

Xiaoshimu Muyang Shukong Jiagong
Qixiao Jili Yanjiu

消失模模样数控加工 切削机理研究

罗红旗 | 著



非外借



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

Xiaoshimu Muyang Shukong Jiagong
Qixiao Jili Yanjiu

消失模模样数控加工 切削机理研究

罗红旗

著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书通过阐述消失模铸造技术研究现状及发展前景,在高质量模样是保证消失模铸件质量的重要前提下,研究了消失模铸造技术与数控加工技术相结合的技术体系,并以不同密度的塑料模样材料为研究对象,分析了消失模模样数控加工的切削机理,建立了相关切削模型,为消失模模样数控加工的参数优化提供了理论基础。

本书可供机械工程相关专业的研究人员与工程技术人员阅读,也可作为相关专业研究生的科研参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

消失模模样数控加工切削机理研究/罗红旗著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.12
ISBN 978-7-5680-3668-9

I. ①消… II. ①罗… III. ①数控机床-铣床-加工工艺-研究 IV. ①TG547

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 269611 号

消失模模样数控加工切削机理研究

罗红旗 著

Xiaoshimu Muyang Shukong Jiagong Qiexiào Jīlǐ Yanjiū

策划编辑:万亚军

责任编辑:万亚军

封面设计:原色设计

责任校对:张会军

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:12.5 插页:4

字 数:173千字

版 次:2018年12月第1版第1次印刷

定 价:38.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

模样是消失模铸造生产过程中必不可少的消耗品,其成形技术是消失模铸造的核心与关键技术之一,高质量模样是获得高质量消失模铸件的基础。由于泡沫塑料模样容易受力变形,因此研究机械加工中刀具结构、工艺参数等因素有利于减少或避免模样产生各种缺陷。本书结合消失模铸造技术与数控加工技术,利用数字化加工技术加工消失模模样。

本书内容基于消失模模样数控加工机理研究项目取得的成果。该研究项目以不同密度的塑料模样材料为研究对象,主要研究内容如下。① 从组织结构与断裂特征、压缩试验、反复荷载作用下的力学特性等方面进行消失模模样材料的力学性能分析。② 根据模样材料的特性从切削加工的基本原理、切削加工缺陷、机械加工方法和工艺等方面分析其加工机理。③ 对不同结构的硬质合金刀具进行对比试验,从切削力方面研究不同刀具结构对泡沫塑料模样数控加工的影响,明确切削速度、进给速度、加工余量、进给量等工艺参数与切削力的变化关系,为选择合适的加工工艺参数奠定基础。④ 根据切削加工主要涉及的切削参数,建立切削力模型,为消失模模样数控加工的参数优化提供理论依据。⑤ 对影响消失模模样加工质量的参数进行相关研究,从表面粗糙度和尺寸精度等方面进行消失模模样数控加工质量分析和控制,为提高模样加工质量提供科学依据。

本书内容涉及的研究项目得到了科技部国家国际科技合作专项“复杂金属件精密成形关键技术及设备研究”(2012DFG70640)的支持,得到了机械科学研究总院先进制造技术研究中心单忠德研究员、

刘丰研究员、李艳征博士、张志权硕士、卢泽宇硕士的大力支持。同时本书的出版获得了北京工商大学学术专著出版资助项目的资助,并得到了华中科技大学出版社的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于消失模铸造技术涉及面广、技术难度大,加上作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2017 年 10 月

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 消失模铸造类型及特点	(5)
1.2.1 用模具发泡成形的消失模铸造	(5)
1.2.2 板材加工成形的气化模铸造	(7)
1.2.3 消失模铸造工艺的特点	(7)
1.3 国内外研究现状	(10)
1.3.1 国外消失模铸造技术研究现状	(10)
1.3.2 国内消失模铸造技术研究现状	(12)
1.4 研究目的和意义	(16)
1.5 研究主要内容	(19)
第 2 章 消失模模样材料力学性能研究	(21)
2.1 消失模模样材料类型	(21)
2.2 泡沫塑料力学性能模型	(23)
2.3 组织结构及力学性能	(27)
2.4 断裂特征	(28)
2.5 EPS 静态与动态压缩试验	(29)
2.5.1 EPS 压缩试验	(29)
2.5.2 不同加载速率下 EPS 的压缩力学性能	(31)
2.5.3 EPS 压缩蠕变模型	(32)
2.6 本章小结	(34)

