

航空发动机表面工程应用的问题与思考

Problem and Thinking of Aeroengine Surface Engineering Application

中航工业贵州黎阳航空动力有限公司 张世波

[摘要] 我国航空发动机的研制和发展与世界先进水平存在较大差距,而表面工程应用方面的问题是诸多制约因素之一。在简单介绍现代表面工程技术发展及在我国航空发动机制造领域的应用现状基础上,重点对存在的问题进行探讨,分析原因,并提出解决措施。

关键词: 航空发动机 表面工程 再制造 机械制造

[ABSTRACT] There is a big gap between aeroengine research and development of our country, and the advanced level of the world, surface engineering application problem is one of the restrictive factors. Based on the simple introduction of the development of modern surface engineering technology and present application situation in Chinese aeroengine manufacturing field, the discussion, analysis of the causes of the existing problems is carried out, and the solving measures are put forward.

Keywords: Aeroengine Surface engineering Re-manufacturing Machinery manufacturing

材料的表面处理技术可追溯到距今 2000 多年的青铜器时代春秋战国时期。对现今大量出土的保存完好的青铜器表面研究显示,青铜器表面存在厚度不等的镀锡层,具有铸态组织,有明显热镀迹象,使得青铜器表面抗氧化能力大大提高^[1]。

19 世纪工业革命以来,为适应高强度、高硬度和耐磨、耐蚀、耐高温等特殊要求,需要不断开发各种特殊的合金材料,但这些材料往往价格昂贵。因此,人们试图采用各种表面技术对普通钢材表面进行加工,改变其表面性能,以适应复杂的工作环境。另外,磨损、腐蚀等失效都是首先发生在材料表面,通过对材料表面进行有效处理,可极大地提高材料寿命。尤其是 20 世纪 80 年代以来,在电子、信息、航空航天、先进制造等高科技急剧发展和对传统工业改造的迫切需要的背景下,逐步形成了一门新兴学科——表面工程学^[2]。

作为制造业顶上明珠的航空发动机,集精密成形技术、特种加工制造技术、连接制造技术、热处理技术、表面防护与强化技术、数字化制造技术和检测技术于一

身。现代先进航空发动机更是当代先进制造技术的结晶,美国装配 F22 的 F119 发动机、装配 F35 的 F135 发动机、俄罗斯的 AI-41F 发动机就是典型代表。这些发动机取得的成就,无不伴随着表面工程技术的创新、发展与应用,且在某些部位还起着决定性的作用。我国表面工程发展的总体现状与先进国家相比仍然存在较大的差距,尤其是应用领域,差距更大。正视差距并积极采取措施弥补是中国表面工程领域包括研究人员在内的所有从业人员的责任^[3]。

1 现代表面工程技术的发展

现代表面工程技术的发展,早已突破经典表面处理技术(电镀、涂装)的范畴。2002 年出版的《国防科技名词大典》中,将“表面工程”定义为:将材料表面与基体一起作为一个系统进行设计,利用表面改性转化技术、薄膜技术和涂镀层技术,使材料表面获得材料本身没有而又希望具有的性能的系统工程。它是近代技术与经典表面工艺相结合,繁衍、发展起来的。

按照定义,现代表面工程包括三大技术:表面改性转化技术、薄膜技术和涂镀层技术(表 1)。通过这些技术,使得材料表面实现某些特定的功能,如装饰、耐腐蚀、耐高温、抗氧化、抗疲劳等。

表 1 表面工程常用工艺

表面工程技术	应用工艺
表面改性转化技术	化学氧化、磷化、钝化、阳极化;喷丸强化;表面渗碳、渗氮;表面淬火等
薄膜技术	PVD、CVD 等
涂镀层技术	电镀、化学镀;火焰喷涂、等离子喷涂、HVOF;冷喷涂等

表面改性转化技术:表面形变强化、表面相变强化、离子注入、表面渗入(又称表面合金化)、化学转化、电化学转化。

薄膜技术:利用近代技术在零件(或衬底)表面上沉积厚度为 100nm 至数微米薄膜的成形技术,如 PVD、CVD。

涂镀层技术:金属电化学沉积(电镀)、有机涂层(油

漆)、热喷涂层、热浸镀层、防锈技术。

现代表面工程工艺技术革命性的发展,源于“三束”(激光束、电子束、离子束)技术的出现和发展应用。“三束”使得表面工程工艺技术突破了原有工艺方法的限制,极大地拓展了表面工程应用领域。表面工程技术几乎具有了无限的发展和空间^[2]。

