

专家简介



李其连, 中航工业制造所研究员, 1984年毕业于北京航空航天大学, 长期从事飞机及发动机涂层基础研究与技术研究工作...

热喷涂技术在航空发动机制造中的应用与发展

中航工业制造所 李其连

热喷涂的基本原理是用特种热源(燃烧火焰、电弧、等离子焰流、激光等)或一定温度的高温、高压、高速气体(冷气流)将涂层材料熔化或半熔化...

燃烧火焰喷涂, 可以喷涂塑料、金属、合金、氧化铝陶瓷等多种粉末和线材, 现代飞机树脂基复合材料部件表面防静电电雷击涂层即为火焰喷涂涂层。

电弧喷涂, 热效率高、生产率高、喷涂成本低, 广泛用于钢铁结构表面锌、铝及铝锌合金防腐涂层...

等离子喷涂, 是热喷涂技术中最重要的, 几乎可以喷涂从低熔点塑料到高熔点金属、钎、钎、氮化物及碳化物金属陶瓷、氧化物陶瓷等任何材料, 用途极其广泛。

上世纪80年代超高速火焰喷涂(HVOP)从美国推出, 90年代开始广泛应用, 目前已是WC-Co、WC-CoCr类涂层的最佳制备工艺方法...

热喷涂技术在航空发动机上的应用

由于热喷涂材料来源广泛、制备工艺稳定、涂层成分结构可设计性强、涂层质量可控、可制备多种功能及防护涂层, 并可自动化生产, 使热喷涂技术在航空制造技术领域获得了广泛的应用。

航空发动机及飞机的关键零部件——压气机叶片榫头、机匣、封严齿、燃烧

室、涡轮叶片、导向叶片、轴颈、轴承座、封严环、喷管等数以千计的零件需进行热喷涂制备涂层(见图1), 涂层的应用是航空发动机可靠性及服役寿命大幅度提高。

高温可磨耗封严涂层等离子喷涂技术

高温可磨耗封严涂层作为发动机部件的重要涂层之一, 用来调控高压涡轮转子部件与机匣之间的间隙, 对保持发动机的效率十分关键。

中航工业制造所高能束流加工技术重点实验室研制的添加陶瓷减摩自润滑材料及聚苯醚的高温可磨耗封严涂层, 涂层摩擦系数低, 可磨耗性能优异, 同时抗高温氧化性能及燃气冲刷性能优良。

高温可磨耗封严涂层厚度一般超过1.5mm, 必须采用机器人自动等离子喷涂技术, 喷涂参数计算机闭环控制、涂层厚度在线监测, 这样有利于涂层组织结构及厚度均匀, 稳定涂层冶金质量。

热障涂层等离子喷涂技术

热障涂层广泛用于航空发动机及地面燃气轮机, 保护发动机高温部件, 如燃烧室、涡轮叶片、火焰喷管等(见图2), 可大幅度提高部件寿命、提高发动机效率、降低部件温度或提高燃气温度。

热障涂层的制备方法主要有等离子喷涂法和电子束物理气相沉积法。热冲击寿命和热导率是热障涂层的两个关键技术指标。

没有优异的抗热冲击性能, 热障涂层就不能在可靠性要求极高的航空发动机上获得成功应用。把涂层寿命做到数千、数万小时是热障涂层成功应用于商用飞机发动机的关键所在。

由于氧化钇稳定氧化锆在1200℃以上工作、在随后的冷却过程中相变, 相变过程中材料体积将膨胀约4%, 这种体积效应使涂层产生裂纹甚至剥落。国内外学者对两种或两种以上稀土氧化物复合稳定氧化锆的多元体系进行了较多研究, 取得了明显进展。

美国科学家开发的氧化钇、氧化镧、氧化铈三元稀土复合稳定氧化锆工作温度可达1500℃, 并已商品化。

制造所高能束流加工技术重点实验室研制的多元稀土氧化物复合稳定氧化锆超高温热障涂层, 隔热性能及抗热冲击性能优异, 1500℃长期工作、在随后的冷却过程中也没有有害的相变发生, 使用温度达到国际先进水平。

