

航空发动机整体叶盘制造技术

整体叶盘是现代航空发动机的一种新型结构，它将发动机转子的叶片与轮盘进行整体设计与制造。与传统结构相比，由于省去了起连接与固定作用的榫头、榫槽和锁紧装置，整体叶盘具有如下优点：叶盘的轮廓径向高度、厚度及叶片原榫头部位尺寸均减小，显著减轻了转子的质量；零件数量大量减少，转子结构大为简化，有利于装配和平衡，使发动机的可靠性增加；传统的叶片和轮盘连接方式中，榫头和榫槽之间的间隙造成了气流的逸流损失，采用整体叶盘后可消除这一损失，提高了发动机工作效率，增加了推力；有效地避免了装配不当带来的榫头—榫槽磨损及锁片损坏，提高了发动机的可靠性。然而，采用整体叶盘的结构与从前的涡轮盘和叶片单独制造技术相比，除具有上述诸多优点外，同时也面临着严峻的技术挑战，整体叶盘的制造技术是未来制备先进航空发动机必需攻克的世界性难题。

西方发达国家于20世纪80年代中期开始将整体叶盘技术应用于航空发动机产品上，该技术目前已在诸多高推重比和大涵道比发动机上得到应用，有效推动了当代航空发动机的发展和技术提升。我国紧跟国际技术潮流，在21世纪初也开展了精铸高温合金整体叶盘、精锻钛合金整体叶盘、热等静压粉末高温合金整体叶盘等研制工作，并取得卓越成就。

近成形制坯技术

精密铸造技术。铸造数值模拟软件的迅猛发展，使得铸造过程流场、温度场可以实现较为准确的定量表征，从而有力地促进了定向凝固理论和热等静压技术的发展，明显改善精密铸件质量。近年来，数值模拟技术在预防铸件缺陷形成及尺寸变形、改善铸造合金组织、优化铸造工艺上发挥越来越大的作用，显著提升了铸件的性质，也减少了叶片表面裂纹，提高了叶片抗疲劳性能。

20世纪70年代，美国广泛开展了高温合金整体叶盘精铸技术的研究，实现了轮盘为等轴晶，叶片为M247、CM681定向凝固材料的双性能整体叶

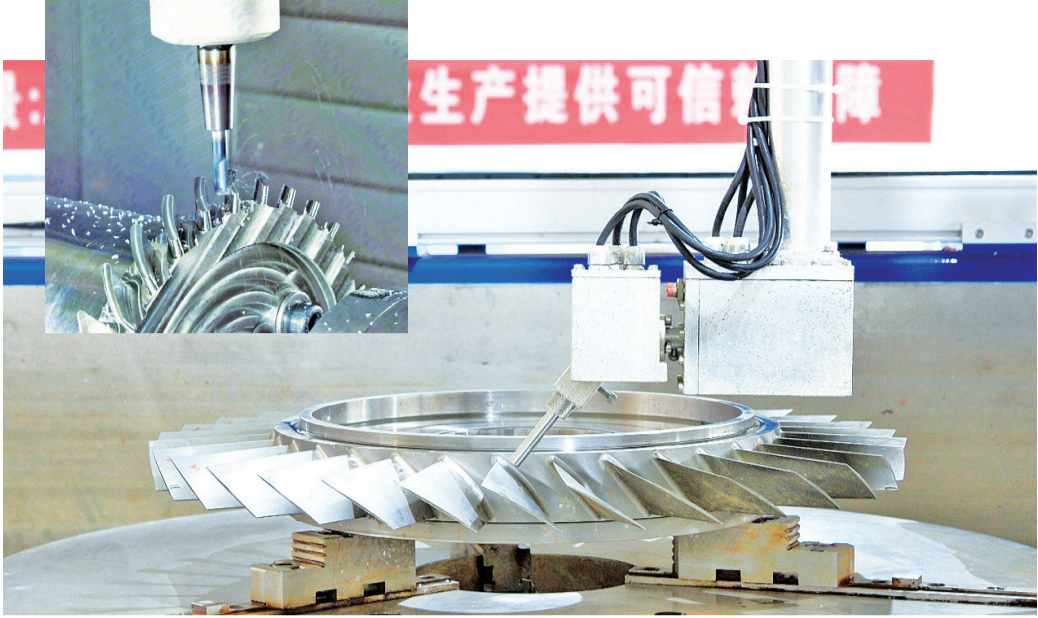
盘的制备。我国北京航空材料研究院通过控制精铸整体叶盘的成形方法、浇注参数以及热处理工艺，为在浇注过程实现沿叶片方向的径向温度梯度，在原有的铸造设备上附加了特殊工装，成功制备出直径为120mm、带有34个叶片的精铸整体叶盘。