如激光熔敷,可在表面包敷上一层合金层甚至陶瓷材料。激光表面合金化,在表面沉积与基体不同的各种金属素,从而使表面形成合金化层,可明显提高耐磨、耐蚀、耐高温等性能。

PVD、CVD 工艺技术,使涡轮叶片表面获得了优良的耐高温涂层。爆炸喷涂、超音速喷涂、等离子喷涂工艺技术在封严涂层、高耐磨金属陶瓷涂层上取得了巨大成功。

近年来,为快速获得有色金属(Cu、Al、Zn 及合金等)覆盖层,以及进一步解决热喷涂工艺带来的高能耗和涂层材料氧化问题,出现了冷喷涂工艺技术,国内在这方面的研究也取得了许多可喜的成果,包括设备及工艺方法。

2 国内航空发动机表面工程技术的应用

国内航空发动机制造与修理,主要集中在军用发动机、民用发动机少量零部件的转包加工及少量台份修理上。表面工程在航空发动机制造中的应用见表 2。

随着发动机的更新换代,涂层技术正成为发动机制造的关键技术之一。为了提高发动机效率,减少热损失,转、静子之间的间隙要小。转动件在工作中由于受离心负荷和热气流温度场的影响而向外伸长,因此会和静子碰磨,从而危及发动机的安全。为限制转、静子之间的间隙,又不使气流泄漏,在静子、转子叶片或封严齿上涂覆软、硬涂层,用磨损涂层的方法来保持封严,从第二代发动机开始,已普遍采用。

发动机设计技术的发展要求涡轮叶片承受更高的温度,在叶片材料的性能难以提高的情况下,只有靠发展热障涂层来解决这一问题。近些年来,热障涂层技术已成为涡轮叶片设计的一个重要组成部分。国外著名的航空发动机公司对热障涂层在涡轮叶片上的应用进行了大量试验,并进行了热障涂层厚度、性能、材料、裂纹、疲劳、剥落机理、隔热等专项研究。美国第四代发动机的涡轮前温度已提高到接近 2000K。

发动机整个气路的封严,涡轮前温度的提高,都对发动机性能起着决定性作用。而可磨耗封严涂层对气路的封严,热障涂层对涡轮叶片使用温度的提高无疑是起关键性的作用。

表2 表面工程在航空发动机制造中的应用

分类	工艺	用途
腐蚀	钛合金表面腐蚀	大型构件粗加工后材料缺陷检查
	高温合金表面腐蚀	
电镀	镀锌、镉	紧固件表面防护,提高耐蚀性
	镀银	钛合金紧固件,叶片榫头,润滑,防高温粘
	镀铜	螺纹紧固件防高温粘结,渗碳保护
	镀铬	轴承、封严圈,提高表面硬度,耐磨
	镀锡	渗氮保护
化学转化	铝、镁合金化学氧化	表面防护,提高耐蚀性
	钢铁表面化学氧化	
	不锈钢钝化	
	磷化、氧化磷化	
电化学转化	铝合金阳极化	提高表面硬度,提高耐蚀性
	钛合金阳极化	
表面强化	喷丸强化	叶片、涡轮盘、压气机盘等表面强化
	表面淬火	齿轮等表面强化
	渗碳、氮、共渗	
	渗铝硅	叶片防护
涂层	有机涂层	发动机附件及管路表面防护,标识
	热喷涂涂层(包括火焰喷涂、等离子喷涂、HVOF)	发动机气路封严,热端部件的高温防护,涡轮叶片表面的隔热,获得高硬镀、高耐磨涂层
	PVD	主要用于叶片表面薄膜防护涂层

