

引用格式: 高中堂, 李雨燕, 彭腊梅, 等. 金刚石微粉粒径对聚晶金刚石复合片组织和性能的影响[J]. 中国材料进展, 2025, 44(3): 295–302.

GAO Z T, LI Y Y, PENG L M, *et al.* Effect of Diamond Particle Size on Microstructure and Properties of Polycrystalline Diamond Compact[J]. Materials China, 2025, 44(3): 295–302.

金刚石微粉粒径对聚晶金刚石复合片组织和性能的影响

高中堂¹, 李雨燕¹, 彭腊梅², 丰德友², 王斌奇²,
高志明¹, 张传伟¹, 于 源³

(1. 西安科技大学机械工程学院, 陕西 西安 710054)

(2. 陕西太合智能钻探有限公司, 陕西 西安 712000)

(3. 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, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 聚晶金刚石复合片(PDC)性能与金刚石粒径大小、金刚石颗粒的分散均匀性以及Co粘结剂在金刚石颗粒之间的分布状态密切相关。采用高温高压烧结制备金刚石粒径分别为3, 10, 16和25 μm 的PDC, 通过X射线衍射仪、扫描电子显微镜、同步热分析仪、高速摩擦磨损实验和抗冲击实验, 研究了不同金刚石粒径的PDC的物相组成、显微组织、热稳定性、摩擦系数和抗冲击韧性。结果表明, 不同金刚石粒径的PDC的最强的衍射峰分别对应于金刚石(111)、(220)、(311)晶面, 且仅在金刚石粒径为25 μm 的PDC中发现 Co_3O_4 相; 金刚石粒径为3, 10, 16和25 μm 的PDC微观组织中Co粘结剂分别以微粒、“球状”和“孤岛状”、“叶脉状”和“孤岛状”、“叶脉状”分布; 金刚石粒径为25 μm 的PDC摩擦系数最小, 为0.049。性能测试结果表明, 粒径为10 μm 的PDC性能表现最佳, 磨损比达到了 2.04×10^6 , 抗冲击韧性为400 J, 耐热温度达到了744 $^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 金刚石粒径; 聚晶金刚石复合片; 磨损比; 热稳定性; 冲击韧性

中图分类号: TQ163; TB332 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2025)03-0295-08

Effect of Diamond Particle Size on Microstructure and Properties of Polycrystalline Diamond Compact

GAO Zhongtang¹, LI Yuyan¹, PENG Lamei², FENG Deyou², WANG Binqi²,
GAO Zhiming¹, ZHANG Chuanwei¹, YU Yuan³

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2. Shaanxi Taihe Intelligent Drilling Co., Ltd., Xi'an 712000, China)

(3. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

收稿日期: 2023-11-07 修回日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51804251, 52104384);
烟台先进材料与绿色制造山东省实验室基础研究开放
课题项目(AMGM2021F04); 西安市科学计划项目(21XJ
ZZ0041); 中国博士后基金资助项目(2020M683675XB);
陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-343)

第一作者: 高中堂, 男, 1983年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: zhongtanggao@xust.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202311007

Abstract: The performance of polycrystalline diamond composite sheet (PDC) is closely related to the diamond particle size, the dispersion uniformity of diamond particles and the distribution state of Co binder among diamond particles. PDC with diamond particle size of 3, 10, 16 and 25 μm were prepared by sintering at high temperature and high pressure. The phase composition, microstructure, thermal stability, friction coefficient and impact toughness of PDC with different diamond particle size were studied by X-ray diffractometer, scanning electron microscope, synchronous thermal analyzer, high-speed friction and wear test and impact resistance test. The results show that the stron-

gest diffraction peaks of PDC prepared with different particle sizes are (111), (220), and (311). Moreover, the Co_3O_4 phase is found in the PDC with a diamond particle size of 25 μm . The Co binder of PDC with diamond particle sizes of 3, 10, 16 and 25 μm are distributed in the forms of fine particles, spherical and isolated shapes, vein-like and isolated shapes, and vein-like shapes, respectively. The PDC with a diamond particle size of 25 μm has the smallest friction coefficient, which is 0.049. The performance test results show that the PDC with particle size of 10 μm has the best performance, the wear ratio reaches 2.04×10^6 , the impact toughness is 400 J, and the heat resistance temperature reaches 744 $^\circ\text{C}$.

Key words: size of diamond; polycrystalline diamond compacts; wear ratio; thermal stability; impact toughness

1 前言

聚晶金刚石复合片 (polycrystalline diamond compacts, PDC) 是由不同粒径大小的金刚石微粉与 Co 粘结剂混合并且与硬质合金基底在高温超高压条件下烧结制备的一种复合超硬材料^[1]。PDC 既拥有金刚石超高的硬度、优异的耐磨性和良好的导热性, 又具备硬质合金良好的强度、抗冲击韧性以及优秀的可焊性, 因此应用于较多领域, 例如石油钻探、地质勘探、煤矿开采用的钻头, 以及硬质合金、石墨、橡胶、陶瓷、塑料和木材等各种材料的切削加工^[2]。

