

精密与超精密加工

预制应力提高大尺寸金刚石抛光成功率

安康^{1a}, 张永康^{1a}, 刘鹏², 张亚琛^{1a}, 杨志亮², 许光宇^{1a}, 李利军^{1a},
冯旭瑞², 吴海平^{1a}, 李鸿^{1a}, 张旭芳^{1b}, 刘峰斌^{1a}, 李成明^{2*}

(1.北方工业大学 a.机械与材料工程学院 b.信息学院, 北京 100144;

2.北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

摘要: **目的** 验证预制应力方法在抛光大尺寸金刚石膜中的有效性, 通过预制应力方法提高大尺寸金刚石膜的抛光成功率。**方法** 首先, 利用拉曼光谱 (Raman Shift)、X 射线衍射 (XRD) 对金刚石膜样品进行测试, 利用拉曼测试数据在有限元分析中引入金刚石膜残余应力, 并通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察了常温黏样抛光致样品开裂的典型断口形貌, 结合有限元模拟抛光过程中金刚石膜应力变化揭示了抛光过程中升温引起的应力导致金刚石膜开裂。随后, 采用有限元分析模拟了预制应力在金刚石膜中的引入过程及其在抛光过程中对拉应力的抵消作用。研究了黏接温度和夹具厚度对预制应力的影响。**结果** 在相同夹具厚度下, 预制应力随黏样温度升高, 呈近似线性增高; 在相同黏样温度下, 预制应力先随夹具厚度增加而快速增高, 夹具厚度达到 30 mm 后预制应力增长速率变缓, 夹具厚度达到 50 mm 后预制应力逐渐趋向于稳定。通过预制应力方法在夹具厚度 50 mm、90 °C 黏样的条件下成功抛光出直径 125 mm 的金刚石膜。通过原子力显微镜 (AFM) 测试抛光过的金刚石膜晶粒内部粗糙度 $S_a=1$ nm。**结论** 研究结果表明, 预制应力法能够有效地在金刚石膜中引入压应力, 显著提高了大尺寸金刚石膜抛光成功率。

关键词: CVD 金刚石膜; 有限元分析; 预制应力; 大尺寸金刚石膜; 金刚石抛光; 机械抛光

中图分类号: TG356.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)06-0143-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.06.013

Prefabricated Stress for Improving Success Rate of Large-size Diamond Polishing

AN Kang^{1a}, ZHANG Yongkang^{1a}, LIU Peng², ZHANG Yachen^{1a}, YANG Zhiliang², XU Guangyu^{1a},
LI Lijun^{1a}, FENG Xurui², WU Haiping^{1a}, LI Hong^{1a}, ZHANG Xufang^{1b}, LIU Fengbin^{1a}, LI Chengming^{2*}

(1. a. School of Mechanical and Materials Engineering, b. School of Information Science and Technology,

North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. Institute for Advanced Materials and

Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: In this study, the prefabricated stress method is applied to the diamond polishing process to improve the success

收稿日期: 2024-07-25; 修订日期: 2024-11-10

Received: 2024-07-25; Revised: 2024-11-10

基金项目: 国家自然科学基金 (52102034, U23A2025); 北京市教育委员会科学研究计划项目资助 (KM202410009010); 北方工业大学有组织科研 (2023YZZKY12); 北方工业大学研究生教育教学改革研究项目 (YJS2024JG16)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52102034, U23A2025); R&D Program of Beijing Municipal Education Commission (KM202410009010); Organized Research Fund of North China University of Technology (2023YZZKY12); Postgraduate Education and Teaching Reform Project of North China University of Technology (YJS2024JG16)

引文格式: 安康, 张永康, 刘鹏, 等. 预制应力提高大尺寸金刚石抛光成功率[J]. 表面技术, 2025, 54(6): 143-151.

AN Kang, ZHANG Yongkang, LIU Peng, et al. Prefabricated Stress for Improving Success Rate of Large-size Diamond Polishing[J]. Surface Technology, 2025, 54(6): 143-151.

*通信作者 (Corresponding author)

rate of large-size diamond polishing. Based on the difference in thermal expansion coefficients between the diamond film and the metal substrate, compressive stress is introduced into the diamond film by high-temperature bonding and cooling process before polishing to offset the tensile stress caused by friction heating up during the polishing process, so as to inhibit the generation and extension of cracks. The work aims to explore and verify the effectiveness of the prefabricated stress method in polishing large-size diamond film, to improve the success rate of large-size diamond polishing, and to provide a new technical way for improving the surface quality and application performance of diamond films.

In this study, finite element analysis and experimental methods were used to verify the validity of the prefabricated stress method. The diamond film samples were tested by Raman spectroscopy and phase analysis of X-ray diffraction (XRD), and the Raman test data were used to introduce the residual stress in the diamond film in the finite element analysis. The typical fracture morphology of the sample cracking was observed by scanning electron microscope (SEM) through the polishing of bonded samples at room temperature. Combined with the finite element simulation of the diamond film stress change during the polishing process, it revealed that the stress caused by the friction heating up during the polishing process led to the cracking of the diamond film. Subsequently, finite element analysis was used to simulate the introduction process of prefabricated stress in the diamond film and its offsetting effect on the tensile stress during the polishing process, and the effects of bonding temperature and fixture thickness on the prefabricated stress were investigated.

The results of finite element analysis show that under the same fixture thickness, the prefabricated stress increases approximately linearly with the bonding temperature. Under the same bonding temperature, the prefabricated stress increases rapidly with the temperature firstly, and then increases slowly after the fixture thickness reaches 30 mm, and gradually tends to be stabilized. The introduction of compressive stress into the diamond film through high temperature sample bonding can effectively offset the tensile stress due to the temperature rise caused by friction in the polishing process. The experimental results show that the diamond film with a diameter of 125 mm has been successfully polished by the prefabricated stress method under the conditions of fixture thickness of 50 mm and sample bonding at 90 °C.

