

## 新工科背景下基于高性能 PVD 涂层开发的先进制造教学新模式探索与实践

赵金富<sup>1,2,3,5\*</sup> 王 兵<sup>1,2,3,5</sup> 刘战强<sup>1,2,3,4,5</sup> 梁晓亮<sup>1,2,3,5</sup> 任小平<sup>1,2,3,5</sup>

1. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061
2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061
3. 机械工程国家级实验教学示范中心〔山东大学〕, 山东 济南 250061
4. 山东大学 机电工程学院, 山东 威海 264209
5. 金属成形高端装备与先进技术全国重点实验室, 山东 济南 250061

**[摘要]**厚度几微米的 PVD 涂层可以承受数十乃至上百度温差可以为刀具隔热, 也可承受 GPa 级高压增加刀具耐磨性, 充分保护“工业牙齿”切削刀具。在新工科背景下培养适应生产需求的卓越工程师, 必须紧紧围绕“以学生为中心”的理念与宗旨, 探明先进制造类课程的当前教学痛点, 提出切实可行的教学革新措施, 以师生双向理论与实践能力提升为目标, 基于产-教-研-用多指标提升课程考核方式, 取得较好的教学实践效果。

**[关键词]** PVD 涂层; 切削刀具; 课程内容; 教学模式; 考核方式

DOI: 10.33142/fme.v6i2.15392

中图分类号: G641

文献标识码: A

### Exploration and Practice of Advanced Manufacturing Teaching Mode Based on High Performance PVD Coating Development under the Background of New Engineering

ZHAO Jinfu<sup>1,2,3,5\*</sup>, WANG Bing<sup>1,2,3,5</sup>, LIU Zhanqiang<sup>1,2,3,4,5</sup>, LIANG Xiaoliang<sup>1,2,3,5</sup>, REN Xiaoping<sup>1,2,3,5</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan, Shandong, 250061, China
2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Ji'nan, Shandong, 250061, China
3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Mechanical Engineering (Shandong University), Ji'nan, Shandong, 250061, China
4. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Weihai, Shandong, 264209, China
5. National Key Laboratory of High-end Equipment and Advanced Technology for Metal Forming, Ji'nan, Shandong, 250061, China

**Abstract:** PVD coatings with a thickness of a few microns can withstand temperature differences of tens or even hundreds of degrees Celsius, providing thermal insulation for cutting tools and increasing tool wear resistance under GPa level high pressure, fully protecting "industrial teeth" cutting tools. In order to cultivate outstanding engineers who can meet production needs in the context of new engineering disciplines, it is necessary to closely focus on the concept and purpose of "student-centered", identify the current teaching pain points of advanced manufacturing courses, propose practical teaching innovation measures, and aim to enhance the theoretical and practical abilities of teachers and students in both directions. Based on the multi index of production education research application, the course assessment method should be improved to achieve good teaching practice results.

**Keywords:** PVD coating; cutting tools; course content; teaching mode; assessment method

### 引言

在我国积极建设新工科的背景下, 将高校作为培养卓越工程师的摇篮, 进而培养出适应新时代高端装备与制造产业需求的高层次机械制造工程师已成为共识<sup>[1]</sup>。“工欲善其事必先利其器”, 先进切削刀具被誉为“工业的牙齿”, 切削刀具通常采用硬质合金材料构成, 但是其硬度等热物理性能在面对高温合金、新一代 Ti-Al 基合金加工时存在切削温度高和受力磨损快的问题, 导致刀具使用寿命短, 造成工厂停机次数多, 生产效率低, 生产成本低。刀具涂层被视作“保护牙齿的牙冠”, 其中, 厚度仅为几微米的 PVD 涂层可以承受数十乃至上百度温差可以为刀具隔热, 也可以承受 GPa 级高压为刀具减磨, 充分保护

