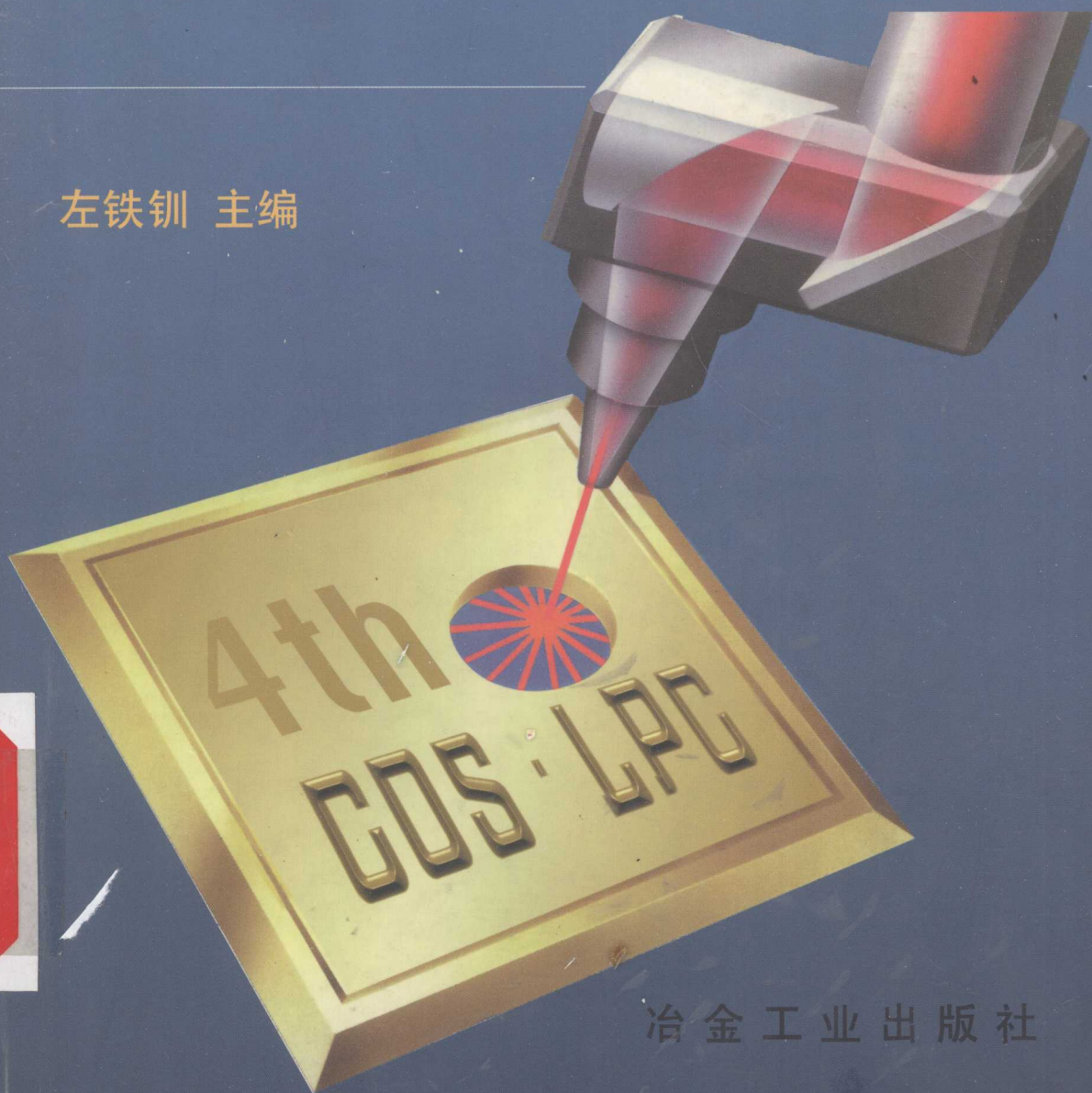




第四届全国激光加工

学术会议论文集

左铁钊 主编



冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

第四届全国激光加工学术会议论文集/左铁钊主编. —
北京:冶金工业出版社,1997.12

ISBN 7-5024-2138-6

I. 第… II. 左… III. 激光加工-学术会议-中国-文集
IV. TG665-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 24200 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑:朱华英 封面设计:李至云 责任校对:李文彦

三河市双峰印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1997 年 12 月第 1 版,1997 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;13 印张;312 千字;199 页;1-500 册

22.00 元

前 言

本书是第四届全国激光加工学术会议论文集,此次会议由中国光学学会激光加工专业委员会主办,由国家产学研激光技术中心承办。本论文集汇集了国内激光加工技术各个领域内的最新研究成果,共集录论文 43 篇,涉及激光加工工艺、激光加工设备和系统、激光加工过程控制、激光加工系统中的光学问题以及其他激光加工的新进展和新技术,涵盖了切割、焊接、打标、表面改性、快速成型、软件编制、光学计算等内容。值得指出的是,本书中的一些论文将新的研究方法引入了激光加工领域,开拓了激光加工应用的新途径,这反映了激光加工技术势必将在越来越广阔的范围内得到应用。本书的出版,将有助于国内激光加工技术各个领域内科研人员的学术交流,有助于推动激光加工研究成果产业化的进程。