Through a combination of finite element analysis and experimental verification, the proposed prefabricated method significantly improves the polishing success rate of large-size diamond films, demonstrating its effectiveness and feasibility. The results show that by utilizing the difference in thermal expansion coefficients between the metal fixture and the diamond film, the compressive stress introduced during the high-temperature bonding and cooling process can offset the tensile stress generated by frictional heating up during the polishing process, thus inhibiting the crack formation in the diamond film. Future studies can further optimize the prefabricated stress introduction conditions to further improve the polishing quality of diamond films.

KEY WORDS: CVD diamond film; finite element analysis; prefabricated stress; large-size diamond film; diamond polishing; mechanical polishing

大尺寸金刚石膜因其卓越的物理和化学特性,如极高的硬度、优良的导热性、良好的抗腐蚀性和极低的摩擦因数^[1-4],在电子器件、光学器件和机械工具等领域有着广泛的应用^[5-7]。然而,化学气相沉积的金刚石表面粗糙度较大,无法直接满足上述应用的要求,需抛光后才能应用^[8-9]。

在金刚石膜的抛光过程中,由于其脆性,容易产生裂纹,这严重影响了其表面质量和应用性能^[10-12]。特别是在大尺寸金刚石膜的抛光中,这种挑战更为显著。目前,常见的加工方法是将金刚石膜固定在金属夹具上进行抛光^[13],然而,这种方法存在问题:在抛光过程中,由于摩擦作用,金刚石膜和金属夹具的温度升高。虽然抛光设备有水冷装置,但是抛光盘转速通常在 1 000 转以上,表面光滑时

摩擦因数较大,夹具和金刚石膜的导热系数不同以及黏接剂的热阻,使冷却装置无法强冷降温,导致夹具和金刚石之间存在温度梯度,冷却液无法将夹具热量全部带走,冷却液温度会随之升高,冷却效果变差。此外,金刚石膜和金属夹具的热膨胀系数差异较大,金属夹具的热膨胀系数通常比金刚石膜的热膨胀系数大 1 个数量级。这导致在抛光过程中,金刚石膜内部会产生显著的拉应力。对于大多数陶瓷材料,其抗压强度远大于抗拉强度^[14]。在高温环境下,拉应力会超过金刚石断裂强度使金刚石膜产生裂纹。因此,如何有效控制或抵消抛光过程中由于高温引起的应力,是提升大尺寸金刚石膜抛光质量的关键^[15]。

为了解决这一问题,依照本文作者授权的发明

专利^[16], 本文将预制应力方法应用于金刚石抛光过程。该方法利用金刚石膜和金属基底热膨胀系数的差异, 在高温黏接到冷却过程中, 成功地引入了压应力。运用有限元方法对预制应力方法进行了验证, 并且通过预制应力方法实现了直径 125 mm 金刚石膜的无裂纹抛光。1875 年英国人 William Henry Lascell 提出预应力混凝土这一概念并获得专利^[17]。预应力技术是一种宏观结构设计方法, 通过在材料或构件中预先施加压应力, 来抵消未来可能出现的拉应力。这种预施加的压应力能够提高材料在受到拉伸作用时的抗裂能力, 从而提高材料的可靠性和耐久性。预应力混凝土和预应力玻璃(钢化玻璃)目前在全世界范围内得到了广泛应用^[18-22]。在陶瓷制备领域也是研究热点^[23]。由于预应力是个技术问题, 在金刚石抛光领域, 发表论文较少。

通过本研究, 验证了预制应力方法在大尺寸金刚石膜抛光中的有效性, 为提高大尺寸金刚石膜的表面质量和应用性能提供了一种新的技术途径。

1 实验与仿真

1.1 实验

本文使用 DC Arc Plasma Jet CVD 技术沉积金刚石膜, 其制备工艺与此前报道所用工艺相同^[24-25]。金刚石膜采用机械抛光, 抛光盘转速较高, 达 1 000 转以上。抛光过程中水冷装置只对抛光夹具进行冷却, 冷却液不会到抛光界面。图 1 为金刚石膜预制应力方法抛光流程图。如图 1 所示将夹具放置在加热台上加热, 待夹具温度升高到所需温度后, 使用 α -氰基丙烯酸酯胶黏剂(502 胶水)将金刚石膜黏接在夹具上。随后将夹具和金刚石取下降温, 利用二者膨胀系数差异, 在降温过程中利用金属夹具和金刚石膜收缩量差异在金刚石膜中预制压应力, 完成预制应力过程。对预制应力的金刚石膜进行抛光, 预制应力可有效抵消抛光过程中升温引起的拉应力, 预防金刚石膜开裂。抛光后将金刚石膜和夹具加热, 将金刚石膜取下, 获得完整的金刚石膜。实验过程中对室温黏样抛光开裂样品进行了 Raman、XRD、SEM 测试, 对预制应力方法成功抛光样品进行了 AFM 测试。

1.2 有限元分析

为有效研究预制应力方法的合理性, 本文采用有限元方法对预制应力过程以及抛光过程的应力和变形量随温度的变化情况进行了分析, 有限元模拟流程图如图 2 所示。使用有限元分析软件构建三维模型, 建立夹具直径为 120 mm, 厚度分别为 3、

5、7、10、20、30、40、50、60、70、80 mm 的模型, 金刚石膜厚度为 0.3 mm。赋予模型物理参数后, 将金刚石膜与夹具进行装配, 使用绑定命令将夹具和金刚石接触面绑定并设置黏接行为模拟黏接。

