

热丝CVD法大批量制备金刚石涂层刀具工艺的温度场仿真优化

阮宇翔

绍兴文理学院数理信息学院, 浙江 绍兴

收稿日期: 2024年11月5日; 录用日期: 2024年12月10日; 发布日期: 2024年12月18日

摘要

本文针对热丝化学气相沉积法(HFCVD)技术批量制备金刚石涂层刀具的质量均匀性, 通过模拟分析了基体温度场分布。利用正交实验设计, 研究了热丝高度(H)、热丝间距(D)和热丝长度(L)三个热丝排布参数对基体温度分布的影响。仿真结果显示, 通过调节热丝长度和热丝间距可以有效地改善刀尖平面的温度均匀性; 而调节热丝高度则可以改善刀具排屑槽区域的温度均匀性。通过仿真确定了最优的热丝参数组合为: 热丝长度 $L = 270$ mm、热丝高度 $H = -10$ mm、热丝间距 $D = 25$ mm。沉积实验的结果表明, 优化后的参数能够产生均匀的温度场, 从而制备出晶粒尺寸和厚度均匀的高质量金刚石涂层。

关键词

温度场仿真, 热丝化学气相沉积, 金刚石涂层刀具, 有限元分析

Simulation and Optimization of the Temperature Field for Mass Production of Diamond-Coated Tools via Hot-Filament Chemical Vapor Deposition

Yuxiang Ruan

School of Mathematics Information, Shaoxing University, Shaoxing Zhejiang

Received: Nov. 5th, 2024; accepted: Dec. 10th, 2024; published: Dec. 18th, 2024

Abstract

Our study investigates how to achieve consistent quality in high-throughput diamond-coated tools

文章引用: 阮宇翔. 热丝 CVD 法大批量制备金刚石涂层刀具工艺的温度场仿真优化[J]. 应用物理, 2024, 14(12): 779-788. DOI: 10.12677/app.2024.1412084

production via Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD), focusing on the substrate temperature distribution. Through orthogonal experimental design, we examine the effects of filament height (H), spacing (D), and length (L) on temperature distribution. Our simulations revealed that filament length and spacing adjustments enhance temperature uniformity at the tool tip, while filament height adjustments benefit the chip groove area's temperature uniformity. We found the optimal filament settings are a length of 270 mm, a height of -10 mm, and a spacing of 25 mm. Our experimental results confirmed that these optimized parameters create a uniform temperature distribution, leading to high-quality diamond coatings with consistent grain size and thickness.

Keywords

Temperature Simulation, HFCVD, Diamond-Coated Tools, Finite Element Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金刚石涂层刀具因其出色的机械性能和摩擦学性能，在现代工业中扮演着不可替代的关键角色。这类刀具的高硬度、强耐磨性、低摩擦系数、与加工材料的良好化学亲和性以及稳定的化学惰性，使它们在各种刀具领域，如刀片、钻头、铣刀等，广受青睐[1]-[3]。特别是，钨钴硬质合金(WC-Co)的金刚石涂层刀具在加工硅铝合金、石墨和碳纤维增强塑料等材料时，因其优越的性能而被广泛采用[4]-[6]。这些应用示例凸显了金刚石涂层刀具在提高加工效率和加工质量方面的重要价值。

热丝化学气相沉积(HFCVD)技术作为金刚石涂层刀具制备的主要方法之一，其原理为热丝产生高温能量活化反应气体，形成活化基团后在基体上沉积成为金刚石膜[7][8]。HFCVD以其设备简易、制造方便、运行成本低、工艺流程简单等特点，在金刚石薄膜的制备领域获得了广泛的研究和应用[9][10]。该技术能够高速生产高质量、大面积的金刚石涂层，因此被认为是金刚石薄膜制备技术中极具价值的一种[11]。其优势不仅体现在生产效率和成本控制上，还在于能够满足工业上对金刚石涂层性能高标准的要求，为金刚石涂层刀具等应用领域提供了重要的技术支持。

在使用 HFCVD 技术制备金刚石涂层刀具时，金刚石涂层的性能与其制备过程中的温度分布密切相关，基体温度在很大程度上影响金刚石薄膜的形核密度、生长速度和质量[12]。因为通过实验试错的方式在参数空间摸索金刚石薄膜的生长调控需要耗费巨大的成本和时间，因此，通过计算机模拟来分析基体的温度分布，探究不同工艺参数对基体温度的具体影响，变得尤为重要。这种模拟分析不仅可以帮助理解温度对金刚石薄膜生长过程的影响机制，还能指导实验过程中的参数优化，从而有效提高金刚石涂层刀具的性能。通过这样的方法，可以在实验之前预测和调整工艺参数，以达到更好的涂层生长效果，确保金刚石涂层具有更高的均匀性、更好的附着力以及更优异的机械性能。这种基于模拟分析的方法为金刚石涂层刀具的研发和生产提供了一条有效的途径，有助于推动高性能刀具的开发与应用。

