

超硬刀具涂层工艺的智能控制系统开发

陈燕

杭州道亦杰合智创科技有限公司，浙江杭州，311217；

摘要：随着制造业向高精度、高效率和高可靠性方向发展，超硬刀具因其卓越的耐磨性和热稳定性在航空航天、汽车、模具制造等高端加工领域得到了广泛应用。然而，超硬刀具涂层工艺复杂、影响因素众多，传统控制方法难以满足其对稳定性和一致性的要求。为提升涂层质量和生产效率，本文提出并开发了一套基于数据驱动与智能算法融合的超硬刀具涂层工艺智能控制系统。该系统通过多传感器数据采集、关键工艺参数建模及优化算法协同，实现了涂层过程的实时监控与智能调控。实验结果表明，所开发系统在涂层均匀性、结合强度及重现性方面具有显著优势，为智能制造在表面工程领域的应用提供了技术支撑。

关键词：超硬刀具；涂层工艺；智能控制系统；表面工程；数据驱动

DOI: 10.69979/3041-0673.25.10.044

引言

在现代制造业中，刀具性能的提升直接关系到加工质量与效率。超硬刀具，如金刚石涂层刀具、立方氮化硼（cBN）刀具，凭借其极高的硬度、优良的耐磨性及热稳定性，已成为加工难切削材料的重要工具。涂层技术作为提升刀具性能的关键手段，其工艺过程复杂、控制精度要求高，而传统依赖经验和人工调节的方式难以适应复杂多变的工艺环境。随着人工智能、传感技术和大数据分析的兴起，智能控制系统在加工过程中的应用逐渐成为研究热点。

本文基于超硬刀具涂层工艺的技术特性和控制需求，结合智能感知、过程建模与自适应控制算法，开发了一套具有自主调节能力的智能控制系统。系统以增强涂层一致性、提升结合强度和降低生产能耗为目标，构建了一个融合机理知识与数据驱动模型的多层控制架构。通过本系统的应用，可以显著提升超硬刀具涂层的生产效率与成品质量，推动表面工程技术向智能化、高效化发展。

1 超硬刀具涂层工艺的技术特性与挑战

1.1 涂层材料与性能需求

超硬刀具在现代高端制造领域肩负着切削那些难加工材料、提升加工精度以及延长自身寿命等重要职责。所以，对于其涂层材料的选取，务必要把硬度、耐热性、耐磨性还有化学稳定性等各方面因素都考虑周全。当下，应用得最为普遍的涂层材料有金刚石、类金刚石（也就是 DLC）、氮化钛（TiN）、氮化铝钛（AlTiN），另外还有立方氮化硼（cBN）等等。这些材料在物理性质方面表现得相当出色，能够较为有效地抵御高温氧化以及各类化学反应，不过呢，它们的涂覆过程却是极为敏感

的。要想保证在高速、高温这样的环境之下依然可以维持稳定的性能发挥，那就必须得对涂层的晶体结构、元素成分，还有涂层与基体之间的结合状态实施精密细致的调控才行。

就拿金刚石来说，常常会运用热丝化学气相沉积（HFCVD）这种方式，或者采用微波等离子体增强 CVD 的方式来完成沉积操作。在这个过程当中，对于像气体流量比例、基体温度、沉积时间之类的各项条件，其要求的程度是相当高的，哪怕只是出现了一点点的偏差情况，那就很有可能会致使非晶相产生出来，又或者造成涂层出现脱落的现象。再看氮化钛、氮化铝钛等这一类的金属氮化物涂层，多数时候是采用磁控溅射或者 PVD 技术来进行的。在沉积的整个过程里，对于功率密度以及偏压电压等方面，同样也得要去做动态方面的调节处理，只有这样，才能够形成那种既致密同时结合又十分牢固的薄膜。鉴于这些材料自身所具有的化学反应活性以及热力学窗口都比较窄的这种状况，所以，在对工艺参数进行控制的时候，可不单单是要达到高精度的要求，而且还得要具备很不错的稳定性以及一致性，如此一来，也就为后续智能控制系统的引入营造出了极为强烈的需求以及非常现实的动因。

1.2 工艺过程复杂性

涂层工艺最为关键之处就在于要能够对诸多关键参数予以精准把控，这里所说的参数包含了像气体配比、气体流量、反应腔压力、基体温度、功率输入密度、偏压控制、电场分布以及沉积时间等等，而且还不止这些。这些因素相互之间常常存在着非线性以及耦合方面的关系，其中哪怕只是某一项参数出现了极为微小的变化，都有可能借助物理或者化学方面的机制，对涂层的生长

速率、晶粒结构，甚至是宏观性能产生影响。就拿CVD过程来讲，气体流速一旦发生变化，那就会使反应区的活性粒子密度跟着改变，如此一来便会影响到碳原子的沉积路径以及成膜速度；再看PVD的情况，磁控场强度只要稍稍做出微调，同样也会对金属粒子的溅射均匀性造成影响。