研究表明, 金属 Co 在金刚石重结晶中起着催化剂的作用, Co 在金刚石中的分布状态对 PDC 的性能有着重要的影响^[3], Co 含量的不同会在很大程度上影响金刚石相与 Co 相的分布。陈晶晶^[4]发现引入第二相可以改善金刚石晶界周围 Co 粘结剂的分布状态, 从而影响复合片的力学性能。金刚石晶界周围的 Co 含量过高会降低 PDC 的热稳定性, 而金刚石粒径大小会影响金刚石晶界周围 Co 的含量^[5]。细小金刚石颗粒形成的金刚石层中, Co 沿金刚石颗粒周围分布, 并且分布得更细、更均匀。金刚石粒径在 PDC 制备过程中起着重要作用, 对 PDC 抗冲击韧性和磨耗比也有着重要的影响^[6]。使用较大金刚石颗粒的 PDC, 其沿金刚石颗粒之间边界的结合强度更容易变弱, 并且存在金刚石颗粒整体移位的情况。而金刚石粒度过小的 PDC, 在磨损过程中更容易发生磨粒磨损。因此研究不同粒径金刚石对 PDC 组织和性能的影响有着重要的意义。基于此, 本文研究了金刚石粒径对 PDC 抗冲击韧性和磨耗比性能的影响。

目前的研究中, 对于 PDC 性能提升的研究只集中在单一性能方面, 对于抗冲击韧性以及磨耗比方面的相关研究较少, 本文对不同金刚石粒径的 PDC 的抗冲击韧性和磨耗比进行了较为系统、深入的研究, 制备出磨耗比达 2.04×10^6 、抗冲击韧性为 400 J 和耐热温度为 760 $^\circ\text{C}$ 的高端 PDC。

2 实验

原料金刚石微粉购自中南杰特有限责任公司; Co 粉购自山东联泓新材料科技股份有限公司 (粒径为 1~3 μm ,

纯度>99.99%); 硬质合金基底购自中南杰特有限责任公司, 为 Co 基 WC 硬质合金 (Co 含量为 20%, 质量分数)。

金刚石粒径分别为 3, 10, 16 和 25 μm , 在制备 PDC 的聚晶金刚石层之前对金刚石进行预处理, 将金刚石颗粒和固体氢氧化钠以 2:5 (质量比) 的比例混合, 并向混合物中加入适量的去离子水, 搅拌混合均匀; 将混合物置于马弗炉中在 500 $^\circ\text{C}$ 下加热 30 min, 然后将产物酸洗、水洗至中性。将预处理后的金刚石微粉和 Co 粉用行星式球磨机均匀混合, 球磨时间 1 h。采用六面顶压机 (德国 Max Vöggenreiter MAVO LPQ6-2400) 在 5.0 GPa 和 1450 $^\circ\text{C}$ 条件下将混合粉末与 WC 基底烧结 90 s 制成 PDC, 烧结环境为空气环境, 冷却方式为自然冷却。

采用 X 射线衍射仪 (X-ray powder diffractometer, XRD, Bruker-D8 Advance) 分析 PDC 的相组成; 采用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM, 日立 S-4800) 分析 PDC 的聚晶金刚石层的微观形貌; 使用同步热分析仪 (德国 Netzsch 耐驰 STA 449F5) 对 PDC 的聚晶金刚石层进行热重分析和差示扫描量热分析; 采用高速往复摩擦磨损试验机 (MFT-R4000) 测量 PDC 的摩擦学性能 (摩擦系数测试条件: 摩擦副材料为氮化硅, 压力为 50 N, 滑动频率是 5 Hz, 磨损长度是 10 mm, 磨损方式为干摩擦; 磨耗比测量条件: 采用外径为 1500 mm、内径为 400 mm、抗压强度为 157 MPa、弯曲强度为 9.4 MPa 的花岗岩石材作为磨副, PDC 切削角度为 15 $^\circ$, 进刀速度为 108 mm/min, 吃刀量为 0.25 mm, 外圆车刀恒线速度为 160 mm/min, 冷却方式是水冷); 采用落锤冲击试验机 (DIT152Z) 测试 PDC 的抗冲击韧性, 冲击靶材选用硬度为 HRC 60~62 的钢块, 冲击起始能量是 40 J, 冲击最大能量是 70 J, 冲击测试次数为 10 次/10 J, 冲击角度为 70 $^\circ$ 。

3 结果与讨论

3.1 相组成和微观组织

图 1 是不同金刚石粒径的 PDC 的聚晶金刚石层的 XRD 图谱, 由图可知 4 种金刚石粒径的 PDC 的聚晶金刚石层 XRD 图谱中都存在金刚石和 Co 的衍射峰。每个 XRD 图谱中都出现了 3 个明显的金刚石特征峰, 对应 (111)、(220)、(311) 晶面。在金刚石粒径为 25 μm 的 PDC 的聚晶金刚石层的 XRD 图谱中发现了 Co_3O_4 的衍

射峰,而在其它3种粒径的PDC中未发现 Co_3O_4 的衍射峰,这是由于大粒径金刚石颗粒间间隙较大,导致空气进入,使Co粘结剂发生氧化,也同时说明小粒径的金刚石可以阻止Co粘结剂的氧化^[7]。Co的氧化在一定程度上会使得金刚石复合片的热稳定性变差^[8]。值得一提的是,随着金刚石粒径的增大,Co粘结剂的衍射峰越来越高。造成这个现象的原因是金刚石的粒径越大,金刚石颗粒之间的间隙越大,金刚石颗粒之间的Co越聚集^[9]。除此之外,在XRD图谱中并未观察到明显的石墨峰生成,表明金刚石在烧结过程中没有石墨化。