热喷涂技术发展趋势

热喷涂技术经过100余年的发展, 技术日益成熟, 用途涉及航空航天、工业燃气轮机、汽车、电力、燃料电池与太阳能、医疗卫生、造纸与印刷等诸多领域。

要实现航空发动机在高推重比和高效率上的重大突破, 就必须提高发动机中燃气温度, 这必然造成高压涡轮热端部件表面温度的大幅度提高。

碳化物、氮化物陶瓷 SiC、Si₃N₄ 是最有可能取代镍基高温合金作为在更高温度下工作的发动机高温结构材料, 制约其应用的重要因素是其在发动机高温燃气环境中的材料组织结构稳定性不足。

碳化物、氮化物陶瓷能够和水蒸气等反应生成挥发性的产物造成陶瓷材料结构及性能严重退化。在陶瓷表面采用气相沉积与等离子喷涂复合技术制备环境障涂层, 可以有效阻止高温燃气气氛和陶瓷基体的接触, 提高陶瓷基体的结构稳定性。

在某些重要应用领域需要高的涂层结合强度, 甚至需要涂层与零件基体间冶金结合。为克服热喷涂涂层界面机械结合的不足, 激光等离子复合喷涂技术应运而生(见图3)。

激光等离子复合喷涂技术制备的涂层致密均匀, 可用于发动机刷式封严跑道的制造。目前要解决的主要问题: 一是控制热输入, 避免涂层成分过度稀释及材料组分的分解; 二是降低应力, 避免涂层中出现裂纹。

室、涡轮叶片、导向叶片、轴颈、轴承座、封严环、喷管等数以千计的零件需进行热喷涂制备涂层(见图1), 涂层的应用是航空发动机可靠性及服役寿命大幅度提高。

高温可磨耗封严涂层等离子喷涂技术

高温可磨耗封严涂层作为发动机部件的重要涂层之一, 用来调控高压涡轮转子部件与机匣之间的间隙, 对保持发动机的效率十分关键。

中航工业制造所高能束流加工技术重点实验室研制的添加陶瓷减摩自润滑材料及聚苯醚的高温可磨耗封严涂层, 涂层摩擦系数低, 可磨耗性能优异, 同时抗高温氧化性能及燃气冲刷性能优良。

高温可磨耗封严涂层厚度一般超过1.5mm, 必须采用机器人自动等离子喷涂技术, 喷涂参数计算机闭环控制、涂层厚度在线监测, 这样有利于涂层组织结构及厚度均匀, 稳定涂层冶金质量。

热障涂层等离子喷涂技术

热障涂层广泛用于航空发动机及地面燃气轮机, 保护发动机高温部件, 如燃烧室、涡轮叶片、火焰喷管等(见图2), 可大幅度提高部件寿命、提高发动机效率、降低部件温度或提高燃气温度。

热障涂层的制备方法主要有等离子喷涂法和电子束物理气相沉积法。热冲击寿命和热导率是热障涂层的两个关键技术指标。

没有优异的抗热冲击性能, 热障涂层就不能在可靠性要求极高的航空发动机上获得成功应用。把涂层寿命做到数千、数万小时是热障涂层成功应用于商用飞机发动机的关键所在。

由于氧化钇稳定氧化锆在1200℃以上工作、在随后的冷却过程中相变, 相变过程中材料体积将膨胀约4%, 这种体积效应使涂层产生裂纹甚至剥落。国内外学者对两种或两种以上稀土氧化物复合稳定氧化锆的多元体系进行了较多研究, 取得了明显进展。

美国科学家开发的氧化钇、氧化镧、氧化铈三元稀土复合稳定氧化锆工作温度可达1500℃, 并已商品化。

制造所高能束流加工技术重点实验室研制的多元稀土氧化物复合稳定氧化锆超高温热障涂层, 隔热性能及抗热冲击性能优异, 1500℃长期工作、在随后的冷却过程中也没有有害的相变发生, 使用温度达到国际先进水平。

