磨削加工自动化、智能化及虚拟化

通辽市科尔沁区公路工程管理处 （内蒙古 028000） 黄竹学
青岛理工大学 （山东 266033） 李长河
东北大学 （辽宁 110004） 蔡光起

磨削加工中，由于砂轮线速度高引起的破碎现象时常发生，砂轮破碎及磨损状态的监测是关系到磨削工作能否顺利进行和保证加工质量和零件表面完整性的关键；在高速加工中，砂轮与工件的对刀精度，砂轮与修整轮的对刀精度将直接影响到工件的尺寸精度和砂轮的修整质量，因此，在高速磨削加工中，在线智能监测系统是保证磨削加工质量和提高加工生产率的重要因素。

1. 磨削加工数控化和自动化

近年CNC磨削技术发展很快，几乎各种磨床都有CNC产品，国外CNC工具磨床已从3轴发展到10轴。一些专用和柔性数控软件和系统已经开发成功。可实现联机测量、自动更换砂轮和自动装卸工件的磨削加工中心的出现标志着磨削自动化达到一个新水平，其主轴回转精度为0.5μm，定位精度为1.0μm，重复定位精度为0.7μm，轮廓加工精度为5μm。近年对于非球面的磨削和研抛，采用计算机控制光学表面成形（Computer Controlled Optical Surfacing，CCOS）技术，能根据加工面上某点需要的材料去除量控制磨盘压强及磨削点相对速度。连续轨迹的磨削数控技术的应用，可实现典型的成形曲面磨削、凸轮廓线和凸轮轴、曲轴及复杂曲面的点磨削。

CNC磨床要求组织和硬度均匀性好的砂轮，且具有很好的静动平衡性能、高的形状精度和尺寸精度、高的磨削效率和使用寿命。同时对超硬磨料砂轮要充分发挥生产效率和使用寿命，还要尽可能减小消耗并提高修整效率和精度。这种需求推动了监测系统的发展。此外，磨削数控系统的开发也有了很大进展，许多专用磨削数控软件和系统已经商品化，更多柔性磨削数控软件和系统正在工艺优化，提高了系统的可靠性，并具有机床保养、故障诊断及排除、避免碰撞等功能。

使用磨削机器人是磨削加工自动化的另一标志。磨削机器人主要用于去除毛刺和抛磨加工。目前机器人磨削已经可以实现较大去除率的磨削，以300N的压力加工硬钢，每分钟可去除80g金属。东北大学研制的并联机器人已经实际应用于钢锭表面缺陷的自动修磨（见图1）。该机器人可实现在0°和90°两种水平位置修磨，最大修磨压力达2520N，最大金属磨除率达1780g/min。

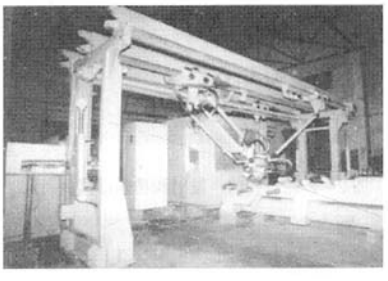


图1 钢坯修磨并联机床

2. 磨削加工智能化

随着人工智能和传感技术的发展，智能磨削已成为重要研究方向。由计算机取代人的部分脑力劳动，实现加工过程中的决策、监测与控制的自动化，其中关键是决策自动化。通过对磨削过程认识的不断深入，已经积累了大量可靠的工艺数据，进一步可建立有实用价值的知识库与数据库，利用有关加工过程的经验知识和模型，为磨削智能化控制提供了可靠的技术知识基础。

价格昂贵的超硬磨料砂轮的应用，要求低消耗和精细修整，并尽可能发挥超硬磨料优越性。这也推动了磨削加工智能化技术的发展。它可以利用监测信息和磨削数据库，自适应优化磨削条件和判断工作状态。在适当安装位置和使用信号分析仪后，声发射传感器可有效监测磨削过程、修整过程、砂轮的磨损与破损和工件表面

完整性（见图2）。目前还使用旋转和环形声发射传感器直接在内外圆磨床主轴上测取信号。磨削传感器的另一个新进展是多频率多传感器的磨削烧伤、表面硬化和硬化层深度在线检查系统的应用。但这项技术需要高灵敏度的传感器，还需要有专家系统或智能系统及软件设计等技术的支撑。汉诺威大学用32mW连续激光管，位置光敏检测器和镜头的新光学测量方法，评价砂轮形貌对磨削过程稳定性的影响，并对砂轮微观特征信息及状态进行在线判断。由于磨削过程的复杂性，目前磨削过程的监控系统在理论上及实用性方面尚有许多问题需要深入研究。美国S. Malkin还研究了一种“智能”砂轮（见图3），通过合理分布安装在砂轮上的传感器和基于数字信号处理器的采集存储片采集和监测声发射信号，可对旋转的砂轮进行实时信号采集和数据处理，进行计算机系统控制，在线监控陶瓷磨削的磨削过程和修整过程等。