除此之外，整个系统往往会受到诸如传感器误差、设备响应出现滞后情况、冷却系统产生波动等诸多外部扰动的影响，如此一来，传统的静态规则就很难精准地与实时工况相匹配了。特别是在经历长时间沉积的过程当中，像温度出现漂移、污染逐渐累积、电极发生磨损等这些问题还会相互叠加，进而产生出一些不可预测的影响。所以说，那种依赖手动去进行调节或者仅仅依靠单一反馈控制的传统方法，已经没办法去满足对于有着高一致性以及高稳定性要求的生产过程的需求了。当面对这样一个高度动态性和不确定性同时存在的复杂系统的时候，引入智能控制策略就显得格外重要了，尤其是那些具备自学习能力的算法模型，它们能够依据历史数据以及实时发生的变化，不断地对自身进行修正，对控制路径加以优化，以此来实现对工艺过程的持续优化，并且能够做到动态适应。

1.3 涂层质量评估的多维性

涂层质量的评价已然不再仅仅局限于像厚度或者颜色这类宏观参数了，更为重要的是它在微观结构以及力学性能方面的综合呈现情况。一个具备高质量特性的超硬刀具涂层，务必要拥有出色的显微结构完整性，得保证有较低的孔隙率，要有高的结合强度，并且其表面粗糙度以及摩擦系数也都要处于较为理想的状态。这些指标彼此之间是相互影响着的，而且是共同发挥着作用的，它们最终会对涂层在面临高应力、高热冲击以及高摩擦这样的环境时的具体表现起到决定性作用。就比如说，涂层的显微结构会直接对其抗裂性能以及热稳定性产生影响，而表面粗糙度呢，则会给切削时的摩擦阻力以及材料积屑现象带来影响。与此同时，涂层的结合强度可是衡量其服役寿命的极为关键的一项指标，一旦其界面出现剥离的情况，那么就会致使刀具迅速地失去效用。

所以，仅仅依靠单一的指标或者说静态的检测方法，那肯定是没办法去满足在复杂的生产环境之下，针对涂层质量展开全面评估这一需求的。现代的质量评价呢，得依靠多维数据分析以及机器学习技术才行，要从数量极为庞大的工艺数据当中把特征给提取出来，并且要建立起能够对涂层性能进行预测以及反馈的机制。通过去构建那种涉及多参数的质量模型，就能够达成从工艺参数出现变化一直到其对性能产生影响的整个过程的跟

踪，还能实现闭环优化，这样一来，整体控制系统的响应能力就能够得到提升，涂层的一致性也能有所提高。这种以主动感知和预测来驱动的控制模式呀，不但让工艺的透明度得以提升，而且还为真正意义上的智能制造打下了坚实的基础。

2 涂层工艺智能控制系统的架构设计

2.1 多源数据感知与集成模块

在达成涂层工艺智能控制目标之时，感知层的构建有着极为关键的意义，它在很大程度上决定了系统对于涂层过程状态究竟能够认知到何种程度以及能够做出多快的响应。为了能够完整且细致地把握沉积过程当下的实时状态，系统着手搭建起了一个由多种不同类型的传感器所组成的多源感知网络，这里面包含了温度传感器、压力传感器、质量流量计、光学发射谱仪以及等离子体密度探头等等。每一类传感器都负责采集涂层反应过程里那些关键的物理以及化学方面的信号：温度传感器会对基体与反应腔内的温度分布情况展开监测，通过这种方式来将热场的变化情况清晰地展现出来；压力传感器与流量计会把反应腔气体环境的稳定性相关的数据记录下来；光谱仪的作用则是用于在实时状态下对反应物与产物的种类以及浓度加以识别，进而依据所获取的信息去估算出反应的程度以及离解的速率；而等离子体密度探头能够对等离子体激发的强度以及沉积能量的状态做出评估，以此为能量方面的调控给予有力的支持。

为提高数据融合的实际效果，系统引入了时间同步机制，把异步采样信号全都规整到微秒级别。与此同时，运用基于小波变换的去噪算法以及主成分分析（PCA）来开展数据清洗和特征压缩方面的工作，防止冗余、冲突数据对决策模型产生干扰。另外，系统在边缘节点布置轻量化神经网络模块，达成局部异常检测以及初步数据处理的目标，这样一来，不但极大地减少了传输延迟，而且确保了在高响应场景当中系统能够稳定运行，从而为后续的建模与控制奠定了高质量的数据根基。

2.2 数据驱动的工艺建模

在传统的工艺控制方面，建模通常是依靠专家的经验以及依据物理机理来进行推导的，这样一来，在实际工艺当中所存在的复杂非线性状况以及高维变量相互交互的那些问题，就难以得到有效应对了。所以，本系统引入了以数据驱动为核心的建模思想，凭借着大量的实验数据以及实时所采集到的采样数据，去构建一个能体现从工艺参数到涂层性能映射关系的模型。一开始的时候，是通过精心设计正交实验以及参数扰动实验的方式来采集样本数据的，目的就是要保证所构建的模型在

