

专访

INTERVIEW

吕志刚简介:

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，先后获机械工程学士、铸造硕士、材料科学与工程博士学位。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。

主要研究领域：材料加工、熔模铸造、陶瓷增材制造。长期致力于熔模铸造工艺机理和型壳材料研究，发展基于光固化的陶瓷增材制造工艺，并将其应用于复杂陶瓷型芯制备。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；参编专业书籍和手册10余部；获得授权发明专利15项。

现为中国机械工程学会铸造分会常务理事、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。



坚持与创新并举 激情与梦想同行

——访清华大学吕志刚教授

《铸造》杂志2021年第2期邀请“客座主编”清华大学吕志刚教授组织策划了“熔模铸造”专题，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。

吕志刚教授1997年毕业留校于清华大学机械系，从事“双肩挑”工作。在管理岗位上，他先后担任清华大学机械系人事科科长、系副主任、系党委副书记、书记。在他和班子成员共同努力下，机械系党委成为清华大学首批党建标杆单位，机械系的整体工作取得好的成绩。除了管理工作外，教学、科研工作也是他的重要工作内容。

在教学岗位上，吕志刚教授承担《材料加工》等专业课教学，他努力提高教学水平，曾获“北京市第七届青年教师教学基本功比赛一等奖”和“清华大学青年教师教学优秀奖”。还两次获得“清华大学教学成果一等奖”。

吕志刚教授对科研工作满怀热情，长期在熔模精密铸造领域坚守和创新。他怀着为发展我国熔模精密铸造技术做贡献的信念，紧密联系实际，有计划地开展系统工艺研究，主持过两项国家自然科学基金项目。他深知熔模精密铸造对航空发动机和燃气轮机制造的重要意义，加强与相关企业合作，产学研结合，在科学研究和技术研发的道路上不懈努力。

2021年3月1日，本刊主编和副主编专程拜访了吕志刚教授，就熔模精密铸造领域以及我国铸造行业的一些问题与吕志刚教授进行了深入交流。

《铸造》：我国是铸造大国，铸造人才需求很大，但我国大专院校基本上取消了铸造专业设置，热加工或材料专业中，涉及铸造内容的课时很少，中等专业学校有铸造专业的也不多。请您介绍一下，清华大学在铸造专业教学和人才培养方面有哪些变化。

吕志刚：清华大学开展铸造专业高等教育的历史比较长，是国内最早开设铸造专业的高等学校之一。1952年就设立了铸工教研组，当时，一批1951年入学的学生转到新设立的铸造专业学习，他们1955年毕业，成为新中国最早一批铸造专业大学毕业生，其中就包括柳百成院士。其实，在更早的时候，清华大学已经开设了铸造方面的课程，1935年毕业于清华大学的王遵明教授，他留学美国获得MIT冶金学博士学位后，1941年回校任教，讲授的课程就包括“高等铸工学”，并于1949年开始了球墨铸铁研究工作。1952年清华大学成立铸工教研组时，王遵明教授任主任。明年，清华大学设立铸造专业就满70年了。这70年间，铸造相关的人才培养和科学研究始终没有中断，对行业发展和进步起到重要的推动作用。当然，大家也都知道，随着高等教育改革向通识教育发展，铸造作为专业名称在国内高校很少看到了，清华大学也不例外，相关的培养内容并入“机械工程”或“材料科学与工程”，但这并不影响科研工作的开展。清华大学有一批专家学者仍在从事铸造相关的科学研究，包括铸造过程模拟仿真、铸造合金、压力铸造、熔模铸造等等。2012年底，清华大学针对机械工程和材料科学与工程学科进行了一次院系调整，从事铸造相关研究的教师根据自己意愿和工作特点，分别选择了机械工程系或材料学院。我所从事的领域聚焦在熔模铸造工艺，以及增材制造与铸造结合的研究工作方面，更贴近“制造”的范畴，所以选择留在机械工程系，指导“机械工程”专业的研究生，也为“机械工程”专业的本科生开设《材料加工》等课程。