许多学者们已经对使用 HFCVD 技术在制备金刚石薄膜时的温度分布进行了大量研究。Song 等[13]通过数值模拟研究了 HFCVD 沉积金刚石过程中适当的温度所需的外加功率，Wu 等[14]研究了一些 HFCVD 的参数对氮化硅陶瓷基板上金刚石涂层沉积过程中温度分布的影响，这些研究主要集中在平面基体上。此外学者也对 WC-Co 刀具类基体在使用 HFCVD 技术制备金刚石涂层中的温度分布进行过仿真

模拟。Zhang 等[15]计算了长刀具底部的散热方式对温度分布的影响，并发现陶瓷支架可以将单个刀具的温差大幅降低。Shen 等[16]建立了双层的热丝模型，并通过仿真优化了双层热丝的参数。这些研究改善了单只长刀具的温度差异，但他们的研究都限制在小容量的 HFCVD 设备中。Wang 等[17]模拟了 HFCVD 金刚石涂层铣刀批量生产的基体温度场，并得到了优化的 HFCVD 设置，然而他们没有考虑单只刀的温差，仅仅考虑了刀尖周围的温度分布，这限制了对整个刀具温度分布的全面理解。

在本文中，我们专注于通过 HFCVD 法大批量制备金刚石涂层铣刀的温度仿真优化。利用有限元软件 Comsol Multiphysics，我们建立了 HFCVD 反应腔的模型，并通过耦合热辐射、热传导和热对流的多物理场来探索热丝排布参数对基体温度三维分布的影响，并由此设计出金刚石刀具制备的优化参数方案。在此基础上，我们也通过对应的金刚石涂层刀具沉积实验，进一步验证了仿真结果的准确性。通过这种综合的研究方法，我们期望能够克服现有研究中的局限性，为金刚石涂层刀具的制备和应用提供更为深入和全面的理解。

2. 仿真与结果

2.1. 仿真模型

本文的研究中，HFCVD 设备的反应室设置成一个直径为 600 mm、高度为 600 mm 的圆柱体。工作台位于室底的中央，尺寸为 420 mm × 240 mm × 140 mm，上面放置着 11 排 240 mm × 25 mm × 25 mm 的石墨条刀架，每条石墨条可固定 17 支尺寸为 4 mm × 75 mm 的铣刀。进气口位于腔顶中央，两个出气口位于工作台两侧。与实际的设备相比，模型忽略一些与温度分布没有显著影响的部分，包括拉丝装置、电极等。使用 Comsol Multiphysics 建立几何模型并进行网格划分，模型的几何结构如图 1(a)所示，图 1(b)为网格的截面图。

HFCVD 在制备金刚石薄膜时，反应气体通过钟罩的进气口流入腔体内，热丝的高温热场将反应气体活化分解，随后在工作台上的基体表面沉积成金刚石薄膜。热源热丝通过热辐射和热对流传递能量加热基体铣刀，同时，基体铣刀放置在工作台的石墨支架上，通过工作台的水冷系统传导热量散热，因此，研究基体表面的温度分布，需要综合考虑热丝的热辐射、反应气体的热对流和固体之间的热传导。

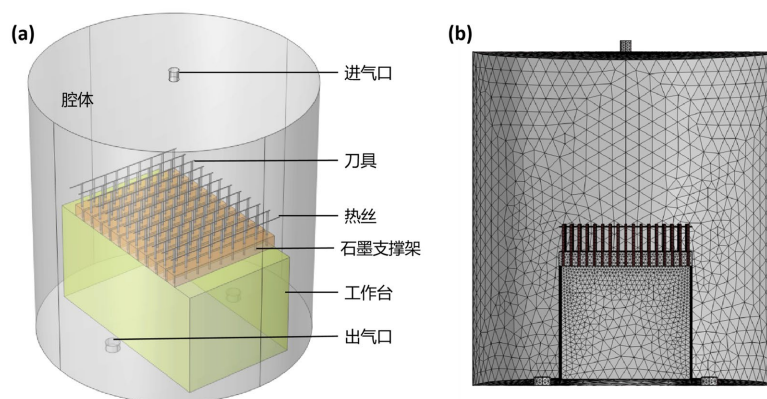


Figure 1. (a) Model structure of the HFCVD equipment, (b) Results of mesh division
图 1. (a) HFCVD 设备模型结构, (b) 网格划分结果

为了简化模拟，对模型的流体域和边界条件做如下设定：1. 将反应气体设为纯氢气且对辐射透明(实际的反应气体是以氢气为主体的混合气体，氢气占混合气体的 95%以上，可以忽略其余气体的作用)。2. 由于反映腔内气压低、气体流速低，雷诺数小于 2300，可将气体设定为不可压缩气体，流动状态可以定

