



王启民 WANG Qimin

入选国家“千人计划”青年项目

Young Overseas High-Level Talents
Introduction Plan

国家优秀青年科学基金获得者

Excellent Young Scientists Found of
NSFC


广东工业大学机电工程学院教授、博士生导师,入选广东省高校“珠江学者”特聘教授。从事硬质涂层和高温防护涂层;合金、氮化物/氧化物涂层的制备、微观结构与性能;摩擦磨损、高温氧化腐蚀;高速切削刀具涂层;模具涂层;发动机叶片涂层等研究。SCI 收录论文 80 多篇,申请美国发明专利 1 项、中国发明专利 18 项,获授权 14 项。任中国机械工程学会表面工程分会青年工作委员会副主任委员、广东省真空联盟技术委员会副主任委员、国际标准 TC107/SC9 物理气相沉积分会副主任委员、韩国 Global Frontier R&D Center for Future Materials 国家研究中心国际委员会委员以及 *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*、《装备环境工程》编委等。

新型复合涂层材料和工艺技术

——访广东工业大学机电工程学院教授、博士生导师王启民

New Composite Coating Materials and Process Technology

本刊记者 良辰

: 高速高效加工和难加工材料使用增多对刀具材料提出苛刻要求,相应地,国际上刀具材料和涂层技术也在不断升级,请介绍下广东工业大学在先进涂层刀具制造及加工技术方面开展了哪些研究和应用?

王启民: 随着我国制造业高速发展,难加工材料使用量急剧增加,

同时对关键零部件的尺寸、加工精度、表面完整性,以及加工效率和绿色环保的要求越来越高,这就对数控高速高效加工刀具的要求也越来越高。

采用高温强度高、韧性好的硬质合金和高速钢刀具作为基体,在其上沉积一层或多层耐高温、耐磨损的涂层材料,可以大大提高刀具寿命。目

前,涂层刀具已占数控刀具 80% 以上,并处于上升趋势,涂层已成为提升切削刀具性能的关键。针对难加工材料高速加工的新型涂层刀具制备等关键性基础研究,国内仍然较少涉及或者只限于一般性跟踪与改进。研究适应不同难加工材料的涂层刀具制备理论和方法、相应优化加工工

艺,依然是相当长一段时间内的研究重点。针对这个需求,我们提出研究先进涂层刀具制造及加工技术并创建创新课题组,主要开展以下工作。

(1)新型硬质涂层的制备。硬质涂层趋于多元化、多层化和纳米化,在TiN、CrN等传统涂层加入一些Al、Zr、Y等元素形成多元涂层固溶强化,可提高硬度、耐磨性和抗氧化性;加入Si等晶粒细化元素生成纳米涂层可提高涂层高温硬度和热稳定性,而且纳米多层和纳米复合结构设计可获得超硬耐磨涂层;对涂层表面成分进行设计,或通过涂层工艺参数调整使具有非稳态组织(非晶或细小纳米晶),可获得自适应的涂层表层活性组织,在使役过程中自适应环境生成低摩擦系数、有利于耗散能量的复合氧化膜;氧化物和硼化物涂层等新涂层体系具有超强的高温稳定性或抗黏结性能;通过梯度或多层设计提高涂层对基体的结合力、涂层韧性和抗裂纹扩展能力,实现各层所具有的复合功能等。我们在前期纳米复合涂层的基础上,设计综合多种成分和结构的解决方案,即设计多尺度纳米复合涂层,目前已制备出多种成分和性能的硬质刀具涂层。

(2)新型PVD涂层技术的研究。目前,用于硬质涂层沉积的PVD涂层技术主要有磁控溅射和电弧离子镀两类。磁控溅射技术具有表面光滑、无颗粒缺陷等优点,是重要工业化大面积真空镀膜技术之一,但离子化率低导致涂层力学性能和结合力较差;相比磁控溅射,电弧离子镀具有较高金属离子化率和强膜基结合力优点,但在沉积中产生大量宏观颗粒,导致涂层表面粗糙、内应力高。PVD涂层技术在20世纪末和进入21世纪后经历了革命性发展,新型磁控溅射技术将闭合磁场设计、离子源辅助离子化技术、高功率脉冲溅射技术、双极脉冲磁控溅射、气体反馈控制系统等新技术,提高磁控溅射离子化率,使

