



作者简介：张人佺，男，1944年生，毕业于北京大学。现任清华大学机械工程系教授、博士生导师。主要从事快速成形制造技术和生物制造工程的研究工作，发表论文200多篇，著书3部。

我国快速模具（RT） 技术的发展与展望

清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室（100084） 张人佺 林峰 颜永年

1.前言

20世纪80年代起，我国开始自主研发快速经济模具（主要包括Bi-Sn系低熔点合金和中熔点Zn基合金），在许多新产品的开发试制方面取得了明显的社会效益和经济效益。当时，由于我国整体工业化的水平比较低，因此，多强调模具要便宜，即强调其经济性，至于其快速性则没有过多的要求。为了使模具尽量造价低廉，因此往往牺牲了它们的精度和使用寿命。快速经济模具始终不能进入模具制造的主流。

20世纪80年代后期，随着制造业的信息化，国际上出现了一种新的先进成形制造技术——快速原型制造（RPM, Rapid Prototyping Manufacturing），或者简称为快速成形（RP, Rapid Prototyping）。这种技术将计算机辅助设计、辅助制造、数字控制、精密伺服驱动和新材料等先进技术集于一体，依据产品的三维设计模型，分层切片得到各层截面的轮廓，并通过激光粘结或热熔得到各截面的轮廓并逐步形成三维产品。它成功地实现了原型制造的自动化，极大地提高了原型的生产效率和制造柔性。近年来，RP领域开始注重于直接制造金属零件，即由RP向快速制造（RM, Rapid Manufacturing）的方向发展。

基于RP原型，可以快速复制复杂形状的模具，这种新型技术称为快速模具（RT, Rapid Tooling）技术，这是RP技术的主要应用领域。根据国外统计，快速模具技术只需要传统加工方法30%~50%的工时和20%~35%的成本，就能直接制造产品的试制模或用于批量生

产的金属模具。快速模具技术目前已广泛地应用于机械、电子、汽车、航空和航天等领域，随着该项技术的日臻完善，它正在受到普遍的重视。

近年来，发展出多种快速模具制造新技术。这些新技术共同特点在于：技术先进，成本低廉，设计制造周期短，精度适中。现已可做到对复杂的型腔曲面无需数控切削加工便可制造出相关的模具。快速模具可分为金属模具和非金属模具两大类，金属模具又可分为直接制造或间接制造两类。模具材料采用金属材料，带来了RP工艺的极大进步，所以，在许多论著中，金属模具的快速制造也归为RM的一个重要方面，有许多深入的讨论。

国际上，发达国家的许多公司和科研机构都在致力于快速模具技术的研究。随着RP精度的提高，所用材料性能的完善，直接制造金属模具正在成为现实。特别是由于某些RP工艺的成形精度已达到数控加工的水平，因此直接制造RP金属模具成为最被看好的先进技术。但是实际上，快速生产金属模具对RP技术的要求是全面的，即对其强度、刚度、耐温性、抗蚀性及精度等均有较高的要求，特别是所采用的计算机软硬件水平的要求很高，所以大规模推广应用还有较长的道路需走。这将成为RP技术发展新的重要推动力。直接金属成形的研究与开发正在迅速发展，至2007年，世界上已有十余家专业公司从事直接金属成形设备的研发，并已有商品出售。其中，金属模具直接快速制造是非常重要的应用方向，为这些设备商所极为关注。

我国自20世纪90年代初起即进入到RP的研究领域。国内清华大学、华中理工大学、西安交通大学、北京隆源公司、山东烟台机械工艺研究所等单位都开展了快速模具技术的研究,形成了铸造法、热喷涂法、粉末直接成形法、熔融沉积法、电铸法等技术。制造的模具包括树脂模、硅胶模、金属模,锌合金涂层快速软模和不锈钢(或硬质合金)涂层快速金属硬模等。这些模具各具特点,满足了不同使用条件的模具的需要,特别是产品的试制模具向快速化的方向,在汽车工业中取得了明显的经济效益。

为了促进RP新技术、新装备的研究与开发,我国与主要发达国家一样成立了RP学会等学术组织。1998年起,成立了全球RP协会联盟(GARPA, Global Alliance of Rapid Prototyping Association),每年举行最高峰会议,进行深入的研讨。近年来,我国学者在RP学术研究方面十分活跃,不仅参加了GARPA的发起成立,而且积极参加各项RP技术的学术活动,还举办了多次RP技术的国际会议与全国性会议。目前的趋势是这类会议吸引了越来越多的生产单位积极参与,研究成果开始产生效益。

