



## 冯晶 FENG Jing

入选国家“千人计划”青年项目

Young Overseas High-Level Talents  
Introduction Plan

昆明理工大学教授

Professor of Kunming University of  
Science and Technology

2018年获中国优秀青年最高荣誉“中国青年五四奖章”。师从美国工程院院士哈佛大学 David R. Clarke 教授,共同研发新一代高温铁弹性低导热材料,在高温材料及各向异性力学领域获得国际性地位。同时是国内较早进行材料基因工程研究的学者之一,目前已在国际知名杂志发表 156 篇研究论文,其中被 SCI 检索逾 112 篇。申请国家发明专利 65 项,其中 12 项进入 Derwent 世界专利数据库。独创研究成果“1600℃超高温稀土钽酸盐热障涂层材料及其制备技术”打破国际最高使用温度,是世界上目前唯一能在 1600℃及以上工作的超高温热障涂层,使我国掌握该重要技术的同时跨越式站在国际顶级水平,相关成果已应用于 ××× 探空火箭及 ××× 高超音速导弹外表面防护和发动机涂层,实现了 ××× 重要型号的大国重器研制加速开发。

# 探索新型陶瓷热障涂层材料 助力航空航天发展

——访昆明理工大学材料科学与工程学院冯晶教授

Explore New Ceramic Thermal Barrier Coating Materials for Aerospace

本刊记者 逸 飞

**逸飞**: 热障涂层对于航空发动机的重要性体现在哪些方面? 国内热障涂层的研究及应用处于怎样的水平?

**冯晶**: 航空发动机的重要技术

是两盘一片和热障涂层,热障涂层是四大关键核心技术之一。航空发动机的效率取决于温度,温度越高效率也越高,但提高发动机的使用

温度,要考虑材料是否耐受,目前发动机燃气的燃烧温度可以达到 1500~1600℃,到达材料表面的温度大概是 1100℃左右。未来对于航空

发动机的要求将越来越高,其使用温度可能达到 1800℃、2000℃,甚至更高。那面临的一个问题,就是如何保证材料在这么高的温度下还能正常运转。目前发动机最常用的材料是镍基超高温合金,其服役的最高温度是 1100℃左右,而且这个指标事实上还很难完成,那就需要使用热障涂层让其达到使用要求。

发动机叶片主要通过空冷的方法实现降温,但我们还希望它能承受更多热量,那就需要在镍基高温合金表面做一层陶瓷热障涂层。陶瓷的好处在于:它的熔点和强度比基体材料要更高,热导率也更低,而低的热导率会使燃气和基体之间产生一个温度梯度,这个温度梯度值越大,材料所能承受的温度极限就越高。传统的热障涂层材料一般使用的是氧化锆基陶瓷,在不同的使用部位和厚度的情况下,可以使材料承受的温度降低 50~150℃。氧化锆基陶瓷的综合性能非常好,广泛应用于民航客机和军用飞机,它对于航空飞行器的发展非常重要,是航空发动机上重要的热障涂层材料。

我们国内热障涂层的研究和应用与国际先进水平相比还有较大的差距。以美国为例,在 20 世纪 50~60 年代,美国国防部和 NASA 等就牵头开始了热障涂层的研究,在 60~70 年代基本固定了材料的种类和生产工艺,在 70~80 年代开始推广应用。而我国开始热障涂层的应用主要是在 2000 年以后,那时我们从俄罗斯、乌克兰等引入了一些相关的设备,较早研究热障涂层的机构主要是中国航空工业下属的航空企业和科研院所,以及包括北京航空航天大学在内的一些高校,经过 10 多年的努力,进步非常大,现在我们已经可以把氧化锆基的陶瓷材料涂敷在叶片、涡轮及其他一些关键部件上。但是,涂层是一种非常复杂的工程,虽然已经开始应用,但是我们的经验不

足,所以导致我国航空发动机的质量和寿命还比不上国际一流的发动机产品,我们的技术还不够成熟。美国的 GE、英国的劳斯莱斯、日本三菱和德国的西门子是国际上涂层研究领域的领头羊,他们在 30 年前就基本完成了材料的研制,又在这 30 年间积累了大量的经验。而目前我国一些涂层材料刚刚研制成功并投入应用,要达到成熟的水平还需要时间和产品应用的经验积累,并不断完善。