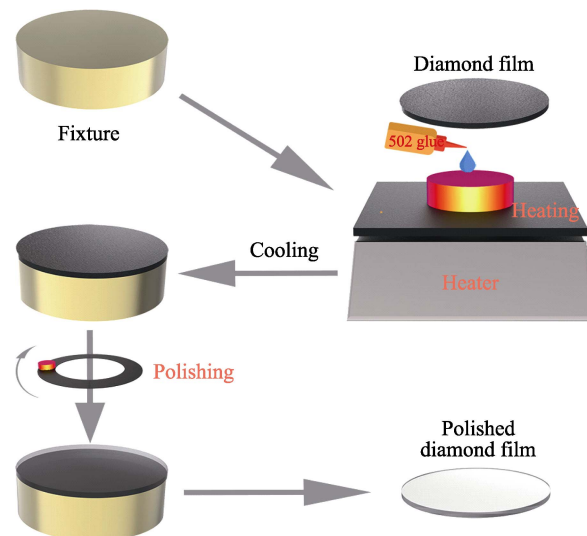


图 1 预制应力方法抛光金刚石膜流程图
Fig.1 Schematic diagram of polished diamond film by prefabricated stress method

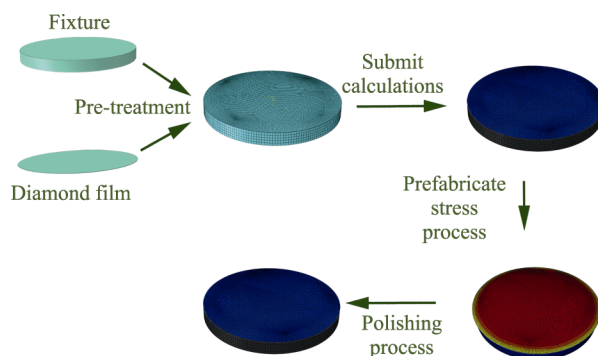


图 2 有限元模拟预制应力方法抛光金刚石膜流程图
Fig.2 Schematic diagram of diamond film polished by prefabricated stress method through finite element simulation

在模型中, 金刚石和黄铜作为主要材料, 其物理属性根据文献和实验数据进行了详细定义。金刚石的物理参数包括密度为 3.51 g/cm^3 、杨氏模量为 1100 GPa 、泊松比为 0.2 、热导率为 $2000 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 在 20°C 时的热膨胀系数为 $1.057 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 110°C 时的热膨胀系数为 $1.1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ^[26-28]。黄铜的物理参数包括密度为 9.095 g/cm^3 、杨氏模量为 115 GPa 、泊松比为 0.31 、热导率为 $385 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 在 20°C 时的热膨胀系数为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 110°C 时的热膨胀系数为 $1.95 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ^[29]。

网格划分是确保模拟精度的关键步骤, 本文将网格算法设置为中性轴算法、六面体网格。金刚石直径方向以 1 mm 一格进行布种, 厚度方向以 0.3 mm 一格进行布种, 而黄铜夹具由于厚度尺寸

变化较大, 黄铜夹具网格布种选择非固定网格尺寸, 对于不同厚度夹具选择不同网格尺寸, 确保在模拟过程中能够准确捕捉到应力和变形的细微变化, 保持合理的计算效率。网格划分如图3所示。

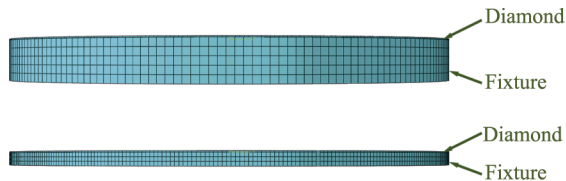


图3 不同夹具厚度下网格划分示意图
Fig.3 Schematic diagram of meshing under different fixture thicknesses

分析步代表不同阶段或时间段特定的加载条件和分析目标。通过合理设置分析步和相应载荷, 能够更准确地模拟降温过程中的应力分布和变形过程, 确保了结果的科学性和实用性, 为后续的实验设计和工艺优化提供了理论依据。本文通过对分析步设置不同载荷, 对室温黏样抛光、预制应力、预制应力后在抛光过程中温度变化引起的应力变化情况进行模拟, 将极限工况考虑在内。载荷中的黏接温度设置为30、50、70、90和110℃, 选取20℃为室温。对于CVD法制备的金刚石薄膜, 在制备过程中的各种缺陷、杂质等因素会引起金刚石膜内应力^[30-32]。因此, 在载荷模块中对金刚石膜赋予内应力场。

2 结果与讨论

图4为金刚石膜样品代表性XRD结果和多个位置拉曼位移统计结果。从图4a可以看出, 样品为多晶金刚石膜, 存在(111)、(220)、(311)等晶面^[33]。图4b为样品多个位置拉曼位移统计结果, 对图中数据求平均值后, 根据公式(1)^[34]计算金刚石膜内应力:

$$\sigma = -A \times (\nu - \nu_0) \quad (1)$$

式中: A 是与CVD金刚石膜相关的经验常数, $A=0.57$; ν 为金刚石峰测量值 (本文取多点拉曼位移结果平均值); ν_0 为金刚石零应力拉曼峰位, $\nu_0=1\,332.5\text{ cm}^{-1}$ 。测量数据后通过公式(1)计算得金刚石膜内应力值为 -163.6 MPa 。金刚石膜此时为压应力状态。基于实际测量数据, 在有限元分析软件中, 对模型进行赋值 (如图5所示)。

2.1 室温黏样抛光金刚石膜

为观察室温黏样抛光金刚石膜时的应力变化。使用有限元软件对此过程进行了模拟。图6为夹具厚度为10 mm、升温到73和110℃时金刚石膜表面应力分布云图。由图6可知, 温度升高到70℃时, 金刚石膜最大应力达597.9 MPa, 当温度升高到110℃时, 金刚石膜最大应力达1 093.3 MPa。从图6可以看出, 室温黏样抛光时金刚石膜应力随温度升高而升高, 应力整体从圆心向圆周递减分布。在抛光过程中摩擦生热引起夹具和金刚石温度升高, 升温后金属衬底膨胀量大于金刚石, 产生较大热应力, 可能导致金刚石开裂。需要注意的是, 有限元模拟软件计算出的Von Mises应力是一种用于描述材料中复杂应力状态的综合应力测度, 通常用于材料的强度分析。它是根据材料的主应力计算出来的, 以估计在复杂应力状态下材料可能发生塑性变形或破坏的趋势。Von Mises应力是一个正值, 表示材料中应力状态的强度, 但不直接反映实际应力值的正负。因此, 计算结果无法展示实际应力值的正负, 而是提供了一个衡量材料在多轴应力状态下可能发生屈服或破坏的指标。

