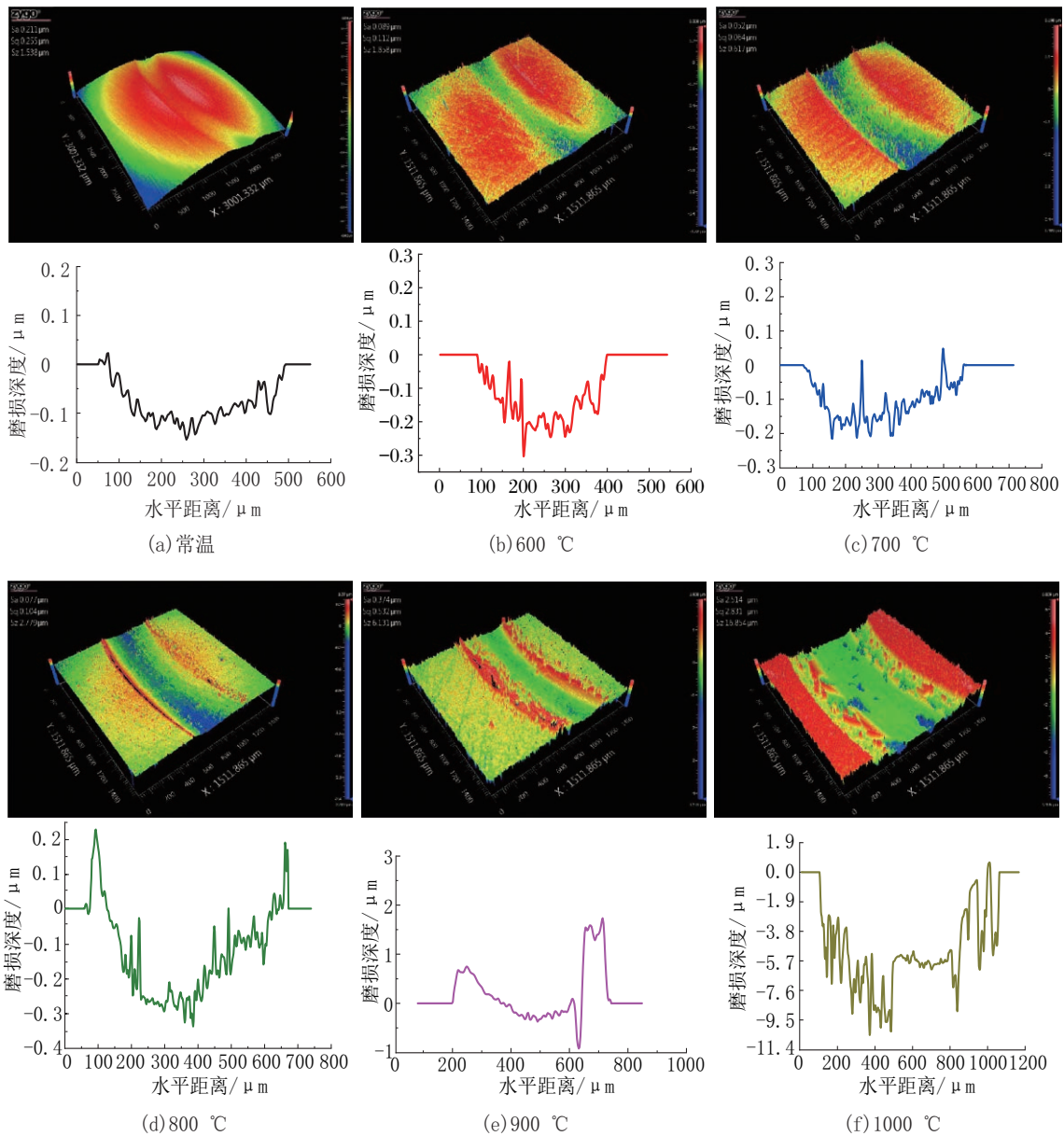


图 10 不同温度退火后 PCBN 对磨  $\text{Si}_3\text{N}_4$  时的磨痕形貌

Fig.10 Wear scar morphology of PCBN samples after grinding at different temperatures for  $\text{Si}_3\text{N}_4$