本书由国家产学研激光技术中心左铁钊教授主编,经中国光学学会激光加工专业委员会在京常委集体评审后由冶金工业出版社出版。在出版过程中,根据出版社提出的有关出版的要求,本次会议秘书处对全部论文的参考文献的引用格式做了重新编排,将某些物理量单位换算成了法定计量单位,并将文章中的英文名称译成了中文。出版社编辑对论文正文中的个别文字和符号做了修改,特此说明。

第四届全国激光加工学术会议组织委员会由下列人员组成:

主任委员:邓树森,委员:王健、左铁钊、刘文今、宋威廉、张魁武、施定远,秘书:丁岳、董志娟。

由于时间仓促,出版稿未经作者审核,敬请谅解。对于书中可能出现的错误,恳请读者批评指正。

中国光学学会激光加工专业委员会
国家产学研激光技术中心

1997 年 9 月

目 录

激光加工工艺技术

基于激光快速成型的电铸模具制造	张人佶	曾 光	杨 斌	颜永年(3)
W-Cu 粉末冶金材料与 18-8 不锈钢				
异种金属激光焊研究	陈 铠	王智勇	李呈德	刘永镇 左铁钊(8)
CO ₂ 激光焊接模式转变规律及其应用				
.....	张旭东	陈武柱	任家烈	王振家 张红军(13)
采用填充焊丝激光焊接工艺参数的匹配研究				
.....	施定远	肖荣诗	梅汉华	左铁钊(18)
车用镀锌拼接钢板的激光拼焊行为研究			裴宇韬	左铁钊(23)
激光功率控制在激光熔敷和焊接中的应用			丁志宏	刘永镇(29)
较大面积连续激光非晶化的探索		钟敏霖	刘文今	任家烈(34)
激光熔敷制备热障复合涂层研究		陈国锋	冯钟潮	梁 勇(39)
高压柱塞泵柱塞激光陶瓷合金化的研究				
.....	刘文今	刘志刚	张红军	张伟明 钟敏霖 钱 晖(43)
激光熔覆 Cu-SiC 金属陶瓷复合层的研究		盛亚明	宋武林	谢长生(48)
激光表面熔敷层的耐磨性和耐冲蚀性实例			刘永镇	翁世平(53)
铝表面激光熔覆陶瓷原理和工艺的研究			李言祥	沈 文(57)
5CrMnMo 钢脉冲激光离散熔凝处理的组织				
及其耐磨损性能		罗耕星	武晓雷	陈光南(64)
激光快速凝固微观组织形成原理				黄卫东(68)
齿轮表面宽带激光强化技术研究				
.....	张 宏	陆博良	石 岩	张冬云 张继彬 徐春英 张 翼(72)
汽车缸体激光相变硬化处理中的几个问题				
.....	张荣兰	袁 斌	王世民	梁二军 沈书泊(76)
激光织构化在金属表面强化处理中的应用				
.....	虞 钢	高春林	胡幼娟	李 平 安永强(80)
石油割缝筛管激光切割技术	张 珊	康少英	马致贤	刘文华 李万群(85)
激光切割叠层有机玻璃板的研究	申 鹏	刘人彤	刘文华	张 珊(89)

淬火高速钢锯片铣刀激光成型切割	刘永镇	丁志宏	翁世平(93)
预编程在连续 CO ₂ 激光切割中的作用			梅宴标(98)
调 Q CO ₂ 脉冲激光器及其在切割硬质脆性材料中的应用			
.....	洪 蕾		李力钧(101)
激光加工深孔工艺研究	孟 勤	王一川	杨晋平
.....	王玉海		康少英(106)
卡尺激光刻划工艺研究	王培德	巴瑞章	雷壁华
.....	刘建君		纪华青(110)
高功率 CO ₂ 激光加工光束会聚点位置变化的研究			
.....	张赵林	程兆谷	雒江涛
.....	夏金安	强宏亮	王润文(114)
脉冲激光诱导 WO ₃ 变色研究	赵 岩	冯钟潮	梁 勇(118)
激光制膜——一种先进的激光加工方法			
.....	冯钟潮	赵 岩	张炳春
.....	郭 良	侯万良	曹立新
.....	王亚庆(121)		
激光参数对选区激光烧结的影响	冯 涛	吴晓林	袁晓鑫(125)
激光在粉末冶金烧结中的应用			
.....	胡建东	沈 平	郭作兴
.....	关庆丰(130)		
选择性激光烧结成型技术的研究现状及发展趋势			
.....	程 军	白培康	赵熹华(135)
人工神经网络在激光加工工艺优化方面的应用			
.....	李延民	潘清跃	黄卫东
.....	林 鑫	宋仁国	周尧和(139)
激光加工站展望			
.....			汤祖尧(144)