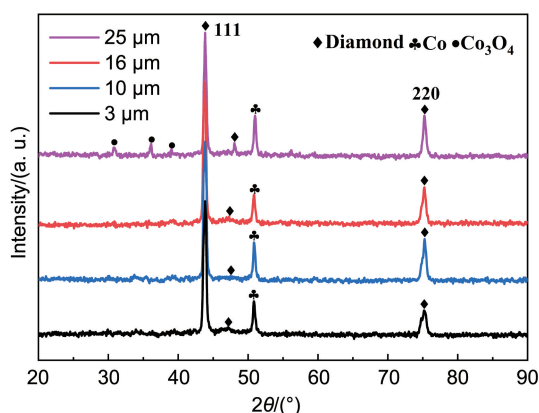


图1 不同金刚石粒径的PDC的聚晶金刚石层的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of polycrystalline diamond layers of PDC with different diamond particle sizes

研究表明,Co的均匀分布将有利于PDC的抗冲击韧性及热稳定性^[10]。采用不同粒径的金刚石微粉制备的PDC聚晶层的Co含量不同,会影响PDC的力学性能。不同金刚石粒径的PDC的微观组织如图2所示,所有的PDC都由白色区域和黑色区域组成,其中黑色区域为金刚石,白色区域为Co粘结剂。图2a是金刚石粒径为3 μm的PDC的微观组织,其中Co粘结剂以微粒形态,均匀且弥散地分布于金刚石颗粒周围。随着金刚石粒径的增大,Co粘结剂在金刚石颗粒间的分布状态也随之变化^[11]。如图2b所示,金刚石粒径为10 μm的PDC中,Co粘结剂主要以“球状”和“孤岛状”均匀地分布在金刚石颗粒周围。随着金刚石粒径的进一步增大,金刚石颗粒之间的间隙也会随着增大,这就导致了金刚石颗粒间Co粘结剂团聚长大。因此,在图2c和2d中可以明显发现白色区域的面积增大。图2c中Co粘结剂主要呈“叶脉状”和“孤岛状”分布,而在图2d中,Co粘结剂主要以“叶脉状”分布。其他研究发现,不同的金刚石粒径会影响Co粘结剂在金刚石颗粒周围的分布状态^[12],大颗粒的金刚石粒径会导致Co粘结剂的部分聚集^[13]。因此,金刚石粒径越小,Co粘结剂在金刚石周围分布得更加均匀。

在不同粒径金刚石烧结制备的PDC的显微组织中可以清晰地看到金刚石颗粒的存在。金刚石颗粒与Co粘结剂的界面清晰,未观察到金刚石与Co粘结剂的地方,金刚石与金刚石之间形成了D—D键,颗粒之间结合良好,金刚石颗粒之间的良好结合是PDC性能优异的基础^[14]。研究指出,在PDC中必须保证金刚石颗粒之间有良好的重结晶界面^[15]。在图2中可以发现,制备出的PDC中均未出现金刚石颗粒异常长大现象。产生这种现象的原因是随着烧结的进行,合成腔内的压力不断增大,金刚石微粒被剧烈挤压造成破裂、破碎,因此形成了晶粒细化^[16]。另外,金刚石粒径不同,金刚石的晶型也有着一定的变化^[17],图2c和2d的PDC中金刚石晶型的棱角比较明显,而图2a和2b的PDC中金刚石晶型的棱角则比较模糊。由图2可以发现,Co分布最均匀的是金刚石粒径为10 μm的PDC。

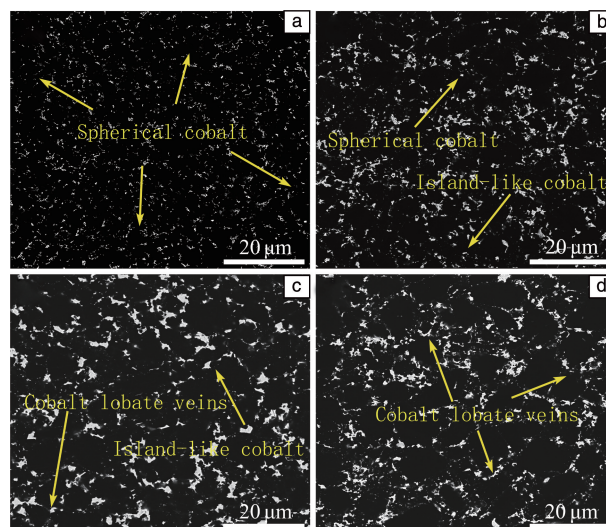


图2 不同金刚石粒径的PDC的微观组织: (a) 3 μm, (b) 10 μm, (c) 16 μm, (d) 25 μm

Fig. 2 Microstructure of PDC with different diamond particle sizes: (a) 3 μm, (b) 10 μm, (c) 16 μm, (d) 25 μm