我觉得，目前我国的本科教育多数以通识教育为主，重在打基础，培养学生处理问题的方法和解决问题的能力，扩大学生的专业适应面，对学生发展有“有利”的一面。但教育中的“广度”和“深度”往往存在一定矛盾，所以也出现了行业对人才的需求与高校人才供应不匹配的问题。这方面，国家已经在做些调整，加大了对职业院校的支持力度，完善专业人才培养体系。强调继续教育，让行业中的从业人员能够获得终身学习的机会。这些举措对行业人才队伍补充和水平提升非常重要。另外，从高端人才供给上看，全国高校的“材料科学与工程”、“机械工程”或其他相关学科仍然在不断培养着铸造领域相关的研究生。现在的重点是如何提升行业吸引力，留住这些人才。



在第1届国际有色合金及特种铸造会议上作报告

《铸造》：您一直从事熔模精密铸造的研究，是什么支撑您一直坚守在这个领域并不断创新的？

吕志刚：我从1993年第一次真正接触到熔模铸造工艺，跟随恩师姜不居教授做本科毕业设计、研究生论文，以及后续科研工作。越是了解这个工艺的重要价值，越是觉得这是一块值得坚守的阵地，需要不断提升我国熔模铸造工艺水平，从而让其发挥应有的作用。熔模铸造（失蜡铸造）技术已有五六千年的历史，之所以现在我们还在采用这种工艺，就是因为它具有独特的工艺优势。熔模精密铸造在高精度、复杂结构铸件，特别是高熔炼温度、高化学活性金属的复杂成形中起着不可替代的作用。熔模铸造工艺从压制蜡模、组树、制壳、脱蜡、焙烧，再浇注成铸件，工艺过程复杂且周期长，也正是这样的工艺过程，使熔模铸造具有了独特魅力。随着工艺技术的不断发展完善，现代熔模铸造工艺已经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，应用领域非常广。最值得一提的是，熔模铸造是航空发动机制造中两类关键零件的核心成形工艺。一是空心涡轮叶片，二是复杂结构的钛合金、高温合金整体机匣。从这个意义上讲，熔模铸造工艺水平甚至影响国家的硬实力。国际上航空制造业领先的国家都拥有先进的熔模铸造技术。



参加国际会议

《铸造》：您近期主要从事哪些方面的研究工作？

吕志刚：从最开始接触熔模铸造到现在，算起来快30年了。这些年的主要研究方向都与熔模铸造相关，核心是围绕工艺和材料，也开展过熔模铸造管理信息系统等开发工作，与企业合作比较多。近些年，我的研究重点在于钛合金、高温合金型壳材料体系，大型熔模铸件工艺等方面的研究。另外一个重要的研究方向是陶瓷增材制造，这方面工作已经开展了7年左右，主要还是将增材制造与熔模铸造工艺相结合，通过增材制造的方法制备熔模铸造的陶瓷型芯，甚至型壳。目前工作取得了很好的进展。

我们的陶瓷增材制造采取的是光固化增材制造的技术路线。用光敏树脂和陶瓷粉混合成料浆，通过数字光处理DLP光源进行层层曝光，逐层累积得到陶瓷坯体，然后再脱脂、烧结得到陶瓷零件。这样说起来简单，但实际上涉及内容很多，包括材料体系、光固化设备、各工艺环节参数控制等方面。从最开始只能实现简单形状到目前能成形多层结构的复杂陶瓷型芯，从最初层间裂纹突出到现在可以很好地避免裂纹出现，包括精度提升，性能优化等，都需要长时间潜心摸索和积累，非一日之功。当看到用增材制造的陶瓷型芯进行浇注验证，得到金属叶片时，内心还是很激动的。我们团队还在持续推进这方面的工作。