义为层流模式[18]。3. 将钟罩设置为换热壁来等效钟罩夹层中的水冷散热，散热系数设为 $55 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 。4. 热丝温度设定为 2200°C 恒定。5. 反应气体入口流速设置为 2000 sccm ，腔内压力维持 3000 Pa 。

模型中工作台的材质为铜、热丝为钨丝，铣刀为 WC 硬质合金。材料的属性明细如表 1 所示。

Table 1. The physical properties of the materials

表 1. 材料的物性参数

	导热系数(W/(m·K))	恒压热容 J/(kg·K)	密度 kg/m^3
氢气	0.1672	14283	不可压缩气体
铜	401	391	8978
硬质合金	35	130	14600
石墨	129	710	2090
钨	63	185	15500

2.2. 参数优化

本文通过正交设计，分析热丝间距 D、热丝距离基体的高度 H 和热丝长度 L 三个因素对基体表面温度分布的影响。每个因素设置了 3 个水平数，设计了 L9 正交表，进行 9 次模拟，得到了铣刀表面的温度分布图。模拟的详细方案如表 2 所示。(表中 H 的+ -表示热丝位置相对于铣刀刀尖的上下，+10 mm 表示热丝位于铣刀刀尖上方 10 mm。)

由于铣刀的切削工作区域较长，因此在评估铣刀表面温度均匀性时，除了考虑平行热丝平面(XY 平面)的温度均匀性，还需要考虑铣刀切削槽部分沿垂直方向(Z 轴)的温度均匀性。为此，我们提取基体表面温度数据，分别计算了铣刀尖端 XY 平面和铣刀刀尖 Z 方向 20 mm 区域的平均温度、极差 R 和均方差 σ 来量化温度分布的均匀性，由此评估最优的热丝参数组合。

Table 2. Parameters used in orthogonal experiments

表 2. 正交实验组

模拟编号	D (mm)	H (mm)	L (mm)
NO. 1	25	+10	250
NO. 2	25	0	270
NO. 3	25	-10	260
NO. 4	30	+10	270
NO. 5	30	0	260
NO. 6	30	-10	250
NO. 7	35	+10	260
NO. 8	35	0	250
NO. 9	35	-10	270

2.3. 仿真结果

9 组模拟得到的铣刀尖端 5 毫米切面温度分布如图 2 所示，可以发现不同的热丝排布参数得到的热场分布存在较为明显的差异。为了更直观地展现这 9 组模拟实验的结果，需要提取具体温度数据绘制成函数曲线。

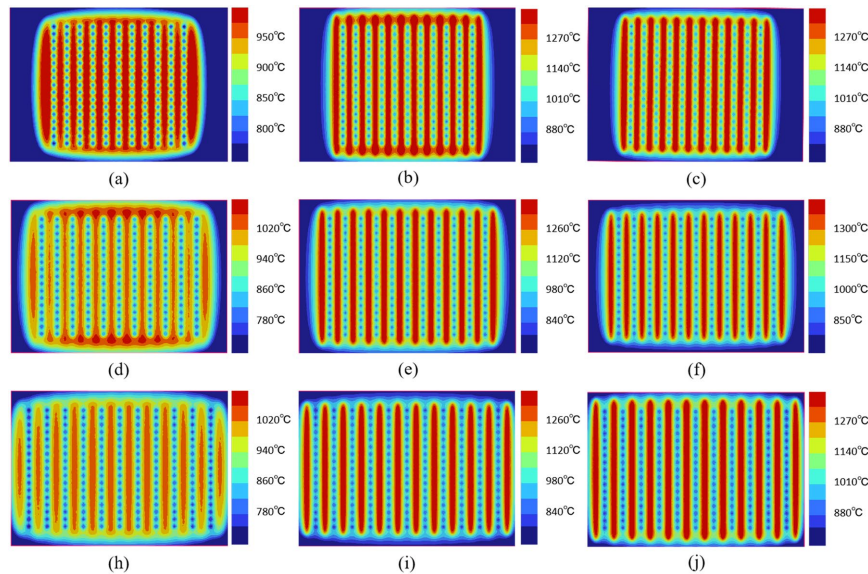


Figure 2. Temperature distribution of the tool tips and surrounding area
图 2. 铣刀尖端及周围的温度分布