(2) PCBN 对磨  $\text{Si}_3\text{N}_4$  球时, 摩擦系数随着退火温度的升高总体呈现上升的趋势, 但是经过  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  退火处理后, 摩擦系数小于  $900\text{ }^\circ\text{C}$  退火处理, 这是由于经过  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  退火处理后, 有大量  $\text{TiO}_2$  相的生成。

(3) PCBN 对磨  $\text{Si}_3\text{N}_4$  球时, 磨损机理与退火温

度有关。常温 PCBN 对磨  $\text{Si}_3\text{N}_4$  球时未发现粘着磨损;  $800\text{ }^\circ\text{C}$  退火后, 磨痕边界出现轻微的粘着磨损;  $900\text{ }^\circ\text{C}$  退火后, PCBN 由于相变导致出现大量的粘着磨损;  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  退火后, 由于  $\text{TiO}_2$ 、CBN 等剥落物产生, 出现了粘着磨损和磨粒磨损共存的形式。

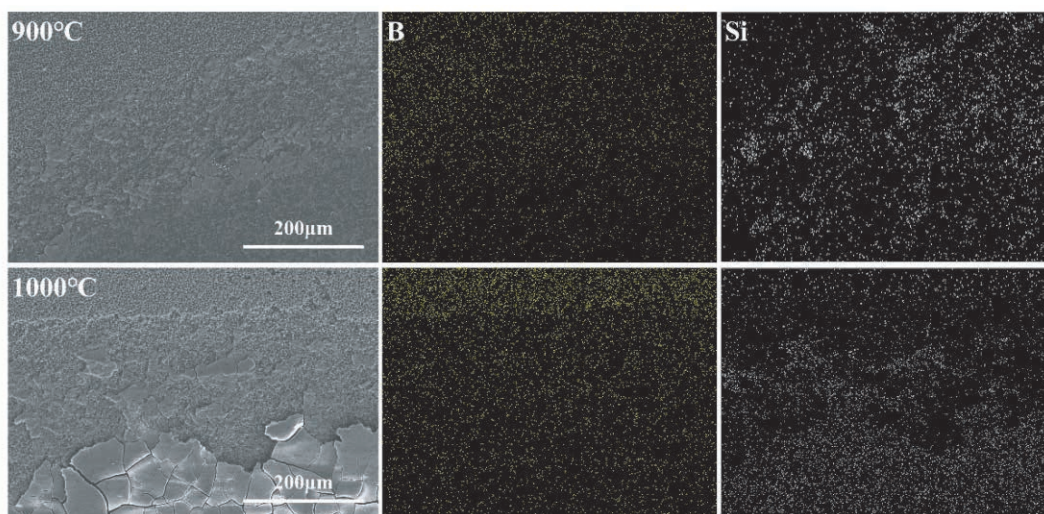


图 11 900、1000 °C 退火处理后 PCBN 对磨 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的磨痕 SEM 图像和 EDS 分析

Fig.11 SEM image and EDS analysis of wear scar boundary of PCBN sample at heat treatment at 900 °C and 1000 °C after grinding Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

