

高速电弧喷涂成形 基础

Fundamentals of
high velocity arc spray forming

陈永雄 徐滨士 梁秀兵 © 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

高速电弧喷涂成形 基础

Fundamentals of
high velocity arc spray forming

陈永雄 徐滨士 梁秀兵 © 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

高速电弧喷涂成形基础 / 陈永雄, 徐滨士, 梁秀兵著. —北京: 知识产权出版社, 2015.1
ISBN 978-7-5130-3049-6

I. ①高… II. ①陈… ②徐… ③梁… III. ①电弧喷涂 IV. ①TG174.442

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第229570号

内容提要

金属快速成形技术克服了传统加工工艺的缺陷,为制造业的发展打开了新的道路,被认为是“21世纪的维修技术”。本书总结了高速电弧喷涂成形技术的最新研究结果,系统深入地论述了电弧喷涂成形中喷涂射流雾化沉积、成形涂层温度场与残余应力分布、喷涂成形工艺的优化设计等前沿性关键问题,建立了雾化粒子飞行、熔滴沉积、涂层形成一系列过程的相关数学模型,研究了其中的传热、传质及应力行为,并在上述研究基础上,结合系统集成和工艺优化,进行了高熔点材料的厚成形试验。为电弧喷涂高熔点材料的高性能快速成形与再制造提供了重要的理论基础和工艺指导,具有重要的参考价值。

本书可供快速成形与再制造领域的科技人员研究参考,也可作为材料成型及控制工程、材料加工工程等专业方向本科生、研究生的参考教材。

责任编辑: 彭喜英

高速电弧喷涂成形基础

GAOSU DIANHU PENTU CHENGXING JICHU

陈永雄 徐滨士 梁秀兵 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

电 话: 010-82004826

社 址: 北京市海淀区马甸南村1号

责编电话: 010-82000860 转 8539

发行电话: 010-82000860 转 8101 / 8539

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司

开 本: 720mm×1000mm 1/16

版 次: 2015年1月第1版

字 数: 190千字

网 址: <http://www.ipph.cn>

<http://www.laichushu.com>

邮 编: 100088

责编邮箱: pengxyjane@163.com

发行传真: 010-82000893 / 82003279

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

印 张: 11

印 次: 2015年1月第1次印刷

定 价: 48.00元

ISBN 978-7-5130-3049-6

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

前 言

为了节约社会资源,延长机械零部件的服役寿命,绿色制造和再制造工程技术在现代工业中备受关注。电弧喷涂作为再制造工程的关键技术之一,在零件的快速成形与再制造领域展现出较大的应用潜力。《高速电弧喷涂成形基础》是在装甲兵工程学院2013年全国优秀博士学位论文(提名奖)《自动化高速电弧喷涂碳钢涂层厚成形的数值模拟与试验》的基础上,并补充近两年来关于成形材料和成形理论等方面的研究成果,重新组织撰写的。

全书以高速电弧喷涂成形技术涉及的工艺、材料和设备等关键问题为主线,共分7章,第1章主要叙述了高速电弧喷涂成形技术及其相近技术的研究与应用现状、电弧喷涂成形的关键技术;第2章通过CFD数值分析技术模拟了电弧喷涂的气体喷射、熔滴雾化飞行及单个熔滴扁平化沉积等系列过程;第3章通过建立一种热喷涂大量粒子随机、动态沉积的有限元模型,模拟了电弧喷涂层的形成及其瞬态传热行为;第4章基于喷涂成形过程的应力分析,建立了多个薄层连续叠加形成涂层这一过程的残余应力弹塑性预测模型及轴类件涂层的有限元模型;第5章论述了高速电弧喷涂成形所需的高性能自动化喷涂设备和成形工艺优化过程;第6章论述了适合于高速电弧喷涂厚成形的典型喷涂材料及其涂层的组织性能特点;第7章在前述研究内容的基础上,总结了自动化高速电弧喷涂厚成形试验的研究结果。本书的内容为装备零件的快速成形与再制造提供了理论支持,也为其他热喷涂成形技术等相关研究领域开辟了新的视角,展现了广阔的研究和应用空间。

