

## 金刚石磨粒表面石墨烯纳米层的原位生长工艺研究

夏孟凡<sup>1</sup>, 王德祥<sup>1, 2, \*</sup>

(1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525; 2. 山东智连共同体轴承科技有限公司, 聊城 252664)

**摘要:**为抑制金刚石磨粒在加工黑色金属时的石墨化化学磨损, 提出在金刚石磨粒表面原位生长石墨烯纳米层, 利用石墨烯纳米层的物理屏障作用抑制石墨化化学磨损。以粒径 1.5 mm 的金刚石磨粒为对象, 采用液态金属镓催化法开展金刚石磨粒表面石墨烯原位生长实验。利用扫描电子显微镜 (SEM)、拉曼光谱仪评估金刚石磨粒表面石墨烯纳米层的生长质量。结果表明: 生长温度对石墨烯生长起到决定作用, 随着生长温度的升高, 石墨烯生长的层数和缺陷密度会随之增加; 液态金属镓作为金属催化剂能够降低金刚石向石墨烯转变的临界温度; 氢气起到促进碳源裂解, 提高石墨烯生长质量的作用, 但过高的氢气流量反而降低石墨烯的生长质量。金刚石磨粒表面原位生长石墨烯的最佳参数为生长温度 1000~1050 °C, 磨粒表面涂覆液态金属镓, 氢气流量 25 sccm。

**关键词:**金刚石; 磨粒; 石墨烯; 原位生长

**中图分类号:** TG584; TH16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2026)02-0090-09

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.012

## Research on the in-situ growth process of graphene nano-layers on the surface of diamond abrasive grains

XIA Mengfan<sup>1</sup>, WANG Dexiang<sup>1, 2, \*</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Shandong Zhilian Community Bearing Technology Co., Liaocheng 252664, China)

**Abstract:** In order to inhibit the chemical wear of graphitization of diamond abrasive grains during the processing of ferrous metals, it is proposed that graphene nano-layers should be grown in-situ on the surface of diamond abrasive grains, and the physical barrier effect of graphene nano-layers should be employed to inhibit the chemical wear of graphitization. Taking diamond abrasive grains with a particle size of 1.5 mm as the object, an in-situ growth experiment of graphene on the surface of diamond abrasive grains was conducted by using the liquid metal gallium as the catalyst. The growth quality of the graphene nano-layer on the surface of diamond abrasive grains was evaluated by using a scanning electron microscopy (SEM) and a Raman spectrometer. The results show that the growth temperature plays a decisive role in the growth of graphene. With the increase of the growth temperature, the number of graphene layers and the defect density increase accordingly. Liquid met-

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2022ME208)

作者简介: 夏孟凡 (1998—), 男, 山东济南人。硕士, 研究方向为磨粒加工。E-mail: 2291085349@qq.com。

\* 通信作者: 王德祥 (1988—), 男, 山东临沂人。博士, 副教授, 主要从事磨粒加工方面的研究。E-mail: wangdexiang830@126.com。

al gallium, as a metal catalyst, can lower the critical temperature when diamond is transformed to graphene. Hydrogen can promote the cracking of carbon source and improve the growth quality of graphene. However, an overly high hydrogen flow rate can reduce the growth quality of graphene. The optimal parameters for the in-situ growth of graphene on the surface of diamond abrasive grains include a growth temperature range of 1000-1050 °C, coating of liquid metal gallium on the abrasive grain surface and a hydrogen flow rate of 25 sccm.

**Key words:** diamond; abrasive grain; graphene; in-situ growth

金刚石是自然界最硬的物质,具备高导热、高耐磨和低摩擦系数<sup>[1]</sup>等一系列优异性能,使得金刚石磨粒工具在硬脆材料和有色金属<sup>[2]</sup>的超精密加工领域获得了广泛应用。但在加工黑色金属时,金刚石会产生极其严重的石墨化化学磨损<sup>[3]</sup>,导致金刚石磨粒工具的使用寿命急剧下降,因此通常认为金刚石磨粒工具无法加工黑色金属。

为抑制金刚石加工黑色金属时的石墨化化学磨损现象,目前主要有金刚石表面改性<sup>[4]</sup>和工件表面改性<sup>[5]</sup>2种方案。金刚石表面改性是指在金刚石表面涂覆耐磨性能好的涂层,阻隔金刚石与黑色金属直接接触。BRINKSMEIER等<sup>[4]</sup>采用化学气相沉积法在金刚石刀具表面分别制备了碳化钛与氮化钛涂层,碳素钢切削实验发现2种涂层均能起到抑制化学磨损的作用,并且氮化钛涂层的抑制效果要优于碳化钛。工件表面改性是指在工件表面渗入新的化学元素,抑制金刚石加工黑色金属时形成Fe—C键,从而抑制化学磨损。WANG等<sup>[5]</sup>利用单晶金刚石刀具切削经渗氮处理的模具钢,发现渗氮处理降低了金刚石刀具的石墨化化学磨损。但以上方案均存在一定问题:金刚石表面涂层工艺虽然能阻隔金刚石与黑色金属直接接触,但也会导致金刚石的切削能力无法充分发挥,同时涂层与金刚石基体的结合强度较弱,容易脱落;工件表面改性虽然通过渗入新的化学元素能阻碍Fe—C键的形成,抑制化学磨损,但也改变了工件材料本身的物理性能。

