

大数据技术在超硬材料工艺优化中的集成应用

王雷

杭州市蒂慕超硬材料有限公司, 浙江杭州, 310000;

摘要: 超硬材料因其极高的硬度、耐磨性和热稳定性, 被广泛应用于切削、钻探、光电、电子等关键工业领域。然而, 其生产制造工艺复杂、参数众多、工况敏感, 传统工艺优化方法依赖经验积累和单变量调控, 效率低、波动大, 难以支撑产品性能的稳定提升。随着工业数字化转型的加速, 大数据技术为超硬材料工艺优化提供了新的解决路径。本文围绕大数据在超硬材料工艺中的集成应用展开研究, 系统阐述了数据采集与建模机制、核心算法体系与优化策略、典型工艺应用实践等关键内容。通过构建以数据驱动为核心的智能工艺系统, 实现了超硬材料制备过程的多参数协同控制、质量预测与异常预警, 为传统制造向智能制造升级提供了理论基础与实践路径。

关键词: 大数据; 超硬材料; 工艺优化; 数据建模; 智能制造; 质量预测

DOI: 10.64216/3080-1508.25.02.030

引言

超硬材料, 主要包括金刚石、立方氮化硼(CBN)及其复合体, 是现代工业制造中不可或缺的关键材料。其极端性能使其在航空航天、汽车制造、精密加工、电子元件等高端产业中承担着核心作用。本文结合超硬材料生产特性, 提出一套完整的大数据工艺优化框架, 系统探讨其在制造过程中的采集建模、算法应用与典型实践, 推动超硬材料行业迈向更高水平的数据驱动型制造阶段。

1 大数据在超硬材料工艺流程中的集成构建

1.1 工艺流程数字化与数据采集体系建设

实现大数据在超硬材料工艺中的有效集成, 首要任务是完成全流程的数字化改造与数据闭环构建。超硬材料制备过程涵盖原料筛选、预处理、混料、高温高压烧结、冷却、成型与后续加工等多个环节, 每一环节均涉及大量可变量, 如温度梯度、压强波动、添加剂比例、时序逻辑等。传统设备多数为离线采集或手工记录, 缺乏实时性和系统性, 难以支撑后续数据分析建模。

因此, 平台需通过在关键设备上部署高精度传感器(如红外测温仪、压力变送器、颗粒度在线检测系统)及工业边缘采集终端, 实现实时数据采集并以工业协议(OPC UA、Modbus等)上传至数据平台。在此基础上构建统一数据仓库, 按批次、时间、设备编号等维度对数据进行标准化处理与归档, 并通过SCADA系统或MES平台实现实时监控与历史回溯, 打通从感知层、网络层到平台层的完整链路, 为后续智能建模提供稳定、结构化、可追溯的数据基础。

1.2 工艺过程特征建模与因果分析框架

超硬材料的工艺过程呈现出高度非线性的状况, 其变量之间存在着很强的耦合性, 并且对时序颇为敏感等一系列特点。单纯依靠简单的线性回归方法, 或者仅针对单因变量进行控制, 是很难精准地将工艺变量给产品性能所带来的真实影响揭示出来的。所以说, 在大数据平台里面去构建一个多维特征建模体系, 这一点显得极为关键。一开始要借助主成分分析(也就是PCA)、互信息量分析等相关的方法, 来对关键变量以及冗余参数加以筛选, 以此达到降低特征维度以及减少噪声干扰的目的; 接下来则运用聚类分析(比如K-means、DBSCAN这类)去识别典型的工艺工况模式以及那些异常的样本, 进而建立起“数据标签—工艺状态”这样的映射关系。

在此之上, 引入像Granger因果、Do-calculus方法这类因果推断框架, 去挖掘关键变量间那种动态的因果结构, 进而识别出究竟哪些变量对于硬度、晶粒尺寸以及杂质含量等质量指标会产生显著的影响。该因果模型一方面能够充当数据解释的基础, 另一方面也能给后续的调控建议给予决策方面的依据, 实现从“相关性”分析朝着“机制性”建模的转变, 这可是把大数据切实嵌入到工艺流程核心之处的一条关键路径。

在实际的生产环节当中, 超硬材料工艺方面的数据常常会展现出这样一些特点, 那就是其源头是分散开来的, 类型也极为复杂, 而且周期还并不统一。这里面既涵盖了结构化的工艺参数, 还有半结构化的传感器时序数据, 甚至连非结构化的图像数据也包含在内了, 比如说烧结过程当中的显微照片以及晶粒扫描图像等。要是想要达成跨数据源的统一分析这一目标, 那么相关平台就必须去构建起一个能够支持多模态

数据融合的数据治理框架,要借助数据中台技术来让数据实现归一化,让标签能够对齐,并且完成指标的映射。烧结温度的时序曲线和最终的晶粒图像它们二者之间是可以通过时间戳以及批次号来建立起一种逻辑上的连接的,如此一来便能够构成一个关于“工艺行为—产品形貌”的关系数据库了。