激光加工系统与设备

大功率激光光束的诊断	李 强	金江华	白志强	左铁钊(149)
一种新型大功率激光光束光斑质量诊断仪的建模初探				
.....	雷 荀			左铁钊(153)
根据光束横截面能量分布计算大功率 CO ₂ 激光束的模式组成	贺 平	王智勇		左铁钊(158)
机器人运动过程中振动状态的测量及分析	丁 岳	陈 涛		左铁钊(163)
整筒泵泵筒内壁激光表面处理生产线				
.....	张炳春	冯钟潮	吴振刚	王亚庆
.....	刘志顺(168)			
引进的激光加工机的软件配套开发	康少英	张 珊		刘文华(171)
飞行光学导光系统中的光学问题		王智勇		左铁钊(175)
CO ₂ 激光加工机的光学系统				东继光(179)
利用紫外信号监测的激光深透焊接闭环控制系统				
.....	雒江涛	程兆谷	张赵林	夏金安
.....	强宏亮			王润文(185)

激光深熔焊时焦点位置自动寻优与闭环控制

..... 陈武柱 王 勇 鲍江成 李天亚 张旭东 张红军(189)

CO₂ 激光切割机床的发展趋势 翁世平 王喜兵(195)

激光加工工艺技术

基于激光快速成型的电铸模具制造*

张人佶 曾 光 杨 斌 颜永年

清华大学机械工程系

【摘要】 激光加工在快速原型制造(RPM)技术中有广泛应用,激光立体光刻(SLA)是应用最早、精度最高的一种 RPM 技术。本文介绍将计算机辅助设计(CAD)、SLA 和电铸模具制造集成起来制造模具的新技术,并用于天地往返系统统一比较模型(TBM)的模具,还分析了 SLA 制造原型和电铸制造模具过程中的一些问题。

关键词 快速原型制造(RPM) 激光立体光刻(SLA) 计算机辅助设计(CAD) 电铸模具制造

1. 前言

快速原型制造(RPM)技术是指在计算机的控制与管理之下,根据零件的 CAD 模型,采用材料精确堆积的方法,制造原型或零件。它是计算机辅助设计(CAD)、数控技术、激光技术、材料科学与工程的技术集成^[1]。由于它可以自动而迅速地将原型或零件制造出来,因此被誉为 80 年代以来先进制造技术中最具革命性的发展。利用 RPM 技术直接或间接地制造金属模具,比如结合熔模铸造、陶瓷型精铸、喷涂、电铸等方法,可缩短生产周期,降低生产成本,十分适合需要一定精度产品的模具制造。

我国已经对天地往返系统(即航天飞机)进行了涉及面极广的研究。它的外观设计需要考虑流线型的设计,因此涉及到空气动力学实验(风洞实验)。采用 RPM 技术可以严格地按照设计制成原型,通过模具制造转换成模型进行测试。本文介绍采用 RPM 中的激光立体光刻(SLA)技术,制造天地往返系统动态特性统一比较模型(TBM)的电铸模具,进而制造出 TBM 的发泡塑料模型(为原大的 1/1000),此种模型被用于风洞中自由飞动量测量的实验。此项实验是由中国科学院空气动力研究所承担的 863 计划,是航天领域的项目。

2. 激光立体光刻(SLA)技术

激光立体光刻(SLA)是应用最早、精度最高的一种 RPM 技术。如图 1 所示,在激光立体光刻(SLA)中,首先对由 CAD、X-ray、CT 或 MRI 数据生成的三维模型进行水平方向分层。He-Cd 激光器产生的紫外激光束针对已被分层图形的每一层在液态光固化树脂表面进行扫描,使之固化。此过程不断重复,直至产生由给定 CAD 数据指定的三维模型^[2]。SLA 的

* 国家自然科学基金重点基金课题。

加工流程分为 4 个步骤(图 2):(1)CAD 造型,这是 SLA 中的关键步骤;(2)计算机分层,通常采用 STL 格式转换文件,并转换成相应的 NC 控制代码;(3)激光扫描,激光束的导向与运动由 NC 代码控制的扫描偏转镜来决定;(4)加工成型,直接从 SLA 得到的实体模型通常还必须进行一定程度的后处理,使之达到足够的强度与硬度。本文的航天飞机的 SLA 原型是在清华大学激光快速成形中心的美国 3D SYSTEM 公司 SLA-250 设备上完成的。直至目前,该公司的 SLA 设备仍然在 RPM 的市场中占有最大的份额。这是由于 SLA 可对几乎任意复杂形状的对象都十分容易迅速成型,而且无需准备工具与夹具。近年来,SLA 在变形及精度控制方面取得了突破,希巴·盖伊(Ciba Geigy)公司又研制出新型的环氧改性光固化树脂(型号:XB5170),代替了原来的丙烯酸型树脂,使其性能有了很大的改善。特别是它的线性收缩率从 0.7%下降到 0.06%,从而使得到的 SLA 原型的精度也相应提高近一个数量级。