本书是由陈永雄主笔,在徐滨士院士和梁秀兵研究员指导下完成的。全书特请装甲兵工程学院焊接专家张平教授审阅,另外,也得到了魏世丞研究员等人的帮助,著者深受教益,在此表示诚挚的谢意。本书的研究成果得益于国家科技支

撑项目（2006BAF02A19）和国家自然科学基金项目（批准号：51105377，51375492）等项目。值本书出版之际，向科技部、国家自然科学基金委等部门和单位表示衷心感谢。同时，向书中参考文献的作者致以敬意。限于著者水平，书中难免存在不足之处，恳请读者指正并提出宝贵意见。

著 者

2014年6月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 技术背景	1
1.2 金属喷涂快速成形技术研究应用现状	3
1.2.1 快速成形技术的基本原理	3
1.2.2 近终喷射成形技术	4
1.2.3 等离子喷涂快速成形技术	4
1.2.4 电弧喷涂成形技术	4
1.3 电弧喷涂快速成形技术发展现状	5
1.3.1 快速模具制造	5
1.3.2 电弧喷涂快速成形系统	7
1.4 电弧喷涂快速成形关键技术	8
1.4.1 喷涂材料	9
1.4.2 电弧喷涂快速成形工艺	12
1.5 研究内容	15
第 2 章 电弧喷涂成形熔滴雾化与沉积	18
2.1 引言	18
2.2 高速电弧喷涂雾化气体的流场分析	19
2.2.1 喷涂气流场的数值建模与求解	19
2.2.2 计算结果与分析	21
2.3 雾化粒子的飞行行为	27
2.3.1 雾化熔滴飞行模型的建立与求解	27
2.3.2 计算结果与分析	29
2.3.3 电弧喷涂粒子雾化性能的试验	31
2.4 高速电弧喷涂弧区动态行为	32

2.4.1	弧区动态行为高速摄像试验方法	32
2.4.2	喷涂电弧的形成分析	33
2.4.3	阴阳极丝材熔化与熔滴过渡行为	36
2.5	飞行熔滴沉积与凝固过程的分析	37
2.5.1	熔滴沉积模型建立与求解	38
2.5.2	计算结果与分析	40
2.6	小结	49
第 3 章	涂层形成过程及其瞬态热传输行为	51
3.1	引言	51
3.2	有限元建模	52
3.2.1	控制方程与边界条件	52
3.2.2	有限元计算法则	54
3.2.3	逐层叠加模型	55
3.2.4	随机沉积模型	56
3.2.5	实例研究	57
3.3	有限元分析结果与讨论	59
3.3.1	逐层叠加模型与随机沉积模型之间的比较	59
3.3.2	喷枪移动速度对传热的影响	63
3.3.3	间歇喷涂模式对传热的影响	64
3.4	成形过程中温度变化行为的试验研究	65
3.4.1	试验方法	65
3.4.2	红外测温结果与分析	67
3.5	小结	69
第 4 章	电弧喷涂成形涂层的残余应力	71
4.1	引言	71
4.2	涂层沉积导致的骤冷应力解析模型	72
4.2.1	沉积第一薄层后的应力	73
4.2.2	沉积第二薄层后的应力	76
4.2.3	沉积第 n 薄层后的应力	78
4.3	涂层冷却导致的热应力	80
4.4	总体残余应力	81
4.5	考虑相变时的残余应力	82