第3章 消失模模样切削加工工艺分析	(35)
3.1 泡沫塑料模样的加工工艺	(36)
3.1.1 模样切削加工的基本原理	(36)
3.1.2 EPS在反复荷载作用下的力学特性	(37)
3.1.3 机械加工方法及其工艺	(38)
3.2 模样加工时静电处理技术分析	(39)
3.2.1 抗静电剂	(40)
3.2.2 泡沫塑料抗静电的主要途径和方法	(44)
3.2.3 抗静电泡沫塑料的抗静电机理	(44)
3.2.4 抗静电泡沫塑料的成形方法	(46)
3.2.5 抗静电性能的主要影响因素	(48)
3.3 泡沫切屑负压吸附收集方法研究	(51)
3.4 EPS切削加工缺陷	(56)
3.5 本章小结	(59)
第4章 数控加工消失模模样切削力研究	(60)
4.1 测试系统	(60)
4.2 多种刀具对比试验	(62)
4.2.1 模样加工试验方案	(63)
4.2.2 试验结果及分析	(64)
4.3 螺旋4刃与直刀4刃对比试验	(71)
4.3.1 单因子试验对比	(72)
4.3.2 单因子方差分析	(77)
4.4 切削分力模型	(80)
4.4.1 常系数和指数的确定	(80)
4.4.2 试验系统和试验方案	(83)
4.4.3 回归方程检验	(85)
4.5 切削总力模型	(88)

4.5.1	影响切削力的因素分析	(88)
4.5.2	试验设计	(88)
4.5.3	试验因素水平的确定	(89)
4.5.4	试验方案与试验结果	(90)
4.5.5	回归方程和回归系数显著性检验	(93)
4.5.6	刀具切削参数优化	(95)
4.6	本章小结	(101)
第5章	消失模模样数控加工质量分析	(102)
5.1	模样加工质量对铸件质量的影响	(102)
5.2	EPS 模样表面粗糙度和尺寸精度试验分析	(103)
5.2.1	模样加工试验方案	(104)
5.2.2	表面粗糙度试验结果及分析	(106)
5.2.3	模样尺寸精度试验分析	(110)
5.3	EPS 与 STMMA 模样加工质量对比试验研究	(112)
5.3.1	主轴转速对模样加工误差的影响	(112)
5.3.2	进给量对模样加工误差的影响	(113)
5.3.3	切削深度对模样加工误差的影响	(114)
5.3.4	进给速度对成形质量影响研究	(115)
5.4	本章小结	(116)
第6章	消失模模样多轴联动加工方法研究	(117)
6.1	多轴联动机床研究现状	(117)
6.2	多轴联动加工方法	(118)
6.2.1	单面 Z 向加工	(118)
6.2.2	斜面法向加工	(118)
6.2.3	复杂曲面的多轴联动加工	(119)
6.3	消失模模样与铸件尺寸误差分析	(121)
6.3.1	模样与铸件在 X 方向的尺寸误差分析	(122)

6.3.2 模样与铸件在 Y 方向的尺寸误差分析	(122)
6.3.3 模样与铸件在 Z 方向的尺寸误差分析	(127)
6.4 消失模模样数控加工成形机结构分析	(130)
6.5 本章小结	(133)
附录 A	(134)
参考文献	(187)

第 1 章 概 论

1.1 研究背景

近年来,国内外市场环境发生了巨大的变化,表现为消费者需求日趋主题化、个性化和多样化,消费行为更具有选择性,产品的生命周期日益缩短,产品的质量和性能更显重要。现代制造技术正是为了适应现代生产环境及市场环境的动态变化,在传统制造技术基础上通过不断吸收科学技术的最新成果而逐渐发展起来的一个新兴技术群。随着日益严峻的环境问题引起国际社会的普遍关注,社会经济发展模式由粗放经营、掠夺式开发向集约型、可持续发展转变。面向可持续发展的制造业,应力求对环境的负面影响最小,资源利用效率最高。在上述社会、经济、科学技术,以及环境资源保护的历史背景下,各国政府和企业界都在寻求对策,以获取全球范围内的竞争优势。目前,传统的制造技术已变得越来越不适应当今快速变化的形势,而先进的制造技术,尤其是计算机技术和信息技术在制造业中的广泛应用,使制造业正在或已经摆脱传统观念的束缚,跨入制造业的新纪元。

先进制造技术的发展趋势主要是信息化、精密化、集成化、柔性化、动态化、虚拟化、智能化、绿色化、快速化、全球化等。现代高新技术产品需要高精度制造。社会的发展对机械产品的质量提出了越来越高的要求。这就决定了精密加工、超精密加工技术是机械制造业未来发展的重点。绿色制造技术是指在保证产品的功能、质量、成本的

前提下,综合考虑环境影响和资源利用的一种现代化制造模式。快速化是指对市场的快速响应,对生产的快速重组。它要求生产模式有高度的柔性与高度的敏捷性。快速化能强有力地推动制造技术的进步与发展,它是先进制造技术发展的动力。