为了进一步探究金刚石粒径为10 μm的PDC的微观组织,对它进行了高倍SEM观察,由图3a可以看出,在金刚石颗粒周围有氧化腐蚀现象,分析可知,这是由于Co和氧气的亲和力比较强,所以Co粘结剂在制备烧结过程中发生了氧化反应,并且在表面形成了氧腐蚀坑^[18],这将影响PDC的力学性能。为了验证Co粘结剂被氧化,对图3a中的白色虚线区域进行了EDS元素面分布分析。从EDS元素面分布可以看出(图3b),深灰色带状区域的元素主要是Co和O,可确定它为Co的部分氧化物。然而,在图1的XRD分析结果中,金刚石粒径为10 μm的PDC中未发现 Co_3O_4 的衍射峰,这是由于 Co_3O_4 的含量较低,因此未被检测出。

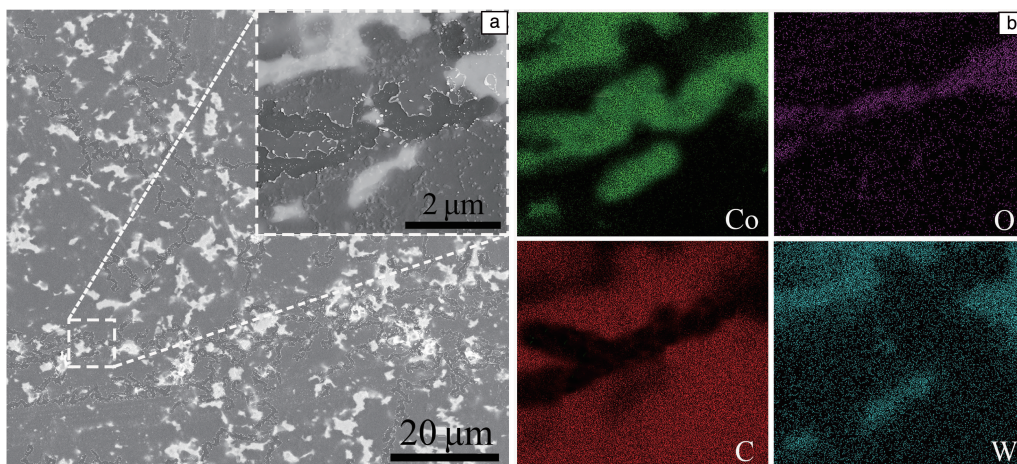


图 3 金刚石粒径为 10 μm 的 PDC 的 SEM 照片 (a) 和 EDS 图谱 (b)

Fig. 3 SEM image (a) and EDS mappings (b) of PDC with diamond particle size of 10 μm

3.2 摩擦学性能

3.2.1 摩擦系数

摩擦系数是 PDC 的一项重要性能参数, 为了研究 PDC 的摩擦学性能, 采用高速往复摩擦磨损试验机测试了 4 种不同金刚石粒径的 PDC 的摩擦系数, 如图 4 所示。金刚石粒径为 3 μm 的 PDC 试样具有最高的摩擦系数和最大的波动范围, 其平均摩擦系数最高, 为 0.061。这是因为金刚石的粒径最小, PDC 层的 Co 粘结剂分布均匀, 滑动摩擦副在较软的粘结剂和较硬的金刚石颗粒之间的摩擦导致了摩擦系数的剧烈变化^[19]。

从图 4a 中可以看出, 随着摩擦时长的增加, PDC

的摩擦系数整体呈下降趋势。文献指出由于表面经过长时间滑动摩擦, 产生的磨屑在高温下氧化成了石墨, 石墨具有润滑作用, 所以导致了摩擦系数的略微降低^[20]。然而, 在磨损 10 min 时, 金刚石颗粒粒径为 3 和 16 μm 的 PDC 的摩擦系数突然变大。这是由于经过长时间的磨损后, 部分小粒径的金刚石颗粒因结合强度不高而脱落。可知长时间的滑动摩擦热效应影响了 PDC 表面的微观结构和化学状态, 进而造成了上述摩擦曲线系数的差异^[21]。图 4b 是金刚石粒径分别为 3, 10, 16 和 25 μm 的 PDC 的平均摩擦系数, 可以看出随着金刚石粒径的变大, 平均摩擦系数逐渐变小, 其中金刚石粒径为 25 μm 的 PDC 的平均摩擦系数最小, 为 0.049。

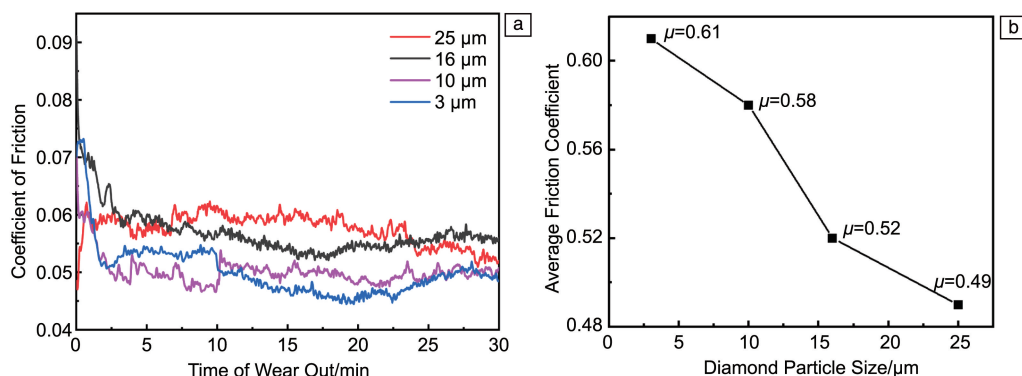


图 4 不同金刚石粒径的 PDC 的摩擦系数曲线

Fig. 4 Friction coefficient curves of PDC with different diamond particle sizes

金刚石粒径为 3, 10, 16 和 25 μm 的 PDC 的磨痕三维形貌如图 5 所示。红色表示高度最高, 蓝色表示高度最低, 可以发现随着金刚石粒径的不断增大, 磨痕不断变浅随后又变大。其中, 金刚石粒径为 3 μm 的 PDC 的磨痕最深, 磨痕面较窄; 而金刚石粒径为 10 μm 的 PDC