3 国内航空发动机表面工程技术应用面临的问题

3.1 传统表面处理工艺的绿色之路举步维艰

20 世纪 70 年代,在环境保护的要求下,欧美开始禁用含氰电镀工艺、镀镉工艺、高价铬电镀工艺、高价铬钝化工艺,并发展了很多替代工艺,如无氰电镀锌、无氰电镀铜、无氰低氢脆镀镉-钛、3 价铬电镀铬、3 价铬钝化等绿色环保工艺。实际上,我国同样在 20 世纪七八十年代开展了无氰电镀工艺研究,并取得了一些进展,在民用产品上逐步得到应用。但由于无氰电镀工艺本身存在的一些问题,如镀层结合力、耐腐蚀性、工艺稳定性等与含氰电镀工艺还存在一些差距,尤其是镀银、镀金工艺上有些技术难题还未得到突破,很多商家也在利益趋使下,违背科学造假,2013 年的“丙尔金”无氰镀金事件,证实其配方中还是存在氰化物。在军用产品上,对

代表国家整个制造水平的航空发动机行业,直到最近高能耗、高污染淘汰工艺调查显示,含氰电镀工艺在该行业内还居于主导地位。

3.2 自动化、智能化程度低

传统表面处理生产线包括电镀线、腐蚀线、阳极化线等,而目前行业内都是手动生产线,产品质量波动较大,工人劳动强度高、效率低,加工数据收集困难。如何结合航空发动机制造的特点,向自动化、智能化方向迈进,是今后发展面临的一大课题。

热喷涂涂层加工也缺乏柔性,虽在单台设备上有了的自动化,但在多台设备上如何实现更高效率,还有更大改善空间。

3.3 新材料、新技术、新工艺成果转化困难

20世纪80年代,我国在美国BAC 840《低氢脆氰化镀镉-钛》基础上,经过多年研究、改进、提高,成功地在高强度钢的防护上应用了无氰低氢脆镀镉-钛工艺,并形成航空标准HB/Z 107《高强度钢零件的低氢脆镀镉-钛工艺》,与美国工艺相比,具有槽液稳定、分散能力好、操作简便、槽液不含剧毒氢化物等优点。近年来,又进一步研究了Zn-Ni合金镀层,用于代替Cd-Ti合金镀层对超高强度钢的防护,进一步消除镉的环境污染问题^[4]。然而,该技术在国内发动机上却鲜有采用,即使是在新一代发动机上,也未有改观。

近年来,北京航空航天大学的朱立群教授带头研制开发了憎水处理剂及其工艺,其成果显示,憎水涂层极大地改善了氧化膜层、镀层、钝化膜层、磷化膜层等表面的防腐蚀性能,且具有成本低廉,操作简单,无需设备投入,无污染,可取代传统油封处理等优点^[5],但是在发动机零件表面处理上却未得到广泛使用。

徐重教授的离子渗金属(等离子表面合金化)在20世纪80年代就申请了国际专利,能以碳钢替代不锈钢,但大规模产业化则举步艰难。

美国TF39发动机轴承采用离子注入Cr+P元素,解决了轴承点蚀、磨蚀问题,显著提高了航空轴承的使用寿命,但此项研究国内少见成果,也未有应用报道。

为快速获得有色金属(Cu、Al、Zn及合金等)覆盖层,以及为了进一步解决热喷涂工艺带来的高能耗和涂层材料氧化问题,出现了冷喷涂工艺技术,国内在这方面的研究也取得了很多可喜的成果,包括设备及工艺方法,但冷喷涂的研究成果却难以转化应用。

3.4 发动机的再制造应用几乎是空白

表面工程使命之一是零件的修复(再制造),然而,目前我国航空发动机的修理中,对于损伤件几乎一律采用更换新件的措施,修理成本高昂。报废产品的再制造是其产品全寿命周期管理的延伸和创新,是实

现可持续发展的重要技术途径。在这一点上,与国外差距巨大^[3]。

现代表面工程技术的典型代表——激光立体成形加工、激光熔敷等也不乏显著成果。西北工业大学的陈静教授研究多年的“激光立体成形技术”几乎与国外同步,而且成绩斐然,可以说在发动机的零件修复上具有广阔的应用前景。北京航空航天大学的金属3D打印技术已取得了突破性成果。然而在实践中,国内国外却有天壤之别:国内工程化应用还在摸索中,发动机上更是未见报道。而美国AeroMet公司使用激光立体成形技术使F15机翼(WING SPAR)的检修周期缩短为1周;Optomec Design公司,用其进行T700美国海军飞机发动机零件的磨损修复;瑞士洛桑理工学院Kurz教授成功用其修复单晶叶片。