石墨烯是目前已知强度最高的材料,本征强度高达130 GPa<sup>[6]</sup>,同时石墨烯还具有良好的柔韧性,在外力作用下碳原子面会发生弯曲变形,且其内部碳原子不必重新排列即可适应外力作用<sup>[6]</sup>。尤为关键的是,石墨烯还具有良好的化学稳定性,将其作为物理屏障应用于金刚石加工黑色金属时,可大幅降低金刚石的石墨化化学磨损。CHU等<sup>[7]</sup>研究发现,采用金刚石刀具切削低碳钢时,通过在切削液中加入石墨烯纳米片,可使金刚石刀具的磨损量减少34%~96%。以上分析表明,如能在金刚石磨粒表面原位生成石墨烯纳米层,利用石墨烯纳米层的物理屏障作用可有效抑制金刚石磨粒加工黑色金属时的石墨化化学磨损。

目前石墨烯的常见制备方案有:机械剥离法<sup>[8]</sup>、碳化硅外延生长法<sup>[9]</sup>、氧化还原法和化学气相沉积法<sup>[10-11]</sup>。其中,化学气相沉积法是目前最适合大规模制备高质量石墨烯的工艺方案,故利用化学气相沉积法在绝缘衬底上生长石墨烯成为关注热点。金刚石作为绝缘衬底具有良好的高温稳定性,在高温下不与碳、氢原子发生化学反应<sup>[12]</sup>。金刚石与石墨烯互为碳的同素异形体,在一定条件下金刚石衬底中的碳元素可作为制备石墨烯纳米层的碳源。GU等<sup>[13]</sup>基于第一性原理证明了石墨烯能在金刚石表面原位自发生长,并通过热丝化学气相沉积法在金刚石衬底制备出硼掺杂金刚石薄膜,退火后自发形成了石墨烯。SHEN、CHEN等<sup>[14-15]</sup>通过液态金属镓催化法,在多晶金刚石表面原位生成了石墨烯纳米层,研究发现石墨烯纳米层以共价键结合到金刚石衬底表面时具有极高的结合强度,可以表现出超高的机械强度和机械鲁棒性。

石墨烯纳米层的生长方式与生长质量不但影响其与金刚石基体的结合强度,而且更会影响其作为物理屏障抑制金刚石石墨化化学磨损的作用效果。因此,本文采用化学气相沉积管式炉装置,使用液态金属镓催化法<sup>[16]</sup>,利用金刚石磨粒本身碳元素表面原位生长石墨烯纳米层。液态金属镓催化法生成的石墨烯以共价键形式与金刚石衬底键合,相较于掺杂形成的以范德华力与金刚石衬底结合的石墨烯,能够大大提高石墨烯与金刚石衬底的结合强度。本文利用扫描电子显微镜(SEM)和拉曼光谱仪检测石墨烯纳米层

的原位生长质量,通过分析生长温度、液态金属镓涂覆与否和氢气流量等制备工艺参数对石墨烯纳米层生长质量的影响,探究最优的制备工艺参数,为抑制金刚石石墨化化学磨损奠定研究基础。

## 1 石墨烯纳米层原位生长实验和原理

### 1.1 实验装置与实验流程

采用粒径为 1.5 mm 的单晶金刚石磨粒开展石墨烯原位生长实验。实验前,依次采用无水乙醇和去离子水对金刚石磨粒超声清洗 10 min,去除磨粒表面的有机物、氧化物等杂质。然后,将金刚石磨粒与液态金属镓搅拌混合后置于陶瓷坩埚,再将其放入高温管式炉中,待管式炉抽真空后开始石墨烯生长实验,实验装置如图 1(a)所示。图 1(b)为石墨烯生长实验全程温度  $T$  与时间  $t$  对应关系,先以  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  速率升温至  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  对管式炉进行预热,再以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  速率升温至设定的石墨烯生长温度,以  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  为例。在设定的石墨烯生长温度下保温 90 min,此阶段为石墨烯生长阶段。生长阶段结束后以  $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率缓慢降至室温。在生长实验全程均通入设定流量的氢气( $\text{H}_2$ )。生长实验完成后,将金刚石磨粒取出,并在  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度下,依次采用浓盐酸、无水乙醇和去离子水分别对其超声清洗 10 min,以去除附着在金刚石磨粒表面的液态金属镓。清洗前后金刚石磨粒表面如图 2 所示,SEM 与 EDS 分析证实清洗后金刚石表面仅存在微量金属镓残留,表面清洁度满足后续实验要求。

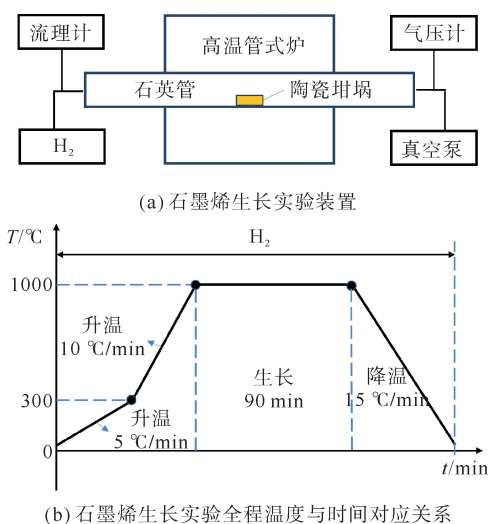


图1 石墨烯原位生长实验装置及温度-时间对应关系

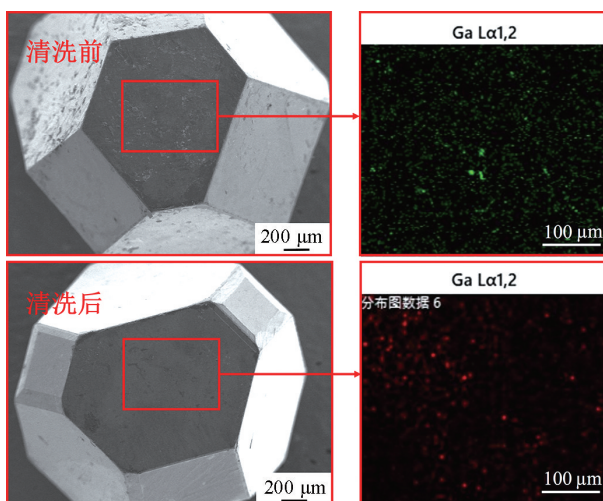


图2 清洗前后金刚石磨粒表面 SEM 与 EDS 图像

### 1.2 石墨烯纳米层原位生长原理

实验过程中,温度参数、催化剂(液态金属镓)、氢气流量构成三元调控体系,共同影响石墨烯纳米层的生长质量,核心作用机制如下:

1) 温度调控机制:生长温度对石墨烯纳米层生长起着决定性影响<sup>[17]</sup>,在高温作用下金刚石内部的 C—C 键发生裂解,驱动金刚石向石墨烯转变。温度过低,无法在金刚石磨粒表面原位生长石墨烯;温度过高,则会对金刚石内部晶格造成严重破坏,产生石墨化现象,从而导致金刚石磨粒丧失优异的切削加工能力。

2) 液态金属镓催化机制:金刚石本身缺乏使表面碳源裂解后生长成为石墨烯的驱动力,通常需要引入催化剂来提高金刚石表面碳源裂解速率,促进石墨烯在金刚石表面的成核生长行为。同时,碳源裂解效率的提高也有利于提升石墨烯的品质,降低额外的能源消耗<sup>[18-19]</sup>。低溶解度的液态金属镓具有超高的催化能力,能够促进金刚石表面的 C—C 键裂解,降低金刚石向石墨烯转变的临界温度与能量势垒<sup>[20]</sup>。随着温度升高,达到石墨烯生长温度时,液态金属镓有效破坏了金刚石表面  $\text{sp}^3$  键结构,使得游离碳源暂时被存储在液态金属镓中。由于镓的低溶解性仅溶解了少量碳原子,在生长结束后的冷却过程中,碳原

子逐渐被析出至金刚石表面,继而形成少层石墨烯纳米层,因此低碳溶解度的催化剂会起到抑制石墨烯层数的作用<sup>[21]</sup>。

3) 氢气流量的双效作用:在生长过程中通入适当浓度的氢气可以起到促进碳源裂解,提高石墨烯生长质量的作用。但过高浓度的氢气对于已生成的石墨烯会有改变边缘形态、刻蚀生长边缘及增加内部缺陷的作用,又降低了石墨烯的生长质量,为此需平衡氢气对石墨烯的生长和刻蚀作用<sup>[22]</sup>。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 生长温度对石墨烯生长质量的影响

为分析生长温度对石墨烯生长质量的影响,开展了生长温度在 950~1250 °C 下的石墨烯原位生长实验,并将生长时间设定为 90 min,氢气流量设定为 50 sccm<sup>①</sup>,且金刚石磨粒表面涂覆液态金属镓。在不同的生长温度下,金刚石磨粒表面的 SEM 分析图像和拉曼光谱分析图像分别如图 3 和图 4 所示。以下均为金刚石磨粒(111)面的分析结果。拉曼光谱分析的峰值强度比值为金刚石磨粒表面任取 3 处不同位置测试后求得的平均值,其中,位于 1350 cm<sup>-1</sup> 附近的 D 峰为石墨烯的无序振动峰,其强度  $I_D$  与缺陷密度正相关;位于 1580 cm<sup>-1</sup> 附近的 G 峰为石墨烯的主要特征峰;位于 2700 cm<sup>-1</sup> 附近的 2D 峰是二阶双声子共振峰,其强度  $I_{2D}$  与层数负相关。

在拉曼光谱分析中,石墨烯的缺陷密度和层数可通过特征峰强度比定量表征,D 峰与 G 峰强度比  $I_D/I_G$  与缺陷密度正相关,比值越大表明结构缺陷越多;2D 峰与 G 峰强度比  $I_{2D}/I_G$  与层数负相关,比值越大表明层数越少。

