

激光制造技术 在航空领域中的应用

Application of Laser Manufacturing Technology in Aviation Industry

北京工业大学国家产学研激光技术中心 左铁钊 陈虹 张冬云 杨胶溪 鲍勇



左铁钊

教授, 博士生导师。第十届、十一届全国政协委员、国家产学研激光技术中心主任、中德激光技术中心主任、全国光辐射安全和激光设备标准化委员会副主任。主要研究方向: 现代激光制造技术; 能量光电子技术与系统; 激光微技术。左铁钊教授在德国负责完成了 13 项欧共体、德国科技部和德国工程师协会项目的科研任务; 回国后建立了国家产学研激光技术中心、激光工程研究院和中德激光技术中心。被北京市国际科学技术协会授予特别贡献奖。

众所周知, 人类文明进步的历史, 都是和制造技术的发展与进步紧密联系在一起。大功率激光以“光能源”和“光工具”作为新加工手段应用于材料加工, 扮演了一个创新尖

自上世纪 70 年代大功率激光器件诞生以来, 已形成了激光焊接、激光切割、激光打孔、激光表面处理、激光合金化、激光熔覆、激光快速原型制造、金属零件激光直接成形、激光刻槽、激光标记、激光掺杂等十几种应用工艺。

兵的角色, 代表了先进制造业的发展方向, 引领制造技术进入激光时代, 极大地提升了传统制造业的技术水平, 带来了产品设计、制造工艺和生产观念的巨大变革, 并正在引发一场制造技术的革命。

激光加工是继力加工、火焰加工和电加工之后的一种崭新的加工技术。它可以完善周到地解决不同材料的加工、成型和精炼等技术问题。小到计算机芯片、大到大型飞机和舰船, 激光制造都将是不可或缺的重要手段。自上世纪 70 年代大功率激光器件诞生以来, 已形成了激光焊接、激光切割、激光打孔、激光表面处理、激光合金化、激光熔覆、激光快速原型制造、金属零件激光直接成形、激光刻槽、激光标记、激光掺杂等十几种应用工艺。与传统的加工方法相比, 激光加工具有高能密聚焦、易于操作、高柔性、高效率、高质量、节能环保等突出优点, 迅速在汽车、电子、

航空航天、机械、冶金、铁路、船舶等几乎包括了国民经济的所有领域得到广泛应用, 被誉为“制造系统共同的加工手段”。

我国是一个制造大国, 现代激光制造技术的研究、开发、应用及产业化对国民经济发展具有现实的重要意义。但是我国总体技术水平还比较落后, 要成为世界制造大国, 光依赖人力资源优势是不行的, 先进的制造技术才是我国成为世界制造业中心和制造强国的关键。发达国家的实践已经证明, 激光制造技术在改造和提升传统产业和发展高新技术产业上都起着前沿开拓者的作用, 在 21 世纪经济可持续发展中占有重要地位, 将对我国航空领域的发展产生深刻影响。

激光连接技术
在航空领域中的应用
激光连接技术主要是指激光焊

接技术。在 20 世纪 70 年代之前,由于没有高功率连续激光器件,因此研究的重点是脉冲激光焊接,应用于小型精密零件的点焊,或者由单个焊点搭接而成的缝焊。1971 ~ 1972 年,随着数千瓦 CO₂ 激光焊接试验的报道,情况发生了根本性的变化;几毫米厚钢板能够一次性完全焊透,所得焊缝与电子束焊接相似,显示出了高功率激光焊接的巨大潜力。

随着激光制造技术的发展,桥梁、船舶等结构都由传统的铆接工艺发展到采用激光焊接技术,但先进的激光焊接技术难以在飞机制造中广泛地应用。长久以来,飞机结构件之间的连接一直采用落后的铆接工艺,主要原因是飞机结构采用的铝合金材料是热处理强化铝合金(即高强铝合金),一旦经熔焊后,热处理强化效果就会丧失,而且晶间裂纹难以避免。因此,普通氩弧焊等熔焊方法在飞机铝合金件制造中的应用成为禁区。另一方面,在 80 年代初,铝及其合金的激光加工十分困难,被认为是不可能的。主要是由于铝合金对波长 10.6 μm 激光的高反射和自身的高导热性。当时,激光加工主要使用波长为 10.6 μm 的 CO₂ 激光器,而铝对 CO₂ 激光的反射率高达 97%,通常作为反射镜使用。但是,激光加工的优越性又极大地吸引着从事激光材料加工的科研工作者。为此他们付出了大量的时间和精力来研究铝合金激光加工的可能性。