3.5 涂层技术的研究应用与国外差距巨大

第四代、第五代发动机的涡轮前温度高达2000K或将更高,没有新一代TBCs涂层(热障涂层),涡轮叶片将无法工作,热障涂层已成为新一代发动机关键技术之一。国外第四代发动机如F119涡轮单晶叶片表面已采用了新一代热障涂层,国内还在研制之中,工程化应用还有很长距离,需要解决技术标准、工艺设备、工艺方法、性能检测、涂层控制、涂层修复等诸多技术难题。

目前,我国PVD制备涂层仅有少量应用,CVD还是空白,这两项技术在涡轮叶片及气膜孔防护上都有着重要的作用,而国外已在发动机制造中普遍采用。

4 问题探讨与思考

4.1 转变观念是解决表面工程技术应用的关键

中国工程院院士、中国热处理学会荣誉理事长、上海交通大学潘健生教授在分析我国热处理整体面貌为什么落后于世界时指出:我国装备制造业材料改性与控性技术落后的原因,主要不在技术层面上。事实上国内在本领域中不乏高水平的成果,然而产业化则举步艰难。国际热处理与表面工程界人士认为,中国在科研和新技术研究上基本与国际同步,但生产应用方面则有几十年差距,这种状态长期得不到改变,主要原因有:材料改性与控性技术得不到应有的重视,重产量轻质量、重成形轻控性的观念阻碍材料改性与控性技术的提高,科技规划中对材料改性与控性技术的投入很少。在政策层面上先进材料改性与控性技术的价值得不到承认,知识产权得不到保护,严重妨碍其产业化的实现^[6]。

在制造企业,作为航空发动机表面处理一线工程人员深有体会:长期以来,表面处理、热处理在机械制造过程中一直处于辅助加工的地位,行业内流传表面

工程就是涮一涮(指电镀操作)、涂一涂、喷一喷,热处理就是烧一烧、淬一淬,没多少技术含量。这些观念说明在人们潜意识里对材料表面改性与材料控性的轻视。事实上,企业在作决策时也充分体现了这一落后观念,在技改投入上几乎全部着眼于机械加工设备,而很少顾及表面工程、热处理的需求。然而在转包项目上,外国人对国内的机械加工成形能力毫不怀疑,却对特种加工的表面工程、热处理的审核近乎苛刻,这就是观念上的巨大差别。

长期以来,国内制造企业表面工程都是作为机械制造的辅助专业设置的,企业管理者和决策者对表面工程知之甚少,属于看不到效益,可有可无的行业。由于观念的原因,企业也不重视表面工程技术人员培养,造成工程化人才缺乏。企业表面工程技术人员本应成为技术成果转化工程应用的主体,由于价值得不到认可,创新意识不高,同样也妨碍了技术创新与成果转化。另一方面,企业表面工程人员对自身价值的认知也不高,没有真正意识到表面工程在发动机制造过程中的关键性作用以及巨大价值,对前沿技术发展研究缺少动力。

4.2 加强表面工程理论研究和人才培养

表面工程是一门应用性很强的学科,与其他应用性很强的学科一样,这类学科往往技术先行,理论研究滞后,重技术轻理论。表面工程成为一门独立学科时间不过 20 余年,本身处于不断发展且快速发展阶段,所以表面工程至今没有形成一套完整而系统的理论,现存理论大部分是从表面化学、电化学、摩擦学、金属腐蚀与防腐、金属热处理等交叉学科直接引用而来。纳米表面工程理论、纳米摩擦学理论、喷涂成型理论、表面改性理论、表面高能熔覆理论、表面超微细加工理论等都有待建立或完善,贯穿于表面工程各领域的基本科学技术问题更需要归纳和探讨^[7]。