的磨痕最浅, 几乎看不到磨痕; 金刚石粒径为 16 μm 的 PDC 的磨痕又变深; 这说明金刚石粒径为 10 μm 的 PDC 的耐磨性能最好。这是因为小粒径的金刚石颗粒在摩擦磨损过程中容易脱落, 造成严重的磨粒磨损, 从而产生较深的磨痕和较大的摩擦系数; 而随着金刚石粒径的不

断增大, 金刚石颗粒间的结合强度变大, 不容易脱落, 在摩擦磨损过程中摩擦系数更小; 然而更大的金刚石颗粒因间隙大反而加快了磨损。

通过对磨痕三维形貌的分析可以得出, 金刚石粒径

为 3, 10, 16 和 25 μm 的 PDC 的磨损率分别为 2.5×10^{-11} , 1.1×10^{-11} , 1.3×10^{-11} 和 $1.5 \times 10^{-11} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 由磨损率的变化规律可以发现, 不同金刚石粒径的 PDC 的磨损率呈现先下降后增大的趋势。

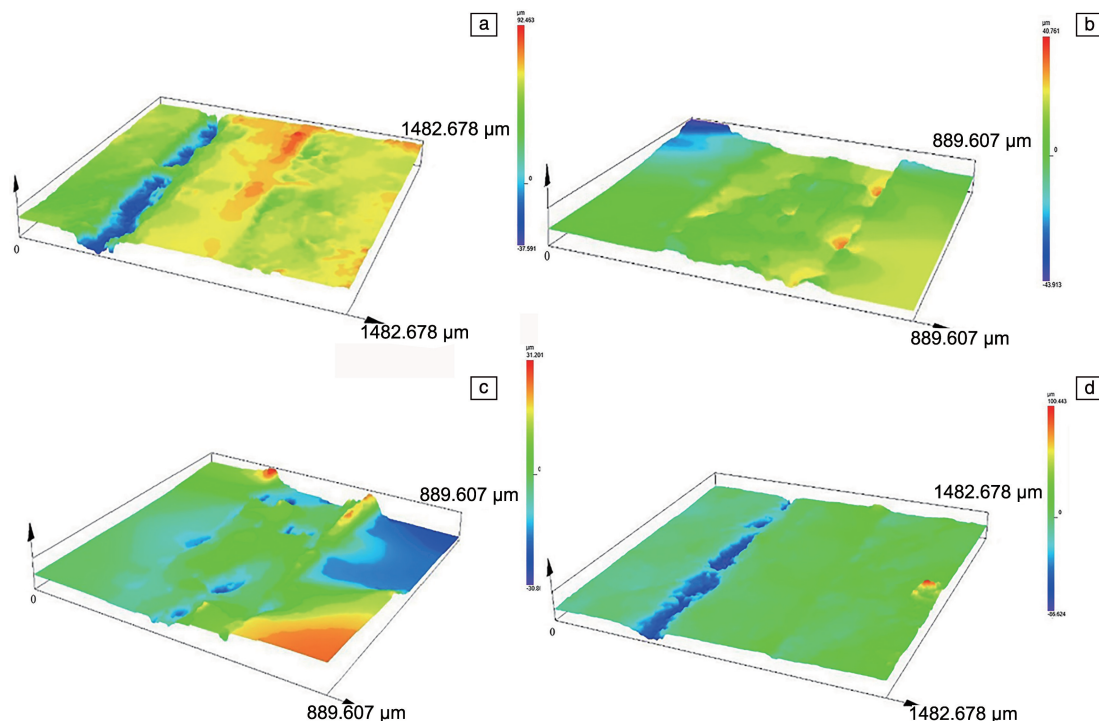


图5 不同金刚石粒径的PDC摩擦磨损后的三维形貌: (a) 3 μm , (b) 10 μm , (c) 16 μm , (d) 25 μm

Fig. 5 3D morphologies of PDC with different diamond particle sizes after wear test: (a) 3 μm , (b) 10 μm , (c) 16 μm , (d) 25 μm