**王**: 与其他涂层材料相比,您研究的新型高温铁弹相变增韧陶瓷材料具有哪些优势? 目前在航空航天等领域的应用情况如何?

**冯晶**: 优势是非常明显的,刚才提到过目前国际上应用最广泛的还是氧化锆基材料,也有一小部分公司开始逐步应用稀土锆酸盐材料,但是锆酸盐有一个非常严重的问题,它的断裂韧性很差,不能长时间工作,寿命比较短。相比而言,氧化锆基陶瓷是非常优良的高温材料。那我们为什么还要研发新的陶瓷材料,并认为氧化锆基材料最终一定会被取代呢? 这是因为氧化锆基材料在 1100~1200℃之间会发生一个相转变,材料一旦发生相变,那它的晶体结构和性质会全部发生变化,在 1200℃以下使用时,氧化锆确实有比较好的性质,但是随着温度超过 1200℃并继续升高,氧化锆基材料的寿命会呈指数级下降。未来航空发动机的工作温度可能达到 2000℃,那我们就一定要制作 1400~1500℃的热障涂层,在这种条件下氧化锆基材料是根本无法再使用的。

我们研制的新型稀土锆酸盐高温铁弹相变陶瓷材料的最高使用温度可以达到 1600℃,甚至 1800℃,是非常稳定的一种陶瓷,与氧化锆基材料相比有三大优势:

第一是热导率低,它比氧化锆基材料的热导率低一半,也就是说氧化锆降低 100℃时,它能降低 200℃,会


产生一个较大的温度梯度,对于保护发动机叶片和其他部件效果明显。

第二是铁弹相变增韧,氧化锆基材料在高温下的增韧是由于它的铁弹性,这是其优于其他陶瓷材料的一大特点,其他陶瓷材料在高温下会变脆就是因为不具备这种铁弹性。我们沿着这个思路来寻找新的材料,根据氧化锆的晶体结构找到了稀土钽酸盐陶瓷,经过研究发现,稀土钽酸盐也具有这种铁弹相变,会在高温下形成铁弹畴,在加载应力和释放应力时它会像橡皮筋一样不会马上变形,从而起到应力缓冲作用,大大提高了材料的高温断裂韧性。换句话说,就是在高温下它不会那么容易变脆,大幅提高了材料寿命。

第三是两者的低热导率机制不同。氧化锆材料的氧空位缺陷会引起声子散射,从而降低了声子热传输的过程,这是它低热导机制的本质。而稀土钽酸盐的低热导机制是钽原子本身质量比较大引起的非谐效应。氧空位形成的低热导材料是氧离子的导体,氧化锆材料因此可以作为燃料电池的电极使用,它在高温下是氧离子的良导体,氧离子可以自由出入氧化锆材料,这样就可以非常容易地氧化涂层下部的合金层,导致合金层表面快速生长一层氧化物。因为这层氧化物的热膨胀系数和热障涂层及合金层都不匹配,特别容易失效,所以发动机叶片涂层的失效不是热障涂层本身被损坏,而是这层氧化物使涂层在热循环过程中应力太大,造成脱落。稀土钽酸盐材料是氧离子的绝缘体,在合金层生长热氧化物的速度比氧化锆材料低 1000 倍以上。另外,稀土钽酸盐材料比氧化锆材料质地柔软,可以承受更多的应力,所以高温下的热应力比氧化锆低很多,这使它的寿命在热循环中远远高于氧化锆,同时,在工况容许的情况下,同等应力状态稀土钽酸盐还可以制备更厚的热障涂层,这样就能达到更

大的温度梯度。

新型稀土钽酸盐陶瓷热障涂层材料目前世界范围内只有一个研发团队,就是我的团队。在我们之前,国内没有任何一个团队关注稀土钽酸盐,从材料发现到基本性质确定到最后应用,整个材料体系是由我的团队建立的,我们在这个领域已经发了几十篇研究论文,也申请了几十个发明专利。在新型稀土钽酸盐陶瓷涂层领域,我们国家拥有自主知识产权,目前国际上没有该材料应用的任何报道,国内也是刚刚开始应用,主要是在航天设备上的高温隔热及一些装备上的试用,在航空领域,我们也在积极与北京航空航天大学、航空工业下属的研究院所展开联合攻关,如果把这种优秀的材料成功地应用到航空航天领域,我认为我们国家的热障涂层技术在国际上会产生跨越式、领跑式的发展。


:除了上面提到的陶瓷涂层材料,您的团队在高温材料领域还取得了哪些成果?