由于反应腔几何模型在 X 方向和 Y 方向具有对称性,热丝的热场和基体的温度分布也具备 X 轴和 Y 轴对称,因此只需对四分之一区域的温度进行分析就可以得到整体的温度情况。将四分之一区域中的 30 支刀作为分析对象,30 支刀的编号如图 3 所示。图 4(a)展示 1 到 30 号铣刀刀尖表面的温度曲线。可以看到,多数模拟结果中在 X 方向和 Y 方向上,越靠近中心,温度越高,中心温度为最高,角上温度低。这是热丝平行排布中间能流密度大和腔内散热的方向造成的必然结果。图 4(b)展示了 30 支铣刀刀尖 20 mm 区域的温度分布,随着 Z 轴上升,基体温度增加。计算每组模拟的刀尖平面的铣刀平均温度(T_{xy})、极差(R_{xy})和均方差(σ_{xy}),以及 Z 轴 20 mm 区域铣刀的平均温度(T_z)、极差(R_z)和均方差(σ_z),结果列在表 3 中。

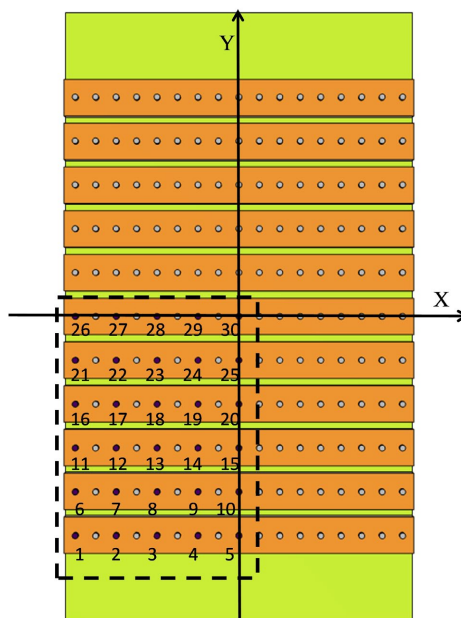


Figure 3. The numbering of milling tools 1 to 30
图 3. 1~30 号刀具编号

使用方差分析对所得结果进行研究,并绘制了不同热丝参数对 T 、 R 和 σ 的控制效应曲线。如图 5(a)~(c) 所示,对刀尖 XY 面平均温度起影响的主要因素是热丝高度,其次依次为热丝间距和热丝长度。当热丝高度和热丝间距增加,基体的温度减小。当热丝长度增加,基体平均温度增加。标准差 σ_{xy} 和极值 R_{xy} 在不同的设置参数上表现出相同的趋势。它们随热丝长度 L 的增加而减小,随着热丝间距 D 的增加而增加,在热丝高度 H 与刀尖平齐时($H=0$ mm)最大,热丝高度 -10 mm 时最小。热丝 3 因素对均方差影响的主次关系为: $L > D > H$, 因此可以主要调节 L 和 D 来控制 XY 平面的温度均匀性,最优的 L 和 D 为 $L = 270$ mm、 $D = 25$ mm。

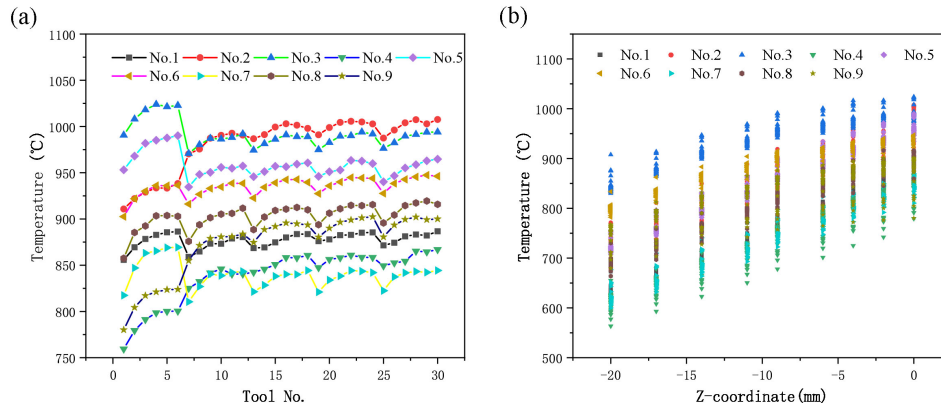


Figure 4. (a) The simulated tip temperatures of the 30 milling tools, (b) the temperature distribution within a range of 20 mm from the tip along the Z-axis

图 4. (a) 30 支铣刀刀尖模拟温度, (b) Z 轴离刀尖 20 mm 内区域得到温度分布

图 5(d)~(f)是 Z 轴的 T_z 、 R_z 和 σ_z 的控制效应曲线。热丝高度 H 会对 Z 轴平均温度和温度均方差产生显著性差异关系,因此可以主要通过调控热丝高度来控制基体在 Z 轴上的温度值和温度均匀性。热丝高度 H 在 -10 mm 时, R_z 和 σ_z 最小,平均温度最高,为 884.58°C 。