目前,高强铝合金激光焊接成果已经成功应用于欧洲空中客车公司的飞机制造中,其铝合金内隔板均采用激光加工,实现了以激光焊接取代传统铆接工艺。激光焊接技术的采用,大大地简化了飞机机身的制造工艺,使机身重量减轻 18%,成本下降 21.4% ~ 24.3%,被认为是飞机制造业的一次技术大革命。空客 A380 的制造就采用了激光焊接技术。德国政府 2006 年公布的科技发展计划

中将激光焊接技术列为航空工业两大尖端发展技术之一。

激光分离技术在航空领域中的应用

激光分离技术主要指激光切割技术和激光打孔技术。激光分离技术是将能量聚焦到微小的空间,可获得极高的辐照功率密度($10^5 \sim 10^{15} \text{W}/\text{cm}^2$),利用这一高密度的能量进行非接触、高速度、高精度的加工。在如此高功率密度的光照射下,几乎可以对任何材料实现激光切割和打孔。激光切割技术是一种摆脱传统的机械切割、热处理切割的全新切割法,具有更高的切割精度、更低的表面粗糙度值、更灵活的切割方法和更高的生产效率等特点。激光打孔方法作为在固体材料上进行孔加



工的方法之一,已成为一项拥有特定应用的加工技术,主要应用在航空、航天与微电子行业中。

激光切割技术在航空领域中主要用于航空发动机、涡轮叶片的激光打孔,航空发动机的激光切割等方面。

激光成形技术在航空领域中的应用

快速成形技术是基于离散-堆积成形原理的成形方法,由产品三维 CAD 模型数据直接驱动,组装(堆积)材料单元而完成任意复杂的三维实体(不具有使用功能)的技术总称。激光近形制造是基于局域送粉

的金属零件快速制造方法,它是在激光涂覆技术的基础上发展起来的。激光涂覆的目的是通过在被加工工件的表面熔覆功能层,来提高工件的耐磨性和抗腐蚀能力,常用于零件或者模具的修复。为了实现修复,补充缺损的材料,常常进行多层加工,在此基础上形成了激光生长技术。

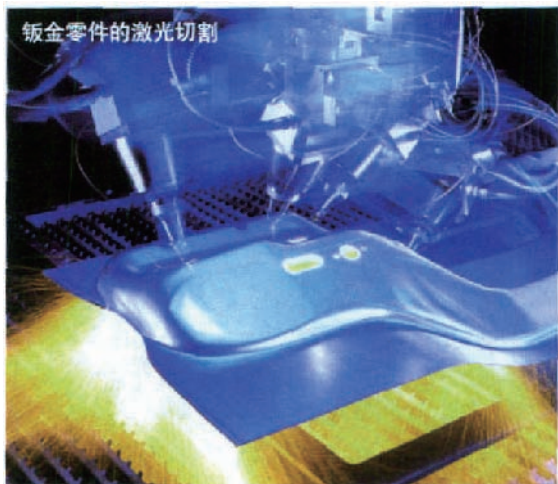
激光近形制造技术在航空领域的应用直接体现在航空用钛合金结构件的直接制造以及航空发动机零件的快速修复方面。2001 年在美国国防部的支持下激光近形制造技术由技术研究转化为装机应用,应用在 F/A-18E/F、F-22、JSF 等先进歼击机上。2002 年以来激光近形制造技术成为美国航空航天国防武器装备大型钛合金结构件的核心制造新技术之一。在 F-22 中钛合金结构

件用量占机身结构重量的 41%,先进航空发动机中钛合金占发动机重量的 25% ~ 40%。钛合金用量的高低已经成为衡量飞机、发动机等国防装备先进性的重要标志之一。由于大型钛合金结构件的传统制造方法具有成本高、锻造模具准备时间长、大型以及超大型工业设施(高吨位水压机以及超大型自由锻造设备等)匮乏、数控加工设备稀缺、机械加工量大、材料利用率低等缺点,因此采用激光近形制造技术直接制造大型钛合金结构件显示了巨大的优势。