《铸造》：我国的熔模铸造在合金材料、原辅材料、工艺机理的研究，以及复杂型芯制造等方面与国外先进技术还存在一些差距，请您谈谈我国熔模铸造的现状未来发展建议。

吕志刚：熔模铸造的应用领域非常宽，根据不同的产品对象有相应的适用技术，每个领域的技术都有一个持续进步的过程。如果从熔模铸造技术的整体看，最先进的技术应用还是集中在航空熔模铸造领域。我国的航空工业体系中，多数发动机主机厂都配备有熔模铸造生产单元，一些研究所也具有高端熔模铸件的生产和研制能力，还包括如贵州安吉航空精密铸造有限公司这样的专业化航空熔模铸件生产企业。这些单位在我国航空工业大发展的需求拉动下持续进步，实力大幅提升。民营资本也陆续加入进来。

纵观我国熔模铸造前沿技术的发展路线，大多数情况下在走引进消化吸收的道路，长期以来，重型号、轻工艺、重冷轻热的思想使共性工艺基础问题研究投入不足。特别是随着熔模铸件的应用领域越来越敏感，技术引进受到制约，工艺基础落后于产品需求发展的情况突出。另外，熔模铸造工艺环节多，局部短板也会引起全局能力不足，填平补齐的工作内容多，必须下决心花更大力气掌握技术核心，突破材

料、工艺、装备的瓶颈，系统地提升工艺实力。对于中低端熔模铸件的工艺而言，我国也走过了引进和自主开发相结合的道路，与国际同类产品制造水平的差距逐渐缩小，甚至局部有所超越。

熔模铸造在航空、航天领域的应用代表国家熔模铸造工艺发展水平。经过这些年的大力建设，我国航空领域的熔模铸造生产企业的硬件装备水平得到很大进步，应该说达到了世界先进水平，但核心装备的自主保障方面还需要开展工作。另外，特别要解决高质量的材料体系保障和工艺机理深入研究的问题。材料体系保障是个系统工程，需要行业内有一批专业化的高水平材料供应商，不仅提供材料商品，而且能够根据用户需要开发适用产品，并有严格的质量控制，这样的企业应该在行业内得到鼓励和保护。工艺机理研究方面则呼吁有更多研究者潜心钻研，特别是应该有更好的产学研合作模式。

熔模铸造工艺环节多，过程复杂，只有更加精细化的工艺控制才能保障质量系统的稳定，而控制的前提是对工艺过程的深刻认识。我国的航空熔模铸造相关工艺研究起步于20世纪五六十年代，有过很好的积累和进步，但随着熔模铸造技术体系的发展和产品要求的不断提升，更多的工艺基础问题被提出。许多问题相互耦合，深入研究难度大。

由于我国工业发展中较长时间在投入上存在“重设备，轻工艺”的现象，造成工艺认知的差距大于装备水平的差距。需要更多研究者静下心来分析工艺背后的基础问题，用抽丝剥茧的耐心补齐工艺控制的短板和盲区。说到这里，又要提另外一个问题，就是要给工艺研究人员以支持和重视。特别在考核指挥棒方面，应该考虑工艺研究的特点，避免单纯以文章发表等显性指标做评价，要为工艺研究人员的发展留出足够的上升通道。

还有一个很重要的问题是标准。行业要健康发展，需要构建更加完善的标准体系，把标准做细，通过标准将最新的工艺成果固定下来，对全行业起到指导作用。我国现在的熔模铸造标准还有许多工作要做。比如说模料、型壳粘结剂、型壳耐火材料等专用材料，需要通过大量实践积累和科学分析，提出符合行业发展需要的技术标准。再比如对铸件性能标准的制定和完善，要为熔模铸件的推广应用提供可靠的通行证。

《铸造》：您长期从事铸造相关研究工作，您谈谈对铸造工艺研究的一些感受。

吕志刚：我认为任何一种工艺的发展都是一个体系，一定要系统思考问题，仅凭单项技术的进步往往难以解决复杂的工艺问题。铸造研究的难度在于其综合性和交叉性。铸造本身是一门学科交叉的学问，需