热喷涂技术发展趋势

热喷涂技术经过100余年的发展, 技术日益成熟, 用途涉及航空航天、工业燃气轮机、汽车、电力、燃料电池与太阳能、医疗卫生、造纸与印刷等诸多领域。

要实现航空发动机在高推重比和高效率上的重大突破, 就必须提高发动机中燃气温度, 这必然造成高压涡轮热端部件表面温度的大幅度提高。

碳化物、氮化物陶瓷 SiC、Si₃N₄ 是最有可能取代镍基高温合金作为在更高温度下工作的发动机高温结构材料, 制约其应用的重要因素是其在发动机高温燃气环境中的材料组织结构稳定性不足。

碳化物、氮化物陶瓷能够和水蒸气等反应生成挥发性的产物造成陶瓷材料结构及性能严重退化。在陶瓷表面采用气相沉积与等离子喷涂复合技术制备环境障涂层, 可以有效阻止高温燃气气氛和陶瓷基体的接触, 提高陶瓷基体的结构稳定性。

在某些重要应用领域需要高的涂层结合强度, 甚至需要涂层与零件基体间冶金结合。为克服热喷涂涂层界面机械结合的不足, 激光等离子复合喷涂技术应运而生(见图3)。

激光等离子复合喷涂技术制备的涂层致密均匀, 可用于发动机刷式封严跑道的制造。目前要解决的主要问题: 一是控制热输入, 避免涂层成分过度稀释及材料组分的分解; 二是降低应力, 避免涂层中出现裂纹。

跟踪国际前沿 工艺设备领先

——记中航工业制造所热喷涂专业组

本报记者 王恒

现代航空发动机有数以千计的零件需采用热喷涂技术制备各种涂层, 以进一步提高或赋予基体零件更好的耐磨、防腐、抗冲刷、抗高温、抗氧化等性能。

工艺设备同强并举

随着飞机和航空发动机性能的不不断提升, 其零部件工作环境也变得愈加恶劣, 基体材料在高温、腐蚀、燃气、摩擦等环境下, 受到环境介质的影响, 往往不能满足使用要求。

因而涂层技术成为现代飞机和发动机越来越多的选择。热喷涂专业组开发的压气机封严涂层、叶片微动磨损涂层、耐磨涂层、高温可磨耗涂层、热障涂层自上世纪80年代起在飞机和发动机上开始获得广泛应用。

同时, 专业组在引进、消化、吸收国外先进设备的基础上, 自行研制自动等离子喷涂及火焰喷涂设备等相应热喷涂成套设备, 批量供应国内市场, 民企市场占有率高达50%以上。

热喷涂专业组现已建成了涂层温度与应力计算模拟、可靠性计算与分析、涂层可靠性评价、热喷涂过程实时监控与控制等测试与分析研究平台, 近年来承担国家多项基础研究、关键技术攻关、集团创新基金、重点实验室基金项目。

在超高温热障涂层材料设计与合成、防热自润滑可磨耗涂层结构控制、防热自润滑材料、飞机部件微动损伤机理及防护等方面取得重大突破, 为飞机研制提供了真实、可靠的实验数据。

技术市场双向人才

高素质的科技人才是保持团队快速发展的关键, 研究所围绕热喷涂新材料设计与合成、新型功能防护涂层研制及热喷涂关键工艺装备开发, 建立了一支国内一流热喷涂技术创新团队。

热喷涂团队注重对高素质人才的培养, 制定了一系列人才培养制度, 充分发挥自身在实验条件、课题申请和经费支持等方面的优势, 为人才培养提供全面支持。

实验室每年招收及联合培养硕士研究生, 同时, 鼓励在职科研人员继续学习或到欧美科研机构及大学访问交流, 积极参加相关国际学术会议。

团队人员主要分为技术人员与市场推广人员, 为了充分调动成员工作的积极性和创造性, 团队针对不同分工设立了相应的考核制度。

技术人员主要从事新材料、新工艺、新设备的研究与开发, 其考核主要针对项目完成质量、科研经费执行率, 意在鼓励科技人员多做实验、多出成果、发表高质量论文、申报发明专利; 市场推广人员工作重点是科技成果转移及热喷涂设备推广, 促进型号生产及新技术的应用。