精密锻造技术。采用精密锻造制坯，不但能节省昂贵的钛合金和高温合金材料，还能通过改善整体叶盘的组织均匀性来提高部件疲劳强度和使用寿命。精密锻造技术必须在对所加工材料进行锻造工艺数值模拟的基础上，对整体叶盘锻件模具进行精细设计，保证锻件不同部位应变场、温度场的均匀性，在轮盘和叶片部位只保留较小加工余量的前提下，轮盘部位要拥有足够的变形量，叶片部位要实现充分成形。等温锻造技术和超塑性成形可以实现钛合金和高温合金的精密锻造。

美国通用电气公司利用等温锻造技术制备的压气机整体叶盘，零件尺寸精度可达0.1~0.25mm，材料利用率提高4倍。国内宝山钢铁股份有限公司通过对锻件图的精细化设计，结合数值模拟技术，实现钛合金整体叶盘的等温锻造，锻件成形良好。

热等静压技术。为保证高温合金具有高强度、良好的耐腐蚀性和优异的综合力学性能，往往需要在镍基合金中添加很多合金元素，这势必会影响合金的加工性能和组织的均匀程度。为避免高合金化所带来的易偏析、难加工等困难，粉末高温合金逐渐兴起。粉末高温合金制备技术，是先将高合金化高温合金粉末电极棒，利用氩气雾化(AA)或者等离子旋转电极(PREP)等方式制备出细小的高温合金粉末颗粒，再通过包裹、封装等工序实现热等静压成形。

北京钢铁研究总院利用热等静压技术实现FGH96高压涡轮盘的制备，并通过后续的梯度控温热处理，得到盘心部分具有高强度和优异抗疲劳性能的细晶组织，盘缘部分具有优异抗蠕变性能的粗晶组织的双性能整体叶盘。



激光快速成形技术。区别于传统的铸—锻—机加工的“减材式制造”零件制备方式，激光快速成形是基于“增材式制造”的概念上发展起来的金属零件全密度快速直接制造技术。各种类型的激光增材制造技术，如激光工程化净成形、选择性激光烧结、激光直接成形等，本质上都是利用送粉或铺粉方式逐点、逐线、逐面添加沉积实现任意形状高性能金属零件的近净成形。作为一项短周期、低成本绿色数字制造技术，激光增材制造技术具有快速、柔性、高性能等诸多优势，在航空、航天、核电、石化、船舶等高端装备制造中有巨大的发展潜力和广阔前景。它有机地融合了先进材料与先进制造技术，在保证零件的成分、组织和性能达到使用要求的前提下，还能同时保证零件的形状和尺寸精度。

利用增材制造技术，不仅可以实现结构复杂的整体叶盘零件近净快速制造，还可以实现双合金整体叶盘的复合制造。北京航空航天大学经过多年潜心研制，利用激光增材制造技术成功制备出双组织双性能钛合金整体叶盘。钢铁研究总院和北京航空航天大学合作，在变形高温合金GH4169盘坯上制备等轴晶K418B叶片环以及DZ417G定向凝固叶片环等研究方向

