

## 专题评述

吕志刚

(清华大学机械工程系, 北京 100084)



吕志刚(1972-),男,博士,清华大学机械工程系研究员,博士生导师。1989年进入清华大学机械工程系学习,先后获学士、硕士、博士学位。2007年10月至2008年3月在英国帝国理工学院(Imperial College London)作访问学者。现为中国铸造学会常务理事、中国铸造协会精密铸造分会副理事长、中国铸造协会教育培训工作委员会主任委员、全国铸造标准化技术委员会熔模精铸分技术委员会副主任,《铸造》《特种铸造及有色合金》《铸造技术》《铸造工程》杂志编委会委员。长期从事熔模铸造工艺研究,主持和作为骨干参与国家自然科学基金、国家重点研发计划、两机专项、中航工业产学研专项、校企合作等项目40余项,发表论文70余篇,1篇获中国铸造学会年度优秀论文银奖,2篇为SCI期刊封面文章。参编专业书籍和手册10余部。获得授权发明专利15项。近些年,开展基于光固化的陶瓷增材制造新工艺研究,开发高精度复杂陶瓷型芯增材制造工艺,并展开芯-壳一体化成形研究。

在铸造工艺大家庭中,熔模铸造独树一帜,该工艺历史传承悠久,早在五六千年前就被人类所采用。古人应用该工艺成形复杂的金属铸件,铸成了一批传世的艺术精品。在现代工业发展中,熔模铸造不断进步,成为适用合金种类广、成形精度高、表面质量好、批量灵活的铸造工艺,特别是随着航空工业对铸件要求越来越高,面对以航空发动机为代表的高端装备中核心铸件的需求,熔模铸造展现出了强大的生命力,成为航空制造中的核心技术之一。

本专题共邀请相关专家和专业技术人员撰写了5篇论文。其中2篇反映熔模铸造在高附加值产品中的应用。1篇介绍光固化增材制造技术与熔模铸造的结合。另有2篇分别介绍熔模铸造的数字化智能化问题和发挥熔模铸造优势,进行产品结构和工艺优化的实践。

冉兴等撰写的《大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术》介绍了熔模铸造工艺在高附加值产品中的重点应用领域——钛合金复杂结构件整体成形。钛合金熔体具有高的化学活性,对铸型材料要求高,而熔模铸造可以选择性地使用高惰性材料作为型壳面层材料,并采取真空浇注,降低金属界面反应。加之熔模铸造的高精度优势,使得熔模铸造成为钛合金复杂精密铸件的主流成形工艺。另外一方面,为了满足航空制造中大型构件整体成形的需要,熔模铸件的尺寸越来越大,从而带来了精度控制及成形难度的提升。冉兴在文中介绍了我国大型钛合金熔模铸件研制的基本情况,从尺寸精度控制和冶金质量控制两方面指出了关键技术难点。特别是,结合某大型钛合金铸件的实例,较为详细地说明了该铸件的制造过程,对相关技术人员有启发意义。

产品结构更大、更薄的需求促使熔模铸造工艺不断革新,通过设备、工艺等不断进步,突破现有工艺局限。大型熔模铸件的生产制造技术是当前熔模铸造工艺的研究前沿之一。

熔模铸造在高附加值铸件方面的另一个重要应用领域是高温合金涡轮叶片。曹腊梅和薛明撰写的《高温合金涡轮叶片近净形熔模精密铸造技术研发趋势》为读者提供了较为翔实的资料和分析。先进涡轮叶片熔模铸造是熔模铸造工艺的集大成者,既要实现高精度的复杂结构,满足近净成形要求,又要实现严格的组织控制,符合严苛的性能标准。作者在文中介绍了合金材料的变化、单晶控制技术的发展和热等静压处理技术。也特别阐述了为了实现叶片更高效冷却,叶片内冷结构的发展历程。最新一代叶片为层板发散冷却的双层壁涡轮叶片,可实现在2300K的涡轮前进口温度下可靠工作。该内腔结构的实现需要形状为多层结构的陶瓷型芯,而复杂陶瓷型芯的制备技术是其中关键,型芯增材制造技术成为关注热点。