未采用预制应力方法直接对样品进行抛光, 抛光过程中温度升高, 进而导致样品开裂。图7a为含典型断口的切片样品, 图7b为切片样品的断口SEM图像。如图7b所示红色圈出部分断口无明显

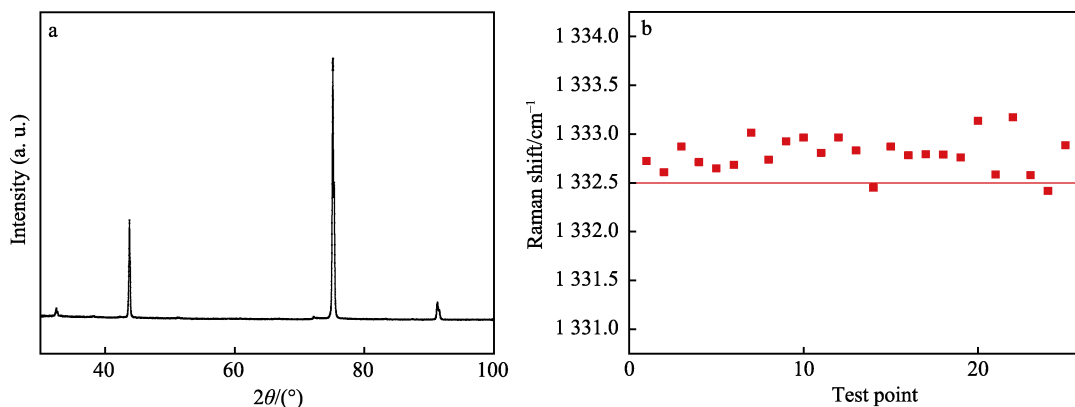


图4 金刚石膜样品代表性XRD结果(a)与多个位置拉曼位移统计结果(b)
Fig.4 Representative (a) XRD results of diamond film samples with (b) Raman shift statistics at multiple locations

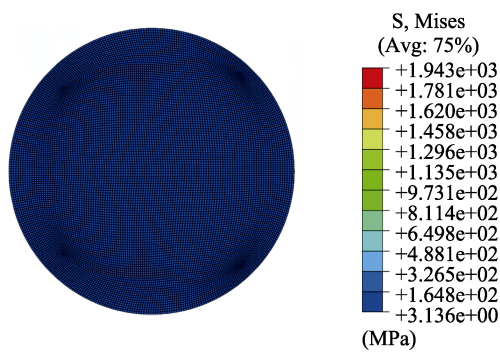


图 5 有限元模拟金刚石膜内应力分布图
Fig.5 Residual stress distribution of diamond film by finite element simulation

解理台阶, 说明该部分发生沿晶断裂。其余部分断裂在晶粒内部发生, 断口处出现大量解理台阶^[35-36], 说明样品其余部分发生穿晶断裂。由此可以推断出样品断口为混合断裂机制, 此样品相对于之前所报道的金刚石膜断裂强度较低^[36]。结合图 6 可以推断出, 抛光时摩擦引起的高温导致夹具对金刚石产生较大拉应力, 应力达 1 GPa 以上, 导致金刚石开裂。

为研究抛光过程中的应力以及变形量变化, 对抛光过程中由于升温引起的应力以及变形进行了模拟, 具体变化趋势如图 8 所示。图 8a 为夹具厚

度为 10 mm、加热到不同温度金刚石膜的最大应力。由图 8a 可知, 随温度升高, 金刚石所受应力呈近似线性增加。由图 8b 可知, 随着应力增大, 金刚石的变形量也随之增大, 但始终小于黄铜夹具变形量。此现象归因于黄铜的热膨胀系数比金刚石大 1 个数量级, 这也是热应力产生的原因。

2.2 采用预制应力方法抛光金刚石膜

为解决金刚石膜抛光过程中的热应力问题, 尝试采用预制应力方法进行抛光研究。以 10 mm 夹具厚度为参考, 通过夹具厚度变化, 研究夹具厚度与应力变化趋势。根据有限元分析金刚石应力分布云图, 选择金刚石膜直径上的应力进行分析。在软件中将直径上所有点的应力数据导出求平均值, 对应力进行分析。相同夹具厚度下应力变化随温度趋势如图 9a 所示, 随黏接温度增加, 金刚石膜冷却后所受到的压应力持续上升, 与温度呈近似线性关系。夹具厚度为 30 mm 时, 随温度的增加, 平均应力从 207.6 MPa 线性增加到 1 654.6 MPa。在相同黏接温度下, 随着夹具厚度增大, 平均应力也呈上升趋势, 但与随温度变化不同, 随厚度增加平均应力刚开始增加速率较快, 随后增长速率逐渐放