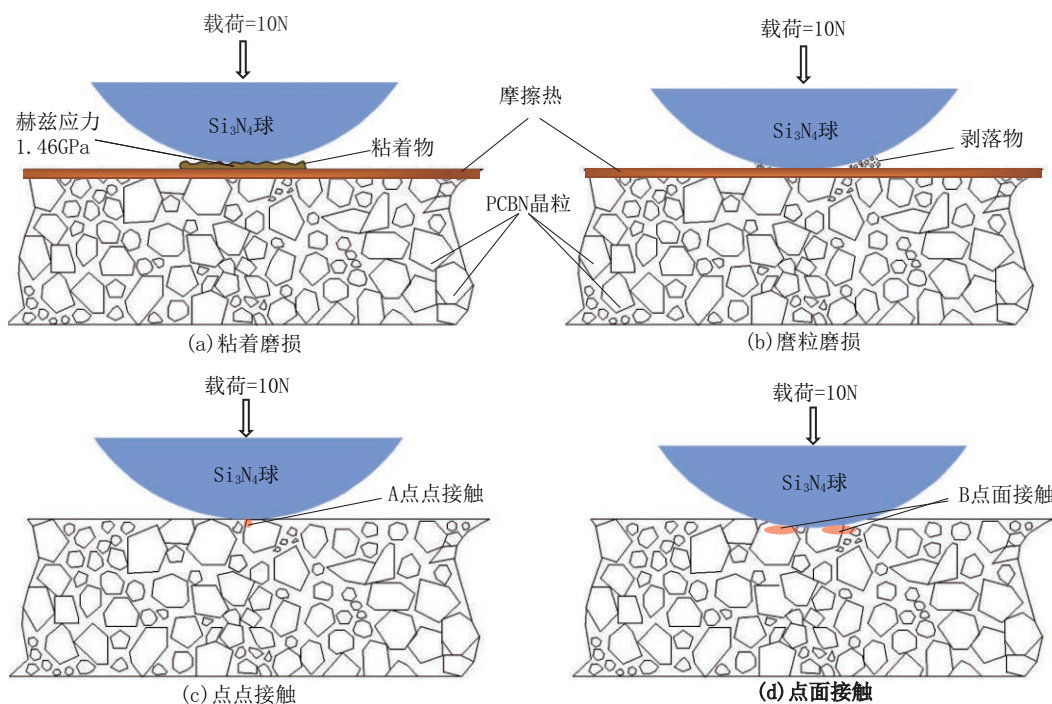


图 12 PCBN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦界面示意

Fig.12 Schematic diagram of PCBN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> friction interface

参考文献 (References):

[1] 国土资源部. 国土资源“十三五”科技创新发展规划[Z]. 2016. Ministry of Land and Resources. Land and resources “13th Five-Year” scientific and technological innovation development plan [Z]. 2016.  
 [2] 自然资源部. 自然资源科技创新发展规划纲要[Z]. 2018. Ministry of Land and Resources. Outline of the natural resources science and technology innovation development plan[Z]. 2018.

[3] 张金昌. 地质钻探技术与装备 21 世纪新进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43 (4): 10-17. ZHANG Jinchang. New development of the 21st century geological drilling technology and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(4): 10-17.  
 [4] 孙建华, 刘秀美, 王志刚, 等. 地质钻探孔内复杂情况和孔内事故种类梳理分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(1): 4-9. SUN Jianhua, LIU Xiumei, WANG Zhigang, et al. Classifica-