与此同时,建立起质量回溯机制显得尤为重要。平台需要能够实现从产品编号一直到工艺全过程的批次追溯功能,借助数据指纹机制把每一批产品和它的生产参数、设备的运行状态以及操作路径紧密地绑定起来,要是一旦察觉到产品存在性能方面的缺陷,就可以马上反向去查找与之相关联的工艺数据,进而精准定位那些潜在的失控因素。该机制在提升发现问题的能力以及为异常分析和优化迭代提供支撑等方面有着极为重要的核心价值,是确保数据驱动的工艺优化体系能够实现闭环运行的极为关键的保障。

2 大数据驱动的超硬材料工艺优化算法体系

2.1 参数优化中的机器学习建模方法

为达成超硬材料制备流程里的精准调控这一目标,大数据平台需要构建起能实现从参数到质量指标的预测以及优化的模型。在针对建模方法加以选择的时候,平台会优先运用机器学习的相关方法来确立起“多输入—多输出”这样的一种映射关系,其中常见的模型有随机森林(RF)、梯度提升树(XGBoost)、支持向量机(SVM),还有深度神经网络(DNN)等等。在开展模型训练的这个过程当中,依据已有的那些工艺批次的数据,去搭建起以温度、压力、时间、材料配比等等作为输入内容,而以硬度、晶粒均匀性、导热率作为输出内容的监督学习模型,从而展开拟合以及泛化方面的训练。

想要让模型更加稳定的话,可以把交叉验证、特征重要性分析以及贝叶斯优化调参等方法引入进来。通过运用模型集成策略,将多个模型的结果加以组合,这样能让其在不同工况之下的鲁棒性得到增强。在部署这方面呢,平台是支持模型进行在线部署的,而且还能实时调用。再结合边缘计算单元的话,就可以在现场实现预测反馈了。如此一来,便能依据从历史数据当中学习到的内容,给操作人员给出调控方面的建议,最终达成工艺设定值的智能推荐以及自适应调节的目的。

2.2 工艺异常识别与智能预警模型构建

在超硬材料的生产环节里,设备出现老化情况、原料产生波动状况或者受到环境方面的干扰等诸多因素,常常使得工艺出现异常情况,可却没能被及时察觉出来,如此一来,产品质量就会发生波动,甚至

会出现报废的情况。大数据平台能够凭借时序异常检测模型以及无监督学习的相关方法来搭建起异常识别的体系架构。比如可以采用变分自编码器(VAE)的方式、孤立森林(iForest)的手段或者基于LSTM的自监督序列预测这类方法,针对各个关键工艺指标的时间序列去展开建模操作,一旦实际观测所得到的值偏离了预测的区间范围,那么就会即刻触发异常识别的程序。而且该平台还能够把热图分析同Top-N指标偏差分析相互结合起来,以此去判定异常情况的源头所在以及其影响的范围大小,较为迅速地达成根因定位的目标。

预警系统能够对告警分级以及响应策略加以配置,它会把异常状况划分成轻微、中度还有严重这几个不同等级,相应地,轻微等级异常会触发操作指导这样的响应流程,中度等级异常会触发调度通知的响应流程,而严重等级异常则会触发紧急停机等响应流程。该平台还具备与移动端、DCS系统以及可视化大屏等实现联动发布的能力,以此来保证多层次的人员可以及时做出响应并进行处置,进而建立起那种涉及全过程且涵盖多角色协同的工艺异常闭环响应机制。

2.3 基于强化学习的动态工艺路径优化探索

与传统静态优化方法相较而言,强化学习(RL)有着适应性强以及策略灵活这样的特点,在超硬材料这类复杂的制造环境当中呈现出了别具一格的优势。平台借助构建“状态—动作—奖励”三元组模型的方式,把工艺设定的整个过程构建成一个有着多轮次的决策过程。将温度曲线调整、压力调节步长当作动作,同时把硬度目标接近度、原料损耗率、周期稳定性作为奖励函数,以此来训练智能体,使其能够在模拟环境里持续不断地进行迭代,进而学习到最优的工艺路径策略。

为了保障安全以及实现可控性,平台对仿真环境的构建予以支持,同时也支持离线训练模式。在虚拟环境当中来完成策略的预热操作,而在实际的工艺过程里面,则采用“专家规则加上RL推荐”这样的混合控制模式,以此来保证实际操作的风险处于可控状态,并且让策略的演进保持稳定。这种方法在非标准批量以及定制化生产场景当中尤其适用,即便处在短周期且高复杂度的情况下,依然能够快速地进行适配,进而输出优化路径,其属于推动超硬材料智能制造从凭借经验控制朝着智能决策转型的重要方向。