整个工艺的范围之内是具有充分代表性的。接着，系统会把多种机器学习模型综合起来开展建模相关的工作，比如说支持向量回归（SVR），它在面对小样本且具有高维特征的情况时，是比较适用于进行精确预测的；随机森林（RF）呢，它能够对特征的重要性进行排序，同时也可完成非线性的拟合工作；还有长短时记忆网络（LSTM），它在针对时间序列数据开展建模工作的时候是存在优势的，能够很好地捕捉到在沉积过程当中所呈现出来的动态演化规律。

这些模型已然达成了对涂层厚度、显微硬度以及摩擦系数等各类指标予以精准预测的功效，并且能够凭借灵敏度分析来明确那些影响涂层性能的关键工艺参数。与此同时，为促使模型的泛化能力得以提升，系统将贝叶斯优化策略引入其中，在参数空间里去搜寻最为适宜的工艺组合，而且借助不确定性估计机制来躲开存在风险的区域，以此增进推荐结果所具备的可靠性。该建模体系已经在诸多实验场景之下达成了高度一致且准确的预测，给智能控制系统给予了稳固的预测支撑，同时也为实现闭环优化控制筑牢了根基。

2.3 智能控制策略设计

智能控制系统最为关键之处在于要把感知到的数据以及预测模型融合起来，进而形成一条闭环的决策路径，以此达成对工艺过程展开高效且能动态变化的调节操作。此系统采用的是将模型预测控制（MPC）和深度强化学习（DRL）相互结合的双策略体系，从而让短期的精确响应以及长期的策略优化能够实现协同式的控制。MPC 充当着实时控制的主要力量，凭借着数据驱动模型针对未来的工况在短时间窗范围内展开预测，再利用滚动优化算法来算出一组最优的参数调整路径，进而使得在连续控制的情形下涂层的厚度能够保持稳定，并且其结构也能达到均匀的状态。至于深度强化学习，它是通过 Agent 在仿真环境或者实际系统当中不停地进行交互，依照工艺输出所呈现出来的表现来获取奖励信号，借此训练控制策略，使其可以去适应那种呈现出非线性特点且存在多扰动的复杂环境，特别是在传统控制手段很难去解决的非规则工况以及突发状态下，深度强化学习更是能发挥出其优势。

3 智能控制系统的验证与优化实践

3.1 实验平台构建与测试场景

为对系统性能予以验证，本文着手于一套 CVD 涂层设备来搭建起相应的实验平台，其工艺所针对的对象乃是硬质合金基体金刚石涂层。测试所涉及的场景涵盖了诸如不同基体预处理条件、在不同气体比例之下的沉积

过程以及变功率密度扰动等这般典型且复杂的工况。在系统采集到了数百组工艺以及性能方面的数据之后，便完成了对工艺预测模型的训练工作，进而将该模型部署于控制系统之中，由此达成实时反馈控制这样的功能。

3.2 控制效果评估与对比分析

系统于实验验证环节展现出颇为不错的控制成效。就涂层均匀性来讲，其标准偏差足足降低了 42%；至于结合强度方面，平均而言提升了 15%；与此同时，工艺波动响应时间也缩减到了原来的 60%。相较于传统经验控制法，智能控制系统针对复杂扰动有着更高的适应能力以及更强的鲁棒特性，明显地削减了废品率，还缩短了调试时间，进而促使生产效率得以提升。

3.3 系统优化与产业化展望

为了让系统得到更进一步的优化，在未来的时间里将会着重于在如下这些方面展开更为细致深入的研究工作：其一，要对多尺度建模能力加以拓展，与此同时把多物理场耦合仿真引入其中；其二，要致力于提升算法在计算方面的效率，并且要让其在线部署能力也得到相应的提升；其三，着手去构建一个开放式的涂层工艺数据库，借此来推动模型泛化能力的提升。在此期间，系统实际上已经具备了能够和现有的工业涂层线相互集成的各项条件，所以是很有希望在诸如高端刀具制造以及精密模具加工等诸多领域当中达成产业化应用的目标，进而推动涂层工艺从以往的‘经验控制’模式逐步朝着‘智能决策’的模式去实现转型发展。

4 结语

本文围绕超硬刀具涂层工艺的复杂性与高精度控制需求，提出并开发了一种智能控制系统，融合多源感知、数据建模与自适应算法，实现了工艺参数的实时调节与性能导向的优化控制。实验证明了系统在提升涂层质量、控制稳定性及生产效率方面的显著优势。该研究不仅为刀具涂层领域提供了新型技术路径，也为表面工程行业的智能制造转型提供了坚实基础。

参考文献

- [1] 刘献礼, 刘强, 岳彩旭, 等. 切削过程中的智能技术 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 45-61.
- [2] 陶飞, 戚庆林. 面向服务的智能制造 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 11-23.
- [3] 刘献礼, 范梦超, 计伟, 等. 椭球头铣刀设计及其刀具路径生成算法 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 199-212.