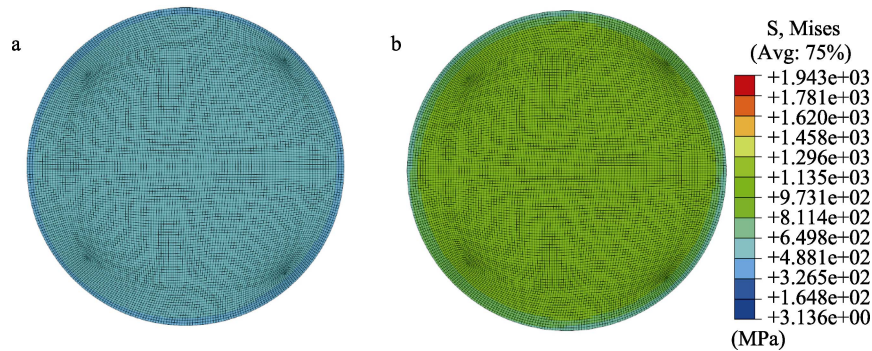


图 6 室温黏样后抛光升温至 70 °C (a)、110 °C (b) 金刚石表面应力分布
Fig.6 Stress distribution on diamond surface after polishing at temperature up to (a) 70 °C and (b) 110 °C after bonding at room temperature

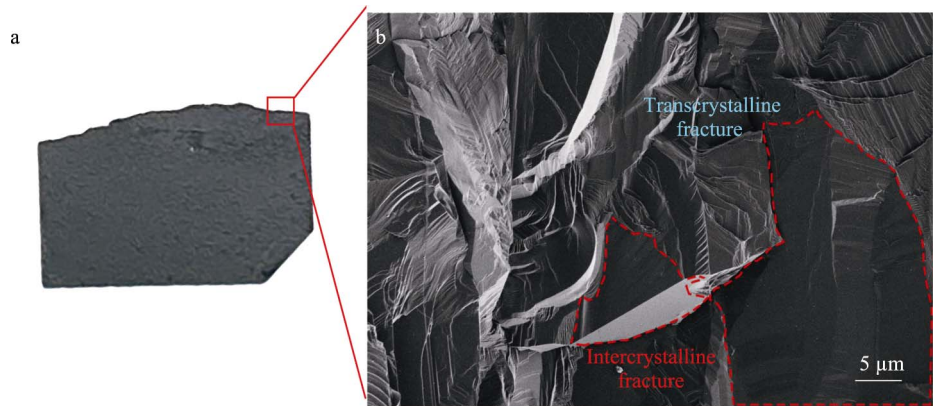


图 7 含典型断口的切片样品 (a)、切片样品断口 SEM 图像 (b)
Fig.7 Sliced sample containing a typical fracture (a) and SEM image of the fracture of the sliced sample (b)

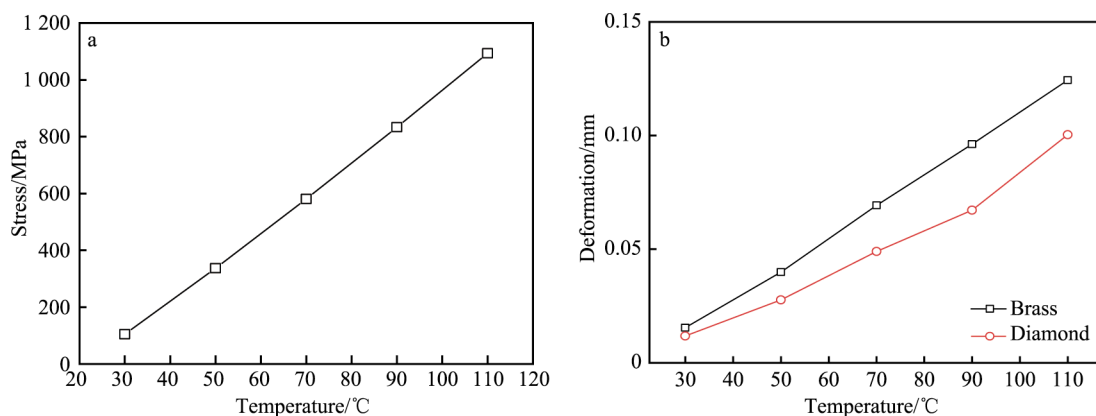


图8 夹具厚度为 10 mm 时金刚石膜最大应力随温度变化曲线 (a)、夹具厚度为 10 mm 时夹具和金刚石膜变形量随温度变化曲线 (b)

Fig.8 Variation curve of maximum stress on the diamond film with temperature under a fixture thickness of 10 mm (a) and variation curve of deformation of fixture and diamond film with temperature under a fixture thickness of 10 mm (b)

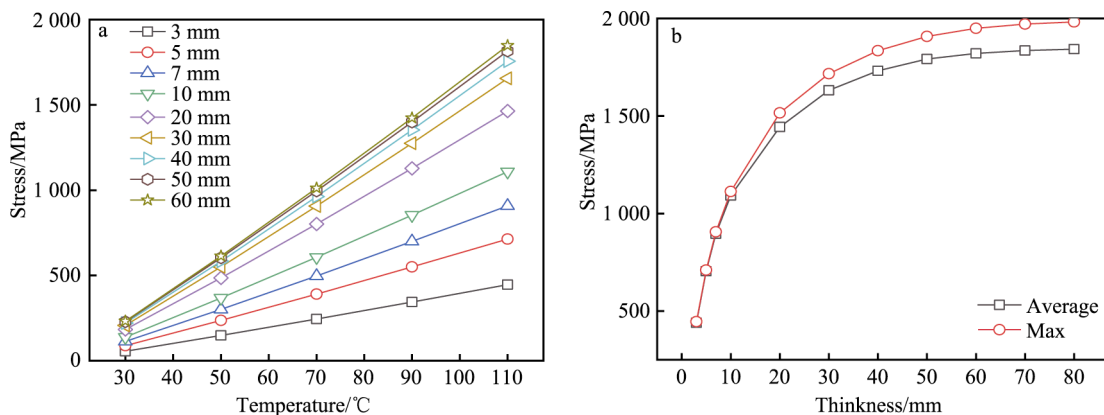


图9 不同夹具厚度下金刚石膜平均预制应力随黏样温度变化曲线 (a)、110 °C 黏样时预制应力随夹具厚度变化曲线 (b)