- tion and analysis on complex cases and accidents in geological drilling holes[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017,44(1):4-9.
- [5] 李粤南. 深部孔段卡、埋钻事故防治对策的探讨[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2011,38(9):2-5.
- LI Yuenan. Discussion of prevention measures for bit freezing and burying accidents in deep borehole[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011,38(9):2-5.
- [6] 胡郁乐,张绍和. 钻探事故预防与处理知识问答[M]. 长沙:中南大学出版社,2010.
- HU Yule, ZHANG Shaohe. Questions and answers on drilling accident prevention and treatment knowledge [M]. Changsha: Central South University Press, 2010.
- [7] 蒋希文. 钻井事故与复杂问题(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社,2006.
- JIANG Xiwen. Drilling accidents and complex problems (Second Edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [8] 陈永杰,王海阔,彭进,等. 聚晶立方氮化硼的制备方法及应用进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2015,35(2):74-80.
- CHEN Yongjie, WANG Haikuo, PENG Jin, et al. Production method stand application of polycrystalline cubic boron nitride [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2015,35(2):74-80.
- [9] 王光祖. 立方氮化硼磨具新近探究综述[J]. *超硬材料工程*, 2016,28(4):42-46.
- WANG Guangzu. Review of recent research on cubic boron nitride grinding tools[J]. *Superhard material Engineering*, 2016,28(4):42-46.
- [10] Zhao Z, Xu B, Tian Y. Recent advances in superhard materials [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2016,46:383-406.
- [11] 于启勋. 超硬刀具材料的发展与应用[J]. *工具技术*, 2004,38(11):9-12.
- YU Qixun. Developmng and application of ultrahard cutting tool material[J]. *Tool Engineering*, 2004,38(11):9-12.
- [12] Dewes R C, Aspinwall D K. A review of ultra high speed milling of hardened steels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997,69:1-17.
- [13] Chou Y K, Evans C J. Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting[J]. *Wear*, 1999,225-229:234-245.
- [14] Abrao A M, Aspinwall D K. Temperature evaluation of cutting tools during machining of hardened bearing steel using polycrystalline cubic boron nitride and ceramic cutting tools[J]. *Materials Science and Technology*, 1997,13(5):445-450.
- [15] Shalaby M A, Hakim M A, Veldhuis S C. A thermal model for hard precision turning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018,98:2401-2413.
- [16] Ren X J, Yang Q X, James R D, et al. Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004,147(1):38-44.
- [17] Harris T K, Brookes E J, Taylor C J. The effect of temperature on the hardness of polycrystalline cubic boron nitride cutting tool materials[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2004,22(2-3):105-110.
- [18] Chen L, Tai B L, Chaudhari R G, et al. Machined surface temperature in hard turning [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2017,121:10-21.
- [19] 于英华. 机械制造技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- YU Yinghua. Fundamentals of mechanical manufacturing technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013.
- [20] Cerce L, Pusavec F. Increasing machinability of grey cast iron using cubic boron nitride tools: Evaluation of wear mechanisms [J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2016,23:65-78.
- [21] Braghini A, Coelho R T. An investigation of the wear mechanisms of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) tools when end milling hardened steels at low/medium cutting speeds [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001,17(4):244-251.
- [22] Liu X L, Wen D H, Li Z J, et al. Experimental study on hard turning hardened GCr15 steel with PCBN tool[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002,129(1):217-221.
- [23] Yang H, Ding N, Niu X, et al. Wear mechanism of PCBN hard cutting the powder metallurgy valve seats[J]. *Key Engineering Materials*, 2016,693:996-1002.
- [24] 王成彪,刘家浚,韦淡平,等. 摩擦学材料及表面工程[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- WANG Chengbiao, LIU Jiajun, WEI Danping, et al. Tribological materials and surface engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [25] Watanabe S, Miyake S, Murakawa M. Tribological properties of cubic, amorphous and hexagonal boron nitride films[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1991,49:406-410.
- [26] Watanabe S, Miyake S, Murakawa M. Tribological behavior of cubic boron nitride film sliding against diamond[J]. *Journal of Tribology*, 1995,117:629-632.
- [27] Watanabe S, Miyake S, Jin M, et al. Frictional behaviors of cubic BN film sliding against DLC[J]. *Tribology International*, 2004,37:923-927.
- [28] Chong Y M, Ye Q, Yang Y, et al. Tribological study of cubic boron nitride films[J]. *Diamond and Related Materials*, 2010,19:654-660.
- [29] Liu E L, An W Z, Zhang C, et al. Experimental research on oxidation behavior when cutting Ti-5553 with cemented carbide and PCBN tools[J]. *Ferroelectrics*, 2020,563:128-138.
- [30] Qin W B, Yue W, Wang C B. Understanding integrated effects of humidity and interfacial transfer film formation on tribological behaviors of sintered polycrystalline diamond[J]. *RSC Advances*, 2015,5:53484-53496.
- [31] Sanchez-Lopez J C, Erdemir A, Donnet C, et al. Feiction-induced structural transformations of diamond-like carbon coatings under various atmospheres[J]. *Surface Coating Technology*, 2003,163:444-450.
- [32] Schall J D, Gao G, Harrison J A. Effects of adhesion and transfer film formation on the tribology of self-mated DLC contacts [J]. *Journal of Physical Chemistry C*. 2009,114:5321-5330.
- [33] Bushlya V, Gutnichenko O, Zhou J, et al. Effects of cutting speed when turning age hardened inconel 718 with PCBN tools of binderless and Low-CBN grades[J]. *Machining Science and Technology*, 2013,17:497-523.
- [34] Tsutomu I, Hiroshi S. Phase formation and characterization of hard coatings in the Ti-Al-N system prepared by the cathodic arc ion plating method [J]. *Thin Solid Films*, 1991,195:99-110.

(编辑 荐华)