4.6	实例分析	83
4.6.1	NiCoCrAlY 涂层残余应力分析	84
4.6.2	高碳钢涂层残余应力分析	88
4.7	轴类涂层零件残余应力的有限元分析	92
4.7.1	问题的描述及有限元模型	92
4.7.2	涂层温度分布	94
4.7.3	残余应力分布	95
4.8	小结	97
第 5 章	自动化高速电弧喷涂系统与工艺	100
5.1	引言	100
5.2	机器人自动化高速电弧喷涂系统的开发	101
5.2.1	设计方案	101
5.2.2	开发流程	102
5.2.3	自动化电弧喷涂系统作业过程	104
5.3	喷涂参数的均匀-正交优化设计	105
5.3.1	试验方法	105
5.3.2	喷涂参数与粒子飞行状态的关系	106
5.3.3	喷涂参数与涂层残余应力的关系	108
5.3.4	喷涂参数与涂层组织结构的关系	109
5.4	喷涂成形路径的优化设计	111
5.4.1	喷枪平行移动偏移间距的确定	112
5.4.2	典型喷涂路径的优化	118
5.5	小结	122
第 6 章	高速电弧喷涂成形典型材料及性能	124
6.1	引言	124
6.2	热处理对高碳钢喷涂层组织性能的影响	125
6.2.1	试验材料与方法	125
6.2.2	热处理对涂层显微硬度的影响	126
6.2.3	热处理对涂层组织结构的影响	127
6.3	高碳钢+Al 复合喷涂层的组织性能	134
6.3.1	试验方法	135
6.3.2	喷涂后 Fe/Al 复合涂层的组织结构	136

6.3.3 热处理后 Fe/Al 复合涂层的组织性能	139
6.4 小结	143
第 7 章 高速电弧喷涂厚成形试验	145
7.1 引言	145
7.2 试验材料及方法	145
7.3 高碳钢电弧喷涂厚成形	146
7.4 电弧喷涂厚成形高碳钢+Al 复合涂层	149
7.5 小结	151
参考文献	152

第1章 绪 论

1.1 技术背景

金属快速成形技术 (Rapid Prototyping, RP) 是以生成最终金属零部件或模具为目标, 采用离散、堆积的成形思想和制造工艺, 使计算机中的几何模型直接转化为三维立体原型的先进制造技术^[1-3]。该技术克服了传统加工工艺的缺陷, 为制造业的发展打开了新的道路, 被认为是近 20 年来制造领域内的一次重大突破, 在世界范围内得到了迅速发展^[4-9]。而且, 金属快速成形技术已经扩展到装备快速修复保障领域, 并被认为是“21 世纪的维修技术”。美国、德国、加拿大等国均大力投入了快速成形技术应用于装备维修的研究与开发。例如, 美国已初步建立了基于快速成形技术的可以实现野外快速直接成形金属零件、进行装备快速保障的“快速制造系统”。这是一种新型的野外快速制造平台, 它集成了先进的金属零件快速成形技术、自动控制技术、新材料技术、信息技术等多种高新技术。该平台是一个能够在野外迅速生产零件的机动式制造系统。采用“快速成形制造系统”后, 保障人员将携带罐装的金属粉末等原材料, 一旦出现紧急的零件需求, 可在非常短的时间内采用激光熔覆等技术完成零件的制造, 大大减少零件采购和运输费用, 以及购买、储存和跟踪备件所消耗的时间。虽然目前的成形和制造工艺还不能完全满足美国对“快速制造系统”的最终要求, 但许多关键技术已取得突破。

为了充分利用能源和节约社会资源, 促进节能减排, 大力发展绿色制造业, 中国特色的再制造工程应运而生。再制造工程是以装备全寿命周期为指导, 以废

旧装备性能实现提升为目标,以优质、高效、节能、节材、环保为准则,以先进技术和产业化生产为手段,进行修复、改造废旧装备的一系列技术措施和工程活动的总称^[10]。所以,再制造是废旧装备高技术修复、改造的产业化。再制造工程作为我国新世纪以来发展的先进制造和绿色制造的新方向,以节约资源能源、保护环境为特色,以综合利用信息技术、纳米技术、生物技术、寿命预测技术等高科技为核心,充分体现了中国特色自主创新的特点。因此,再制造工程高度契合了构建循环经济和建设创新型国家的战略需求。

