

# 冯晶：让“工业之花”开得更灿烂

编者按

冯晶自2002年接触材料研究开始，在将近14年的研究生涯中，他一直默默耕耘，甘之如饴。在冯晶看来，十几年如一日的“苦行僧”生活反而让他的目标更加明确：“想在”材料研究的这条道路上一直坚持下去，我不知道未来会怎么样，但就是想一直坚持下去。

文/本刊记者 陈佳



冯晶，国家“青年千人计划”专家、昆明理工大学材料科学与工程学院教授。

航空发动机是飞机的心脏，被誉为“工业之花”、“皇冠上的明珠”，它直接影响飞机的性能、可靠性及经济性，是一个国家科技、工业和国防实力的重要体现。航空发动机的高速运转对材料的耐热性要求十分严苛，研究耐高温的热障涂层材料，让中国的航空飞机飞得更高、更快、更远是冯晶工作目标的一部分。冯晶自2002年接触材料研究开始，在将近14年的研究生涯中，他一直默默耕耘，甘之如饴。在冯晶看来，十几年如一日的“苦行僧”生活反而让他的目标更加明确：“想在材料研究的这条道路上一直坚持下去，我不知道未来会怎么样，但就是想一直坚持下去。”

## 热障涂层材料研究已达到国际先进水平

热障涂层利用陶瓷的隔热和抗腐蚀的特点来保护金属材料，以达到提高性能、提高可靠性和延长使用寿命的目的，在航空、航天、大型火力发电和冶金、石油、化工等行业都有非常重要的应用价值。国际上，热障涂层的研究始于20世纪40年代末50年代初，此后热障涂层技术不断发展。但是热障涂层的双层涂层系统结构——“粘结层+陶瓷层”几十年来基本保持不变。究其原因，冯晶解释道：“陶瓷层直接使用在发动机热端部件上，其粘结性很差，容易出现开裂。这个时候，就

需要一个类似于胶水一样的东西，也就是我们所说的粘结层，将热端部件和陶瓷层粘起来，这样可以有效防止热障涂层在高温下开裂，延长使用寿命。”热障涂层的双层涂层系统结构虽然保持不变，但涂层材料一直处于“摸索新型材料”的发展过程中。“整体来看，双层涂层的系统结构使用起来效果非常不错。未来，我们需要优化系统结构的整体性能。”冯晶补充道。

传统的热障涂层使用的是氧化钇部分稳定氧化锆材料，由于材料一直处于亚稳态，导致这种材料在高温下很容易失效，温度越高失效越快。所以，研究新的陶瓷热障涂层材料是材料学家要攻克的一个课题，冯晶就是这些材料学家中的一员，他正在进行包括锆酸钐、钽酸钇、稀土铝酸盐等一系列新型陶瓷热障涂层材料的研究。新型陶瓷热障涂层材料相较于传统的氧化锆材料，不只耐高温性得到提升，力学性能和其他热学性能有相应的提高。

美国在陶瓷热障涂层材料上的研究开展已久，目前，GE、西门子、三菱等企业都在紧锣密鼓的开展新型热障涂层材料研究，他们的下一个目标是热障涂层材料将燃气轮机的燃烧温度提高到1600-1800摄氏度甚至更高的温度（三菱重工已攻克1600摄氏度）。冯晶团队研究的陶瓷热障涂层材料可以维持燃气轮机在1600摄氏度的高温下工作，这是目前世界上燃烧温度最高的燃气轮机。“我们研发的陶瓷热障涂层材料已经在除军事以外的其他领域实现了完全国产化的应用。”冯晶自信地说道。

我国在热障涂层材料的基础研究上，与德日等发达国家旗鼓相当。然而，现实情况却是使用一样的材料，发动机和燃气轮机的质量却相去甚远。究其深层次原因，是因为发达国家的工业基础相对完善，产业链各个环节都相对成熟，所以成品误差范围控制在1%~2%，因而产品性能非常稳定。然而，中国只在单一材料上有所突破，其他零部件却无法赶上新材料发展的步伐，真正生产时才发现不少地方还是研究空白，最后将就生产的产品稳定性可想而知。工业制造是一个系统工程，每个环节都会对产品性能产生影响，短板制约了产品的最终性能。对此，冯晶建议道：“我认为只有拓宽国家的工业基础，实现全方位的进步，这样才能做出更好的产品。具体到热障涂层材料，我们可以从最前沿的部分入手，实现跨越式发展。这一点需要材料科学家的共同努力。”

“

从民用逐渐推广到军用的‘两步走’策略可以很好地克服科研经费不足、市场应用的难题。

力。”

## 两步走的研究思路

“从民用逐渐推广到军用的‘两步走’策略可以很好地克服科研经费不足、市场应用被限制的难题。”是冯晶对自己将研究运用到实际生产这一过程的高度概括。在我国冶金和化工行业的管道运输中，管道腐蚀非常严重，包括中石化和中石油等在内的大型企业都对防腐蚀、耐高温、抗氧化的涂层材料需求非常大。冯晶说：“这种现实需要激发我不断完善自己的研究，逐步在民用领域打开陶瓷涂层市场。”军用航空发动机的涂层材料研究是不计成本的，但是民用企业的首要目标是追求效益。冯晶深知这一市场逻辑，“我们不仅做陶瓷涂层，还根据民用企业的现实需要，针对性地做金属涂层和有机涂层，在满足企业产品质量要求的基础上，最大程度地降低成本。”