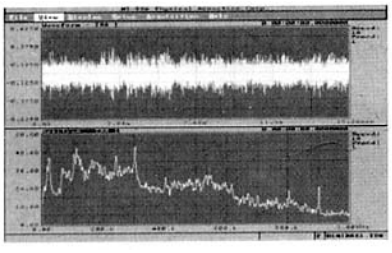


图2 砂轮修锐的声发射和功率谱监测图像

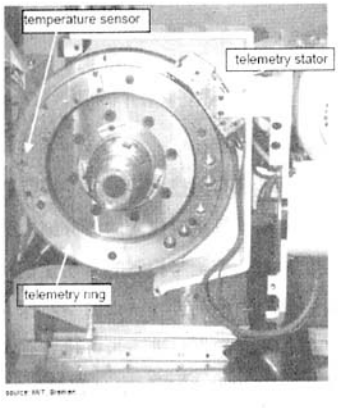


图3 智能磨削砂轮

智能磨削系统利用多传感器信息融合技术，对过程信息进行处理，为决策与控制提供准确可靠的信息。根据传感器模块提供的加工过程信息和磨削数据库，作出决策规划，确定合适的控制方法，产生控制信息，通过NC控制器作用于加工过程，以达到最优控制，优化磨削条件，实现要求的加工任务。此外，还可实现自学习与自维护功能。国内许多单位也先后进行过智能制造技术或智能制造系统等的研究工作，磨削过程的专家系统现在处于研究和开发当中。

英国开发了一种磨削加工过程多模型并存的多元化智能仿真系统，同时运用经验公式法、基本规则法及神经元网络方法求解工艺参数。系统有一个优化的经验数据库，并设定误差限，如果加工要求与该数据库中的数据之差在误差限内，则依据数据库中的优化经验参数选择砂轮参数与控制参数的组合；如果超出误差限，则用磨削基本规则模型求解最佳参数；如果对砂轮规格有特别要求时，则采用人工神经网络模型来选择砂轮参数。采用后两种参数，如果磨削过程达到最优，则经验数据库利用自学习功能加以记录和补充，使系统逐步逼近最优磨削状态。因此使砂轮参数选择技术达到了一个新水平。

3. 磨削加工的虚拟仿真

影响因素复杂的磨削加工曾被认为是“黑色的加工技术”，对砂轮特性与磨削性能影响机理的研究一直没有取得更大进展。近年，人们开始利用计算机仿真、优化、人工神经网络等模型来设计砂轮特性参数和对磨削过程及磨削结果进行仿真和预测，为研究对磨削性能的影响机理提供了新途径。

美国开发出磨削加工软件包（GRINDSIM），该软件的功能有仿真、校准、优化等功能。软件采用磨削类型、工件属性、砂轮规格和磨削条件作为输入信息，然后运行模型，预报磨削力、功率、挠度、温度、比能、表面粗糙度、圆度等磨削特性。其中仿真模块来预测磨削结果和加工质量；校准模块通过实测参数对模型进行校正，对实际磨削过程进行学习，以提高模型的精度；优化模块以最小化周期来确定磨削参数的修正系数。通过这些过程可以优化选定的砂轮特性等工艺参数并掌握其与磨削过程和结果的映射关系。

德国通过运动学仿真来分析和预测磨削过程。基于对磨粒和砂轮的检测，包括磨粒形状、尺寸、分布及结合剂隆起等，建立描述砂轮宏观和微观地貌的三维数学模型，用多磨粒的累积切削模拟磨削过程。该系统可生成不同的砂轮形貌，分析及预测磨削过程及不同条件的磨削结果，从而建立了某些砂轮特性参数与磨削结果的影响规律。

近年来国内外学者广泛应用人工神经网络在建立磨削输入/输出预测模型，比如对表面完整性、磨削烧伤、

磨削力及磨除率的预测等，预测水平达到相当高的精度，为优化选择砂轮特性及工艺参数提供了理论依据。

借助于计算机仿真和优化对砂轮特性影响磨削性能机理的研究取得很大进展，为砂轮特性及工艺参数优化提供了一定依据。但这些方法基本上都建立在大量随机假设基础上，基于统计或经验模型来复制磨削过程和预测结果，仍属于一种对输入输出行为的认识系统，并不能真正揭示磨削系统内部的运行规律。还须探索更有效、严格的理论研究方法，把磨削机理研究推向新的高度。