进行了富有成效的探索。

精确成形加工技术

多轴联动数控铣削技术。五轴联动是指数控机床的5个轴都可以按照一定的速度同时到达某个设定点。在整体叶盘机加工领域，五轴联动数控铣削加工技术含量高、精度高，具有加工柔性好、生产周期短等优点而被广泛应用于加工复杂曲面。我国西北工业大学从20世纪90年代起，致力于开发“叶轮类零件多坐标NC编程专用软件系统”。该系统能利用叶盘的刀位点计算实现加工轨迹智能化、叶形曲面拟合优化。该系统将测量数据预处理、曲面建模、刀位计算、刀位验证及后置处理串联成一个有机的整体，是一项先进的智能制造技术。经过多年研究，西北工业大学探索出一条复合高效铣削加工路径，可同时进行侧铣和插铣，显著提升整体叶盘的加工效率。

电火花加工技术。电火花加工是利用电火花放电时的瞬时高温来熔化、气化材料进而蚀除多余的金属，达到对零件尺寸的加工要求。在整体叶盘的机加工方法中，电火花加工具有独特的技术优势：如不接触加工和不存在宏观切削力等，可对传统的难切削材料，如高温合金、钛合金、硬质合金进行

加工。基于以上诸多优点，电火花加工很适合带冠整体叶盘的加工。上海交通大学开发出具备整体叶盘造型、电极CAD/CAM、工具点轨迹搜索等功能的电火花加工专用CAD/CAM软件，并利用该技术获得了型面精度较高的整体叶盘。

电解加工技术。电解加工是在高压、高流速条件下进行的电化学反应。该原理是在电解液中电阳极溶解的原理，获得具有一定尺寸精度和表面光洁度的零件成型方法。数控电解加工是将计算机控制和电解加工有机地结合，由于是非接触式无宏观切削力加工，很适宜加工薄叶片以及狭窄通道的整体叶盘，以数控技术作为辅助可以精确地实现复杂叶片型面的成形。该技术对于小直径、多叶片、小叶片间通道及变截面扭曲的整体叶盘的加工具有独特的技术优势。美国通用电气公司利用该技术加工出叶型厚度公差为0.10mm、型面公差为0.10mm的发动机整体叶盘。俄罗斯以电解加工替代电火花加工，有效地避免了电火花加工的表面变质层。利用机械仿形电火花与电解加工相结合的新工艺加工带冠整体叶盘，显著提高了零件表面质量。国内南京航空航天大学从20世纪80年代开始研究数控电解加工技术，创造性地提出了“直线刀”阴极数控展成电解加工和成形方法，实现整体叶盘叶片槽与叶片型面的成形加工。

在整体叶盘制造工作中，各种近净成形加工技术、精确成形技术和表面抛光处理技术各具特色，也都有各自的局限性。各种技术相互渗透，形成整体叶盘复合制造工艺。

因此，从整体上看，我国整体叶盘制造技术虽然与国外先进技术仍存在较大差距，但如果能够充分发挥在激光增材制造等领域的技术优势，由设计部门牵头，产学研用紧密结合，创造性地采用“激光增材制造近净成形+多轴联动数控铣削精确加工+数控抛光表面处理”工艺路线，必将能实现我国航空发动机整体叶盘高效率、高质量的智能制造。

随着整体叶盘在航空发动机上的广泛应用，未来将采用性能更加优异的碳化硅或碳/碳复合材料制备整体叶盘以满足高推重比、大涵道比发动机的设计需要，且部件结构设计更加复杂。全新的材料体系和制备工艺对整体叶盘全流程制造技术提出了空前的挑战。世界各国都必将投入更大的人力、物力和财力，进一步推动这种低成本、高效率、高质量智能集成制造技术的进步，以满足航空发动机不断增长的高安全性、高可靠性、高效率性的要求。