与此同时，冯晶还在积极地将自己的研究从民用逐渐推广到军用领域。他提到自己目前正在和从事发动机和叶片研究的军方研究所进行交流，希望能够说服军方研究所使用自己研究的先进涂层材料。“航空发动机叶片的涂覆成本高达几百万，没有人能保证一次性就涂覆材料成功，几次下来，科研经费要花几百万甚至上千万。所以军方研究所不敢贸然使用。”冯晶对军方的顾虑充分理解。

当下发展如火如荼的3D打印，也被冯晶纳入他的“两步走”策略当中。冯晶做出了极富想象力的展望：“在航空发动机和燃气轮机的叶片以及其他热端部件上涂覆热障涂层，需要经过很多道工序，并且每道工序要求极其严格，如果这些热端部件上的热障涂层可以使用3D打印技术直接‘做’上去，不仅会节省成本，还能极大地减少工序。这一设想如果实现，对于3D陶瓷打印和热障涂层的未来发展意义重大。”

在航空材料领域，国际航空材料的发展趋势是在国内取消军用标准，而代之以军民两用标准，在国际范围内实施国际化标准。对于这一趋势冯晶如何看待？这一趋势是否会对冯晶的“两步走”策略产生影响？冯晶一一解答了这些疑问：“我个人认为，有些标准可以军民通用，有些标准是绝对不可能完全统一的。民航客机肯定是在安全飞行的基础上追求低成本和高效益，相对于民航客机平稳地飞行，军用战斗机却要在空中进行很多“花样”操作，比如说俯冲、直角转弯等，这些动作对发动机产生的压力很大，破坏性也很严重，加之战斗机飞行速度非常快，发动机的燃烧温度相应会提高，因而发动机失效非常快。由此可见，军方战机和民航客机所处的使用环境完全不同，材料的标准自然也不一样。至于这一趋势是否会对我的‘两步走’策略产生影响，我认为答案是不会，因为我们的研究已经相当先进了，完全可以满足民用和军用领域的要求。”

### 希望科技人才得到应有的尊重

研究成果丰硕的冯晶的科研生涯是从“打杂”开始的，大二的时候，进入云南省新材料制备与加工重点实验室，“一开始连专业知识都还没有学完，什么都做不了，只是跟在导师后面扫扫地、搬搬桌子。”久而久之，导师被他爱提问、肯坚持的精神感动，慢慢地将一些课题交给他做。在实验室的这段生活为冯晶之后的研究奠定了基础，说起这段经验他也是感触颇深：“在实验室的研究生活让我完全喜欢上了材料这个行业，我有了一个很明确的目标，对未来的发展规划也十分清楚了。”

2008年，冯晶进入清华大学攻读博士研究生，在清华的材料学院，冯晶是每天最晚回宿舍的学生，“清华大学材料学院是晚上十一点关楼门，我一般是晚上两三点才离开。为此，我自己弄了把钥匙，二楼虽然不高，但是也不能每天往下跳。”冯晶笑着回忆了这段生活。平时的绝大部分时间，冯晶都是在实验室度过的。“刚进入清华的时候，我其实很自卑，因为我感觉自己和别人的差距很大。所以我想通过自己的努力来弥补。实验生活其实很枯燥，但是只要每天能学习到一点点东西，就感到很兴奋。”由于自己的目标十分明确，再加之自己愿意坚持，冯晶有幸获得了去哈佛大学深造的机会，师从美国工程院院士哈佛大学David R Clarke教授，继

续开展他热爱的材料研究。

2015年，冯晶入选中组部“青年千人计划”，回到母校昆明理工大学任教。当问及为何选择回到昆明理工大学任教时，冯晶给出了自己的回答：“首先，主要考虑的是昆明理工大学是我的母校，‘母校情节’起了比较大的作用。其次，我在云南待了很多年，深切感受到这里的教育比较落后，这里说的落后不单是指硬件和软件落后，还有人们的思想也很落后。我想改变这种情况，个人的力量虽然很微小，但我觉得这是我的责任。”

在学校任教期间，冯晶积极督促学生阅读前沿科技文献和专业基础知识书籍，让学生将书本上的知识和国际最前沿技术的实例结合起来。“现在的时代呈扁平型，任何人都可以通过网络了解到国际最前沿的科学技术的研究进展。如果我们将基础打扎实了，就可以直接进入到最前沿的行列。”冯晶谈道。

我国想跻身科技强国，在国际前沿技术的研发上掌握领导权，离不开优秀科研人才的培养。对此，冯晶也有着自己的想法：“年轻人是未来科技发展的中流砥柱，优秀科研人才的培养应该以年轻人为主体，给年轻人更多的机会和支持。只有得到更多的支持，年轻人才能专心致志开展科学研究，没有后顾之忧。尤其是在西部，我们需要兼顾国家教育和经济的地区平衡性，国家更应该适当政策倾斜，让更多的优秀人才来西部建设祖国。”

回国之后，冯晶也遇到了诸如资源缺乏等一系列现实困难。“我这个人最大的特点就是能坚持，我一坚持就是十几年，一直没有变过。我未来的目标也不会改变，我目前从事的行业，是我自己所喜欢的，我会一直在这个地方坚持、坚持、再坚持。条件艰苦一些我觉得不算什么，只是希望科技人才能得到更多的尊重。人才的培养需要付出很大的代价，应该更多的给予优秀人才以尊重和支持，让他们为中国科技的发展贡献自己的一份力量。”