3.2.2 磨损比

耐磨性是衡量金刚石材料性能的首要指标。金刚石材料的硬度、断裂韧性和强度都可以通过耐磨性反映^[22]。图6是不同金刚石粒径的PDC的磨损比统计图, 从图中可以直观地发现不同金刚石粒径的PDC的耐磨性的差异。金刚石粒径为10 μm 的PDC的磨损比最高, 达到了 2.04×10^6 ; 金刚石粒径为3 μm 的PDC的磨损比最低, 为 5.32×10^5 。研究表明, 不考虑其他情况, PDC的耐磨性随着金刚石粒径的减小而增大, 但是当金刚石粒径不断减小到一定程度时, 这种现象就会消失^[23]。出现这种现象的原因是, 超细金刚石表面含有大量杂质, 清理过程十分复杂, 并且很难清理干净, 在高温高压烧结过程中杂质使得金刚石颗粒间的结合强度受到严重影响, 从而导致PDC耐磨性下降^[24]。因此, 金刚石微粉粒度小到一定程度时, 影响复合片耐磨性的重要因素是原料的纯净度^[25]。

3.3 抗冲击韧性

抗冲击韧性是PDC的重要性能指标, 因此, 研究不同金刚石粒径的抗冲击韧性十分必要^[26]。图7是不同金

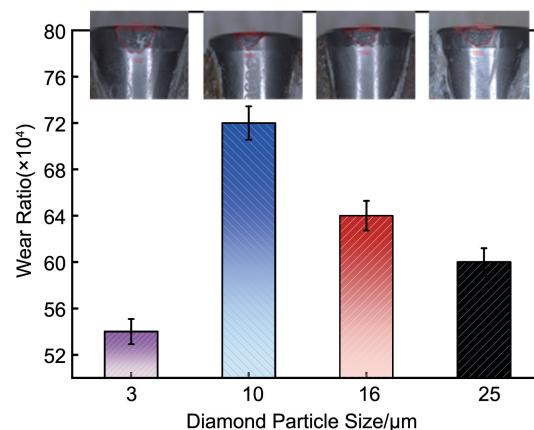


图6 不同金刚石粒径的PDC的磨损比

Fig. 6 Wear ratio of PDC with different diamond particle sizes

刚石粒径的PDC的冲击功, 反映了PDC的抗冲击韧性。从图中可以看出, 粒径为10 μm 的PDC的抗冲击韧性是最大的, 冲击功为400 J。且随着金刚石微粉粒径从3增大到25 μm 时, PDC试样的冲击韧性先增大后减小。金刚石粒径过小会产生大量的金刚石结合界面, 导致复合

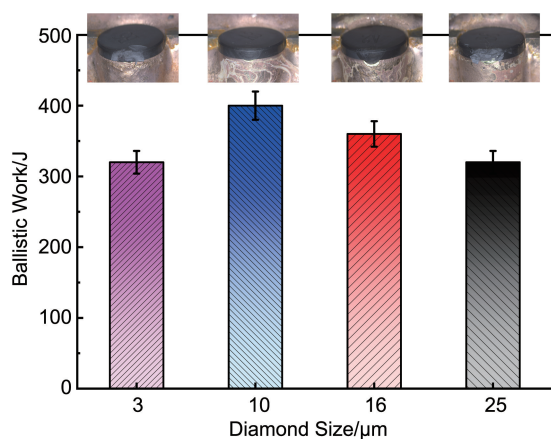


图 7 不同金刚石粒径的 PDC 的冲击功

Fig. 7 Impact toughness of PDC with different diamond particle sizes

片的抗冲击韧性较差^[27]。当金刚石粒径过大时, 金刚石颗粒之间的缝隙较大, 过多的 Co 粘结剂分布其中, 也会导致复合片的抗冲击韧性变差^[28]。因此, 合适的金刚石粒径是制备高抗冲击韧性 PDC 的关键。

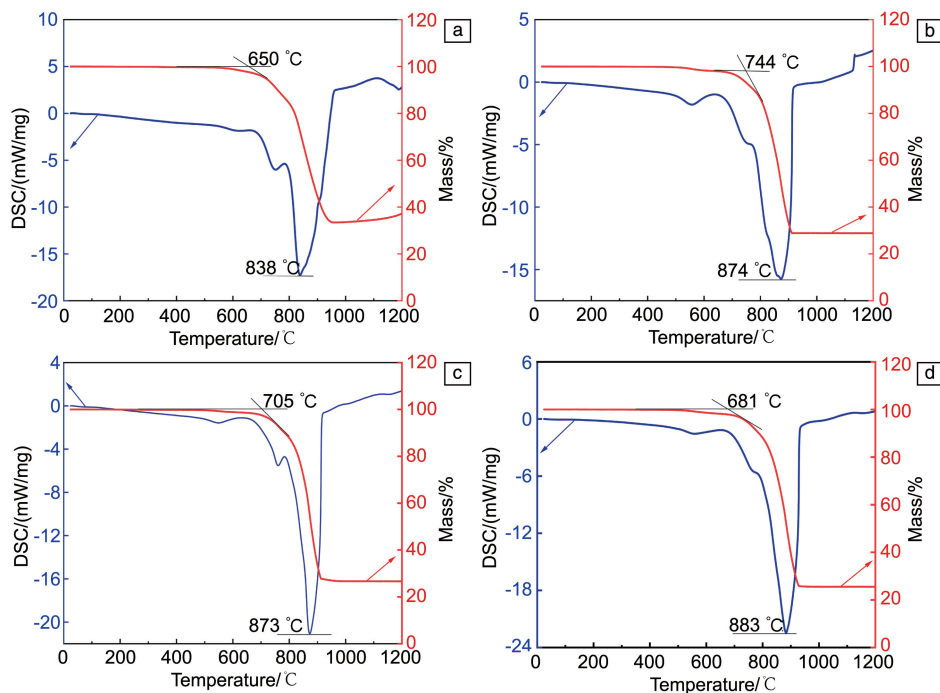
3.4 热稳定性

石墨化是导致 PDC 在工作中性能恶化的根本原因, 因此, 对于制备性能稳定的 PDC 来说, 提高热稳定性很有必要^[29]。图 8 是不同金刚石粒径的 PDC 的 TG-DSC 曲线。由图中可以发现, 经过持续加热, TG 曲线上出现了拐点, 并且急速下降。这表明金刚石已经开始失重, 拐