表面抛光处理技术

表面抛光处理可以进一步降低经数控铣削、电火花及电解加工的整体叶盘表面粗糙度，提高型精度，从而改善气流通道、提升燃油效率。还可以实现提高叶片疲劳强度，延长使用寿命的目的。

数控抛光技术。近年来，国外在整体叶盘抛光技术方面取得了长足进步，日本率先提出并通过磨削中心进行自由曲面抛光的新工艺，并研制出抛光加工机器人投入使用。这种工艺不但获得了光洁度很高的表面质量，还解决了NC误差导致的抛光轨迹误差

(王科)

MES或将成为工厂运营的核心

“工业4.0”重新燃起了“工业再发现”之火。许多概念和实践再次被强化，在这样一场焦点争夺战之中，MES(制造执行系统)系统毫无疑问成为众所瞩目的焦点。

智能工厂面临的大规模个性化定制的生产问题，必须由各个系统(PLM、MES、现场数据采集系统等)进行承接和解决。

越来越多的管理者意识到，MES系统正在成为承载工厂核心的运营平台。服务于车间制造是MES的最核心的任务，因此越来越多的企业在新建工厂时，不仅考虑采购先进的设备，也考虑MES如何将工艺研发、品质管控、精益制造、协同供应链等，统一到一起。MES系统已然成为工厂的信息枢纽。

MES的历史渊源

制造执行系统是美国AMR公司在90年代初提出的，旨在加强MRP计划的执行功能，把MRP计划通过执行系统同车间作业现场控制系统联系起来。很显然，MES系统自落地之日起，就定义了自身的使命：MES系统，为连接中枢而生。

1997年，MESA(制造执行系统协会)提出的MES功能组件和集成模型，包括11个功能。同时规定，只要具备11个功能之中的某一个或几个，也属MES系列的单一功能产品。

伴随着MES系统市场的发展，MES厂商犹如雨后春笋般地涌现出来，各路大军杀入其中。在这个过程中，大量洗牌是不可避免的。而近几年，从物联网行业来的MES系统厂商也成为热点。由于具有先天的对设备、网络的理解，这些厂商也在成为一股不容小觑的生力军。

历史上，MES系统行业曾有过一次并购热潮，是以自动化设备供应商为主角，以便快速进入该行业。这是自动化和软件供应商最直接的本能反应。实际上，这是自动化系统，第一次在工厂中精确地度量了硬件设备与软件的距离，宣告了一个正在萌芽的全新意图：自动化供应商管理，而不仅仅是控制，大大前行了一步。

而近几年开始大热的工业数字化热浪，正在将MES的认识和实践推向另一个高峰。

然而，一手好局，MES系统的发展却出乎意料地缓慢。

MES从20世纪90年代开始发展，刚开始主要是在自动化程度比较高的行业得到广泛应用。如汽车行业、半导体电子、烟草行业，同时在食品饮料、工程机械、大型离散装配、家电行业得以推广。

自动化设备商仍是MES系统市场的主流供应商，但也难以形成ERP行业的SAP这样的寡头。尽管ERP厂商虽然也尝试进入MES行业，但是，市场拓展效果不佳，很显然，对资源管理轻车熟路的ERP厂商，对现场控制系统、数据采集，有着与生俱来的疏和规避。

MES系统的缓慢发展，恰好跟工业化进程密切相关。MES系统的行业性需求与通用型产品之间的矛盾日渐突出，产品化程度不够。与ERP不同，MES系统从产生开始，就是为了了解决通用型的ERP功能难以解决的工厂管控问题，因此，即使有多年的发展，MES系统也无法摆脱行业性对其形成的局限。

与此同时，集成难度是另外一个MES系统难以快速铺展的门槛。随着智能工厂的建设热潮，对于MES的集成提出更高的要求，纵向集成要求MES系统不仅与ERP集成，还要求与控制系统进行集成；不仅要求进行数据采集，还希望实现控制参数、工艺标准的下达。这也对MES供应商提出很大的挑战。