“工业牙齿”切削刀具<sup>[2,3]</sup>, 通过 TiAlN、CrAlN 等涂层的涂敷, 可以充分保护刀具基体硬质合金。

依据不同生产场景合理选择与制备正确的刀具涂层是确保高效加工最重要的因素之一。其中, 正确选择涂层可以降低每个零件产品项目或每件刀具的使用成本, 刀具涂层合理选择不仅可以降低摩擦、减少热胀冷缩和降低切削力, 从而提高进给速度和转速, 最终改善工件表面质量, 并且可以减少加工过程中的停机时间。但是, 针对某特定应用场合选择正确的涂层可能是件复杂而费劲的工作。市场上可以见到的每种涂层都有其优缺点, 而选择不当则会缩短刀具寿命并使问题雪上加霜。

目前国外巴尔查斯等涂层商具备强大的市场优势, 其

长期在高端涂层炉制备、高性能涂层制备领域具备垄断地位,虽然近年来我国刀具涂层行业奋起直追,但是由于我国目前高层次涂层人才较少,一方面对于刀具涂层基础材料知识了解不足,另一方面对于刀具涂层在加工中所面临的实际工况下对切削机理的了解甚少,造成了高端涂层制备我国长期处于跟跑状态,比如国内高性能硬质合金刀具磨削制备后仍需采用进口涂层炉完成涂层制备,因此,目前市场上对合理选用和制备工具涂层的专业人才需求十分迫切。

为了适应日益增长的生产需求,结合当前就业形势严峻的大背景,必须在当前学校教学过程中,探明先进制造类课程关于高性能 PVD 涂层制备评价选择方面当前教学痛点,探索切实可行的课程内容和新教学模式,以师生双向理论与实践能力提升为目标,基于产-教-研-用多指标提升课程考核方式,通过依靠自身培养的高层次人才和原始创新成果,改变由现在国家刀具制造业跟着跑,转向领跑世界刀具行业新局面<sup>[2,3]</sup>。

### 1 课程教学痛点

山东大学机械工程学院依托“机械制造及其自动化”国家重点学科,其中,机械工程学科是国家“211 工程”及“985 工程”重点建设学科,是山东大学双一流建设学科(学科名称:材料与加工制造),工程学(含机械学科)ESI 排名前 0.34%,学院拥有高速切削加工与刀具、金属成形高端装备与先进技术全国重点实验室、高端工程机械智能制造全国重点实验室、高效洁净机械制造教育部重点实验室、国家级机械基础实验教学示范中心、国家虚拟仿真实验教学中心和山大临工国家级工程实践教育中心,多个国家级与省部级平台均以机械制造为核心和主题。近年来,机械制造类课程作为重点科学不断丰富和发展。但是,以往以非涂层刀具作为重点的机械制造基础类课程显然无法满足社会上日益增长的高性能 PVD 涂层刀具/工具需求<sup>[4]</sup>。“金属切削刀具与加工”作为我校机械类本科专业的主干课程和必修模块。但是,在以往机械类课程“金属切削刀具与加工”教学中关于最新的先进涂层技术及其应用内容较少提及,导致学生对各类涂层及其功能了解甚少,主要体现在多数学生不了解刀具涂层的基本种类及其适用范围,对涂层基本功能不明确,学生更不具备制备实操能力,达不到优秀卓越机械工程师的培养目标。

在课程内容方面,主要体现为最新前沿知识和与时俱进能力无法有机凝力,痛点主要包括:(1)最新前沿知识匮乏,当前课程内容关于各类先进防护涂层类别及其制备方式介绍较少,导致学生对涂层的认识和了解仅仅停留在“臆想”阶段,由于涂层属于薄膜材料,其材料组成与性能与常规尺度材料有所差异,仅仅停留在臆想阶段会导致学生对“微纳尺度和毫米尺度”材料知识的差异认知不到位,部分涂层材料的尺寸效应归属于“介观尺度”,因此,不从更加详细的角度加以阐述前沿知识,会导致学生们无法与已有物理/化学/生物等高等教育科学体系相联系;(2)

与时俱进能力不足,当前教学过程中关于涂层防护目的的介绍较少,导致课堂中学生只是单纯了解“减磨”和“隔热”字面含义,对于其背后的机制和理论缺少定量认识,而摩擦学与传热学作为一门既传统但又在新工科背景下推陈出新的新科,新的知识的引入将引领涂层防护方面新的认知变革,因此,合理阐明涂层制备工艺与组分等如何影响涂层性能,引导学生对于课堂学习内容的思考,激发学生学习热情,避免现在陈旧教学内容导致的学生无法面向实际需求合理提出涂层设计方案和改进措施的困境。