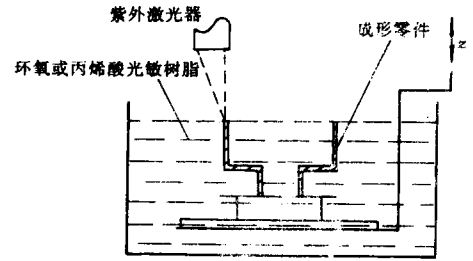


图 1 激光立体光刻(SLA)示意图

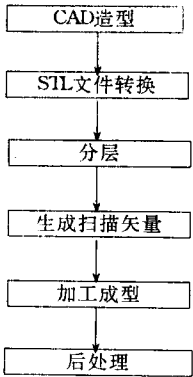


图2 SLA制造原型步骤

3. 模型的 CAD 数据与原型制造的 CAD 造型

3.1 模型的 CAD 数据

空气动力学地面模拟实验(风洞实验)是设计性能先进的航空航天飞行器所必不可少的一个重要环节。因此,对于天地往返系统(即航天飞机)需要考虑对于规定的模型进行这样的实验。为了考核多项动态气动特性(如飞行器的阻尼特性),由国家制定的统一比较模型(TBM)在各有关实验承担单位进行风洞实验,并对实验数据作比较分析,是十分重要的。TBM 模型具有航天飞机的基本特性,可以应用于各类风洞实验。本文承担模型应当为航天飞机原大的千分之一。由于模型在风洞中的自由飞行运动记录时间很短,又要获得较高的测量精度,以及尽可能多的运动周期数的记录,因此对模型的要求必须十分严格。既要有严格的缩尺比例,又要对它的质量分布有一定的要求。模型的外壳应用轻质材料制成,再以高密度材质置于空腔来配重,调整它的质心位置和使模型有小的旋转半径。图 3 为天地往返系统 TBM 模型的外形图和三视图。它们是根据航天飞机的计算机辅助设计(CAD)数据得到的。由图 3 及 CAD 数据可知,该模型具有体积小、形状复杂、机体与机翼均为流线型的特点,加之尾部的两个凸起就更增加了该模型的制造难度。

3.2 原型制造的 CAD 造型

CAD 造型是快速原型制造的关键一步,必须保证精确的模型尺寸与形状。本文的 CAD 造型是通过 Pro/Scan-Tools(ST)来完成的。Scan-Tools 是 Pro/Engineer 的一个可选配模块,是专门用来将激光扫描或三坐标测量得的点数据重构成实体/曲面模型的工具软件。它允许用户利用非 Pro/E 的测量数据拟合成光滑的样条曲线。这些平行的曲线经过光顺处理产生曲面,最终得到实体/曲面模型,并且保持这一模型与其他 Pro/E 功能的完整结合性。

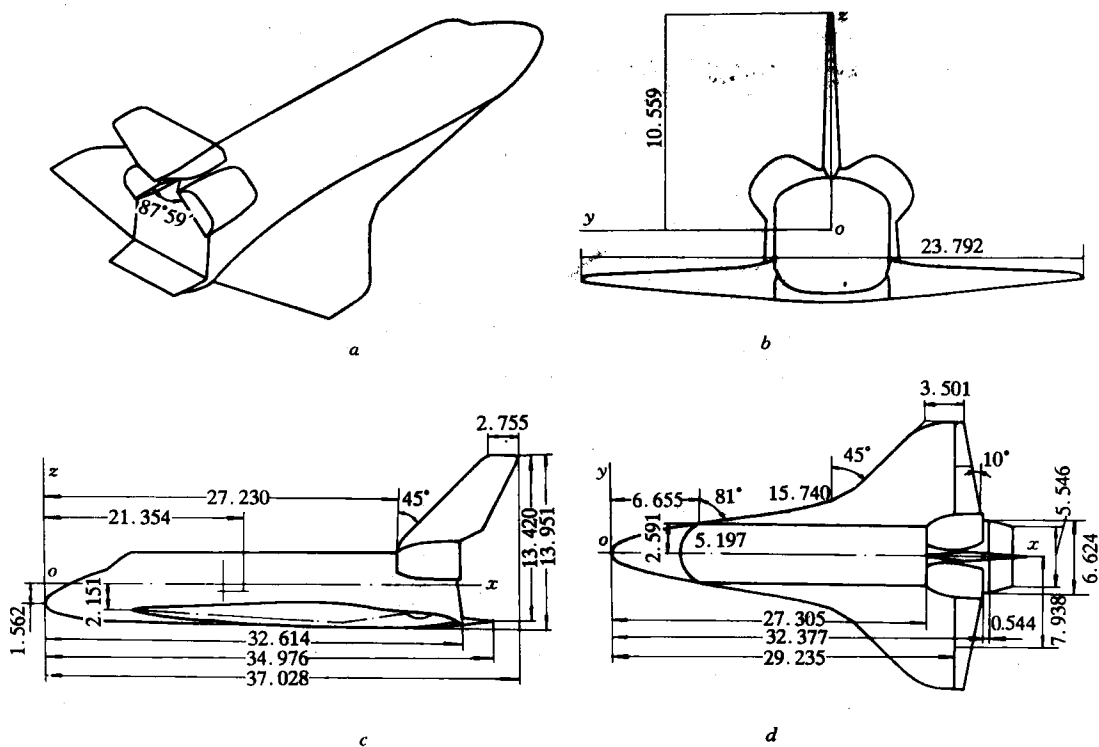


图3 TBM模型的外形图a和三视图b-d

ST 要求输入的数据必须满足 Pro/E 的 IBL 文件格式。IBL 文件格式的特点为:各截面(Section)相互平行,面上的点(Point)数目相同。当数据完全读入后,由点拟合成三次样条曲线。目前大多数 RP 成型系统都以 STL 文件为数据输入。CAD 模型完成后,还需要将 CAD 模型表面进行三角形离散,从而转换为 STL 文件。STL 文件作为 RP 系统的转换标准有许多优点,如数据结构简单,拟合精度高。但由于模型的离散化,有可能产生缝隙和空洞,或产生相邻三角形的法向取向矛盾。本文在数据处理时上述问题均妥善加以解决^[3]。