在航空发动机零件的快速修复方面,LENS 技术也发挥了极大的优势。例如美军在恶劣的沙漠环境中

使用直升机,由于发动机上很多带叶片的叶轮受到沙粒侵蚀,使直升机的飞行寿命锐减。叶轮的侵蚀不仅降低了发动机的飞行寿命,还导致燃料消耗增加、马达动力减弱、工作温度

不同之处在于,SLM过程中金属粉末完全熔化以及该过程使用的金属粉末为单组元粉末材料,生成的模型或零件的致密度约为100%。该制造方法更加适合制造形状复杂、尺寸较小的精密零件,特别是具有中空结构的零件。采用该方法制造的具有中空结构的铝合金、钛合金以及镍基合金的模型说明了该制造方法在航空领域的应用潜力。



激光表面技术

在航空领域中的应用

采用 10^3 W/cm^2 以上功率密度的激光高能束流集中作用在金属表面,通过表面扫描或伴随有附加填充材料的加热,使金属表面由于加热、熔化、汽化而产生冶金、物理、化学或相结构的转变,达到了金属表面改性的目的,这种加工技术称为激光表面(处理)技术。

激光熔覆是一种重要的材料表面改性技术,亦被称为激光镀覆或激光表面硬化。它是以高能量密度的激光为热源在基材表面熔覆一层熔覆材料,使之与基材实现冶金结合,在基材表面形成与基材具有完全不同成分和性能的合金层的表面改性方法。近年来激光熔覆修复技术逐渐发展成为一种新型的先进制造技术。该技术集快速原型制造技术及激光熔覆表面改性技术于一体,可实现三维金属零件的修复而无需工模

升高以及压气机和涡轮零部件的损害。如果更换整个叶轮,成本将非常昂贵。为此美军引入了 LENS 技术对破损的零部件进行修复。据报道,采用传统方法修复一个直升机发动机大约需要 11 万美元,而采用激光直接制造技术进行修复大约只需要 500 美元,且修复部分的材料耐磨性能优于原始材料,可以延长发动机的使用寿命,减少检修频率。美军运用 LENS 技术修复涡轮发动机的零部件,包括涡轮转子、密封转轮、间隔压气机、导向器叶片、压气机定子、压气机叶片等。LENS 系统能够在很短时间内修复用常规方法无法修复的高温合金破损零部件。

SLM 技术是基于粉末床的金属零件快速制造方法,与 SLS 技术的

具。

激光熔覆的第一项工业应用是 Rolls Royce 公司 1981 年对 RB211 涡轮发动机壳体结合部件进行硬面熔覆。表 1 所示为激光熔覆技术的工业应用实例。

在航空领域,航空发动机的备件价格很高,因而在很多情况下维修零件是比较划算的。但是修复后零件的质量必须满足安全要求。例如,飞机螺旋桨叶片表面上出现损伤时,必须通过一些表面处理技术进行修复。除了考虑螺旋桨叶片所要求的高强度、高耐疲劳性,还必须考虑表面修复后的耐腐蚀性。选择一种合适的表面处理技术对螺旋桨叶片进行修复,对节省装备维护费用、提高装备使用寿命具有很重要的意义。激光熔覆技术可以很好地用于发动机叶片激光三维表面熔覆修复。

国家产学研激光技术中心一直关注激光熔覆技术及其相关外围系统的研制和开发,目前已经在钢铁冶金领域激光熔覆高速线材轧辊方面取得了突破性进展,开发了具有自主知识产权的激光宽带熔覆送粉头及积分镜。

结束语

本文介绍了激光连接技术、分离技术、成形技术以及表面技术在航空领域中的应用。目前工业领域逐渐呈现出轻型、环保和循环发展的趋势,我国今年积极启动了自己的大飞机项目计划,激光制造技术在国防和航空航天领域的产业化应用前景

远大。另外,激光制造系统也向着小型化、高转换效率与集成化方向发展,我国激光制造技术将继续发挥效率高、能耗低、流程短、性能好、数字化、智能化的优势,形成我国新一代激光制造产业链。

(责编 侧卫)

表1 激光熔覆技术工业应用实例

熔覆部件	熔覆合金(粉末)	方式
涡轮机叶片 / 壳体结合部件	钴基合金	送粉熔覆
涡轮机叶片	PWA694, Nimonic	预置粉末
海洋钻井和生产部件	Stellite, Colmonoy 合金和碳化物等	—
阀体部件	—	送粉熔覆
阀杆, 阀座	铸铁, Cr, C, Co, Ni, Mo	预置粉末
涡轮机叶片	Stellite, Colmonoy 合金	预置粉末和重力送粉熔覆