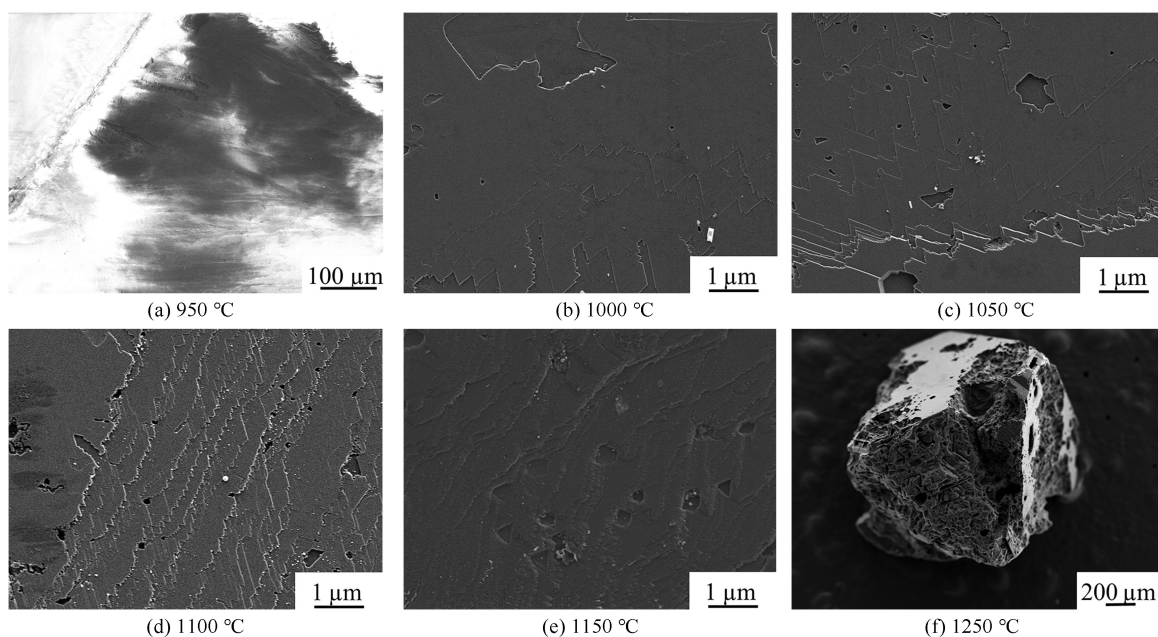


图3 不同温度下金刚石磨粒表面 SEM 图像

当生长温度为 950 °C 时,由图 3(a)可知,金刚石磨粒的 SEM 图像呈现大面积白斑,表明此时磨粒表面呈现弱导电性,并未生成石墨烯纳米层。进一步由图 4(a)可知,此时只检测到 1332 cm<sup>-1</sup> 的金刚石特征峰。综合上述分析可确定,当生长温度为 950 °C 时,金刚石磨粒能够保存完整的晶型,磨粒表面没有生成石墨烯纳米层。

当生长温度为 1000 °C 时,由图 3(b)可知,金刚石磨粒表面成功生成了石墨烯纳米层,且石墨烯表面

① 在标准大气压下,1 sccm=1 mL/min。

光滑,生长质量较高。图4(b)显示,在1350、1580和2700  $\text{cm}^{-1}$ 附近分别出现了D峰、G峰和2D峰,进一步证实金刚石磨粒表面生成了石墨烯纳米层。D峰与G峰的强度之比  $I_D/I_G=0.410$ ,表明该参数下所生长的石墨烯缺陷密度较低。2D峰与G峰的强度之比  $I_{2D}/I_G=0.406$ ,表明此时金刚石磨粒表面的石墨烯层数较少,大约为5~10层。