**冯晶:** 高温热障涂层领域,之前全球范围内都是做到2层、3层,通过我们的改良,可以做到8层或是10层,我们的多级梯度功能热障涂层材料不仅具有高效隔热的功能,同时还具有防腐蚀、抗磨损、长寿命的作用。其他研究还包括高温陶瓷材料的焊接、高温合金材料的开发等。

我们比较有特色的一项研究是稀贵金属材料在高温领域的应用,针对发动机部件上高温陶瓷涂层与镍基超高温合金的粘结效果不好的问题,两者之间会加一种粘结层合金,国际上常用的粘结层合金是NiCoCrAlY,但是它超过1100℃后氧化速度非常快,难以在更高的温度下使用。我们在这种材料中增加了Pt,或者是单独增加了一个贵金属粘结层,这样就创造了更高温下的粘结层使用环境,这种材料目前已经开始应用。这项研究在高温材料领域是

非常重要的,也是粘结层材料在世界范围内的一个新突破。


热障涂层材料与3D打印技术的相结合,比如在制作粘结层合金过程中,3D打印技术就非常适用,在今年启动了云南省稀金属材料基因工程,其中一项重要工作就是热障涂层的粘结层部分由稀金属材料来制作,主要的方式就是通过3D打印/激光成形的方法在基体材料表面制备一层稀金属材料,这样就能实现耐高温、抗氧化的性能。云南稀金属材料基因工程的一大功能就是服务于我国航空航天领域,研发新型合金材料。现在的合金成分越来越复杂,甚至有了8元、10元系的合金,人已经无法完成工作量如此巨大的试验工作,但是通过材料基因工程,我们就会很容易发现和研制出新的粘结层合金材料,可以整体实现热障涂层对于航空发动机技术进步的推动作用。

:云南省稀金属材料基因工程重大科技项目于2018年3月启动,您担任计算与数据库首席科学家,工作的主要内容是什么?请谈一下这个项目对于材料研究的重要意义?

**冯晶:** 我主要负责的是稀贵金属材料的计算以及数据库的建设,我们主要针对的是航空发动机超高温合金的探索 and 开发。通过材料基因工程的方法,我们可以探寻之前人类根本无法解决的8元系、10元系合金。通过高通量计算和机器学习,以及利用数据库的“元素”,我相信在未来,第一可以得到稀金属材料高温粘结层合金,第二我们有可能在超高温合金领域取得更大的突破,这样超高温合金就有望实现在1500~2000℃高温环境下的直接应用。

稀金属材料基因工程的重要性还体现在,一方面大大减轻我们材料科学家的工作量,借助这个高性能计算工具能够实现成百上千甚至上百万的材料组分和合金材料的设计,以及性能预测;另一方面,通过这个

项目不仅可以大大加快材料的研发速度,而且在这个过程中会大量节约研发成本,我们当前的目标是达到双减一半,即研发时间缩短一半,研发成本降低一半,使人力物力都降一半。从项目实施的过程来看,我觉得未来减少的可能远不止这个数,因为它不仅可以设计稀金属材料,还可以设计其他高温材料。

:您是第22届“中国青年五四奖章”的获得者,如何看待这份殊荣?对于有志从事材料技术研究的学生,您有什么话想对他们说?

**冯晶:** 首先,我非常荣幸获得了“中国青年五四奖章”,这个奖是由团中央颁发的中国青年的最高荣誉,科研领域的工作者今年大概只有五六名人员获得了这个奖励。这也是目前我获得的最高荣誉,感谢我们的国家,感谢团中央,也感谢我们单位的栽培。关于这个奖我有几句话要说,第一,它来之不易;第二,在获奖之后,我得到的更多的是一种鞭策,鼓励自己前行,希望将来自己能为国家和社会做出更大贡献。

对于材料学科的青年学子,我想说的是材料研究领域博大精深,天很高也很广,只要认真努力、坚持不懈,你就一定能取得突出的研究成果。从事材料学的学习与研究其实是一件非常辛苦的事情,这是因为需要掌握的知识太多了,包括从材料制备到材料检测以及相关的材料应用,远远超过其他学科。但是,国家对这一块有需求也很重视,需要有志者为之付出。不管你现在身处985高校还是普通高校,不管你之前的基础是好还是很差,只要从现在开始不断努力,不断积累材料学的知识,我想若干年以后,你一定会成为材料学科的一名优秀专家,会取得非常不错的成果。在材料领域,国家非常需要大家去努力去拼搏,只有这样,我们国家才能在未来高科技领域站在世界巅峰。

(责编 铃兰)