在 CAD 模型完成后,本文还根据以后各步的精度损失调节 CAD 模型的尺寸。精度损失包括:(1)SLA 成型过程中产生的收缩,收缩量约为 0.05%;(2)发泡模脱模后自由搁置产生的膨胀,膨胀量约为 0.02%。而电铸后产生的金属型壳几乎不存在精度损失。最后建造出来的航天飞机的 CAD 模型如图 4 所示。

4. SLA 原型制造

由于 TBM 模型的尾部凸起使得发泡塑料模型不能顺利地通过飞机对称面脱出,为此将 CAD 模型的凸起之间加上一个高台(见图 5),再将此模型分为两半。只要在模具上加工一个附件放在阳模上,合模后发泡时,就可得到具有尾部凸起的气泡塑料模型。因此,在实际进行方案设计时,是按照模型要求→模具设计→电铸方法设计→SLA 原型设计→CAD 造型设计的步骤进行的。由于各个步骤之间又是相互影响、相互依存的,因此在设计过程中,也经过了反复比较、反复修改才确定下来;而在最终实施加工工艺时,还有不断的小的修改与

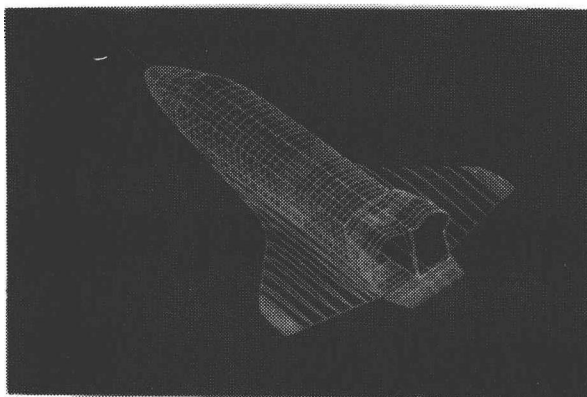


图4 航天飞机的CAD模型(经消隐后)

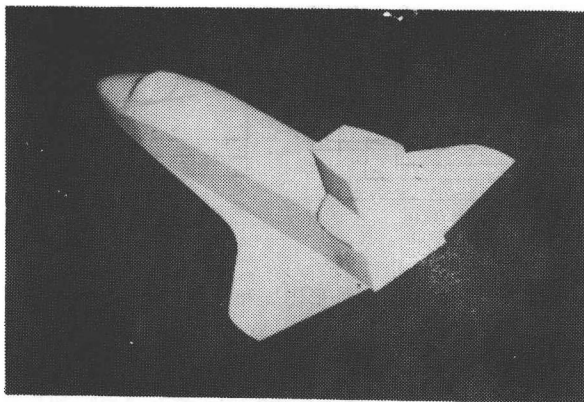


图5 加上高台的CAD模型

补充。这样复杂的过程本文不作详细的叙述了。

本实验中采用定厚度(0.1mm)分层。为了消除台阶效应,采取涂敷树脂的方法,涂敷后进行紫外光固化后处理。涂敷前,机翼处的 $\Delta h_{\max}$ 为 0.12mm,涂敷后 $\Delta h_{\max}$ 为 0.04mm;机身顶部处的 $\Delta h_{\max}$ 为 0.08mm,涂敷后 $\Delta h_{\max}$ 接近为零。根据上述分析,SLA 原型的尺寸精度可以达到 $\pm 0.02\text{mm}$ 。

5. 电铸模具制造

TBM 模型的模具有如下要求:(1)合模快,因为发泡时间很短,要求合模在几秒内完成;(2)模型具有严格的空腔尺寸及位置,以便配置不同质心位置的模型。电铸模具的制造步骤为^[4]:(1)电铸,得到电铸壳与树脂原型合在一起的电铸壳体;(2)切边;(3)脱模,采用焙烧法将树脂原型分离出来,得到金属型壳;(4)将型壳定位在模具外壳中,浇铸铝合金作衬背,制成阴模,同时制成带有附加凸起的阳模。本实验采用电铸镍层,电铸时间为 5d,铸层厚度约为 1.0~1.5mm。将半飞机原型按照分型面粘贴在标准尺寸的铝板上,然后置于电铸槽进行电铸。电铸出来的金属型壳见图 6,壳体的四边则为定位基准。