当样本温度的均方差越小时,温度分布的均匀性越好。对此,综合考量铣刀切削区域整体的温度分布后,得出优化的沉积参数如下:热丝长度 $L = 270$ mm,热丝高度 $H = -10$ mm,热丝间距 $D = 25$ mm。

Table 3. Calculated average temperatures, ranges, and standard deviations along XY-plane and Z-axis

表 3. XY 平面和 Z 轴的平均温度、范围和标准差的计算结果

No.	XY plane			Z direction		
	T_{xy}	R_{xy}	σ_{xy}	T_z	R_z	σ_z
No. 1	869.96	64.46	11.62	757.65	283.85	81.48
No. 2	1001.74	48.48	9.11	888.90	300.03	87.33
No. 3	979.45	37.46	8.32	931.72	167.37	47.92
No. 4	858.41	52.61	9.57	754.23	269.63	77.17
No. 5	947.19	49.87	9.60	846.04	261.00	77.43
No. 6	927.32	76.65	15.94	878.70	190.66	46.73
No. 7	827.66	68.79	13.37	731.00	264.26	72.24
No. 8	895.00	96.67	18.72	804.00	273.50	71.00
No. 9	896.34	51.12	10.81	848.92	162.59	43.41

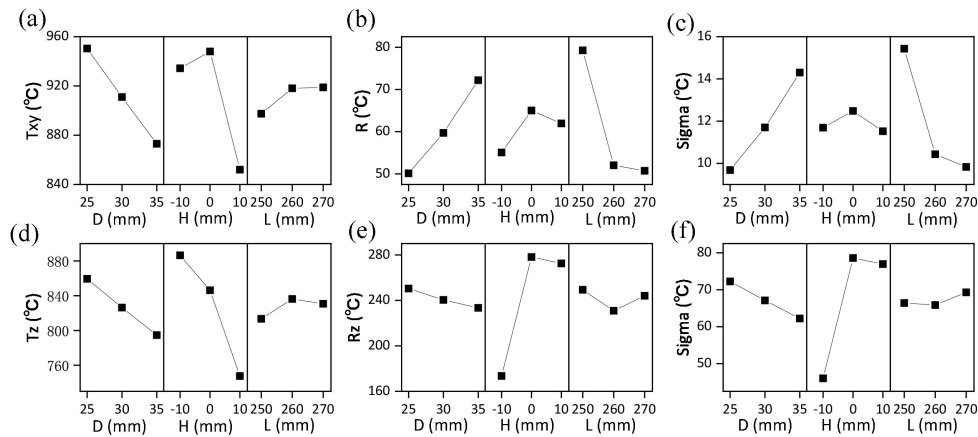


Figure 5. The quality effect charts of (a) average temperature (T_{xy}), (b) temperature range (R_{xy}), and (c) standard deviation (σ_{xy}) on the XY-plane, The quality effect charts of (d) average temperature (T_z), (e) temperature range (R_z), and (f) standard deviation (σ_z) along the Z-axis

图 5. XY 平面的(a) 平均温度(T_{xy})、(b) 温度范围(R_{xy})和(c) 标准偏差(σ_{xy})的控制效应曲线图, Z 轴的(d) 平均温度(T_z)、(e) 温度范围(R_z)和(f) 标准偏差(σ_z)的控制效应曲线图

3. 实验验证

为验证热丝排布方式是否真实有效地改善了基体表面的热分布, 本研究根据热场模拟结果对热丝参数进行了优化, 然后利用这些优化后的参数进行金刚石涂层的沉积实验。实验中使用的反应气体为甲烷和氢气, 而具体的沉积参数详见文中的表 4。

Table 4. Parameters of diamond film deposition experiments

表 4. 金刚石薄膜的沉积参数

Parameter	Value
Mass fraction of methane	2.5%
Flux of gas/sccm	2000
Pressure of reactor/Pa	3000
Filaments temperature/°C	2200
Deposition time/h	6

沉积实验完成后, 通过扫描电子显微镜(SEM)对金刚石涂层的表面形貌、晶粒粒度和涂层厚度进行了详细表征。此外, 还使用拉曼光谱仪对金刚石的纯度和涂 c 层的整体质量进行了评估。

检测对象选择了不同位置的 4 支金刚石涂层刀具, 分别为图中编号为 1、5、26 和 30。图 6(a)~(d)是它们的 SEM 表面形貌图, 四支不同位置的刀具都生长上了致密的金刚石薄膜, 且金刚石晶粒尺寸相似, 大小在 2~3 μm 。图 7(a)~(d)是它们的 SEM 截面形貌图, 四支刀上的金刚石薄膜的厚度皆在 4~5 μm , 膜厚均匀。四支不同位置的刀均生长上了晶粒大小和厚度均匀的金金刚石薄膜, 反映了基体温度的均匀。图 8 是四支刀具金刚石涂层的拉曼光谱, 四支刀在 1335 cm^{-1} 处均存在尖锐的高峰, 为金刚石特征峰, 由于硬质合金刀具和金刚石薄膜之间的热失配, 使得内部存在残余压应力, 导致特征峰位偏离了天然金刚石 1332 cm^{-1} 峰而向数值更大的拉曼频移方向偏移, 残余应力大小可以通过公式:

$\sigma [\text{GPa}] = -0.567 [\text{GPa}/\text{cm}^{-1}] \times (v_m - v_0) [\text{cm}^{-1}]$ 计算[19], 式中 σ 为残余应力, v_m 为被测金刚石峰的波数, v_0 为天然无应力金刚石峰的波数。26 号刀在 1580 cm^{-1} 存在一个低峰, 为石墨 G 峰, 说明具有 sp² 相碳

的存在。拉曼散射对石墨峰的灵敏度是金刚石峰的 50 倍左右[20]，因此金刚石是涂层的主要成分。拉曼谱线表面四支不同位置的刀都生长了高质量的金刚石薄膜。

通过扫描电镜和拉曼光谱对不同位置刀具涂层的表征分析，优化后的热丝参数可以产生相对均匀的温度场，能够制备晶粒尺寸和厚度均匀的高质量金刚石涂层，表明基于模拟的 HFCVD 热丝参数的优化方法是有效的。

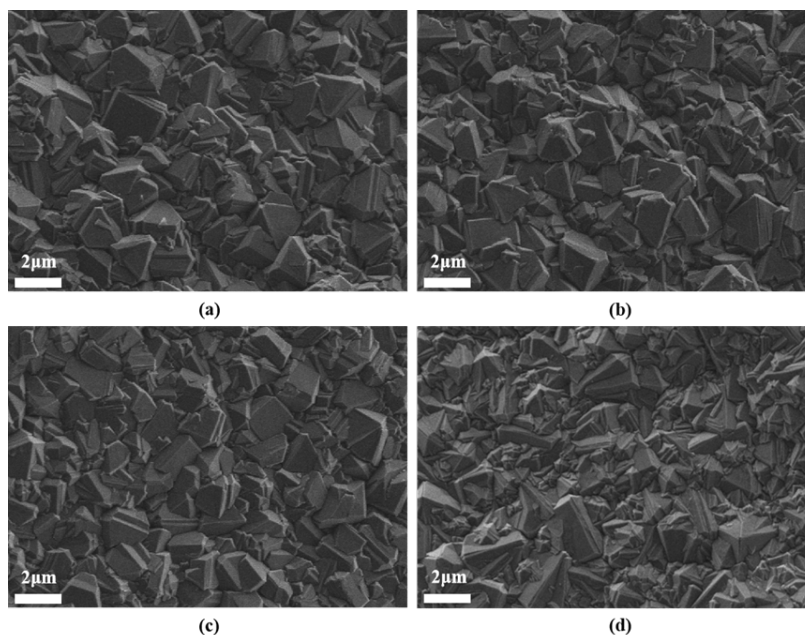


Figure 6. The surface morphologies of diamond coatings on tools (a) No. 1, (b) No. 5, (c) No. 26, (d) No. 30
图 6. 编号(a) 1、(b) 5、(c) 26、和(d) 30 的铣刀金刚石涂层表面形貌

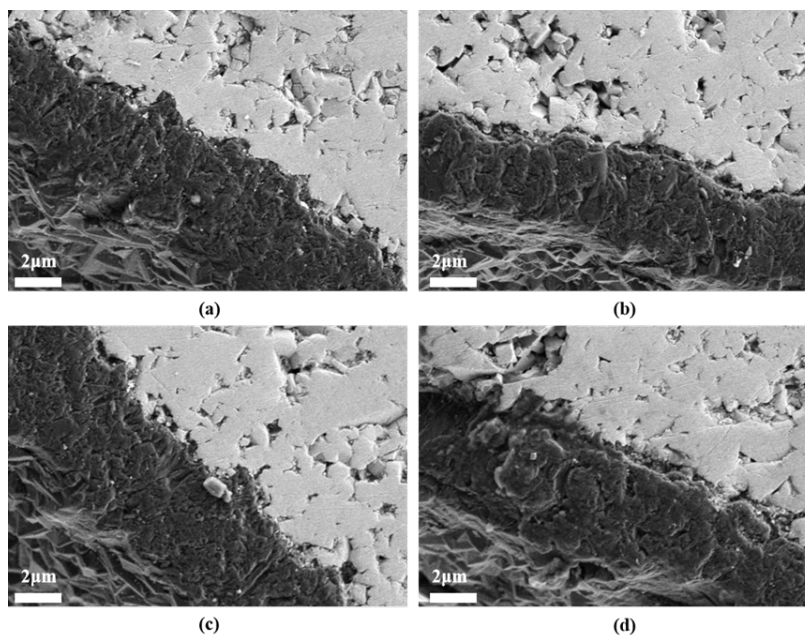


Figure 7. The cross-sectional morphologies of diamond coatings on tools (a) No. 1, (b) No. 5, (c) No. 26, (d) No. 30
图 7. 编号(a) 1、(b) 5、(c) 26、和(d) 30 的铣刀金刚石涂层截面形貌