热喷涂表面工程技术是再制造工程的关键支撑技术之一,它可以制备出优于本体材料性能的表面功能薄层,在恢复零件尺寸的同时,进一步提升了零件的表面性能^[11, 12]。同时,它也是金属快速成形技术的一个重要部分,因其成形效率高、表面质量好、可实现近终成形等优势而备受青睐。因此,热喷涂技术是金属零件快速成形制造技术与先进再制造技术的整合体,在这样的背景下,通过研究该技术,构建适合于金属零件快速成形与再制造(修复)的综合平台,将具有十分重要的研究价值。其中,电弧喷涂工艺是利用两根连续送进的金属丝之间产生的电弧熔化金属,采用高压气流将其雾化成小熔滴并高速喷射至工件表面形成涂层的一种工艺。电弧喷涂技术具有设备简单、成本低、生产效率高、质量可靠等特点而被广泛用于制备各种功能薄涂层,尤其是应用在零件表面的防腐蚀和耐磨损领域^[7, 8, 13]。近年来,人们结合电弧喷涂技术的优势和金属液滴喷射快速成形的思想,提出一种电弧喷涂快速成形/再制造工艺,并展开了研究。与使用激光束、等离子束等高能束的快速成形技术相比,电弧喷涂快速成形技术使用丝材作为原材料,材料利用率和沉积效率都相对较高,如喷涂钢丝可达 16 kg/h ^[14],相当于粉末喷涂技术的4倍;同时,电弧喷涂设备相对简单,携带方便,特别适合于现场作业。

因此,如何有效地保证在野外条件下为损坏装备提供充足的备件供应,实现金属零件野外快速成形制造/再制造(修复),促进我国绿色制造与再制造产业的发展,正成为当今社会需要解决的紧迫课题。针对快速成形制造/再制造(修复)的技术要求,研究电弧喷涂快速成形的技术特点、成形新材料、新设备,以及喷涂成形关键工艺技术等方面具有重要的理论价值。

1.2 金属喷涂快速成形技术研究应用现状

1.2.1 快速成形技术的基本原理

快速成形技术是20世纪80年代后期兴起的一项高新技术,当时由于计算机技术特别是CAD/CAM技术的发展,人们可以直接在计算机上构造产品的三维模型,获得设计零件的三维数据,再用分层切片软件得到零件的二维几何信息,然后将这些数据信息结合其他成形工艺参数一起形成数控代码,控制成形机将材料逐层添加堆积生成三维实体零件。它突破传统材料的受迫成形和去除成形的工艺方法,可以在没有工装夹具或模具的条件下,迅速地制造出形状十分复杂的三维实体零件。其基本过程如图1-1所示,首先采用CAD软件设计出所需零件的计算机三维曲面或实体模型(数字模型或称电子模型);然后根据工艺要求,按照一定的规则将该模型离散为一系列有序的单元,一般在Z向将其按一定厚度进行离散(习惯称分层),把原来的三维电子模型变成一系列的二维层片;再根据每个层片的轮廓信息进行工艺规划,选择合适的加工参数,自动生成数控代码;最后由成形机接受控制指令,制造一系列层片,并自动将它们连接起来,得到一个三维物理实体。这样就将一个物理实体复杂的三维加工离散成一系列层片的加工,大大降低了加工难度,并且成形过程的难度与待成形的物理实体形状和结构的复杂程度无关^[4,15]。