要综合运用多方面的知识积累。

面对铸造研究，特别是工艺研究，有时为了解决某一方面的问题，用了很多的方法，采取了很多的措施，但费了九牛二虎之力仍收效甚微，有时还会恶化，最后就会很迷茫。这是对研究者的很大考验。铸造的许多问题都要放在工艺的大系统中看，就像中医在治病时特别强调人体的整体诊治一样。铸造工艺环节很多，任何一个环节出现问题，都可能造成整个过程的失败，所以系统的观念很重要，必须站在一个宏观的角度来对待铸造技术问题，铸造的材料、工艺、设备可能都要改进，而且只有同向改进才可能看见成效。要在一堆问题里去伪存真，找到问题的核心，这是工艺研究的难点。

另外，我还想说铸造的很多问题要了解其机理才能更好解决，所以要多做一些基础性的工作，理论方面的研究还要深入。但理论的研究不能脱离实际，研究者应该多到一线了解实际情况，坚持科学问题从实践中来，成果到实践中去的做法。



采访吕志刚教授

《铸造》：增材制造技术发展较快，增材制造对熔模铸造技术的发展有哪些影响？

吕志刚：增材制造与熔模铸造的核心优势都是可以成形复杂形状，两种工艺是可以有机结合的。行业里经常讨论增材制造将来会不会替代铸造的问题，我的看法是任何工艺都存在优势和不足，工艺的复合往往会带来更大的发展空间。现在，增材制造的熔模就在熔模铸造企业中得到了一定应用。陶瓷型芯，乃至陶瓷型壳的增材制造也在研制中。铸造的本质特征是金属液对铸型的复制，而铸型的成形有很大的工艺包容度。即使金属增材制造在某些特定领域替代了铸造，铸造技术人员从原领域切入增材制造领域也是较为方便的，并具有较大优势，毕竟对金属成形的许多基础认知是一致的。

《铸造》：您对铸造行业期刊的发展给予很大支持，您对铸造科技期刊的发展有哪些看法？

吕志刚：期刊作为技术交流和知识传播的平台，对行业发展特别重要。较长时间里，我国的科研单位学术评价中，SCI或者EI期刊论文都是重要指标，这使得许多高水平的科研成果最终发表在外国期刊上。国际学术交流本身是应该支持的，但有一点我们必须关注，我国大量铸造企业，包括许多研究单位，由于论文获取或者语言的原因，并不能及时、有效地利用我国自己资助和产出的科研成果，这是非常遗憾的事，也是巨大的浪费。现在，国家正在着手解决这个问题，高水平铸造专业期刊建设就非常关键。让更多的高水平研究成果以我国读者容易获得和容易读懂的方式进行传播是行业的一件大事，也是国家科技进步的大事。

结束语

经过半个多世纪的发展，我国熔模铸造行业形成了从高端航空、航天铸件、工业燃气轮机铸件到一般民用产品的多层次产品体系，一大批工艺技术人员和专家为熔模铸造工艺的发展殚精竭虑。如今，我国熔模铸造已经具有一定规模，也形成了自己的特色。但工业进步的脚步并没有停止，我国新战略的实施，又吹响了熔模铸造工艺向更高目标进军的号角。包括吕志刚教授在内的我国一批熔模铸造人继承着刻苦钻研的精神，并在新的制造和研究条件下加以发扬，正在为我国熔模铸造的辉煌和梦想不懈努力。

荀子在《劝学篇》中有“不积跬步，无以致千里；不积小流，无以成江海。”“锲而舍之，朽木不折；锲而不舍，金石可镂。”说的就是积累的重要性，同时要持之以恒、坚持不懈。近30年来，吕志刚教授沉浸和坚守熔模精密铸造领域，持续积累，不断地努力创新，为熔模精密铸造行业发展和熔模铸造工艺发扬光大而奋力前行！



(文/刘冬梅，图/吕志刚)