在课程形式方面,存在传统课堂课程要点之间链接缺少精细衔接和课程考核形式单一,痛点主要包括:(1)课程要点之间链接缺少精细衔接,在实际教学过程中,但从课堂泛泛知识点介绍,导致学生缺少涂层刀具在实际生产制造过程中与非涂层刀具的效果对比,虽然几微米 PVD 涂层的引入看似极小的改变,但是这将起到“四两拨千斤”的效果,涂层有无将直接改变刀具与切屑之间的接触受力和受热状态,改变其传热与磨擦规律,因此不对比教学,会造成学生根本无法真实深入理解涂层用处,因此现有教学中缺少涂层服役场景下的传热量、材料学、摩擦学和接触力学等的知识传授,造成了学生只是略懂涂层知识,实际使用场景下很多涂层功能都是叠加复合使用,既需要考虑涂层的耐磨性又要考虑其隔热性,甚至需要考虑其与工件材料组分之间的化学亲和性等,课程要点之间链接缺少精细衔接会直接造成学生们所学课程要点难以融会贯通和举一反三;(2)当前制造类课程的考卷基本以理论知识为主,直接造成了学生普遍存在只注重卷面应试分数,造成了高分低能现象。当前课程形式考核方面,缺少综合评估学生制备与评价高性能涂层环节,甚至部分学生完成四年教学,都未曾见过涂层炉、涂层测试装备,多数学生未见过涂层刀具在切削加工中心实际加工效果,造成面向金属切削刀具与加工行业“内卷”时,毕业学生关于涂层制备与选择的知识掌握深度不足。

### 2 基于高性能 PVD 涂层开发的教学革新措施

针对上述课程内容痛点提出如下革新措施。(1)前沿涂层研究内容更新,提出了系统性的高性能涂层制备与评价的教学内容体系,结合现有学院电弧离子镀、磁控溅射仪等设备优势,增强学生对氮化物、硼化物和氧化物等具有代表性的 PVD 涂层研究现状和制备工艺的了解。(2)课堂与企业实际需要密切结合,构建刀具涂层组分、微观结构与制备工艺间的关系数据库,提升学生选择与开发高性能涂层的能力,避免无头绪选择和仅凭经验选择,在学生培养中设计具有实际生产价值的涂层刀具,开展切削加工性能评价实验,提升学生的实践能力,帮助学生将来更好地从事本专业工作。

针对上述教学模式痛点提出如下革新措施。(1)多学科知识交叉融合,基于开展的新工科背景下高性能 PVD 涂层的热学-物理-化学-弹塑性力学等多学科知识融合的

教学改革研究,通过有限元模拟求解其中热-力耦合的非线性关系和模拟实验观察结合,避免单纯理论授课造成学生对相关涂层影响传热规律及减摩效果等与实际脱节的困境,仿真预报中涉及的切削力、切削温度、切削应力应变场变化可以帮助学生在有限学时内系统掌握更多刀具涂层优选和设计的知识,更加清晰了解涂层对于切削机理的影响规律。培养学生“针对性”选择合理涂层的能力,构建面向不同涂层组分、层数、厚度与结构的涂层制备工艺选择与设计数据库。(2)涂层设计与制备训练,通过指导学生理论与实践相结合,突破单一课堂传授知识的不足,精心挑选典型的涂层刀具类型,包括单层、多层与梯度化涂层等设计训练项目,涂层训练内容包含了选型、制备、评价整套流程,最后整理讲义,形成具有特色的教材,给学生讲述理论知识之后进行实际制备与表征,有利于掌握每类涂层的设计要点。

### 3 基于产-教-研-用多指标的教学课程考核

以师生双向理论与实践能力提升为目标,以分组协作共进提升的小组为单位进行有效管理和考核,新增评价内容包括:(1)实践过程评价;(2)研究报告评价。以“企业实际需求导向-教学革新措施保障-研发制备评价总结-产品测试评估验证”为新课程教学路线,充分激发学生自主学习热情,增强单位培养与企业需求有机结合,获得了良好的教学效果。