值得注意的是一个现象是，尽管MES系统发展多年，但其产业化规模仍然不足。一个成熟的产业应该是由供应商、服务商(经销商)和用户组成的，比如ERP、PLM。而现在的MES系统多是供应商直接面向用户，产业规模还远远没有发展起来。

实际上，MES系统是一个企业信息化程度的体温计。由于MES系统的数据库表，来源于工厂的多个角度。因此如果企业自身的工艺资源、制造资源、流程节点不能规范有效的时候，MES系统厂家将不得不先帮着企业整理自身的资源数字化。

MES系统的未来

从国外的发展趋势看，已经形成了一批MES软件产品商和行业解决方案商。ERP和MES系统的分工也愈加清晰。企业智能制造的应用焦点已经从ERP转向MES，MES系统已经由BRP的配角转变为生产管家

的主角。

随着CPS赛博物理系统正在逐步成为指导智能工厂建设的重要因素，物联网IoT的影响范围和对象越来越大，MES将对更多的“人、机、料、法、环”的信息进行闭环处理，从采集、传输、分析、控制、乃至巨大的提升。

一方面，MES系统与精益管理思想进行更深入的融合。相比ERP，MES在企业精益管理思想落地方面更具有可操作性，在汽车、家电等装配行业，借助MES的物料拉动功能，企业已经实现JIT、JIS管理。

另一方面，基于MES的制造大数据的分析处理将成为MES面临的课题和挑战，与ERP层的BI分析处理不同，MES产生的制造数据不仅包括结构化数据，还包括大量的非结构化数据如实时历史数据、图片等。在新一代软件技术和工业互联网思维的支持下，MES在内涵中也增加了多个角色功能。

如何利用MES系统掌握的即时、准确的生产信息成为各MES厂商竞相竞争的基础，例如：对于某些设备管控上移到MES层是充分利用MES掌握在制品状态的信息，对于AGV由MES系统调度是充分利用MES掌握生产节奏的信息等等，随着实时工业网络在制造现场的部署，MES由于掌握最全面、最精细的生产系统信息会显得越来越重要，同样地，MES系统所涵盖的功能也将不仅仅局限与AMR定义的十一个模块，MES系统会适时、动态、与时俱进地增加更多有价值的软件模块。

随着对于行业的规范化，知识管理的思想将渗透到融入到未来的MES系统中。典型的应用如设备维修知识库，工艺异常调整知识库、最佳实践(最佳工艺、最佳设备运行参数)等将大幅度提高MES系统的推广应用普及，而MES未来将向云端进行转移。对于一些制造过程比较简单的中小企业，基于云平台的MES不失为一种低成本解决方案。

而随着谷歌眼镜、VR/AR、智能手表的引入，MES系统跟人的连接也将更加频繁和自然。而当下智能制造的许多热点话题，可以从MES本身可以一展开。(李之行)

飞机客舱革命性的布艺新材料即将来临

芳纶纤维(聚酰胺)纤维，是我国具有自主知识产权的科研成果和高新技术纤维产品，属于芳香族有机耐超高温材料，类似的纤维只有少数发达国家才能生产，芳纶纤维技术是我国科技水平和实力的象征，芳纶纤维产品在我国的航空领域，如宇航服、飞行通风服、特种军服等。2016年，使用于“神舟五号”飞船的芳纶纤维产品以其优越的性能完胜发达国家的王牌超高温纤维，芳纶纤维的运用已被列为我国耐超高温产业领域的一项核心技术。

随着飞机客舱娱乐系统的完善，航空公司允许旅客在飞行期间使用手机、平板电脑等便携式电子设备，便携式电子设备的锂电池将火灾的安全隐患系数提高。因此，客舱内纺织品的防火性能提高飞机的安全性能。