2. 各种基于RP的RT技术

这里介绍经常用于金属型及非金属型RT的各种技术,详细情况可以参阅《中国材料工程大典》第25卷。

(1) 直接金属激光选区烧结(SLS) 目前,直接获得金属件最成功的方法仍是激光选区烧结(SLS)。最有代表性的是美国3D Systems公司采用的将金属粉末和有机黏结剂相混合后的粉末烧结技术和EOS公司采用的将多种熔点不同的金属粉末组成的混合粉末烧结技术。国内北京隆源公司、华中理工大学及北方恒利公司等开展了类似的研究和成功的商品化工作。北京隆源公司利用特种蜡基材料制造出可用于消失模铸造的原型件,在国防工业上获得了广泛的应用。

(2) 激光选区熔化(SLM) 德国Fraunhofer研究所、德国MCP公司、德国TRUMPF公司、比利时Leuven大学以及英国利物浦大学开展了SLM工艺的研究。其工作原理与激光选区烧结技术类似,不同的是采用低功率激光器对金属粉末进行熔化成形,以达到比较致密的金属零件。该技术中由于熔化部分不存在固相成分,表面张力很容易导致熔化金属“聚球”,这对材料成分、工艺参数及扫描策略都提出了特殊的要求,必须通过对材料参数、工艺参数和扫描方式的严格控制,才

可以使“聚球”现象得到消除。国内华南理工大学、南京航空航天大学、四川大学等单位也在从事该项技术研究。

(3) 激光近净成形(LENS) LENS技术是无需后处理的金属直接成形方法,可适应多种金属材料的成形,成形得到的零件组织致密,具有明显的快速熔凝特征,力学性能很高,并可实现非均质和梯度材料零件的制造。它由美国Sandia国家实验室的David Keicher发明,并由Optomec Design公司于1997年开始商业化运作。该工艺将Nd:YAG激光束聚焦于由金属粉末注射形成的熔池表面,而整个装置处于惰性气体保护之下。通过激光束的扫描运动,使金属粉末材料逐层堆积,最终形成复杂形状的零件或模具,已经制造出铝合金、钛合金、钨合金等半精化的毛坯,其精度已超过传统闭式模锻的水平,而质量也达到甚至超过整体锻压所达到的金属内部质量,在航天、航空、造船及国防等领域具有极大的应用前景。

(4) 电子束选区熔化(EBM) 利用电子束选区熔化金属粉末成形称为电子束熔化(EBM)工艺。早在1995年,美国麻省理工学院的V. R. Dave、J. E. Matz和T. W. Eagar就提出了一种利用电子束将金属熔化进行三维制造的设想。2001年,由瑞典Arcam公司申请专利并进行商业化运作。利用金属粉末在电子束轰击下熔化的原理,先在铺粉平面上铺展一层粉末;然后,电子束在计算机的控制下按照截面轮廓的信息进行有选择的熔化,金属粉末在电子束的轰击下被熔化在一起,并与下面已成形的部分粘接,层层堆积,直至整个零件全部烧熔化完成;最后,去除多余的粉末便得到所需的三维产品。我国清华大学研制出相关的设备(SEBM 150,I),并开展了高温合金等粉末成形的工艺研究,在确定工艺参数及参数控制等方面取得了新的进展。

(5) 电子束自由制造(EBF3) 2002年,美国航空航天局(NASA)兰利研究中心(Langley Research Center)的Karen M. B. Taminger和Robert A. Hafley提出了另一种电子束制造技术EBF3,其原理为将金属丝材熔化后逐层沉积成形,能制备出高性能的金属零件,材料利用率也较高,但是由于送丝机构和X-Y运动平台的存在,使得真空室的尺寸较大,从而造成设备昂贵,前期投入大。EBF3的重要应用是空间零部件或空间结构的在地(ground-based)或在轨(on-orbit)修复与制造,特别是航空航天铝合金零部件的修复与制造。

Extrude hone (ProMetal)、Therics等公司已经开始将此项技术实用化。

(6) 高熔点材料等离子熔射 等离子熔射技术可以使高熔点合金材料迅速熔化,在覆盖件模具的表面快速制得一层硬质耐磨的金属涂层,而心部只用抗压材料,则可大大提高制模速度,降低成本,使“好钢用在刀刃上”,从而获得极大的经济效益。国内华中理工大学开展了多项研究,对原型制作、不同材料的熔射工艺、加衬补强的材料配方及工艺进行了探讨,并对这种方法制造的模具进行了评估。他们以熔射不锈钢粉末形成的涂层为工作层,以树脂为补强材料,通过涂层的转移与结合而制作的模具,具有表面硬度高、质量好、经济耐用、制作简单等特点,适用于汽车、摩托车等新产品试制及改型换代、中小批量生产,具有广阔的应用前景。