在我国,表面工程在航空航天制造业应用最为广泛,表面工程人才的培养也主要集中在几所航空航天大学,但目前都停留在传统表面处理技术的教学上,对于已成为表面工程发展方向的涂层技术(热喷涂、PVD、CVD 等)及激光表面改性在专业设置上还是空白。目前,航空发动机企业从事涂层加工的技术人员及科研院所研究人员,都不是科班出身且人员稀少,这在很大程度上制约了该项前沿技术在我国的发展及应用。

4.3 加快行业标准的编制,促进表面工程成果转化应用

另一个阻碍表面工程技术推广应用因素是“标准”。标准在航空发动机行业是保证产品质量稳定性和获得高可靠性的重要保障,是企业 and 客户都必须遵从的

法规性文件。正因如此,本应引领技术产业化和技术进步,成为新技术、新工艺、新成果转化桥梁的航空标准,一旦与当前航空产业发展的大环境不适应,标准数量、标准水平、制定速度与航空产业发展需求脱节,反而会成为技术转化面前的一道鸿沟。

我国航空标准的建立始于 20 世纪五六十年代,当时从前苏联成套引进了涵盖总体、发动机、电器、附件、仪表等产品图样、工艺规程、工艺装备规格等标准资料 2000 余份,并以此为基础陆续发布了我国 2000 余项航空工业标准,奠定了飞机设计、材料、标准件、工量量具等方面的技术基础。80 年代,通过美国标准协会成功全套引进 43000 余项美国军用标准。90 年代,对照苏联标准和美军标准两个体系,结合我国航空工业基础,积极实践、广泛征询,基本完成了符合我国国情的航空工业标准体系建设工作^[4]。

然而,当时取得巨大成就的航空标准体系,进入新世纪后却发展缓慢,远跟不上航空工业发展的需求,表面工程方面的标准尤其如此。表面工程相关航空标准自 1985 年发布以来,仅在 20 世纪 90 年代中期进行过部分修订,到目前为止,近 20 年来几乎没有修订过。当时,看似符合国情的标准,现在看来却保护了落后。很多新技术无法在航空发动机零件上应用,原因就是难以逾越标准这个障碍,如憎水处理、钛合金化学镀镍、超音速喷涂、PVD、CVD、激光立体成形等工艺技术急需建立新标准。航空标准应是进行跨越式发展的时候了。

4.4 加强标准、材料、制造工艺与设计的协同

标准、材料、工艺、设计的协同存在问题,在表面工程技术要求上尤其突出,还停留在老型号仿制的影响下,这使得本可以通过先进表面工程技术对材料表面进行改性的可能性,以及使发动机获得更高性能的作用大大降低。目前的状况是很多设计人员不深入了解材料,更是对表面工程技术和最新的表面工程技术知之甚少,往往设计图纸到达制造环节后,才发现表面工程技术要求存在诸多问题。这固然与航空相关标准跟不上发展有关,但更重要的是产品在设计之初,材料、工艺与产品应该进行一体化设计,显然,这单纯依靠产品设计是无法完成的,必须由材料领域、表面工程技术领域以及制造工艺领域的专业人员共同完成,将表面工程设计纳入其工程或产品的总体设计与制造之中。实际上应建立材料、工艺、设计协同机制,这就为最新的表面工程技术得到应用提供了可能,同时也促进了相关标准的建立,最终形成良性循环。

另外,需特别强调的是表面工程技术设计要改变观

(下转第 82 页)

量而且明显提高了装夹效率(见表2),由之前的单件需2~3次装夹优化为1次装夹。

由于大大减少了工装品种和装夹次数,装夹难度显著降低,工装修夹时间由之前的50min/次缩短为35min/次,零件装夹时间由之前的20min/次缩短为16min/次,整体装夹时间明显缩短(见表3)。

从表中可看出,接头类、侧梁类、盒类的装夹时间分别为原来时间的18%、34%、32%,提效十分明显。

2.3 应用效果

针对立卧转换机床加工的4种主要零件类型,自主设计了相应的工艺夹具(见表4),构建了高效装夹系统。配合相应的高效加工策略,能显著缩短装夹时间,达到减少生产准备时间的目的。

如果科学合理地安排好其他诸如生产任务、材料供应、人员安排等加工资源,结合机床平台自动交换功能,在零件加工的同时,进行着装夹准备工作,完全可以实现设备的高效利用。生产实践证明,在高效装夹系统的支持下,设备利用率有了明显提高。