可用于硬质刀具涂层;与此同时,电弧离子镀技术也有很多大的改进,通过增大阴极面积、加强水冷却、优化磁场分散电弧的办法,大大降低了涂层中大颗粒含量。我们也基于这些思路,对电弧离子镀和磁控溅射技术进行研究,获得优质刀具涂层;以及发展多种复合沉积技术,如磁控溅射-电弧复合技术、离子源-辅助阳极辅助离子化技术等,获得结合强度高、内应力低、多种组元成分和结构的涂层。

(3)PVD涂层刀具的应用技术研究。目前国内涂层与刀具的应用研究比较孤立,涂层研究多关注新成分工艺的涂层和硬度、氧化腐蚀、摩擦磨损等静态性能;刀具研究多集中在高速加工工艺及加工机理,使用的高速加工涂层刀具多是国外大公司的刀具。缺乏针对难加工材料-涂层材料-涂层静态性能-刀具结构-加工工艺之间联系的研究,对其中规律认识不清导致无法在源头上进行创新。我们针对多种难加工材料进行涂层刀具的应用理论和技术研究,尝试把涂层的静态性能和涂层刀具切削应用表现联系起来,探索涂层刀具的应用规律。希望最终一方面解决发展高速高效加工刀具与加工工艺的关键应用基础理论问题,另一方面与企业合作,开发出解决各种难加工材料高速高效加工的先进PVD涂层刀具的制造技术和产品。

☞:团队未来在涂层方向的发展思路是怎样的?如何更好地开发新型涂层并用于产业发展?

王启民:我们定位于硬质耐磨涂层、硬质功能涂层和高温防护涂层的研究。硬质耐磨涂层包括刀具、模具和易磨损零部件涂层;硬质功能涂层指在硬质耐磨基础上满足光学、电学、腐蚀等功能需求;高温防护涂层指可在高温下对基体零部件进行防护,满足高温氧化、腐蚀、高温气体冲刷或磨损环境下使用需求的涂层。

随着传统制造业的升级和新能源汽车、5G电子产品等新兴产业的发展,对涂层的发展提出新需求。

我们将以多学科交叉的基础和应用研究为主要研究内容,结合涂层成分结构-涂层工艺-作用失效机理研究,开发新型复合涂层成分和工艺,与企业深度合作,最后给出解决方案,用于产业发展。

☞:针对航空航天热端部件的防护涂层,您认为未来的研究重点和需解决的难题主要有哪些?

王启民:航空飞行器燃气进口温度一直在提高,服役时间长,传统MCrAlY涂层的使用温度面临极限(1000~1100℃),通过添加合金元素和非金属元素稳定高温相组织、提高氧化腐蚀抗力,使用扩散阻挡层限制高温元素扩散,与贵金属渗铝复合涂层等方法可以改善涂层的性能。热障涂层是降低合金基体温度的方法,要解决高温下相变加剧、烧结和热冲击影响涂层寿命提高的难题。轻质合金如钛铝合金替代镍基高温合金可降低发动机重量提高效率,其高温防护涂层也是一个需要解决的难题。高温防护涂层工艺采用热喷涂、电子束物理气相沉积和真空离子镀技术,热喷涂技术效率高,但涂层相对较粗糙,寿命也受到限制;电子束物理气相沉积技术设备造价高;真空离子镀技术沉积效率较低,在沉积氧化物陶瓷涂层方面也有限制。

航天飞行器使用温度超高,甚至超过了大部分金属材料的力学性能限制,达到1600~2200℃,超高温涂层材料的突破一直是研究重点和难题。目前硅化物涂层、Re/Ir涂层是主要防护涂层,涂层材料的选择和制备、超高温条件下作用失效机理、与基体材料的匹配性等都需要研究的内容;另外,因部分发动机热端部件需在内表面涂层,采用涂层方法制备Nb基合金基体和防护涂层也是一种可能的选择。(责编 铃兰)