(7) 三维印刷(3DP) 美国麻省理工学院(MIT)在完成3DP工艺原理性研究后,自20世纪80年代末起先后将其授权给多个公司在不同的应用领域进行应用和后续研究与开发。这些公司包括:Soligen公司(DSPC技术)、Z Corp.公司、TDK公司、Specific Surface公司、Metal Matrix Cast Composites公司等。基于3DP工艺,利用喷头有选择地向金属粉末喷射黏结剂,金属粉如不锈钢、碳化钨等,在保证金属粉对所喷射的化学黏结剂具有较好的湿润性的条件下,利用黏结剂使金属粉末成形。这种低密度的(约50%)成形件经去除黏结剂和渗铜处理,便可得到致密度达到92%以上的模件。对其表面进行抛光打磨处理后可作模具使用。其典型过程是:①通过3DP工艺使粉末与黏结剂成形。②焙烧成形件以增强其强度。③通过利用低熔点合金浸润焙烧件转变成致密件。

(8) 熔融沉积制造(FDM) 熔融沉积制造工艺的基本特征是用热熔塑性材料在其熔融温度下靠自身的黏接性逐层堆积成形。在成形过程中,材料以较低的速度连续地挤出喷嘴,零件是由丝状材料的受控积聚逐步堆积成形的。熔融沉积制造(FDM)技术首先由美国Stratasys公司开发成功的,有多种型号的商用机器。国内殷华公司等研究开发成功了商品化设备,并自参加了1997年起参加了多次国际机床展。美国Stratasys公司开发出能用FDM工艺成形的金属材料,将金属粉与黏结剂混合均匀,然后挤压成具有足够弯曲强度和黏着度的丝,供FDM设备成形使用,制造出不锈钢、钨及碳

化钨材料的零件。美国Stratasys公司和国内殷华公司使用高强度的聚碳酸酯(PC)丝材,并采用高温喷头,也制造出了高强度、高性能的功能零件。例如,美国一家公司采用Stratasys公司的FDM Titan设备和PC线材制造的带轮代替生产线上破损的铝制带轮,带轮能正常运行。

(9) 无模铸型快速制造(PCM) 无模铸型快速制造(PCM)是具有我国自主知识产权的新技术,将所需要的金属零件CAD数据,通过计算机转换成铸型的CAD,经过分层制造直接制出铸型,完全替代传统铸造工艺中的模具制作,提高功效几倍至几十倍,能够快速、柔性、准确地制造内腔、表面复杂的铸件,特别适合单件、小批量、形状复杂的大中型铸件的生产以及新产品的试制。佛山市峰华自动成形装备有限公司生产的PCM-1200型设备的扫描速度达600mm/s,最大成形尺寸为1200mm×1000mm×750mm,铸件尺寸精度优于CT9,可广泛应用于装备制造业等行业,尤其适用具有自由曲面的模具毛坯的生产。与国外同类设备相比,性能相近,价格仅为其1/5,性价比优势明显。

3.我国发展RT技术的展望

基于RP的RT技术,在我国已经有长足的发展,为了尽快在生产实际中获得应用,提出如下几点需给予突出的关注。

(1) RT与模具信息化同步发展 模具生产企业面临信息化的企业升级的新局面。基于RP的RT由于与计算机技术密切相关,因此其信息化应当相对较好。但是,实际情况并非如此。国内的模具企业大多数为中小型企业,生产管理落后,也还没有专营RT的企业。在市场竞争日益剧烈的年代,客户对模具的交付期要求越来越短,模具价格不断走低,只有运用信息化管理手段整合企业资源,在生产中尽量采用计算机技术,是国内RT模具企业面临的崭新课题。

(2) 建立快速模具制造集成系统 以计算机技术为代表的信息技术的发展给传统的制造业带来了新的生机和活力,中小批量乃至单件生产成了重要生产模式,产品生命周期越来越短,对瞬息万变的市场迅速作出快速反应往往成为产品竞争成败的第一要素。因此,建立快速模具制造集成系统,不仅可以使企业能根据市场的要求快速设计出新产品,而且能尽快地制造出样品,进行必要的性能测试,征求用户意见进行修改,最后形成投放市场的定型产品。例如,在嘉陵集团就初步建成