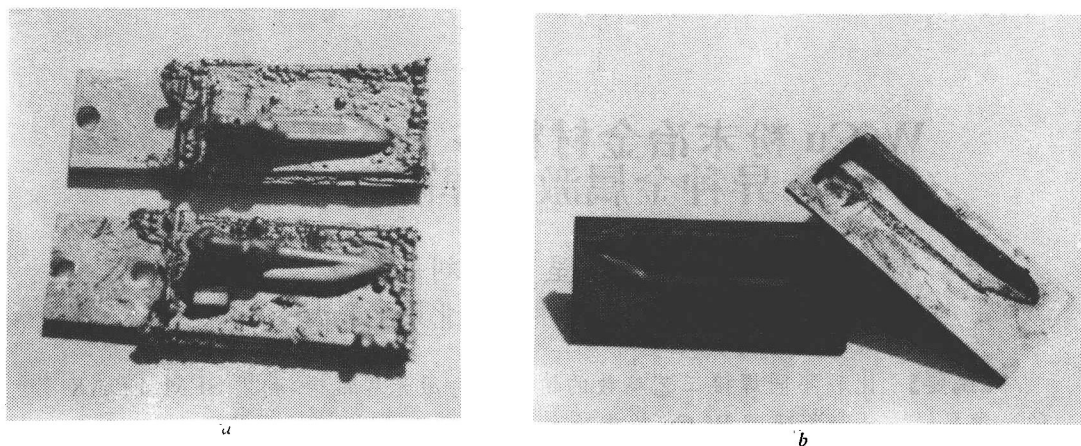


图 6 电铸金属型壳
a—带有铝衬背;b—去除铝衬背后

6. 结论

(1)采用三维 CAD 造型→SLA 原型→电铸模具→发泡塑料模型的方法,成功地制造了航天飞机 TBM 模型。这一工艺路线同样适用于其他各类产品的快速简便制造。

(2)为解决模型尾部脱模的问题,从 CAD 造型中即加入一个凸台,同时在阳模上加上附件,则可加以解决。

(3)将 RPM 技术与各类金属模具转换技术相结合,是制造技术具有重大意义的进步。

参 考 文 献

- [1] 颜水年,张伟,卢清萍,中国机械工程,4(1994),64~66.
- [2] Jacobs P. F., Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography, SME Publ. (1992), 114~117.
- [3] 冯伟,清华大学工学博士论文,1996,18~44.
- [4] 朱乃彰,刘晓宁,朱获,模具工业,2(1992),47~50.

W-Cu 粉末冶金材料与 18-8 不锈钢 异种金属激光焊研究

陈 铠 王智勇 李呈德 刘永镇 左铁钊

国家产学研激光技术中心 北京工业大学

【摘要】 比较不同焊接工艺参数的填粉 CO₂ 激光焊试样,利用 SEM、EDAX 和光学显微方法分析研究 W-Cu 粉末冶金材料与不锈钢焊接接头的显微结构、粉末冶金和焊缝界面的结构特点、界面两侧的成分及分布。并综合上述结果提出 W-Cu 与不锈钢填粉激光焊接机理。

关键词 W-Cu 粉末冶金 18-8 不锈钢 异种金属 填粉激光焊

1. 前言

现代工业的发展使各种各样的新结构层出不穷,新材料和新工艺的应用日益广泛。为应对同一构件的不同部分提出的不同性能要求,充分利用各种材料的优异性能,异种金属的使用受到国内外的普遍重视。因而,异种金属的焊接就成为实现不同金属连接不可缺少的重要手段和关键技术。不同金属所具有的不同物理、化学性质常常使异种金属的连接变得非常困难。针对不同金属组合,需采用不同连接工艺,选择特殊工艺措施才能完成^[1,2]。

本文所涉及的 W-Cu 粉末冶金材料与 18-8 不锈钢的异种金属焊接属于粉末冶金类材料与金属的焊接。在已往的研究工作中,此类连接一般只能采用非熔化焊工艺如钎焊,扩散焊才能完成。其原因主要是因为粉末冶金类材料常常是由贵金属、难熔金属与其他金属混合或相互不润湿的金属混合后经加压烧结而成。如 W-Cu 就是固态和液态都完全不互溶的两种金属用粉末冶金技术制成。该类材料与其他金属连接时,由于性能的巨大差异,尤其是熔点、沸点、线膨胀系数等参数及相互润湿性的不同,一般的熔焊方法根本无法使其形成完整的焊接接头。

本研究工作采用激光焊接方法成功地实现了 W-Cu 粉末冶金材料与 18-8 不锈钢的异种金属连接;使用 SEM、EDAX 和光学显微等方法对其连接机理进行了分析。到目前为止,还十分鲜见这方面的报导,尽管近几年来,随着激光加工技术在国外工业先进国家的使用,许多研究者已把激光焊用于异种金属的连接,并取得了很好的效果^[3~5]。

2. 试验用材料及设备

2.1 试验用材料

试验用母材为钨基粉末冶金材料和 18-8 型奥氏体不锈钢。其化学成分如表 1 所示。试验要求在两种金属 10mm×1.2mm 的横截面实现可靠对接。

表 1 钨基材料与 18-8 不锈钢化学成分(%)

金 属	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Cu
1Cr18Ni9	<0.12	<2.0	<1.0	17~19	8~11	—	—
钨基材料	—	—	—	—	—	80	20