因此, 对其考核更侧重于经济增加值。通过考核, 成员们能够更加积极地推进热喷涂新材料、新技术、新设备在航空航天及其它相关领域的应用, 努力成为国内领先的热喷涂技术团队。

国内国际共同进步

近些年, 在航空航天工业高速发展的带动下, 我国热喷涂技术的产业化进程已得到跨越式发展, 但在高温、超高温热障涂层方面与欧美发达国家相比还存在较大差距, 特别是在涂层质量稳定性、可靠性及使用寿命方面差距尤为明显。

经过多年的不懈追求, 研究所热喷涂技术专业在超高温热障涂层、高温可磨耗涂层、微动损伤防护涂层等关键航空涂层方面已处于国内领先地位, 接近国际先进水平。

随着热喷涂新材料、新方法的不断出现, 团队认识到开展国内外学术交流和国际合作是提高热喷涂项目研究水平、学术水平及走向世界的重要环节。团队邀请英国TWI研究所、法国巴黎十一大学、法国贝尔福工业大学、中国科学院上海硅酸盐研究所等国内外知名科研机构的专家来实验室交流专业最新进展, 促进了涂层研究工作的开展。

研究人员通过参加国际新材料、热喷涂学术会议以及去发达国家相关大学、研究所、专业厂家或实验室进行技术培训、技术考察或合作研究, 一方面介绍了自身最新研究成果, 提高了团队声誉和学术地位; 另一方面获取了相关领域国际研究现状及方法, 及时了解了国际热喷涂技术领域的研究热点和趋势, 促进了自身热喷涂技术水平的提高。

未来, 制造所热喷涂团队希望有机会联合优势高校、科研院所、相关制造厂共同合作, 深入开展基础研究应用研究、产品研制与验证、产业化应用研究工作, 全面推动热喷涂新材料、新技术的广泛应用, 助力航空航天事业大步迈进。

中航工业科技与信息化部信息化办公室、信息技术中心

以系统工程理念引发航空产品开发能力提升和模式创新

【中航工业商发设计研发中心控制系统部部长 殷轲】

航空发动机控制系统在研制过程中对软件和硬件的可靠性和安全性要求很高, 必须应用系统工程的方法进行需求的捕获、设计、验证和确认, 才能保证系统的正确性和被正确地实现。

集团公司统一组织的系统工程培训, 使系统工程理念、方法和标准流程得以更系统、更完整的展现; 使产品研制全生命周期各阶段该做什么、其输入输出都是什么问题更清晰、标准化; 结合产品的具体特性对标准流程进行剪裁, 为实际工作提供有力指导, 使产品开发更全面、更准确、更标准。

通过培训, 我们了解到系统工程的重点和关键所在, 比如在需求捕获阶段, 要加入“运行概念”, 模拟产品在各种状态下的运行情况, 包括工作运行、维护运行、运输运行和检查运行等。系统工程一方面为我们提供了标准的流程过程, 另一方面也为各种模拟提供了有力的工具。总之, 系统工程使我们的研制工作得以不断改进和完善, 使之体系化、流程化、标准化。

【中航工业商发总本部工程师 孙煜】

系统工程是一种基于系统思考、基于全局思维、基于流程的方法。系统工程将各个细分专业进行有机结合, 使各个专业实现紧密配合与协同。我们目前进行的航空发动机研制是一个复杂系统, 更需要应用系统工程的方法来开展研制工作。

在推进系统工程过程中, 面临的挑战之一是严重缺乏系统工程方面的专业人才。目前, 国内的大学教育中没有系统工程专业, 国内也普遍缺乏对系统工程理念的认识。这次培训使我们对于系统工程有了全面的认识, 今后要将这些先进的理念在本单位贯彻, 并在实际工作中深入贯彻, 以优秀试点项目带动系统工程在本单位的推广应用。