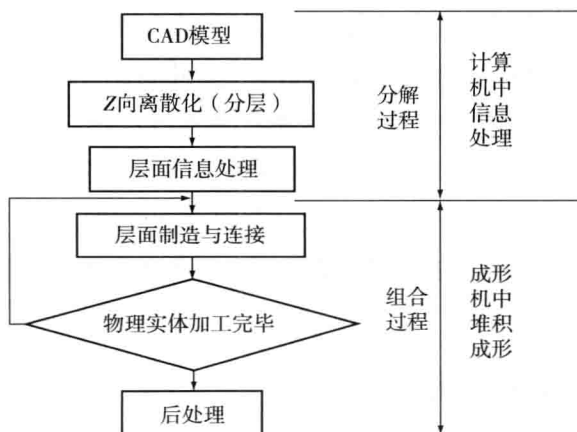


图 1-1 快速成形基本过程

1.2.2 近终喷射成形技术

利用金属液滴喷射沉积技术快速制造零件的最初思想应该起源于20世纪60年代的近终喷射成形工艺,其基本过程是,熔化的金属在高压惰性气体的作用下,被吸入或被压入陶瓷喷嘴,然后在高速气流的作用下,雾化成细小的金属液滴,液滴高速沉积在预制形状的收集器表面上而成形^[16, 17]。英国Osprey公司、瑞典的Sandvik工厂及德国的Peak公司利用该技术已能够制造钢管、轧辊等大型零件,最大件质量超过2 t,最大外径尺寸超过400 mm^[18]。另外一个发展方向就是液滴喷射微制造技术,它是指从坩埚底部的喷嘴喷出形成均匀熔滴流,在下落过程中先后通过充电电极和偏转电极,熔滴选择性沉积到基板上,控制基板的运动使熔滴在基板上按需准确定位,逐点逐层沉积,最终成形出复杂的几何造型,该工艺在微型器件制造领域具有广泛的应用前景^[19]。

1.2.3 等离子喷涂快速成形技术

等离子喷涂(熔射)快速成形技术是以等离子射流为热源,在特定工艺条件下,使喷涂粉末在原模表面集结成形,经背衬、脱模、强化等处理,得到具有一定功能的零件及型腔的制造方法。它合理地利用了等离子喷涂技术与RP技术的互补性,是一种新的快速、灵活、材料适应性广泛的零件制造技术和加工方法,主要应用于模具的快速制造。1995年,法国学者A. Teslon^[20]采用等离子喷涂的方法成功制得高500 mm,厚0.5 mm,精度为 ± 0.03 mm的圆锥形薄壁件。日本学者Lutz^[21]对等离子喷涂法制得的多种陶瓷管件与烧结方法制得的相应材质陶瓷管件的性能(如粒度与成分、微观结构、孔隙率、弹性模量与强度、高温强度、热冲击性能等)进行了系统研究,为等离子喷涂成形技术进一步发展提供了有力支持。近年来,国内学者也展开了这方面的研究,如华中科技大学对等离子喷涂法制造不锈钢注塑模技术进行研究,并成功制得多种注塑模具^[22]。西安交通大学、清华大学、大连理工大学在等离子喷涂成形金属和陶瓷类模具零件方面也做了许多有意义的工作^[23, 24]。

1.2.4 电弧喷涂成形技术

表1-1为上述两种喷射技术及电弧喷涂成形技术之间的对比情况。可以看

出,虽然等离子喷涂技术比电弧喷涂技术制备的涂层性能要高,但是等离子喷涂的设备复杂、成本高、效率也相对较低,其应用范围通常是航空航天等高端领域高性能零件的快速制造。有学者也尝试采用HVOF喷涂技术进行零件的快速成形,但面临同样的问题^[25]。下面主要就电弧喷涂成形技术的诸方面作详细的介绍。

表 1-1 三种金属喷射成形技术的比较

项目	近终喷射成形	等离子喷涂快速成形	电弧喷涂成形
基本特点	利用惰性气体将预先熔化的金属液通过陶瓷喷嘴雾化喷射成形	利用高温等离子弧加热粉末,并通过气体雾化喷涂成形	利用金属丝产生电弧,熔滴脱离丝尖端后被高速气体加速雾化沉积
适用材料	碳钢、高速钢、不锈钢及有色金属	各种高性能金属喷涂粉末或陶瓷粉末	各种金属实心丝材,或者金属带包覆金属粉末或陶瓷粉末的粉芯丝材
设备	设备复杂,包括加热装置、密闭装置、熔滴控制及运动控制装置等	设备复杂,包括等离子电源、喷枪、气体和粉末供给系统及运动控制装置等	设备简单,包括电弧喷涂电源、喷枪、送丝和气体供给装置及运动控制装置等
成本及能耗	成本较高,具体因零件形状而异	材料及能量消耗成本高,能量利用率为4%~12%	成本低,丝材来源广泛,能量利用率高达57%~67%
成形效率	—	通常 ≤ 5 kg/h	通常5~35 kg/h
适合领域	分两个方向,一是可生产小到微米级的精密元器件,二是大到几百毫米级的大型零件	主要用于高性能金属或陶瓷模具的制造。可实现精密成形,可用于制造微小模具和有复杂或小内表面的模具	主要适合于各种注塑模、压铸模等模具或壳体类零件的成形,也可用于零件快速修复与再制造领域