虚拟磨床依靠建模与模拟技术仿真磨削过程，建立一个逼真的虚拟磨削环境，以用于评估及预测磨削过程和结果，加深了人们对磨削过程的认识。使用建立的砂轮地貌模型，并考虑磨削和几何参数、磨削力和磨削热、磨削振动和受力变形等的影响，对磨屑形成过程、能量转换、磨削力变化、磨削区温度、磨削精度和磨削表面质量进行动态虚拟仿真，再现磨削过程，能分析和预测不同条件下的磨削性能和效果。

4. 分子动力学仿真技术在磨削加工中的应用

磨削机理的分子动力学分析和仿真是目前磨削机理研究的新方法。超精密磨粒加工和超高速磨削发生在极小区域和极短时间内，磨削区域只包含数个至数百个原子层，磨屑的厚度只有几个纳米。分子动力学仿真是用原子、分子的运动方程来计算和反映系统性质，既能得到原子的运动轨迹，又能进行各种观察；仿真结果能反映系统的静态特性和动态特性，为在极端条件下很难或根本无法做的磨削实验提供了一种科学、合理的研究方法。

通过建立分子动力学模型和仿真，可以对超精密加工过程中的切削能耗和切削应力、应变的分布进行仿真，可以有效地预报切削力和切削变形，研究切削区和磨粒、工件接触区的微观结构和已加工表面的完整性、超精密切削时材料去除机理及表面形成机理、微观物理现象和预报极限加工精度及研究非金属硬脆材料超精密加工过程中脆性/延性转变规律和临界条件等；可以通过热分析模型，研究能量守恒系统中势能动能转换中切削温度的升高及切削温度场。

日本1990年对单晶铜与金刚石的微细加工过程建立了原子尺度的切削模型，1994年又进行了加工表面结构的分子动力学仿真，指出可实现精确刃口钝圆半径1/10～1/20的微量切削，因切刃耕犁而被打乱的工件原子在切刃经过后将完美地重新排列。1997年，天津大学就单晶硅磨削过程进行了分子动力学仿真模拟。近年，哈尔滨工业大学、东北大学等单位亦开展了分子动力学仿真的研究工作。

分子动力学是通过 N 个相互作用原子构成的能量守恒的微正则系综的哈密顿量、拉格即日量或牛顿运动方程来描述复杂凝聚态系统的。分子动力学仿真的关键是恰当地选择磨粒与被磨材料相互作用的势函数，建立分子动力学模型。目前使用的势函数分理论势函数和经验势函数2种。理论势函数的许多参数很难确定，很难直接用于实际仿真。实际中，分子动力学仿真采用较多的是2体经验势函数，主要包括 Morse 势函数、Born-Mayer 势函数、Lennard—Jones 势函数和 Tersoff 势函数等适用于单晶铜，单晶铝和锗等金属材料；3体和多体势函数考虑了具有共价键晶体结构和晶格方向，适用于硅、碳及金刚石等材料。现有文献已报道铜、铝、单晶硅材料的势函数，但多晶材料、陶瓷等硬脆材料的势函数未见报道，确定描述材料基本特性的势函数存在困难。

现有分子动力学仿真模型都是针对理想无缺陷单晶材料的，实际上大多数工程材料都不可避免地存在着空穴、位错、气孔和微裂纹等缺陷，为此应深入研究描述晶体材料中存在缺陷时的建模方法。

为真实地反映加工条件，建模尺寸不能太小，模型大则计算时间大大增加。仿真算法研究具有重要意义，并要研究有利于控制模型中的原子数量的周期边界条件，和与边界层原子相邻的热态层。最近提出的边界原子层适时更新算法和相邻原子登记保存技术有利于对长距离切削模型的观察和提高计算机运行速度。分子动力学描述单晶材料超精密切削过程是有效的，如能扩展到亚微米和微米水平，其应用前景将更为广阔。

为此，应进行如下研究：研究开发描述常用多晶材料、陶瓷材料的新型势函数，建立所描述材料的经验势函数；研究开发实际晶体材料建模方法，同时要建立包括工具磨损的建模及仿真算法；研充开发微观模型向宏观模型的转化条件，用来进行微米或更大尺寸的切削过程的仿真；研究分子动力学仿真计算时间短的仿真算法；建立针对实际超精密切削/磨削过程的实用分子动力学仿真软件，解决实际工程问题。

（收稿日期：20070730）