目前飞机客舱纺织品一般采用羊毛纤维或皮革，为了达到民航客舱阻燃要求而进行阻燃技术处理，但随着客舱纺织品洗涤次数的增加，其阻燃性能逐渐减弱，一般情况下，民航飞机上的座椅面罩或门帘经过几次洗涤后不再使用。

作为一款新型的纺织面料，芳纶纤维具有永久本质阻燃特性，能有效阻止与降低火灾风险，保护客机人员的安全。

芳纶纤维性能

芳纶纤维具有良好的阻燃性。纤维在燃烧时不熔融、不收缩或很少收缩。离火焰自熄，极少有阴燃或余燃现象。其限氧指数在各种纤维中也是很高的。

芳纶纤维属于本质阻燃纤维，芳纶纤维的阻燃性源于其特殊的化学结构，无需经过改性或阻燃处理，就具有耐高温、抗氧化、不易燃等特点，且其阻燃特性不会因使用磨损程度和洗涤次数而降低或消失。传统机上纺织品是对纺织品进行化学改性或阻燃后处理，该方法虽成本低，但阻燃性一般随着使用年限和洗涤次数的增加而逐渐降低或消失。在实际应用中，往往采用多种阻燃剂或多种后处理方式协同效应达到阻燃效果。

和国外Nomex相比，芳纶纤维具有良好的染色性能。芳纶纤维在常用的高温高压条件下即可染色，面料的后整理成本较低。芳纶纤维易印染，可上染丰富多彩的色泽，甚至上染荧光色，以满足飞机座椅面料色彩丰富的



大提花织物需求。芳纶纤维制成的面料可保持出色的外观，表现出稳定的色牢度。芳纶纤维的耐摩擦色牢度、耐干洗色牢度、耐湿洗色牢度、耐汗渍色牢度的检测项目中，检测结果在4-5级。芳纶纤维具有更柔软的肌肤触感，织物更柔软滑糯，吸湿性良好，兼顾体环境的舒适度。芳纶纤维和一般纺织纤维类似，可用于普通设备加工成纱线、机织布等，芳纶纤维其回潮率为6.28%，具有一定的热湿传递能力，有利于人体热量散失和汗液的蒸发。

三防技术是芳纶纤维分子和防护分子相结合，区别于传统防护面料表面涂层处理或混胶处理，防水性优秀的同时带来优质的透气性，做到既防水又透气。

芳纶纤维具有良好的耐磨性，经测试，在12kPa压力下磨40000次不破损，可媲美现有的羊毛飞机座椅面料。

芳纶纤维优势

使用寿命长。芳纶纤维座椅套本身具有的长效的阻燃性和持久耐用性，降低了总的持有成本。芳纶纤维可多次水洗大大降低成本，无论水洗、干洗，都不会随时间及洗涤次数而降低阻燃特性，具备出色的耐用性。芳纶纤维具有良好的结构稳定性，反复洗涤后仍保持固有的阻燃特性，在整个使用寿命期间始终能维持相等程度的阻燃水平。耐磨性能通常指其抗磨性比传统羊毛好。传统羊毛纺织品缝线处易出现撕裂，芳纶纤维强度高比羊毛高，不易出现撕裂。因此，芳纶纤维研发的座椅面料防护性、耐用性更高。

减少碳排放。飞机减重，直接减少二氧化碳排放。新型芳纶纤维座椅套替换传统座椅套，一架飞机即可“瘦身”86.88千克，每年节省燃油约7.4吨，减少碳排放约28吨。例如，某航空新型芳纶纤维座椅套装配30架飞机，每年节省燃油222吨，减少碳排放840吨。据民航专家预测，芳纶纤维面料用于其卓越的性能，其应用于飞机座椅套、飞机门帘、客舱防火毯、客舱灭火毯等所带来无可比拟的安全性及经济性，中国民航的成功应用将推动全球民航的广泛使用，芳纶纤维将改变飞机客舱面料行业。(张煜林)