1.3 电弧喷涂快速成形技术发展现状

1.3.1 快速模具制造

工具和模具在制造业中的需求广泛,包括在自动化工业中产品体表的图文刻

印, 航空工业中机翼部分的合绳机构, 塑料工业中的注射模, 以及铸造和冲压成形等。全球的工模具供应市场量年均高于800亿美元, 其中的大部分是通过数控加工的方式制造的, 而这一般需要16~24周的生产周期^[26]。因此, 产品的设计必须在该产品发起时的很长一段时期后才能确定, 且不能有太大的改动。长期以来人们致力于发展阶跃变化的快速加工技术以减少更换模具的周期, 但是大多数发明应用仅局限在样机上, 因为这些快速加工的工模具难以满足批量生产时的严格要求。

模具快速制造技术(Rapid Tooling, RT)是目前快速成形技术中发展最迅速, 产值增长最明显的技术之一。电弧喷涂快速制模技术作为快速制模技术中的一种, 具有特殊的优点, 并得到了较快的发展。20世纪70年代, 美国TAFE公司开始用电弧喷涂试制低熔点金属模具, 陆续解决了喷涂过程中存在的许多工艺性问题, 使喷涂设备小型化, 实现了电弧喷涂金属在制模工艺中的成功应用。推出一种新式电弧喷涂设备, 包括动力与控制装置、TAFE-M8830型喷枪及压缩空气系统^[27]。进入90年代后, 随着快速原型制造技术的成熟, 原型基模的制作已不存在多大困难, 电弧喷涂制模技术逐渐被人们所重视。南洋理工大学C.K. Chua等^[28]应用此技术制备了注射模具, 其成本仅为传统工艺的50%。TAFE公司利用电弧喷涂铜、铝或不锈钢等, 在原模(木材、塑料或金属制品)上制作靠模型壳, 填充背衬材料, 可用于多种塑料、玻璃纤维及大型复合材料的生产, 另外, 该公司还将电弧喷涂制模应用于汽车行业中, 降低了成本, 并显著提高了经济效益。在美国, 几乎所有聚氨酯组合鞋底制造商在自动成型设备上都采用了金属喷涂快速制模法进行生产。福特公司采用多个喷嘴的电弧喷涂设备, 分别用N₂、Ar、空气等作为压缩气体, 进行了电弧喷涂高熔点材料模具的研究, 采用机器人操作4把喷枪的喷涂工艺, 已经可以制造914 mm×914 mm的模具。A.P. Newbyer等人^[29]用电弧喷涂的方法制得Ni₃Al合金模具及钢制模具。1997年, 英国牛津大学先进材料及复合材料研究中心、美国Hasbor有限公司、英国喷涂成形工模具有限公司联合进行研究, 采用电弧喷涂的方法, 快速制造工模具(如生产儿童高位椅支架的注塑模)。与传统的工模具制造方法相比, 显著减少了产品设计与生产的时间。在2002年举行的国际工模具大会上, 英国牛津大学展示了采用电弧喷涂制造的

高碳钢汽车覆盖件冲压凸模，以取代原有数控切削加工制模的工艺，制模时间约为原有方法的1/5。Mohanty等人^[30]开发出一种HVOF-ARC复合的新型电弧喷涂技术，该技术可用于军用高强度模具及零件的快速成形与再制造，在装备的快速保障方面有很好的应用前景。

在国内，1985年烟台机械工艺研究所^[31]引进意大利DPT-B型、MCP-001CLP型电弧喷涂设备，开展了快速制模技术的研究，并采用电弧喷涂锌合金快速制作注塑模具，取得了满意的效果，制造周期可缩短1/2~2/3。西安交通大学利用电弧喷涂技术成功制作了锌合金汽车覆盖件模具^[32]。大连理工大学、华侨大学、清华大学、山东大学等单位也进行了电弧喷涂制模的初步研究^[33, 34]。