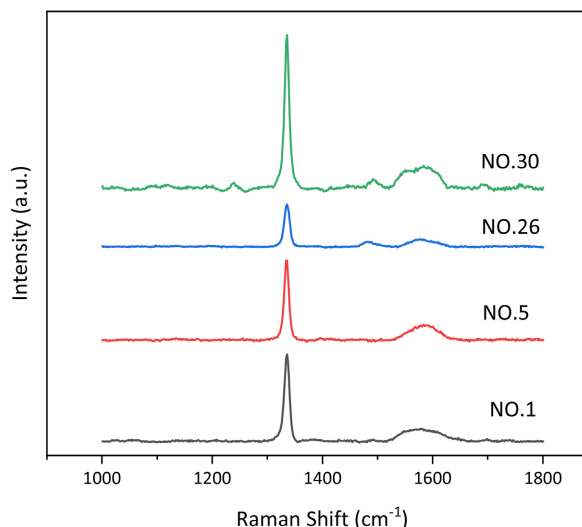


Figure 8. Raman spectra of diamond coating of tools No. 1, 5, 26, 30 and 0
图 8. 编号 1、5、26、30 和 0 号铣刀金刚石涂层的拉曼光谱

4. 结论

本文采用有限体积法进行数值模拟,探究了在 HFCVD 过程中制备金刚石涂层刀具时,热丝间距(D)、热丝与基体的高度(H)以及热丝长度(L)这三个参数对基体表面温度分布的影响。通过深入研究,进一步确定了热丝设置参数的最优组合,该组合能够在整个刀具镀膜区域产生高度均匀的温度分布,从而确保金刚石涂层的批量沉积具有高完整性和均匀性。仿真结果表明,热丝高度对温度均值具有显著影响,热丝过高会大幅降低温度均值大小;热丝长度和热丝间距对 XY 平面温度场均匀性具有重要影响,随着热丝间距的减小和热丝长度的增加,XY 平面温度场均匀性增加;热丝高度是影响 Z 方向温度分布均匀性的主要因素,当热丝位于刀尖下方 10 mm 时,Z 方向温度均匀性最好。经优化的最佳热丝参数为:热丝长度 $L = 270$ mm,热丝高度 $H = -10$ mm,热丝间距 $D = 25$ mm。

根据这些最佳热丝设置参数,在实际的 HFCVD 反应器中对金刚石涂层铣刀进行了沉积实验,以验证这些参数设置的正确性。实验结果显示,所沉积的金刚石涂层在铣刀上展现了均匀的晶体结构、厚度和物相成分,证明了对基体温度场进行优化的方法是有效且可行的。这不仅提高了金刚石涂层的质量,还为金刚石涂层刀具的批量生产提供了重要的技术支持。

参考文献

- [1] Vasu, C., Andhare, A.B. and Dumpala, R. (2024) Machinability and Tool Wear Studies on AZ91/B4C Metal Matrix Composites Using Uncoated and CVD Diamond Coated WC-Co Turning Inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **119**, Article 106538. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106538>
- [2] Parray, M.A., Din, S.H. and Wani, M.F. (2024) Enhancing Machining Performance of EN24 Steel with CVD Diamond Coated Tool and Minimal Quantity Lubrication. *Engineering Research Express*, **6**, Article 015063. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad2035>
- [3] Costa, R.D.F.S., Duro, J.N.S., Sousa, V.F.C., Silva, T.E.F., Figueiredo, D.A. and Jesus, A.M.P. (2024) Drilling of CFRP/Al Multi-Material Stacks Using Wc-Co CVD Diamond Coated Tools. *Procedia Structural Integrity*, **53**, 376-385. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.044>
- [4] Bhowmick, S., Banerji, A. and Alpas, A.T. (2015) Tribological Behavior of Al-6.5%, -12%, -18.5% Si Alloys during Machining Using CVD Diamond and DLC Coated Tools. *Surface and Coatings Technology*, **284**, 353-364. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.08.073>
- [5] Cabral, G., Gäbler, J., Lindner, J., Grácio, J. and Polini, R. (2008) A Study of Diamond Film Deposition on WC-Co Inserts for Graphite Machining: Effectiveness of Sic Interlayers Prepared by HFCVD. *Diamond and Related Materials*,