缓。从图 9b 可以看出夹具厚度小于 30 mm 时, 随夹具厚度增大平均应力增长速率较快; 夹具厚度大于 30 mm 时, 随夹具厚度增大平均应力增长速率逐渐放缓; 夹具厚度大于 50 mm 时, 平均应力趋于稳定, 基本不再增长。在 110 °C 黏样时, 夹具厚度从 3 mm 增加到 30 mm, 平均应力从 446.1 MPa 增长到 1 654.6 MPa; 夹具厚度从 30 mm 增长到 50 mm, 平均应力缓慢增长到 1 792.1 MPa; 夹具厚度从 50 mm 增长到 80 mm, 平均应力仅增长到 1 842.4 MPa。由此可知在相同黏接温度下, 应力先随夹具厚度的增大而快速增大, 当夹具厚度到 30 mm 以上时增加缓慢, 夹具厚度到 50 mm 以上时逐渐趋向于稳定。因此选用厚度为 50 mm 黄铜夹具进行预制应力。

为验证预制应力方法的有效性, 本研究采用有限元分析软件对夹具厚为 50 mm 时预制应力以及抛光过程中由于摩擦升温而引起的应力变化进行了模拟。

如图 10a 所示, 在高温黏接冷却过程中, 样品

的压应力逐渐增加。温度降到室温时应力最大, 达到 1 943.2 MPa。随着升温过程的开始, 样品的应力开始下降, 并在温度升高至黏接温度时, 由于预制应力与抛光过程中因摩擦升温引起的拉应力抵消, 金刚石膜最大应力仅为 81.9 MPa, 远小于金刚石膜断裂强度。从图 10a 可以看出, 采用预制应力法抛光之后金刚石膜应力与初始应力不同, 应力未完全恢复。有限元模拟结果显示在引入金刚石膜内应力时, 采用预制应力方法抛光金刚石膜, 抛光完成后金刚石膜会发生微小形变, 这可能是应力无法恢复的原因。室温黏样抛光, 抛光完成后金刚石膜也会发生微小形变, 微小形变不会影响抛光质量。图 10b~d 分别展示了样品在预制应力过程中温度降到 42 °C、降温到室温以及抛光过程中升温到 88 °C 时金刚石膜应力分布云图。由图 10b~d 可知, 在 110 °C 黏样冷却到 42 °C 时金刚石膜表面最大应力为 1 498.9 MPa, 样品冷却到室温时金刚石膜表面最大应力达到 1 943.2 MPa, 在抛光过程中金刚石膜升温, 预制应力与升温产生的应力抵消, 温度

升高到 88 ℃时金刚石表面最大应力为 523.8 MPa, 小于图 6a 中未采用预制应力方法抛光金刚石膜升温至 70 ℃时的 597.9 MPa。抛光温度升高到 110 ℃时金刚石膜的最大应力仅为 81.9 MPa, 远小于图 6b 的 1 093.3 MPa。这些结果进一步证实了在预制应力的过程中, 应力随温度变化的趋势。验证了预制应力方法在抛光过程中的有效性, 为预制应力方法的实际应用提供了可靠的理论支持。

实际操作过程中发现当预制应力温度大于

100 ℃时, 黏结剂开始软化失效。因此为便于金刚石膜的抛光以及抛光后的加热取膜, 预制应力最佳温度为 90 ℃。综合实验以及有限元模拟结果, 最终选择 50 mm 厚的黄铜夹具, 在 90 ℃的温度下进行预制应力。并且基于预制应力方法, 成功抛光了一块直径 125 mm 的金刚石膜。图 11a~b 分别为直径 125 mm 金刚石膜沉积态和抛光后的图片。图 11c 为样品抛光后晶粒内部 AFM 粗糙度测量结果, 其粗糙度 $S_a=1$ nm。

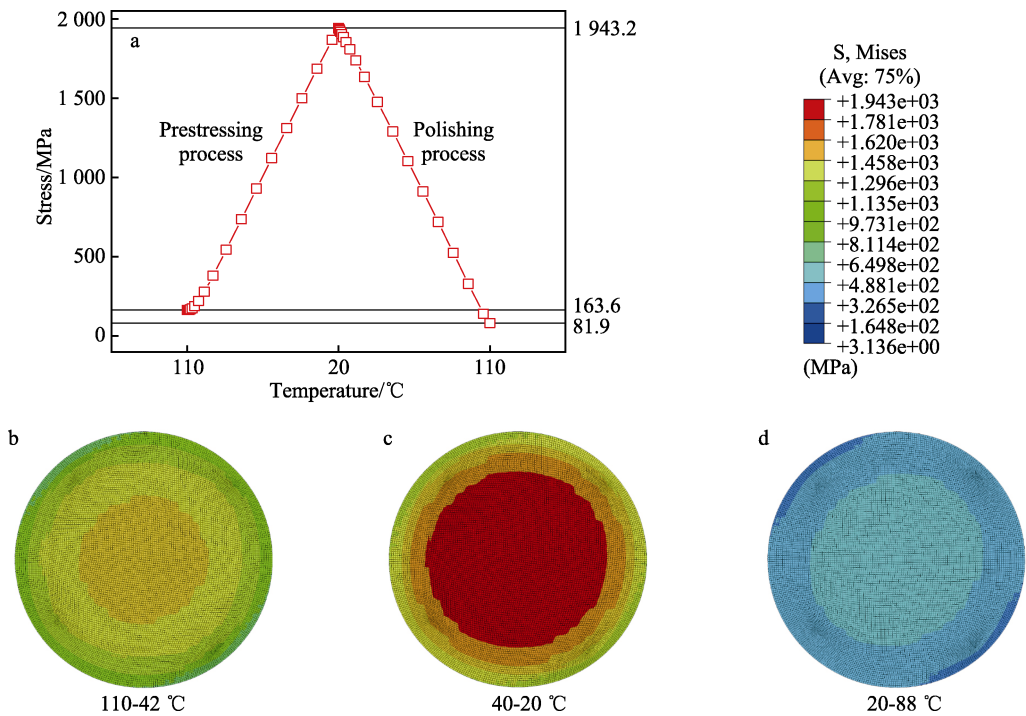


图 10 预制应力以及抛光过程应力随温度循环变化曲线 (a)、预制应力过程降温到 42 ℃时金刚石膜应力分布 (b)、预制应力过程冷却到室温时金刚石膜应力分布 (c)、预制应力后的样品进行抛光升温到 88 ℃时金刚石应力分布 (d)