表4 高效装夹系统匹配表

零件类型	平板类	接头类	侧梁类	盒类
工艺夹具	方箱形托盘	通用工装	通用工装	通用工装
高效策略	成组加工	大维度加工	大维度加工	大维度加工

3 结束语

在高效加工已成为现代航空制造业的重要趋势的今天,高效装夹作为高效加工技术的重要组成部分,是实现设备高效利用及施行高效加工方案的重要基础。

本文结合本单位生产实际,选取具有典型代表意义的立卧转换数控机床为平台,通过自主设计的工艺夹具,构建了一套高效装夹系统,配合相应的高效加工策略,充分发挥了立卧转换机床的效能,达到了减少装夹时间,提高装夹效率的目的,实现了设备高效利用的目标。相关研究方法及应用经验可推广使用。

参考文献

- [1] 张杰.提高企业数控加工效率的有效方法.机床与液压,2011,39(18):43-45.
- [2] 田辉,王俊斌.航空零件数控加工的特点.航空制造技术,2010(19):38-41.
- [3] 张凯,刘春时,李焱,等.一种卧式五轴加工中心的结构特点与技术性能.机械设计与制造,2011(12):201-204.
- [4] 梁斌,唐有康.普通物理学.北京:机械工业出版社,2009.
- [5] 胡益平.材料力学.成都:四川大学出版社,2010.

(责编 小城)

(上接第55页)

念,不能仅仅考虑基体材料、服役条件、服役环境等要素,应该在材料设计、加工阶段就要系统考虑表面工程技术设计及实现的要求,即应该树立表面工程全寿命周期设计的观点,这样材料才能达到表面加工处理的理想效果。

4.5 表面工程工艺装备、控制检测技术水平亟待提高

国内表面工程工艺技术装备制造水平、控制技术、检测技术与世界尚存在较大差距,如爆炸喷涂、超音速喷涂设备基本上还得依赖进口;CVD、PVD等工艺绝大部分都是在真空环境下进行的;国内真空炉的寿命、控制及仿真都无法与国外相比。近年,潘健生院士在真空热处理设备及仿真技术上取得了很大成功,但工程化还有一段距离;激光加工设备也是如此。这些高端工艺设备受到限制也是造成很多先进表面工程技术难以实现应用的因素之一。相信现在国内市场需求增大以及设备制造企业自主创新意识的提高,必将逐渐缩短与世界的差距。

5 结论

时代呼唤创新,我国的发展正需要科学技术的创新,作为体现国家制造业水平的航空发动机更需要创新。实践证明,现代表面工程技术及先进工艺在世界最先进航空发动机上作出了极大贡献,国内新一代航空发动机的研制也必将如此,这需要广大的表面工程科研人员、标准化人员、企业表面工程技术人员、产品设计员共同作出艰苦的努力。美国工程院在向美国国会提供的2000年前集中力量加强发展的9项新科学技术中,有关材料方面的仅有材料表面科学与表面技术研究,可见发达国家对表面工程技术的重视。近年来,我国航空也迎来了大发展的时代,相信表面工程在航空制造业中也将迎来大发展的春天。

参考文献

- [1] 马清林.春秋时期镀锡青铜器镀层结构和耐腐蚀机理研究.兰州大学学报,1999:67-72.
- [2] 李金桂.现代表面工程设计手册.北京:国防工业出版社,2000.
- [3] 师昌绪,徐滨士,张平,等.21世纪表面工程的发展趋势.中国表面工程,2001(1):2-7.
- [4] 徐明德,刘颖.金属腐蚀与防护标准手册.北京:中国环境科学出版社,1996.
- [5] 朱立群,吴俊,刘亚军,等.表面处理膜层憎水处理后耐腐蚀性能研究.腐蚀科学与技术,2002(5):302-304.
- [6] 潘健生.中国热处理亟待加强自主创新.机械制造与自动化,2009,38(3):1-9.
- [7] 涂铭旌,欧忠文.表面工程的发展及思考.中国表面工程,2012(2):1-5.

(责编 叶枫)