点所对应的温度是金刚石材料的初始氧化温度。观察 DSC 曲线可知, 曲线出现拐点处的起始温度是分解反应发生的开始温度。由 TG-DSC 分析可知, 4 种不同金刚石粒径的 PDC 的耐热性差异较大, 金刚石粒径为 10 μm 的 PDC 材料的耐热温度最高, 为 744 $^{\circ}\text{C}$; 而金刚石粒径为 3 μm 的 PDC 的耐热温度最低, 为 650 $^{\circ}\text{C}$ 。分析可知造成这种现象的原因是金刚石粒径为 3 μm 的 PDC 的金刚石微粉颗粒最细, 最容易被氧化和石墨化。金刚石粒径为 25 μm 的 PDC 材料耐热性也较差, 是由于金刚石粒径较大, 颗粒之间的 Co 粘结剂较多, 在 Co 的催化下, 金刚石发生了石墨化^[30]。图 8 中金刚石粒径为 3, 10, 16 和 25 μm 的 PDC 的 TG 曲线分别在 650, 744, 705 和 681 $^{\circ}\text{C}$ 时开始呈现向下趋势, 并且 TG-DSC 曲线上存在一个放热峰。通过分析知道, 金刚石和 O_2 反应生成 Co_3O_4 , 试样会失重; Co 和 O_2 反应生成 Co_3O_4 , 试样会增重。但是 PDC 中 Co 的含量远远小于金刚石的含量, 所以 Co 氧化产生化合物造成试样的增重会小于金刚石氧化造成试样的失重, 产生的结果就是试样一直在失重。由前文分析可知, PDC 的耐热温度不仅取决于粘结剂的含量, 还取决于金刚石微粉粒度大小以及杂质含量^[31]。

4 结 论

(1) 金刚石粒径为 3, 10, 16 和 25 μm 的聚晶金刚石复合片 (polycrystalline diamond compacts, PDC) 的 XRD 图

图 8 不同金刚石粒径的 PDC 的 TG-DSC 曲线: (a) 3 μm , (b) 10 μm , (c) 16 μm , (d) 25 μm Fig. 8 TG-DSC curves of PDC with different diamond particle sizes: (a) 3 μm , (b) 10 μm , (c) 16 μm , (d) 25 μm

谱中均出现了3个明显的金刚石特征峰,3条最强的衍射峰分别对应着(111)、(220)、(311)晶面;在金刚石粒径为25 μm 的PDC衍射峰中发现了 Co_3O_4 的衍射峰。

(2)金刚石粒径为3 μm 的PDC中Co粘结剂主要以微粒分布;金刚石粒径为10 μm 的PDC中Co粘结剂主要以“球状”和“孤岛状”分布;金刚石粒径为16 μm 的PDC中Co粘结剂主要以“孤岛状”和“叶脉状”分布;金刚石粒径为25 μm 的PDC中Co粘结剂主要以“叶脉状”分布。

(3)金刚石粒径为3 μm 的PDC试样具有最高的摩擦系数,为0.061;金刚石粒径为25 μm 的PDC试样具有最低的摩擦系数,为0.049。金刚石粒径为10 μm 的PDC磨耗比最高,达到了 2.04×10^6 ,金刚石粒径为3 μm 的PDC磨耗比最低,为 5.32×10^5 。用金刚石粒径为10 μm 的金刚石微粉制备的PDC试样的抗冲击韧性是最大的,冲击功为400 J。金刚石粒径为10 μm 的PDC的耐热温度最高,为744 $^{\circ}\text{C}$;金刚石粒径为3 μm 的PDC材料的耐热温度最低,为650 $^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献 References