异种材料焊接时,由于性能上的差异和冶金相容性等原因,常常不能直接进行,而要借助于某种填充材料(中间材料)。填充材料的选择对异种金属的焊接成功与否具有关键性的作用,选取的基本原则是其必须与被焊的两种材料都具有较好的冶金相容性。在本试验中,选择的填充材料是镍基自熔性粉末材料,粉末粒度直径为 0.06~0.04mm;该种粉不仅可以满足上述原则,而且所选低硬度粉具有良好的韧性。在提高焊缝的韧性的同时,可以进一步改善焊接接头的应力分布,保证接头的质量。其主要成分如表 2 所示。

表 2 镍基粉末材料主要化学成分(%)

金 属	Ni	Cr	B	Si	C	Fe
镍基粉	>63.1	16	3	3.5	0.4	<14

2.2 试验设备

试验用设备为 6kW 快速轴流 CO₂ 激光加工系统(德国通快公司生产),激光器的模式为 TEM01^{*} 模。试验用送粉系统为 Twin-送粉器及自制专用送粉枪,以保证送粉的准确性与均匀性。

3. 试验结果及分析

3.1 填粉激光焊典型焊接工艺规范及焊缝成型

从大量的焊接工艺试验中,选取有代表性的一组,其焊接工艺规范及焊缝成型如表 3 所示:

表 3 填粉激光焊焊接工艺规范及焊缝成型(厚度 $\delta=1.2\text{mm}$)

编号 No.	焊速/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	功率/ W	离焦/ mm	送粉速/ $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$	送粉气 Ar/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	保护气 Ar/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	间隙/ mm	焊缝成型
1	2	2000	0	37	0.4	0.4	0	未焊透
2	2	2500	0	37	0.4	0.4	0	成型好
3	2	2500	0	37	0.4	0.4	0.3	不稳定

由表 3 可以看出,在对接板无间隙时,现有其他工艺参数不变的情况下,2500W 是最佳功率值,低于 2500W 则可能由于焊接能量不足而出现未焊透的缺陷。当对接板间隙不为零时,则需对光斑位置、送粉参数、焊接功率甚至离焦量进行调整,否则就会出现如试样 3 所示,焊缝成型不稳定的问题。实际上,在激光焊接中,各参数的调整都不是孤立的,具有密切相关性。在一定的条件下,需仔细对焊接工艺参数进行调整才能得到最佳的焊接质量。

3.2 激光焊接时光斑中心位置的设定与焊接结果

异种金属焊接时,除了工艺参数以外,激光光斑中心位置的设定是非常重要的,而且比相同金属焊接要复杂得多。填粉的异种金属激光焊,焊接时,一部分能量用于熔化母材,另一部分用于熔化填充粉。用于熔化母材的那部分能量就要综合考虑两种不同材料的物理化学性能的差异,尤其是热物理参数的不同,以便调节控制较难熔金属和较易熔金属的加热程度,满足不同金属对焊接能量的不同要求,得到可靠的连接。表 4 是钨、铜、铁、镍的主要物理

性能。

表 4 钨、铜、铁、镍的主要物理性能

金属	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	导热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	线胀系数/ K^{-1}	晶格类型
钨	19.3	3380	5900	152.9	4.6×10^{-6}	体心立方
铜	8.9	1084	2578	359.2	16.6×10^{-6}	面心立方
铁	7.8	1537	2875	66.7	11.76×10^{-6}	体心立方
镍	8.9	1435	2834	69.6	13.4×10^{-6}	面心立方

注:镍基粉熔点 $<1100^{\circ}\text{C}$ 。

考虑到 W-Cu 材料中 80% 是钨、20% 为铜,又如表 4 所示钨和铜的热物理性能相去甚远,而不锈钢的熔点和铁相似。于是,试验中设定了几种光斑中心位置,其焊接结果如表 5 所示(表中光斑中心位置以两部分金属所占光斑面积表示)。

表 5 光斑中心位置与焊接结果

试 样 No	光斑面积/%		焊接结果
	18-8	W-Cu	
4	20	80	失败
5	40	60	成功
6	60	40	失败
7	80	20	失败

从表 5 的焊接结果可以得知,只有 5 号试样由于焊接热量在两部分金属的分布适当,焊接取得了成功,满足了设计要求。其他的试样都没能得到可靠的连接。从当时的试验现象看,7 号试样由于 W-Cu 侧受热太少,致使粉末冶金材料基本没熔,而镍基粉熔化后是和不锈钢母材形成焊缝,并且由于熔化的镍基粉带来了更多的热量,进一步增加了不锈钢母材的熔解。6 号试样 W-Cu 侧得到的热量虽比 7 号试样增多,但仍不满足焊接的要求,以致在 W-Cu 侧出现未焊透缺陷。可是,W-Cu 侧得到的热量也不是越多越好,当 W-Cu 侧获得 80% 光斑面积的热量时(4 号试件),焊后在紧靠焊缝的 W-Cu 侧出现了与焊缝平行的长裂纹。

3.3 焊接接头 W-Cu 侧连接机理

图 1 为 5 号试样焊接接头光学显微照片,图 1a 为不锈钢一侧形貌,图中上半部为不锈钢,下半部为焊缝;图 1b 为焊缝形貌。由图可见,不锈钢侧连接完好,焊缝及热影响区无缺陷。图 1、图 2 均为典型形貌,故不作进一步的分析。