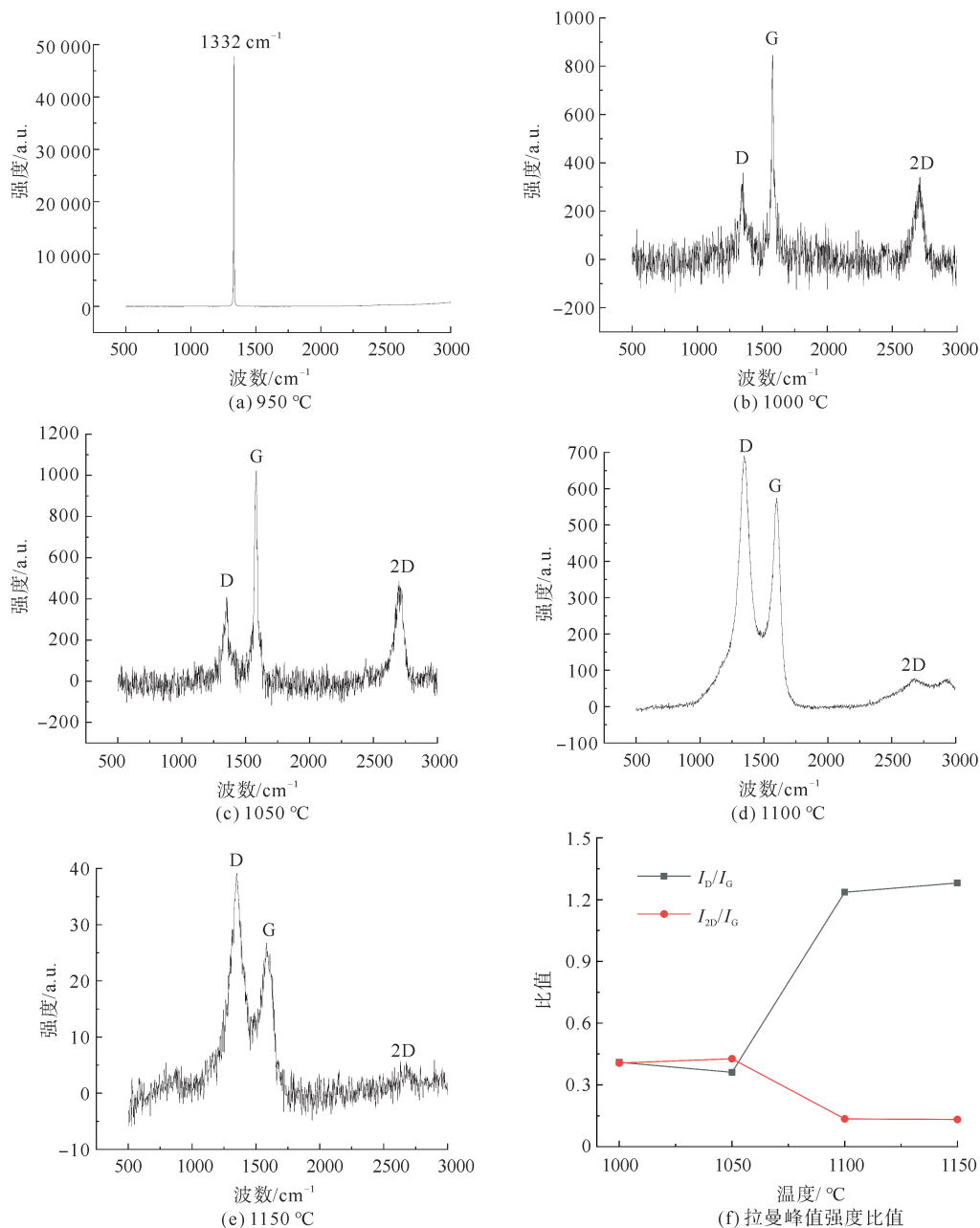


图4 不同温度下金刚石磨粒表面拉曼光谱分析

当生长温度为1050  $^{\circ}\text{C}$ 时,由图3(c)可知,此时金刚石磨粒表面生成的石墨烯表面也较为光滑,生长质量较高。由图4(c)可知,此时  $I_D/I_G=0.361$ ,  $I_{2D}/I_G=0.427$ ,表明相较于生长温度为1000  $^{\circ}\text{C}$ 时,1050  $^{\circ}\text{C}$ 生长温度下石墨烯层数与之较为接近,约为5~10层,缺陷密度略微降低。

当生长温度为1100  $^{\circ}\text{C}$ 时,由图3(d)可知,此温度下生长的石墨烯较1000和1050  $^{\circ}\text{C}$ 时表面的光滑程度降低,且层数明显增加。由图4(d)可知,此时  $I_D/I_G=1.236$ ,表明石墨烯的缺陷密度较1000和1050  $^{\circ}\text{C}$ 时大幅度提升。石墨烯层数的大幅增加,使得2D峰处的峰值强度大幅降低,此时  $I_{2D}/I_G=0.135$ ,难以利用  $I_{2D}/I_G$  准确表征石墨烯的层数。

当生长温度升高至 1150 °C 时,由图 3(e)可知,金刚石磨粒表面生成的石墨烯表面存在褶皱,不及 1000 和 1050 °C 时光滑。由图 4(e)可知,此时  $I_D/I_G=1.281$ ,表明石墨烯的缺陷密度较 1100 °C 进一步增加。此时  $I_{2D}/I_G=0.132$ ,表明石墨烯层数较 1000 和 1050 °C 时也大幅增加。

当生长温度升高至 1250 °C 时,由图 3(f)可知,金刚石磨粒严重石墨化,磨粒表面出现大面积热损伤,呈现出松散的孔洞形貌,丧失了原有的优异切削能力。

以上分析表明,随着生长温度的升高,石墨烯生长的层数和缺陷密度会随之增加。1000~1050 °C 是适合少层(5~10 层)石墨烯原位生长的温度区间,此温度下石墨烯表面光滑平整,生长质量较高,同时也可以避免高温对金刚石磨粒造成热损伤。

## 2.2 液态金属镓对石墨烯生长质量的影响

为了分析液态金属镓对金刚石磨粒表面石墨烯生长质量的影响,在最佳生长温度区间内选择 1025 °C 作为生长温度,并将氢气流量设定为 50 sccm,分别涂覆、不涂覆液态金属镓进行石墨烯生长实验。金刚石磨粒表面的 SEM 分析图像和拉曼光谱图像如图 5 所示。

由图 5(a)可知,涂覆液态金属镓的金刚石磨粒表面成功生长了石墨烯,由拉曼光谱分析(图 5(b))可知,此时  $I_D/I_G=0.402$ , $I_{2D}/I_G=0.443$ ,比值与生长温度为 1000 和 1050 °C 时相接近,表明成功生成了少层(5~10 层)石墨烯。

由图 5(c)可知,不涂覆液态金属镓的金刚石磨粒并未生长出石墨烯,其 SEM 分析图像显示磨粒表面呈现弱导电性,拉曼光谱分析(图 5(d))只检测到  $1332\text{ cm}^{-1}$  处金刚石特征峰。