1.3.2 电弧喷涂快速成形系统

电弧喷涂快速成形技术是通过操作机或机器人等自动化设备操纵高速电弧喷枪，按照计算机规划的路径在空间进行自动化喷涂作业，向预先制备好的快速模具基体或零件基体表面喷涂涂层，使用在线监测设备（包括红外热像仪、粒子飞行状态检测仪、应力-应变在线检测传感器等）测量成形过程中零件的质量情况，并优化成形工艺，从而完成零件的自动化快速成形，其典型过程如图1-2所示。

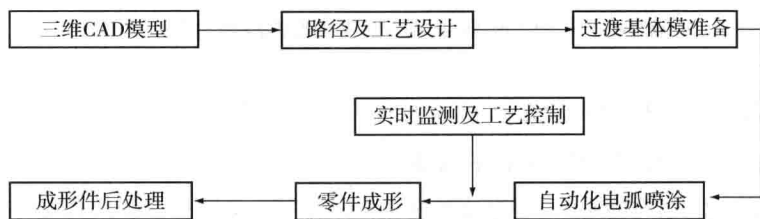


图 1-2 电弧喷涂快速成形典型过程

电弧喷涂快速成形系统主要由硬件和软件两部分组成，硬件部分主要包括基于机器人的自动化行动机构（带动喷枪和工件的运动）、高性能电弧喷涂系统（包括喷涂电源、送丝机构、喷枪、气体供给系统），质量控制仪器设备及其他辅助设备等。软件系统包括控制喷枪运动和控制喷涂工艺参数的中央控制软件系统，以及建立控制喷涂工艺与涂层质量监测信号间反馈信息的在线控制系统。针

对不同形状零件的快速成形，软件控制系统通常以离线编程的方式完成。如图1-3所示为牛津大学电弧喷涂快速成形系统结构示意图^[35]，使用4把Sulzer Metco公司的SmartArc电弧喷枪固定在6自由度KuKa机器人上，并在密闭仓中进行，利用红外热像仪监测喷涂过程中涂层表面的温度场，通过计算机的主控程序控制喷枪的运动及喷涂中的各项工艺参数，同时，计算机接受红外热像仪测量的温度场信息，通过计算平均温度值反馈控制喷涂送丝速率等参数，实现喷涂工艺的实时调节。

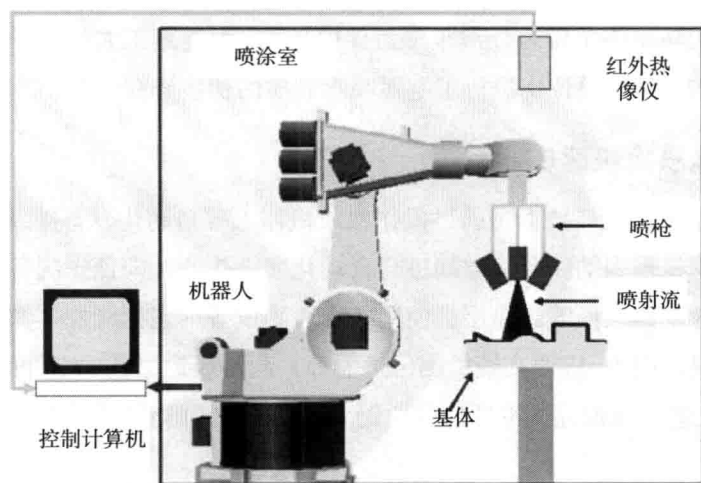


图 1-3 牛津大学电弧喷涂快速成形系统结构示意图^[35]

在国内，华中科技大学张海鸥等人对机器人等离子喷涂成形技术进行了较多的研究，主要集中在自动化喷涂控制系统与软件系统的设计、喷涂的路径规划与优化设计等，这对自动化电弧喷涂快速成形系统的研究有重要的借鉴意义。西安交通大学研究了基于金属电弧喷涂和电刷镀技术的快速制模工业机器人系统，该机器人6自由度直角坐标型结构（也称操作机），主要用于汽车覆盖件模具的制造^[36, 37]。

1.4 电弧喷涂快速成形关键技术

电弧喷涂快速成形厚涂层不同于传统薄涂层的制备，成形厚涂层时由于结构