- [1] 赵凯伦. 聚晶金刚石烧结过程中应力与密度有限元分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
ZHAO K L. Study on Polycrystalline Diamond Sintering Process of Stress and the Density of Finite Element Analysis[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [2] 聂孟杰, 裴黄崑, 黄成志, 等. 电焊机[J], 2023, 53(4): 63-72.
NIE M J, PEI Y Y, HUANG C Z, *et al.* Electric Welding Machine [J], 2023, 53(4): 63-72.
- [3] HUANG H F, ZHAO B, WEI W L, *et al.* International Journal of Refractory Metals & Hard Materials[J], 2020, 92(1): 11-19.
- [4] 陈晶晶. 聚晶金刚石复合片(PDC)显微结构与性能的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
CHEN J J. Study on the Microscopic Structure and Performance of the Polycrystalline Diamond Compact[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [5] 李灏博, 赵志伟, 王恒, 等. 超硬材料工程[J], 2021, 33(6): 42-47.
LI H B, ZHAO Z W, WANG H, *et al.* Superhard Material Engineering[J], 2021, 33(6): 42-47.
- [6] BAEK K A. Journal of Korean Institute of Metal and Materials[J], 2017, 55(11): 56-64.
- [7] WU Z J. Cemented Carbide[J], 2010, 42(8): 19-25.
- [8] 舒登峰. 金属/金属氧化物纳米颗粒对单晶金刚石摩擦学行为的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
SHU D F. Effect of Metal/Metal Oxide Nanoparticles on the Tribological Behavior of Single Crystal Diamond[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- [9] SUMIYA H, IRIFUNE T. Journal of Materials Research[J], 2007, 22(8): 2345-2351.
- [10] 卢康, 许竞翔, 孙强, 等. 中国材料进展[J], 2022, 41(7): 536-546.
LU K, XU J X, SUN Q, *et al.* Materials China[J], 2022, 41(7): 536-546.
- [11] 杨雄文, 冯泉, 王旭, 等. 超硬材料工程[J], 2021, 33(6): 34-41.
YANG X W, FENG X, WANG X, *et al.* Superhard Material Engineering[J], 2021, 33(6): 34-41.
- [12] POLINI R, NORMAND F O L, MARCHESELLI G, *et al.* Journal of the American Ceramic Society[J], 2010, 82(6): 1429-1435.
- [13] 汪冰峰, 王斯琰, 唐治, 等. 矿冶工程[J], 2009, 29(5): 90-93.
WANG B F, WANG S Y, TANG Z, *et al.* Mining and Metallurgical Engineering[J], 2009, 29(5): 90-93.
- [14] 高中堂, 段迪, 彭腊梅, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2024, 53(8): 2321-2330.
GAO Z T, DUAN D, PENG L M, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2024, 53(8): 2321-2330.
- [15] 范文捷. PCD层与WC-Co基体之间界面结构与性能的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
FAN W J. Research on the Interface Structure and Properties Between PCD Layer and WC-Co Matrix[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.
- [16] 邵华丽. D-D键合型聚晶金刚石的制备及脱钴技术研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
SHAO H L. Research on the Synthesis of D-D Bonding Polycrystalline Diamond and Method for Removing Cobalt from It[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.
- [17] SHUAI W, LONG X D, XU N C, *et al.* Superhard Material Engineering[J], 2014, 78(7): 43-46.
- [18] 邓福铭, 马峰, 陈启武. 人工晶体学报[J], 2003, 32(4): 377-381.
DENG F M, MA F, CHEN Q W. Journal of Synthetic Crystals[J], 2003, 32(4): 377-381.
- [19] 陈朝然. 坚硬地层钻探用复合超硬材料(PDC)研制及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
CHEN C R. Development and Performance Research of Polycrystalline Diamond Compact for Hard Rock Drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [20] 高英敏, 解涛, 解峰, 等. 降低石墨润滑剂摩擦系数的方法: CN1544590[P]. 2003-11-11.
GAO Y M, XIE T, XIE F, *et al.* Method for Reducing Friction Coefficient of Graphite Lubricant: CN1544590[P]. 2003-11-11.
- [21] 贾洪声, 李彦涛, 王琰弟, 等. 超硬材料工程[J], 2010, 22(4): 21-23.
JIA H S, LI Y T, WANG Y D, *et al.* Superhard Material Engineering

- [J], 2010, 22(4): 21-23.
- [22] BOLAND J N, LI X S. Materials[J], 2010, 3(2): 1390-1419.
- [23] 汪冰峰, 王绍斌, 杨扬, 等. 矿冶工程[J], 2009, 29(1): 94-96+100.
- WANG B F, WANG S B, YANG Y, *et al.* Mining and Metallurgical Engineering[J], 2009, 29(1): 94-96+100.
- [24] YU H, LI S, HU E. Diamond & Related Materials[J], 1994, 3(3): 222-226.
- [25] 陈超, 林峰, 盘玉英, 等. 超硬材料工程[J], 2013, 25(5): 11-15.
- CHEN C, LIN F, PAN Y Y, *et al.* Superhard Material Engineering[J], 2013, 25(5): 11-15.
- [26] ZHANG F, LU Y, XIE D, *et al.* Engineering Failure Analysis[J], 2022, 140: 106503.
- [27] 孙伟, 赵海峰, 张天翔, 等. 钻采工艺[J], 2018, 41(6): 87-89+105.
- SUN W, ZHAO H F, ZHANG T X, *et al.* Drilling & Production Technology[J], 2018, 41(6): 87-89+105.
- [28] JONG-KUPAR K, AKAISHI M, YAMAOKA S, *et al.* Journal of Materials Science[J], 1992, 27(17): 4695-4697.
- [29] 黄志强, 晏瑀琪, 李琴, 等. 金属热处理[J], 2018, 43(10): 14-19.
- HUANG Z Q, YAN Y Q, LI Q, *et al.* Heat Treatment of Metals[J], 2018, 43(10): 14-19.
- [30] EVANS S, NEY M R. The Journal of Physical Chemistry C[J], 2018, 122(12): 6629-6636.
- [31] 刘志强. 工具技术[J], 2006, 89(8): 15-26.
- LIU Z Q. Tool Engineering[J], 2006, 89(8): 15-26.