【中航电子科技与信息化部部长 李京生】

需求捕获与分析是系统工程的核心与精髓, 就是要借助一些专业的方法与手段把客户模糊的、千差万别的想法挖掘出来, 使之显性化。需求捕获与分析不再仅限于项目研发的起始阶段, 而是贯穿于产品整个生命周期, 存在于产品研发的各个阶段、各个层面, 直接关系到项目成功与否。

各用飞机研制过程中, 将飞机制造的所有相关者分级分层, 从上往下大致为主机、系统供应商、设备供应商、部件及元器件供应商。在这种专业化极强的工作架构中, 上一级对下级的需求定义必须是清晰可实现、经济可承受并且负责的。在此基础上, 下级供应商经过详细论证与分解, 对下一级供应商提出需求并对提出的需求负责。

在上一级需求冻结之前, 下一级供应商不会启动实质性研发工作, 以避免在时间、经济等方面造成巨大损失。如果哲学是科学的科学, 那么系统工程就是工程的工程, 是一种方法论, 是对工程活动的抽象, 并反过来再指导工程实践。

系统工程在推进过程中, 需要面对各行业、单位、产品和技术基础的差异, 如何落地是难点。有些单位在局部已应用过系统工程, 并在多个航空产品的研制过程中形成了一套既有的流程和方法, 其中有些与系统工程的理念不谋而合, 但有些没有对系统工程方法论的过程, 未来如何对接是一个问题。我们需要完善已有的, 补充缺失的, 结合实际总结出一套方法。

另外, 建议推进MBSE要以主机单位为牵引, 进而带动辅机的发展。此外, 系统工程是自上而下的综合, 因此从更高的层面看, 需要集团的牵引、用户(军方)的牵引, 这将有助于加速系统工程的推进, 也将是推动自主创新的有效方法。

【中航工业成都所飞控部副主任 杨林】

成都所飞控部从2011年某航空产品的方案阶段就开始应用系统工程。从结果看, 由于需求不明确导致的产品缺陷非常少, 这是产品能在很短的时间内完成系统综合、确保按期顺利首飞的原因。

通过这个项目, 我们也发现了影响系统工程推进的一些问题。一是在项目推进过程中, 与制造厂产品研制的各阶段未完全对接, 导致不同阶段的协调内容类似; 二是在用户需求的捕获上, 由于沟通不够充分透彻, 致使有些需求未能完全贴合用户的真实意图, 只能在后续的设计中加以解决; 三是系统工程的推进需要相关信息化工具和标准支持, 但传统工作模式下不同部门(如四性审查、质量管理等)依然单独进行各自配套程序, 导致脱节和重复。

作为设计单位, 系统工程理念要求我们不仅要从产品生命周期的角度, 将用户、内外部协作方都纳入到整个过程, 形成宏观的概念框架。另外, 还需要从INCOSE系统工程手册中提炼、剪裁出适合我们自己的开发方式。

【中航工业成都所航电武器部新技术发展室主任 谢锋】

系统工程的方法和流程, 如需求分析、概念设计、开发、制造、运行维护等一些概念和流程在之前的飞机研制中已经存在, 只是没有体系化和规范化, 在需求的逐级分析分解、逐级确认和验证等方面也有待提高。基于模型的系统工程方法提供了体系化的方法和规范来指导产品研发, 同时也保证了可追溯性和可验证性, 特别是当用户的需求更改时, 能快速找到相应的需要更改的内容。

今后需要在基于模型的系统工程方法论的指导下, 重点补充和强化产品研发中缺失和薄弱的部分。而在此过程中, 我们除了面对系统工程各流程、工具对现有的体系、方法带来的改变之外, 更困难的还是将面对组织架构的变革, 需要我们格外重视。

此外, 系统工程理念和方法的应用不仅仅是工业部门的事, 还需要通过我们的积极推动来影响客户, 引导其改变现有的管理方式和文档体系, 将系统工程作为项目管理的工具, 从需求管理、研制要求到运行维护全过程采用统一的方法论。