- 17, 1008-1014. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2008.03.017>
- [6] Soldatov, A., Remnev, A. and Okada, A. (2022) Reconditioning of Diamond Coated Tools and Its Impact on Cutting Performance for CFRP Laminates. *Applied Sciences*, **12**, 1288. <https://doi.org/10.3390/app12031288>
- [7] Vispute, R., Seiser, A., Lee, G., Dozier, J., Feldman, J., Robinson, L., *et al.* (2009) Compact and Efficient HFCVD for Electronic Grade Diamond and Related Materials. *MRS Proceedings*, **1203**, Article No. 1725. <https://doi.org/10.1557/proc-1203-j17-25>
- [8] Schäfer, L., Höfer, M. and Kröger, R. (2006) The Versatility of Hot-Filament Activated Chemical Vapor Deposition. *Thin Solid Films*, **515**, 1017-1024. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.073>
- [9] Matsumoto, S. (2000) Development of Diamond Synthesis Techniques at Low Pressures. *Thin Solid Films*, **368**, 231-236. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)00771-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)00771-9)
- [10] Huh, J.M. and Yoon, D.Y. (2000) Enhanced Nucleation of Diamond on Polycrystalline Ni by D.C. Glow Discharge in Hot Filament CVD. *Diamond and Related Materials*, **9**, 1475-1479. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(00\)00272-7](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(00)00272-7)
- [11] Song, G.H., Sun, C., Huang, R.F., Wen, L.S. and Shi, C.X. (2000) Heat Transfer Simulation of HFCVD and Fundamentals of Diamond Vapor Growth Reactor Designing. *Surface and Coatings Technology*, **131**, 500-505. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00785-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00785-4)
- [12] Wei, Q.P., Yu, Z.M., Ma, L., Yin, D.F. and Ye, J. (2009) The Effects of Temperature on Nanocrystalline Diamond Films Deposited on WC-13wt.% Co Substrate with W-C Gradient Layer. *Applied Surface Science*, **256**, 1322-1328. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.06.091>
- [13] Song, C., Lee, Y., Heo, S., Hwang, N., Choi, S. and Kim, K. (2017) Computer Simulation of Temperature Parameter for Diamond Formation by Using Hot-Filament Chemical Vapor Deposition. *Coatings*, **8**, Article 15. <https://doi.org/10.3390/coatings8010015>
- [14] Wu, Y., Zhang, H., Yan, G., Liu, L., Cristea, D., Wang, H., *et al.* (2021) Hot Filament Chemical Vapor Deposition Temperature Field Optimization for Diamond Films Deposited on Silicon Nitride Substrates. *Materials Research Express*, **8**, Article 116403. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac3278>
- [15] Zhang, T., Qian, Y., Wang, S., Huang, G., Zhang, L. and Xue, Z. (2019) Influence of the Heat Dissipation Mode of Long-Flute Cutting Tools on Temperature Distribution during HFCVD Diamond Films. *Crystals*, **9**, Article 394. <https://doi.org/10.3390/cryst9080394>
- [16] Shen, B., Chen, S., Cheng, L. and Sun, F. (2014) The Effect of the Double-Deck Filament Setup on Enhancing the Uniformity of Temperature Field on Long-Flute Cutting Tools. *Surface Review and Letters*, **21**, Article 1450078. <https://doi.org/10.1142/S0218625X14500784>
- [17] Wang, H., Shen, X., Wang, X. and Sun, F. (2020) Simulation and Experimental Researches on the Substrate Temperature Distribution of the Large-Capacity HFCVD Setup for Mass-Production of Diamond Coated Milling Tools. *Diamond and Related Materials*, **101**, Article 107610. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107610>
- [18] Zhang, J., Zhang, T., Wang, X., Shen, B. and Sun, F. (2013) Simulation and Experimental Studies on Substrate Temperature and Gas Density Field in HFCVD Diamond Films Growth on WC-Co Drill Tools. *Surface Review and Letters*, **20**, Article 1350020. <https://doi.org/10.1142/S0218625X13500200>
- [19] Ferreira, N.G., Abramof, E., Leite, N.F., Corat, E.J. and Trava-Airoldi, V.J. (2002) Analysis of Residual Stress in Diamond Films by X-Ray Diffraction and Micro-Raman Spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, **91**, 2466-2472. <https://doi.org/10.1063/1.1431431>
- [20] Sharda, T., Rahaman, M.M., Nukaya, Y., Soga, T., Jimbo, T. and Umeno, M. (2001) Structural and Optical Properties of Diamond and Nano-Diamond Films Grown by Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition. *Diamond and Related Materials*, **10**, 561-567. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(00\)00390-3](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(00)00390-3)