以上结果表明,液态金属镓具有超强的催化能力,降低了金刚石向石墨烯转变的临界温度,促进裂解金刚石内部的 C—C 键,从而驱动金刚石向石墨烯转变。

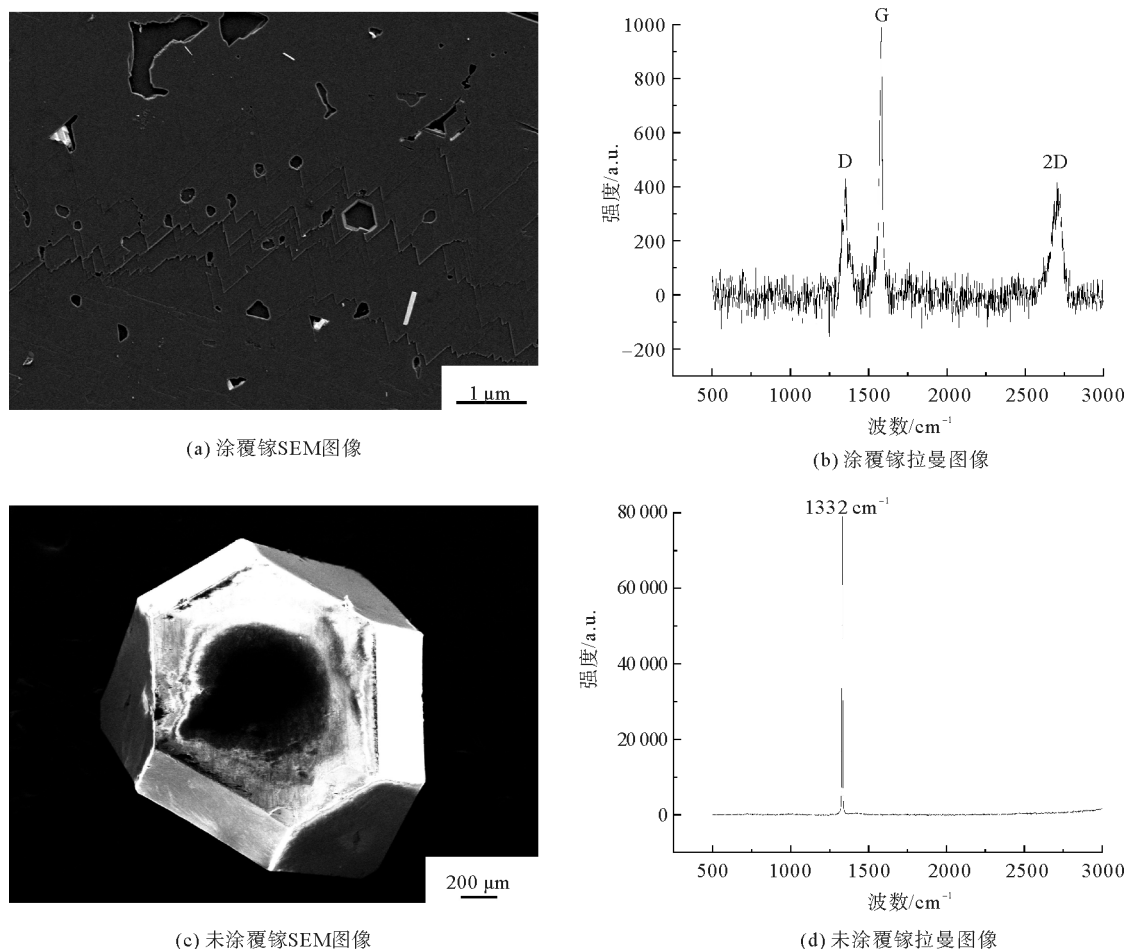


图5 改变液态金属镓条件下的金刚石磨粒表面 SEM 与拉曼光谱图像

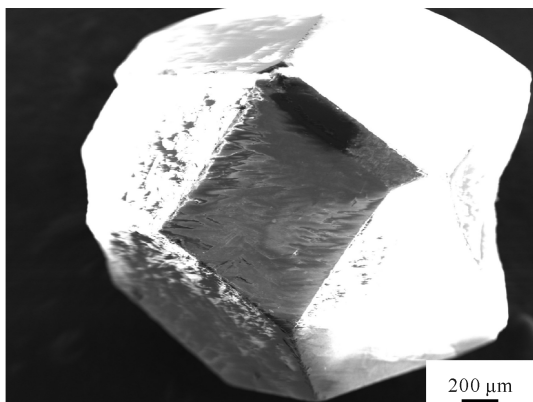
### 2.3 氢气流量对石墨烯生长质量的影响

为提高石墨烯的生长质量,在生长过程中需要通入氢气来促进碳源裂解,但过高的氢气流量会对已生成的石墨烯起到刻蚀边缘与增加内部缺陷的作用,反而降低了石墨烯的生长质量。为保证石墨烯高质量生长,需要平衡氢气对石墨烯生长的促进作用与刻蚀作用,为此设计了4组实验,如表1所示,在生长温度为1025℃,涂覆液态金属镓和不涂覆液态金属镓的条件下,分别通入0、25 sccm氢气,探究氢气流量对金刚石磨粒表面石墨烯生长质量的影响。

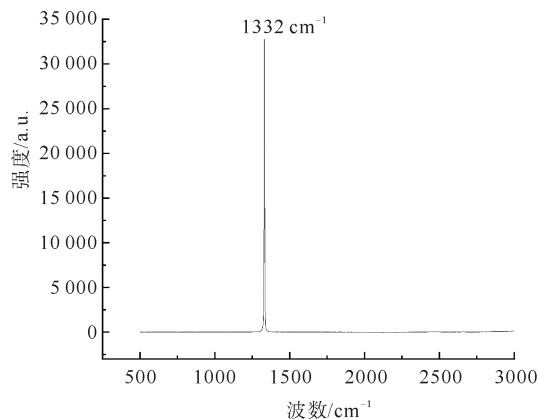
由图6可见,a、b组在不涂覆液态金属镓的条件下,仅通过改变氢气流量并不能在金刚石磨粒表面原位生长石墨烯,其SEM图像由于磨粒表面的弱导电性而出现大面积白斑,拉曼光谱分析只检测到1332 cm<sup>-1</sup>处的金刚石特征峰。这表明在达到金刚石向石墨烯转变的临界条件之前,氢气并不能诱导金刚石转变为石墨烯。

表1 不同参数分组情况

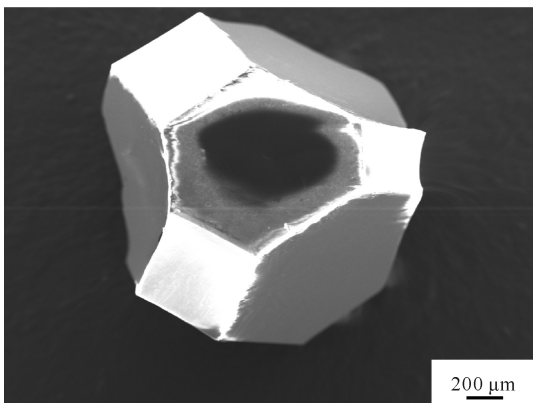
编号	温度/℃	是否涂覆液态金属镓	氢气流量/sccm
a	1025	否	0
b	1025	否	25
c	1025	是	0
d	1025	是	25