【中航工业沈阳所无人机部总体室主任助理 卢元杰】

如果哲学是科学的科学, 那么系统工程就是工程的工程, 是一种方法论, 是对工程活动的抽象, 并反过来再指导工程实践。系统工程在推进过程中, 需要面对各行业、单位、产品和技术基础的差异, 如何落地是难点。

有些单位在局部已应用过系统工程, 并在多个航空产品的研制过程中形成了一套既有的流程和方法, 其中有些与系统工程的理念不谋而合, 但有些没有对系统工程方法论的过程, 未来如何对接是一个问题。我们需要完善已有的, 补充缺失的, 结合实际总结出一套方法。

另外, 建议推进MBSE要以主机单位为牵引, 进而带动辅机的发展。此外, 系统工程是自上而下的综合, 因此从更高的层面看, 需要集团的牵引、用户(军方)的牵引, 这将有助于加速系统工程的推进, 也将是推动自主创新的有效方法。

【中航工业太航总工程师 宣晓刚】

随着技术的发展, 现在的飞机系统越来越复杂, 需求数量也越来越庞大。基于模型的系统工程将需求通过模型化的方式逐级传递, 保证了最终实现需求的可追溯性。因此, 飞机的系统级供应商应从传统的成品协议书方式转变为基于模型的系统工程方法。

同时, 系统工程是一种创新和正向开发的有效方法, 通过追溯源头去寻找最原始、最本质的需求, 再通过需求分析找出其实现的方法, 这就是从需求(needs)到需求(requirements)的转化过程。即从用户需要分析飞机的需求、从飞机系统层级分析对各系统的需求、再从系统层级分析部件的需求, 并逐级展开, 这是我们进行原始创新的有效途径。

从防务层面来说, 需求源于未来制止战争的形态所提出的装备需求。例如, 赛峰集团与霍尼韦尔合作研发的民用飞机电动滑翔技术, 就是关注原始需求而带来节省能源和环保的益处。

集团公司力推基于模型的系统工程方法, 建议以飞机总体设计为牵引, 进而带动全集团的应用, 同时将利益攸关者也纳入进来, 使全集团和用户都采用同一种方法和语言, 以加快基于模型的系统工程的应用进程, 加速产品研发模式的转型, 从而缩短研发周期、降低研发成本, 有效提高创新能力。

【中航工业动控所软件工程部部长 陈伟静】

INCOSE系统工程手册是一个具有可执行性的指南和操作手册, 把技术流程、项目流程、协议流程和组织使能流程都串起来, 每个流程都有推荐的方法, 对实际操作有很强的指导价值。系统工程强调系统思维, 高度关注利益攸关者的要求, 关注全生命周期, 关注产品的维护过程、退出过程, 而缺乏对产品生命周期的全局考虑正是目前设计的弱点之一, 特别是普遍缺乏对维护过程和退出过程的考虑, 因此学习系统工程方法对于当前的产品研制具有很好的指导意义。

掌握先进理念和工具的关键是在于实践, 期待通过系统工程的实践能够为企业研制和企业发展带来显著成效。在此也建议集团公司采用自顶向下的方式, 形成氛围, 进而高效推广基于模型的系统工程方法的应用。

【中航工业自控所导航部系统工程师 袁冀】

基于文档的系统工程面临文档信息表达容易产生歧义、系统需求难以获得、各个层次研发人员难经统一认识达到准确理解、系统与子系统及子系统之间的接口信息难以表达与传递等诸多困难。目前, 大多数单位在研发过程中采用的仍然是基于文档的研发模式, 还不具备能够灵活应用的、针对系统全数字样机设计—多学科性能评估—数字样机虚拟—设计—加工—测试一体化的数字化闭环设计验证流程。

而基于模型的系统工程可通过模型化的运行测试实现对系统设计方案的分析、测试和验证, 消除其中可能存在的歧义和错误, 保证总体设计方案的正确性以及设计需求的满足。集团公司近年广泛开展的系统工程培训和MBSE试点应用, 是对先进方法论推进基础的夯实, 培养了一批中航工业系统工程应用推进的领航员, 为系统工程在集团公司的全面应用和集团公司新型结构化研发模式的建立奠定基础。