3 典型工艺场景中的大数据应用实践分析

3.1 金刚石微粉粒度控制中的数据建模优化实践

金刚石微粉属于超硬材料里颇为关键的一个子类,它的粒度控制情况会对后续涂层均匀性、切削性

能以及耐热性等重要指标产生直接的影响。在微粉生产期间,其粒度分布是由破碎能量、分级气流速度、初始颗粒尺寸还有沉降时间等诸多变量相互作用来控制的。传统的工艺往往是凭借人工经验去设定分级参数,这样就很难形成一种稳定的分布模式。针对这一难题,某生产企业着手构建了大数据粒度预测模型平台,该平台通过高频次地采集分级环节中的设备电流、气压以及粒径在线检测图像等方面的数据,进而形成了历史批次样本库。

平台借助随机森林以及 LSTM 模型相互组合的方式,构建起非线性回归预测框架,由此达成了对目标粒度区间的预测准确率能够达到 92% 以上的效果。与此同时,平台还引入图像识别方面的技术以及深度学习相关技术,针对颗粒扫描图像展开自动判别操作,并且进行粒径分类处理,在实际的工况环境下能够实现针对粒度偏移情况的自动调节以及反馈功能。等到项目落地实施之后,微粉产品的粒度合格率得以提升,提升幅度达到了 12%,而且人工参与的各个环节也有所减少,减少的比例大约为 60%,进而形成了一个从数据识别一直到参数调节的完整全流程闭环控制系统,很好地展现出大数据技术对于粒度工艺稳定性所具有的提升价值。

3.2 立方氮化硼(CBN)高温烧结工艺的智能调控实践

CBN 它是硬度仅次于金刚石的材料,位列第二。其烧结过程对温度曲线、压力强度、升温速率以及保温时间等方面都极为敏感,工艺窗口不仅窄,而且还容易出现波动情况。在某超硬材料研究所开展的项目里,研究团队凭借着多年积累下来的历史数据,着手构建了温压时序数据模型以及硬度质量预测模型。一开始,先针对超过三千组的烧结实验数据展开聚类与关联方面的分析,由此确定了六种较为典型的烧结路径。接着,借助 XGBoost 模型来建立温压参数和硬度之间存在的非线性回归关系,并且还设计出了针对温度的多段控温策略。

平台把实时分析模块接入到烧结炉控制系统之中,实时对当前工艺参数和预测最优路径的偏差值加以对比,促使边缘控制器依据情况动态调整升温功率以及保温时间,以此来最大程度地把控烧结环境的一致性。与此同时,平台还结合异常识别机制,达成对热偶故障、电源波动这类意外因素的提前预警,并且能够做出避让调节。在部署后的一年时间里,CBN 材

料的硬度波动范围从 $\pm 1.2\text{ GPa}$ 缩减到了 $\pm 0.4\text{ GPa}$,成品率也提高了 9%,由此可以看出大数据辅助工艺路径进行动态优化所取得的成效是颇为显著的。

3.3 超硬材料复合刀具加工工艺的数据闭环控制实践

在超硬材料深加工方面,复合刀具的磨削加工涵盖了像多轴联动、多介质磨削以及砂轮损耗控制等一系列颇为复杂的环节。与此同时,相关设备的品牌各式各样,其接口标准也并不统一。有一家在刀具制造领域处于龙头地位的企业大力推动数字化改造工作,在那些关键设备之上部署了统一的边缘采集终端,用来采集诸如主轴功率、震动信号、砂轮磨损情况以及电流波动等多维度的数据,并且还将这些数据与刀具质量检测结果进行对接,由此构建起了一个包含‘加工参数—工艺行为—刀具形貌’的三层数据模型。

平台运用 CNN 以及 Attention 机制来搭建刀具缺陷图像识别网络,与此同时,还把回归模型融合进来,用以预测砂轮剩余的寿命以及刀具边缘整形方面存在的误差。在磨削的整个过程当中,系统能够实时察觉到异常的偏移情况,要是功率曲线出现并非正常状态下的上扬情况,而且还伴随着震动频率发生突变,那么系统便会自动下调进给的速率,并且发出提醒以更换砂轮。在试点线条完成部署之后,单位换刀的次数减少了 20%,而一次加工所得到的良品率则提升到了 96% 以上,这也就意味着以大数据分析作为基础的磨削工艺已然迈入到了能够自我诊断、自我调节的智能时代。

4 结语

实践证明,数据不仅是信息,更是工艺背后的“行为镜像”,通过它可以透视系统、调控参数、预防风险。未来,随着工业互联网、边缘智能与人工智能的深度融合,大数据在超硬材料行业的应用将进一步向纵深发展,从辅助决策走向智能闭环,从工艺链优化迈向整个产业链重构,为我国材料工业的高端化、智能化提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 代凯,王传新,许青波,等.约束式热丝 CVD 法制备金刚石的研究[J].金刚石与磨料磨具工程.2018,(4).
- [2] 张旺玺,王艳芝,梁宝岩,等.纳米金刚石基于功能材料应用的研究现状[J].材料导报.2018,(13).
- [3] 王秦生,张旺玺,穆云超.关于金刚石线锯发展中的若干技术问题[J].中原工学院学报.2018,(4).