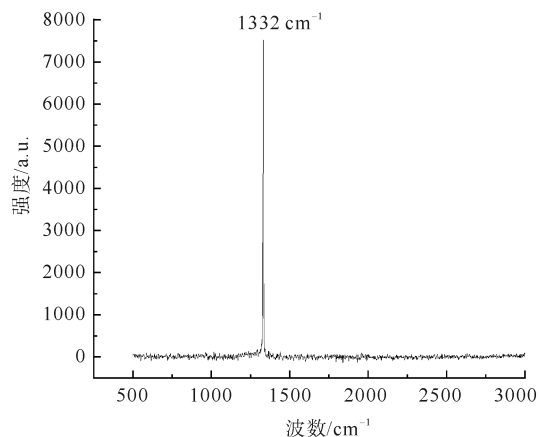
(a) 金刚石磨粒表面SEM图像(氢气流量0 sccm)



(b) 金刚石磨粒表面拉曼图像(氢气流量0 sccm)



(c) 金刚石磨粒表面SEM图像(氢气流量25 sccm)



(d) 金刚石磨粒表面拉曼图像(氢气流量25 sccm)

图6 未涂覆镓、改变氢气流量条件下的金刚石磨粒表面 SEM 与拉曼光谱图像

c、d组实验结果如图7所示。当氢气流量为0 sccm时,由图7(a)可知,此时金刚石磨粒表面生成的石墨烯表面存在褶皱、缺失。由拉曼光谱分析(图7(b))可知,此时 $I_D/I_G=0.528$ , $I_{2D}/I_G=0.441$ ,与氢气流量为50 sccm时(图5(b))相比, $I_D/I_G$ 明显上升。这表明在不通入氢气条件下,金刚石磨粒表面虽然能生成石墨烯,但石墨烯的生长质量较差,缺陷密度较通入氢气时明显升高。当氢气流量为25 sccm时,由图7(c)可知,此时金刚石磨粒表面生成的石墨烯表面较为光滑,生长质量较高。拉曼光谱分析(图7(d))

显示,此时  $I_D/I_G=0.292$ ,  $I_{2D}/I_G=0.451$ ,与氢气流量为 50 sccm 时(图 5(b))相比,  $I_D/I_G$  明显下降,这表明过高的氢气流量会降低石墨烯的生长质量,导致石墨烯的缺陷密度增加,氢气流量为 25 sccm 时较 50 sccm 时更适合制备高质量石墨烯。对比分析 3 种氢气流量下的  $I_{2D}/I_G$ ,可知氢气流量对石墨烯的生长层数几乎没有影响。