图 2 是 5 号试样 W-Cu 侧接头的 SEM 照片。图 2a 的右侧为焊缝,左侧为 W-Cu 材料,其中白色颗粒为钨。图 2b 为 a 图焊缝金属中打“十”字标记处的主要化学成分,由谱线图可以知道主要为 Fe,其次为 Cr、Ni 和 Si 并有极少量的 Cu,没有发现 W 的成分。这可能是因为钨的熔点(3384°C)太高,并且超过上述各金属元素的沸点的缘故所致。从谱线所示主要元素组成可以认为,焊缝是以 18-8 不锈钢为主体,熔合部分镍基粉和 W-Cu 材料中 Cu 元素共同构成。

为了研究 Cu 在焊接过程中的作用,试验中还在远离此点的焊缝中选数点作了 EDAX 分析,所得谱线均包括 Cu。这就进一步证实了 Cu 是整个焊缝的组成部分,而不仅仅是“十”字标记处的个别行为(因为“十”字处距白色的钨颗粒仅 0.01mm)。图 3a 是 5 号试样的 W-Cu 侧接头细貌(SEM 照片)。由图可见,靠近焊缝的白色钨颗粒,四周被深色的部分所包围。

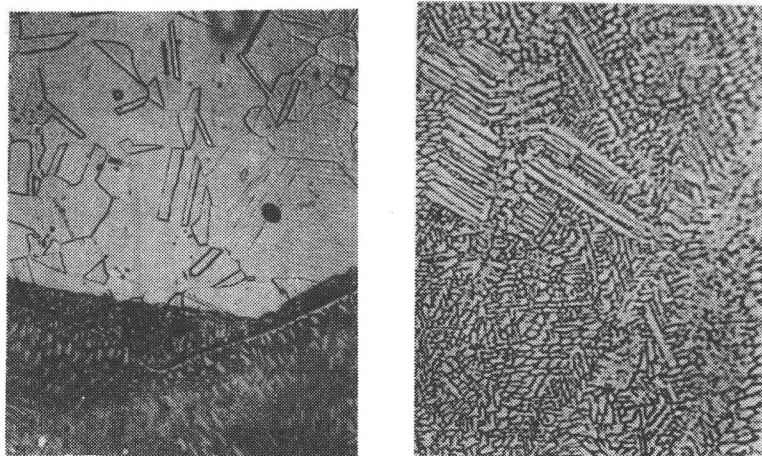
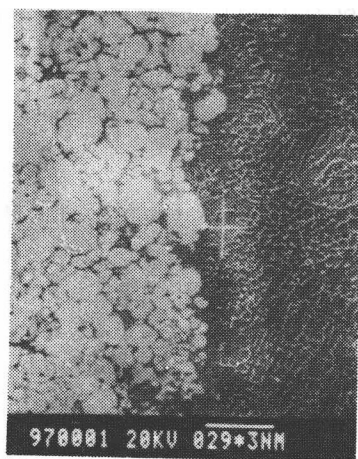
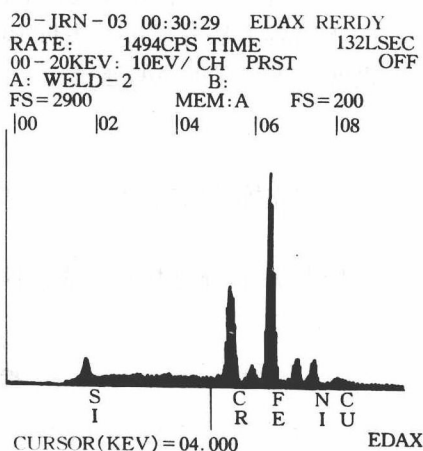


图 1 5 号试样焊接接头形貌

a—不锈钢侧×150;*b*—焊缝×300



a



b

图 2 5 号试样焊接接头形貌(SEM)

a—W-Cu 侧 *b*—十字线处 EDAX 图

试验中对此部分做了 EDAX 分析,4 次检测(如图中“十”字线位置),分析结果几乎完全相同,谱线如图 3b 所示,主要成分是 Fe,其次有 Cr、Ni、Si 和极少量的 Cu。把图 2b 和图 3b 相比较,更能发现,两张谱线图如出一辙。也就是说,白色钨颗粒四周深色部分的成分和焊缝完全相同。即是说,此部分是在焊接过程中由熔融的液态金属填充形成的。进一步的分析已经确认,此种熔融金属“进入”W-Cu 母材侧深达 0.12mm。这就表示原 W-Cu 母材中包围钨颗粒的铜受激光热量的影响最少熔化了 0.12mm 的宽度。熔化了铜进入了熔池,成了整个焊缝的组成部分。而钨则由于熔点高、密度大,而且处于熔池边缘流动性差等原因保留下来,没有熔入熔池,仅受熔池金属流动的影响加大了颗粒的分散(和其母材比)。

基于以上分析,可以想见 7 号试件由于 W-Cu 侧受到较大光斑面积(80%)的加热,造成