基于开展的新工科背景下高性能 PVD 涂层的热学-物理-化学-弹塑性力学等多学科知识融合的教学改革研究,采用多种有限元仿真软件求解与对比非涂层刀具与涂层刀具在实际切削过程中的热-力耦合机理,结合实际切削实验,避免了纯粹理论授课引起的学生关于涂层传热及减摩机制了解不足的困境,充分在学校教学过程中提前帮助学生系统掌握更多适应生产需求的刀具开发经验。

突破单一课堂传授知识的不足,找到了获取实际经验和能力的模拟生产现场的新教学评估方式,通过教学革新措施中提炼出的合理刀具/工具用涂层开发制备项目,交给每个学习小组(3~5人左右),利用单位已有涂层设备,开展相关涂层制备前处理、过程与后处理工作,最后经过与企业方工程师一起采用学院已有高速车削、铣削、钻削加工中心开展面向不同高温合金、钛合金、铝合金等难加工材料的涂层刀具性能评价,并记录学生在制备过程中面临的困难、思考和应对措施,形成教学案例。



图1 基于高性能 PVD 涂层开发的先进制造教学新模式技术路线

针对参与涂层刀具/工具制备的 20~30 个学习小组

所提交的研究报告,开展评估,最终形成面向不同涂层组分、层数、厚度与结构的涂层制备工艺选择与设计数据库,经过多年案例库的不断累积与发展,最终建立和完善基于高性能 PVD 涂层开发的先进制造教学的协同育人机制。图1为基于高性能 PVD 涂层开发的先进制造教学新模式技术路线。

### 4 结语

在新工科背景下通过基于高性能 PVD 涂层开发的先进制造教学新模式探索与实践,充实了机械制造类课程的教学与实践课程内容,充分利用了单位现有的教学与科研设备资源,实现了涂层制备设备、性能评估设备、多切削加工中心协同,多举措并举优化了单位的专业课程体系,通过以企业实际需求案例为导向,结合仿真技术与数据库开发,实现了本科生对高性能涂层制备关键核心科学和技术问题探索的学习热情和爱好,也为我国高端涂层事业发展提供了充分实验数据,通过为国家当前高性能刀具涂层事业发展提供人才储备,充分落实了习近平总书记要求的要深入实施新时代人才强国战略,使得学院在未来制造业竞争中能够占领制高点,加快建设机械制造专业高峰学科。

基金项目:2024 年度山东大学教育教学改革研究项目“新工科背景下基于高性能 PVD 涂层开发的先进制造教学新模式探索与实践(2024Y143)”,教育部产学研合作协同育人项目(项目号:231104590020100),山东大学教育教学改革研究项目“高质量发展背景下机械制造基础学科教学模式改革及人才培养策略研究(2023Y132)”,山东省普通本科高校重点领域教学改革试点项目“机械设计制造及其自动化专业发展联盟建设”。

#### [参考文献]

- [1]陈晖,朱海,刘林.新工科背景下“机械制造基础”课程改革探索与实践[J].机械工程师,2023(12):4-6.
  - [2]胡兴军.刀具表面涂层技术进展综述[J].世界制造技术与装备市场,2008(6):91-94.
  - [3]赵海波.国内外切削刀具涂层技术发展综述[J].工具技术,2002,36(2):3-7.
  - [4]田立辉,卢向雨.《材料表面工程技术》本科教学改革探索[J].产业与科技论坛,2017,26(3):217-218.
- 作者简介:赵金富(1993—),男,山东青州人,博士,山东大学机械工程学院副研究员(准聘副教授),主要从事涂层刀具制备研究;王兵(1990—),男,山东章丘人,博士,山东大学机械工程学院教授,主要从事智能刀具技术研究;刘战强(1969—),男,山东肥城人,博士,山东大学威海校区副校长,机电工程学院院长,教授,主要从事切削加工与刀具技术研究;梁晓亮(1991—),男,山东寿光人,博士,山东大学机械工程学院教授,主要从事加工表面完整性研究;任小平(1985—),女,山东聊城人,博士,山东大学机械工程学院高级工程师,主要从事难加工材料切削机理研究。