(下转第70页)

有的金属特性,可利用不同电极材质的选择就能生成耐磨性、耐剥离性、润滑性、耐热性、热传导性等各种不同功能的被膜。

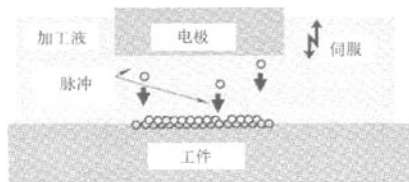


图13 表面处理的原理

这种表面处理技术还具有以下的特点

- (1) 通过调整电极的不同形状能在所要求的部位上形成准确的被膜形状,无需作加工前后的处理工作。
- (2) 基本上是在原有的电火花加工机上进行操作,跟个人的加工技能无关,能确保稳定的加工质量。
- (3) 以原有的电火花加工机床为基础,设备的规模比较小,可在生产上应用。

随着喷气式发动机高性能化的要求,已将这项电火花表面处理技术具体用于发动机机翼的修复加工(如图14、图15)。开发者认为作为一种革新技术将会在各种零件上获得推广应用。

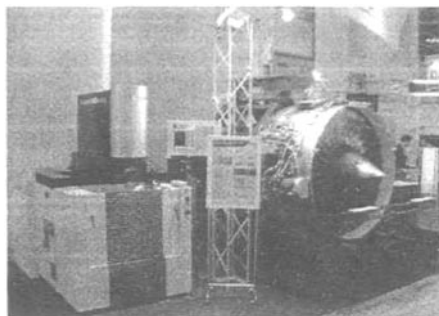


图14 MSCoating喷气发动机

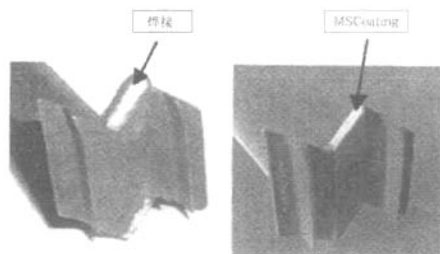


图15 发动机翼的应用实例

MW (待续)

(上接第64页)

这样的制造系统,它与计算机辅助工程(CAE)相结合,在生产实际中起到了很好的作用。

(3) RT与高速铣技术相结合 随着高速铣(High Speed Milling, HSM)技术的发展,设备的转速越来越快,加工的成本越来越低,对RT的“快速”提出了挑战。例如,原来许多汽车模具可通过RT来进行,现在则改用可加工塑料由高速铣获得原型,再通过消失模铸造得到金属模具。但是由于RT“离散/堆积”的特殊成形思想,它拥有能同时处理多种材料和复杂结构的功能,使得其成为制造领域的一个独特分支,RT终究有其存在的价值。当前,应当将RT和HSM技术相结合,由RT获得毛坯,再由HSM精加工最终成形,可以使得生产效率提高,成本降低,更好地发挥各自的技术优势。事实上,国内外已经出现了RM-HSM集成的设备。

(4) 大型快速模具原型件的分割与拼装 在生产实际中经常遇到大型、超大型零件的情况,因此需要相应的大型、超大型模具。在国家“十五”攻关计划《精密制造与数控关键技术研究和应用示范》项目的支持

下,清华大学和西安交通大学开展了大型、精密快速原型的制造工艺的研究,取得了阶段性的成果。一方面,可以通过研制大型RPM系统,制造出大型、精密无拼接的RP原型;另一方面,也可以对大型、超大型原型件进行分割与拼装,在计算机技术的支持下,可以使得原型件的精度大大提高,从而保证RT模具具有相应的精度。

(5) RT与虚拟现实(VR)技术相结合 虚拟现实(Virtual Reality, VR)对于制造业而言,显示出越来越大的重要性,受到人们的关注。实际上,利用VR快速地获得产生于人们头脑思维的虚拟零件,再利用RT快速地获得模具以实际制造出零件,不仅不会对头脑中的虚拟原型造成妨碍,而且还有助于人们的思维活动。随着RP技术的发展和广泛应用,人们意识到物理原型在产品开发过程中是不可替代的,而虚拟原型的用处也很大。2003年,在葡萄牙召开了第一届虚拟原型和快速原型国际学术会议,取得很大的成功。此后,每年均召开会议,逐渐变为常设的国际会议,表明RP+RT与VR之间完全可以相辅相成。MW