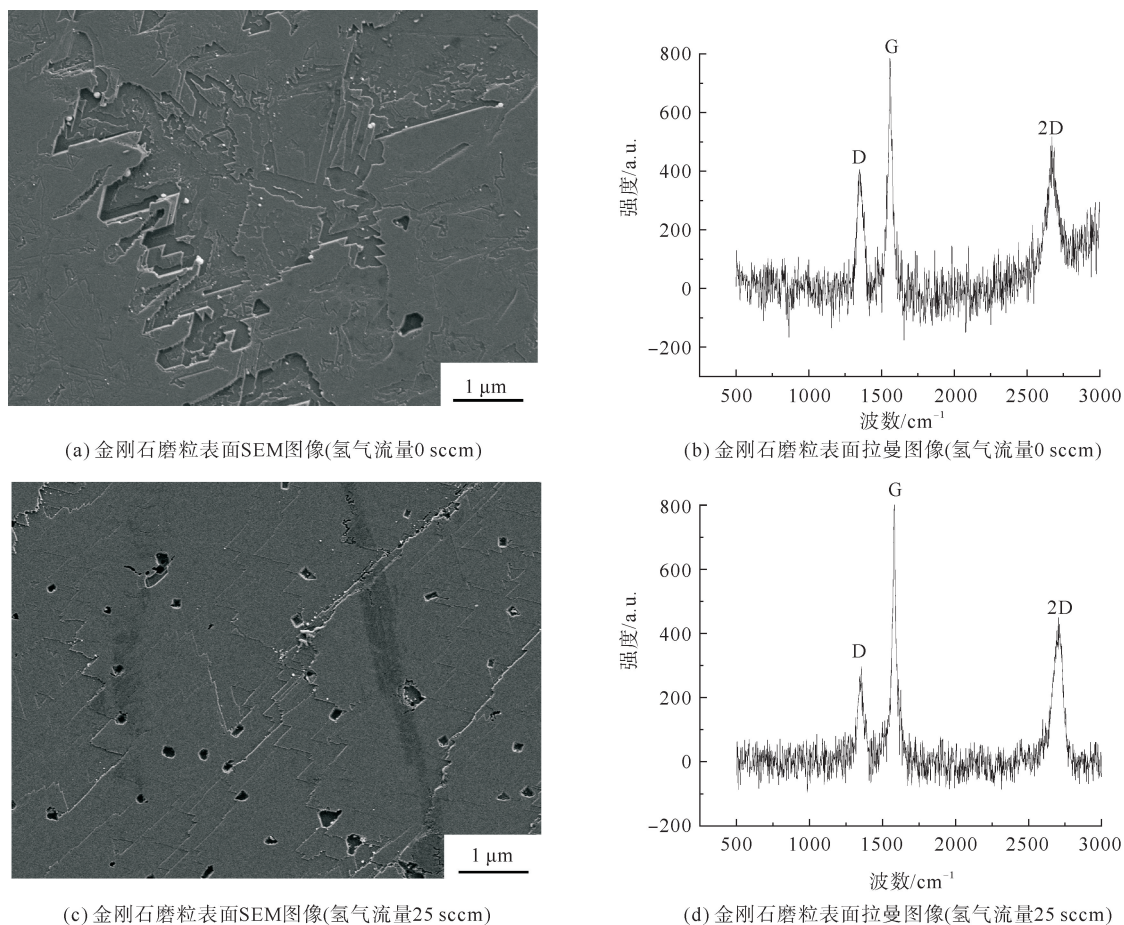


图 7 涂覆镓、改变氢气流量条件下的金刚石磨粒表面 SEM 与拉曼光谱图像

综合以上分析可知,金刚石磨粒表面原位生长石墨烯的最佳参数为:生长温度 1000~1050 °C,磨粒表面涂覆液态金属镓,氢气流量 25 sccm。

### 3 结论

- 1) 生长温度对金刚石磨粒表面生长石墨烯起决定性作用,在 950 °C 时液态金属镓无法催化磨粒表面生长石墨烯,在高于 1100 °C 时金刚石磨粒表面石墨烯层数多、缺陷密度高、生长质量较差。
- 2) 液态金属镓能够催化裂解金刚石 C—C 键,降低金刚石向石墨烯转变的临界温度。
- 3) 在石墨烯生长过程中通入氢气较不通氢气可显著提高生长质量,但氢气流量过大反而会导致石墨烯缺陷密度增加。
- 4) 本研究建立的金刚石磨粒表面石墨烯原位生长最佳工艺条件是:生长温度在 1000~1050 °C,磨粒表面涂覆液态金属镓,氢气流量为 25 sccm。

#### 参考文献 (References):

- [1] 张志强,向道辉,胡永伟,等. 织构对硼掺杂金刚石涂层刀具摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2021, 34(1): 50-59.

- ZHANG Zhiqiang, XIANG Daohui, HU Yongwei, et al. Effects of texture on tribological properties of boron-doped diamond coated tools[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(1): 50-59.
- [2] 都建标, 张强, 宗文俊. 硬脆及黑色金属材料的单点金刚石车削加工技术综述[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(7): 156-175.  
DU Jianbiao, ZHANG Qiang, ZONG Wenjun. Summary of single point diamond turning technology for hard, brittle and ferrous metal materials[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(7): 156-175.
- [3] 邹莱. 黑色金属金刚石切削刀具磨损及其抑制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
ZOU Lai. Research on tool wear and its inhibition in diamond cutting of ferrous metals[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [4] BRINKSMEEIER E, GLÄBE R. Advances in precision machining of steel[J]. *CIRP Annals of Manufacturing Technology*, 2001, 50(1): 385-388.
- [5] WANG Y L, SUZUKI N, SHAMOTO E, et al. Investigation of tool wear suppression in ultraprecision diamond machining of die steel[J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(4): 677-685.
- [6] LEE C G, WEI X D, KY SAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. *Science*, 2008, 321(5887): 385-388.
- [7] CHU B, SHI Y F, SAMUEL J. Mitigation of chemical wear by graphene platelets during diamond cutting of steel[J]. *Carbon*, 2016, 108: 61-71.
- [8] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [9] BERGER C, SONG Z M, LI T B, et al. Ultrathin epitaxial graphite layers: 2D electron gas properties and a route towards graphene based nanoelectronics[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(52): 19912-19916.
- [10] REINA A, JIA X T, HO J, et al. Large area few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(1): 30-35.
- [11] LI X S, CAI W W, AN J, et al. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils[J]. *American Association for the Advancement of Science*, 2009, 324(5932): 1312-1314.
- [12] 余威, 栗正新. 金刚石表面石墨烯的制备及应用研究进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2021, 41(6): 1-6.  
YU Wei, LI Zhengxin. Advances in preparation and application of graphene on diamond surface[J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2021, 41(6): 1-6.
- [13] GU C Z, LI W X, XU J, et al. Graphene grown out of diamond[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(16): 162105.
- [14] SHEN B, JI Z, QIANG L, et al. Graphenization of diamond[J]. *Chemistry of Materials*, 2022, 34(9): 3941-3947.
- [15] CHEN S L, LIN Q, JI Z, et al. Ultrahigh mechanical robustness of vertical graphene sheets covalently bonded to diamond[J]. *Carbon*, 2023, 201: 390-398.
- [16] MURAKAMI K, TANAKA S, HIRUKAWA A, et al. Direct synthesis of large area graphene on insulating substrate by gallium vapor-assisted chemical vapor deposition[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 093112.
- [17] NORIO T, MAKOTO F, TOSHIHARU M, et al. Formation of graphene-on-diamond structure by graphitization of atomically flat diamond(111) surface[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, 52(11): 110121.
- [18] YANG J, JANG Q Q, CHEN Z H, et al. Transfer-free synthesis of multilayer graphene on silicon nitride using reusable gallium catalyst[J]. *Diamond and Related Materials*, 2019, 91(1): 112-118.
- [19] 陈善登, 白清顺, 窦昱昊, 等. 金刚石表面生长石墨烯的纳观尺度机理研究进展[J]. *材料导报*, 2023, 37(16): 49-55.  
CHEN Shandeng, BAI Qingshun, DOU Yuhao, et al. Research progress in the nanoscale mechanism of graphene growth on diamond surface[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(16): 49-55.
- [20] 刘若娟, 刘冰之, 孙靖宇, 等. 气相助剂辅助绝缘衬底上石墨烯生长: 现状与展望[J]. *物理化学学报*, 2023, 39(1): 35-46.  
LIU Rujuan, LIU Bingzhi, SUN Jingyu, et al. Gaseous-promotor-assisted direct growth of graphene on insulating substrates: Progress and prospects[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2023, 39(1): 35-46.
- [21] HIURA H, LEE M V, TYURNINA A V, et al. Liquid phase growth of graphene on silicon carbide[J]. *Carbon*, 2012, 50(14): 5076-5084.
- [22] LIN L, DENG B, SUN J Y, et al. Bridging the gap between reality and ideal in chemical vapor deposition growth of graphene[J]. *Chemical Reviews*, 2018, 118(18): 9281-9343.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)