增材制造和熔模铸造均有成形复杂形状的特点，二者具有天然的工艺结合优势。胡可辉等撰写《光固化增材制造技术在熔模铸造中的应用》一文，重点介绍了光固化增材制造的特点和应用。增材制造包括众多的具体方法，而光固化成形是其中精度水平高的一种，更适合于高精度熔模铸造的工艺要求。光固化增材制造制备熔模是一种已被实际应用的工艺措施，可以实现熔模的快速成形，从而较快地进入后续铸造工艺生产过程，减少了由于开发蜡模模具带来的时间和成本投入。而利用光固化增材制造陶瓷技术，实现难以通过模具成形的复杂陶瓷型芯的制备成为当前的一个技术研究热点。作者对相关工作进行了综述，也介绍了清华大学已经开展的工作，展示了陶瓷光固化增材制造在涡轮叶片多层壁陶瓷型芯制备中的技术可行性。同时，也探讨了制备芯-壳一体铸型的增材制造工艺。

以上三篇文章从不同侧面展示了熔模铸造工艺的技术应用前沿，大型钛合金复杂结构件和新一代单晶空心涡轮叶片作为熔模铸件不断迈向更高目标的代表，直接与航空制造水平密切相关，成为科技攻关的重要阵地。增材制造，特别是陶瓷增材制造在熔模铸造中的应用为熔模铸造工艺革新提供了一个新的机遇。

熔模铸造的生产实践中，关键的难点在于工艺过程复杂，影响因素多，工艺控制难度大。数字化、智能化改造成为解决工艺痛点的手段之一。周建新等撰写的《熔模铸造数字化智能化大数据工业软件平台的构建及应用》一文，具体介绍了铸造工艺设计系统（CAD/CAE）、产品信息及生产管理系统（PDM/ERP）、车间执行系统（MES）以及铸造设备采集与监控系统（SCADA）在铸造企业中的应用，特别指出工业软件集成的重要意义。文中列出较多的应用实例，期待对相关企业和技术人员有所启发，进一步推动我国熔模铸造行业信息化进程。

工艺技术的发展离不开现实产品的需求，而发挥工艺优势，探寻更大的工艺应用空间则是更为主动之

举。本主题邀请唐平生撰写的《气瓶支架轻量化集成设计实践》一文，介绍了东风精密铸造有限公司发挥熔模铸造复杂成形优势，深入产品设计领域，谋求产品结构优化，通过铸件轻量化改造为终端装备的轻量化贡献力量，同时也开发出了更多的熔模铸造工艺适用产品。作者进一步强调整体构件的合理工艺组合，以实现制造的最佳效益。

5篇文章从不同侧面反映了熔模铸造工艺的发展与进步。纵观人类社会应用铸造工艺的历史，熔模铸造一直是其中最为活跃的领域之一。现代社会，人们对熔模铸造工艺有了更进一步的认识，将其推向了更大范围的工业应用。根据不同目标产品的需要，熔模铸造工艺也展现出不同特征，在材料选用、设备投入、工艺手段、铸件检验及后处理等方面呈现不同的形态。国际上，一般把熔模铸造产业分为高附加值产品、一般商用铸件和汽车件三类。我国在一般商用铸件和汽车件熔模铸造中，已经成为世界重要的生产基地之一。但在高附加值铸件生产方面，还有很大的技术提升空间。

面对以航空工业为代表的高附加值熔模铸造领域，如果站在技术发展的潮头，就能看到熔模铸造工艺始终被目标产品的性能提升所牵引，制造能力提升和更先进的产品设计之间的迭代始终没有停止。熔模铸造在高附加值铸件上的每一次进步都必须重新梳理全工艺链条的每一个环节，面对熔模的高分子材料成形、面对铸型的陶瓷材料成形、面对高性能合金的金属材料成形，剖析工艺机理，挖掘工艺潜力，进行工艺革新，突破工艺极限。这样的技术进步非一日之功，却又迫在眉睫。

总之，熔模铸造广泛应用于各行各业，是工业基础的重要组成部分。在尖端领域，熔模铸造也发挥着重要作用，承担着为以航空发动机为代表的高端装备供应关键铸件的任务，大型机匣、高性能涡轮叶片等熔模铸件的稳定供应和性能提升直接关系到航空发动机生产和研制能力，先进熔模铸造技术是我们必须掌握的核心技术，是国之重器。