Fig.10 Stress cycling curves with temperature for the prefabricated and polishing processes (a), diamond film stress distribution when the prefabricated stress process is cooled down to 42 ℃ (b), diamond film stress distribution when the prefabricated stress process is cooled down to room temperature (c) and diamond stress distribution when the prestressed samples are polished and heated up to 88 ℃ (d)

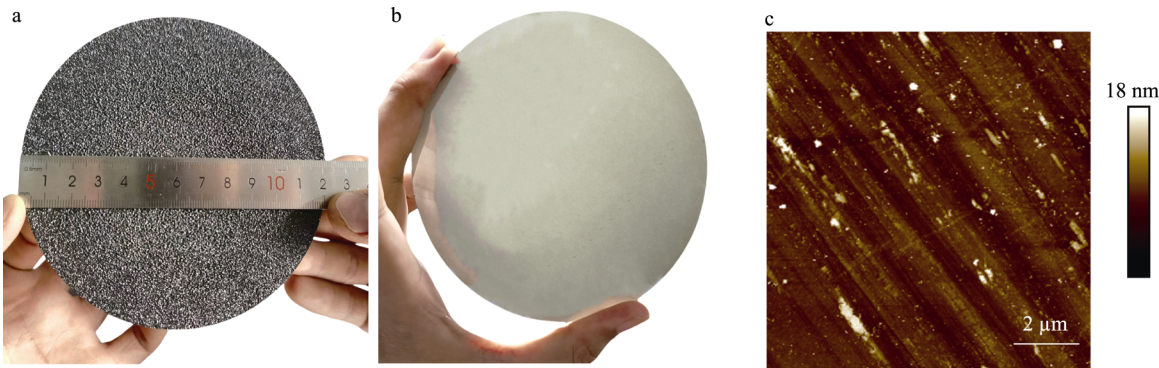


图 11 直径 125 mm 金刚石膜沉积态图片 (a)、通过预制应力方法抛光的直径 125 mm 金刚石膜 (b)、采用预制应力方法抛光的金刚石膜 AFM 图 (c)

Fig.11 Pictures of 125 mm diameter diamond film in the as-deposited state (a), 125 mm diameter diamond film polished by the prefabricated stress method (b) and AFM map of diamond film polished by the prefabricated stress method (c)

3 结论

本文将预应力方法应用于金刚石抛光领域,利用夹具和金刚石膜的膨胀系数差在金刚石膜上预制应力,提高大尺寸金刚石膜的抛光成功率。通过有限元模拟发现夹具厚度相同时随黏样温度升高,冷却到室温后的预制应力增大。黏样温度相同时,随夹具厚度增大,预制应力先增大后趋向于平稳。使用有限元分析对预制应力的样品抛光过程的应力变化进行了模拟,结果显示通过高温黏样预制应力,可以有效抵消抛光过程中升温引起的应力,验证了预制应力方法在金刚石抛光领域的有效性。并通过预制应力方法在黄铜夹具厚度为 50 mm、90 °C 黏样的条件下,成功抛光出直径 125 mm 的金刚石膜。

参考文献:

- [1] MAY P W. Diamond Thin Films: A 21st-Century Material[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2000, 358(1766): 473-495.
- [2] HICKS M L, PAKPOUR-TABRIZI A C, JACKMAN R B. Polishing, Preparation and Patterning of Diamond for Device Applications[J]. Diamond and Related Materials, 2019, 97: 107424.
- [3] YANG N J, YU S Y, MACPHERSON J V, et al. Conductive Diamond: Synthesis, Properties, and Electrochemical Applications[J]. Chemical Society Reviews, 2019, 48(1): 157-204.
- [4] WILDI T, KISS M, QUACK N. Diffractive Optical Elements in Single Crystal Diamond[J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3458-3461.
- [5] 赵正平. 超宽禁带半导体金刚石功率电子学研究的新进展[J]. 半导体技术, 2021, 46(1): 1-14.
ZHAO Z P. New Research Progress in Ultra Wide Bandgap Semiconductor Diamond Power Electronics[J]. Semiconductor Technology, 2021, 46(1): 1-14.
- [6] HOCHENG H, HSIEH M L. Signal Analysis of Surface Roughness in Diamond Turning of Lens Molds[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(15): 1607-1618.
- [7] ZHENG Y T, LI C M, LIU J L, et al. Diamond with Nitrogen: States, Control, and Applications[J]. Functional Diamond, 2021, 1(1): 63-82.
- [8] 苑泽伟, 金洙吉, 李强, 等. CVD 金刚石化学机械抛光工艺研究[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(1): 73-79.
YUAN Z W, JIN Z J, LI Q, et al. Study on the Chemical Mechanical Polishing Technique of CVD Diamond[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016, 45(1): 73-79.
- [9] 徐锋, 左敦稳, 王珉, 等. CVD 金刚石厚膜的机械抛光及其残余应力的分析[J]. 人工晶体学报, 2004, 33(3): 436-440.
XU F, ZUO D W, WANG M, et al. Study on Mechanical Polishing for CVD Diamond Thick Film and Its Residual Stresses[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2004, 33(3): 436-440.
- [10] XU W Q, XU S R, TAO H C, et al. High Quality GaN Grown on Polycrystalline Diamond Substrates with H-BN Insertion Layers by MOCVD[J]. Materials Letters, 2021, 305: 130806.
- [11] ATIKIAN H A, SINCLAIR N, LATAWIEC P, et al. Diamond Mirrors for High-Power Continuous-Wave Lasers[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 2610.
- [12] DANG C Q, LU A L, WANG H Y, et al. Diamond Semiconductor and Elastic Strain Engineering[J]. Journal of Semiconductors, 2022, 43(2): 021801.
- [13] SCHUELKE T, GROTHJOHN T A. Diamond Polishing[J]. Diamond and Related Materials, 2013, 32: 17-26.
- [14] LAWN B R. Fracture of Brittle Solids[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [15] 刘俊杰, 关春龙, 易剑, 等. 半导体用大尺寸单晶金刚石衬底制备及加工研究现状[J]. 人工晶体学报, 2023, 52(10): 1733-1744.
LIU J J, GUAN C L, YI J, et al. Research Status of Preparation and Processing of Large-Size Single Crystal Diamond Substrates for Semiconductors[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2023, 52(10): 1733-1744.
- [16] 安康, 李成明, 邵思武, 等. 抑制金刚石膜研磨抛光裂纹萌生与扩展的夹具及使用方法: CN112792735A[P]. 2021-05-14.
AN K, LI C M, SHAO S W, et al. Fixture for Controlling Initiation and Development of Grinding and Polishing Cracks of Diamond Film and Its Using Methods: CN112792735A[P]. 2021-05-14.
- [17] 廖显东. 预制预应力混凝土框架结构体系研究与应用进展[J]. 建筑结构, 2015, 45(22): 65-70.
LIAO X D. Progress of Studies and Applications of Precast Prestressed Concrete Frame Structural System[J]. Building Structure, 2015, 45(22): 65-70.
- [18] WONDRACZEK L, MAURO J C, ECKERT J, et al. Towards Ultrastrong Glasses[J]. Advanced Materials, 2011, 23(39): 4578-4586.
- [19] CHAUDHRI M M, CHEN L Y. The Catastrophic Failure of Thermally Tempered Glass Caused by Small-Particle Impact[J]. Nature, 1986, 320: 48-50.
- [20] MAURO J C, PHILIP C S, VAUGHN D J, et al. Glass Science in the United States: Current Status and Future Directions[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2014, 5(1): 2-15.

- [21] GREEN D J, TANDON R, SGLAVO V M. Crack Arrest and Multiple Cracking in Glass through the Use of Designed Residual Stress Profiles[J]. *Science*, 1999, 283(5406): 1295-1297.
- [22] 穆祥纯. 综述现代预应力技术在我国城市桥梁建设的创新发展[J]. *特种结构*, 2012, 29(2): 81-85.
MU X C. Summary about Innovation and Development of Modern Prestressed Technique in City Bridge Construction of Our Country[J]. *Special Structures*, 2012, 29(2): 81-85.
- [23] 包亦望, 孙熠, 旷峰华, 等. 高强度预应力陶瓷的发展与探索[J]. *无机材料学报*, 2020, 35(4): 399-406.
BAO Y W, SUN Y, KUANG F H, et al. Development and Prospects of High Strength Pre-Stressed Ceramics[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2020, 35(4): 399-406.
- [24] AN K, LIU P, SHAO S W, et al. Exploring Three-Point-Bending Fracture Toughness of Thick Diamond Films from Different Directions[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 448: 128888.
- [25] AN K, LI S Y, SHAO S W, et al. Evaluation of the Fracture Strength of Ultra-Thick Diamond Plate by the Three-Point Bending ISO Standard Method[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(12): 17942-17949.
- [26] A Ö, UCAR V, MIMAROGLU A, et al. Comparison of the Thermal Stresses Developed in Diamond and Advanced Ceramic Coating Systems under Thermal Loading[J]. *Materials & Design*, 2000, 21(5): 437-440.
- [27] JACOBSON P, STOUPIIN S. Thermal Expansion Coefficient of Diamond in a Wide Temperature Range[J]. *Diamond and Related Materials*, 2019, 97: 107469.
- [28] DANG C Q, CHOU J P, DAI B, et al. Achieving Large Uniform Tensile Elasticity in Microfabricated Diamond[J]. *Science*, 2021, 371(6524): 76-78.
- [29] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
XIN C L, XUE Z Q, TU J, et al. Handbook of Common Material Parameters for Finite Element Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [30] ANTHONY T R. Stresses Generated by Impurities in Diamond[J]. *Diamond and Related Materials*, 1995, 4(12): 1346-1352.
- [31] KUO C T, LIN C R, LIEN H M. Origins of the Residual Stress in CVD Diamond Films[J]. *Thin Solid Films*, 1996, 290: 254-259.
- [32] 方亮, 王万录, 王健, 等. 金刚石薄膜内应力研究现状[J]. *材料导报*, 1999, 13(6): 39-41.
FANG L, WANG W L, WANG J, et al. Current Status of Research on Internal Stress in Diamond Films[J]. *Materials Review*, 1999, 13(6): 39-41.
- [33] LIU P, SHAO S W, YANG Z L, et al. The Uniform and Robust 8-Inch CVD Diamond Plate Generated by Dual-Magnetic Field Controlled DC Jet CVD[J]. *Diamond and Related Materials*, 2024, 141: 110670.
- [34] ZHU Y L, CHEN Y H, GOU L. The Improvement in Heat Transfer Performance of Single Crystal Silicon Carbide with Diamond Film[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2024, 630: 127601.
- [35] AN K, CHEN L X, YAN X B, et al. Fracture Strength and Toughness of Chemical-Vapor-Deposited Polycrystalline Diamond Films[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(15): 17845-17851.
- [36] AN K, CHEN L X, YAN X B, et al. Fracture Behavior of Diamond Films Deposited by DC Arc Plasma Jet CVD[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 13402-13408.