在汽车、机械、航空航天、国防军工等国家重大装备和重大工程的研制及实施过程中,零部件更新换代的速度不断加快,短周期、小批量的新产品开发成为必然趋势。另一方面,为建设资源节约型、环境友好型社会,要求在铸造过程中降低能源消耗,减少污染,提高金属件质量。随着许多新材料、新工艺的广泛应用,制造业对金属件的结构形式和型腔要求也日益复杂。若采用传统的模具制造方法,不仅成本高,生产率低,而且很难满足模具的质量要求。我国汽车产业的高速发展,直接带动了汽车模具的高速发展。国内大型汽车覆盖件模具企业采用的是利用消失模模样制造毛坯的方法,常常需要手工切割、黏结。条件较好的企业采用机加工,但是从加工消失模模样、手工黏结模样到埋砂消失模铸造,制造周期长,环节多,不易保证制造质量,且成本较高。以汽车缸体、缸盖等为代表的复杂金属件生产过程复杂,质量要求高,若采用传统的制造方法,不仅成本高,生产率低,而且很难保证质量。随着计算机技术、数控技术等先进技术在制造业中的广泛应用,急需开发先进的数字化精密制造技术及设备,以满足制造大型高质量模具的技术需求。

铸造行业是典型的高能耗、高污染行业。铸铁件生产的平均能耗统计数据显示,我国铸铁件生产的平均能耗是发达国家的2倍多。我国每生产1 t合格铸件,要排放约50 kg粉尘,1000~2000 m³废气,约1 t废砂、0.3 t废渣。目前采用的传统砂铸与经验设计方式,不仅设计试制成本高昂,且生产中还排放大量的污染物。随着全球经济的发展,能源供应变得越来越紧张,因此,各国对能耗高、污染大的铸造行业提出了更高的节能降耗及环保要求。计算机模拟技术不受生产试验条件的限制,可以对铸件生产的充型过程和凝固过程的影

响因素进行定量、定性的分析。计算机模拟技术与被称为“21 世纪的铸造新技术”的消失模铸造技术相结合,能大大减少在设计阶段与生产阶段的能源消耗与污染物排放的问题。目前消失模铸造精密成形工艺及数值模拟已成为工业发达国家在制造领域竞相研究开发的热点。消失模技术能大大减少生产成本与生产周期,然而,在我国,该工艺很不成熟。因此,开展针对消失模铸造精密成形工艺及数值模拟研究,对降低制造业中的能源消耗和污染物排放具有重要的意义。

目前,美国、日本等发达国家都进行了金属件消失模数字化精密成形技术及设备研究。美国作为消失模铸造技术的发源地,在 20 世纪 80 年代初率先将消失模铸造技术应用于工业生产,当前仍然是消失模铸造工艺的领跑者,其消失模铸件的产量已经占世界产量的 50% 以上。在美国、德国和意大利等发达国家,几个汽车集团积极参与了消失模铸造技术研究,经历了较长的技术积累后,已进入大批量生产铝合金和黑色合金铸件的技术成熟期。日本因资源、环境等限制,非常重视先进制造技术、绿色制造技术等研究。消失模数字化精密成形技术在汽车中大型冲压件模具上的应用取得了良好经济效益,成为汽车薄板用中大型冲压件模具制造的首选方向,引领精密成形技术发展。在我国 22000 多家铸造企业中,消失模铸造企业仅有 100 多家,大量企业仍然采用传统的砂型铸造技术。国内复杂金属件生产过程中存在制造周期长、尺寸精度低、加工余量大、耗用材料多、成形质量差、手工操作劳动强度高、生产工序多、重复性和质量稳定性差等问题,尤其是在复杂内腔、壁厚不均匀的大型复杂金属件的铸型制造工艺方面一直沿用传统的制造模式,铸造污染大,工艺出品率低,产生大量的废水、废渣以及粉尘。因此,急需在国内铸造行业推广复杂金属件数字化铸造技术。

利用快速成形技术制造铸型,由于采用有选择的烧结或喷射黏结剂的方式逐层加工,加工速度较慢,不适于大中型铸型的加工。而消

失模数控加工制造方法是在 CAD 模型驱动下,直接采用多轴联动数控加工设备实现具有复杂内外结构的消失模模样的一体化数字化成形,并结合消失模工艺浇注成形,不需要传统的铸造模样,制造速度快,精度高。本书针对大型铸造模具制造周期长、尺寸精度低、加工余量大、生产工序多、重复性和稳定性差等问题,结合中国汽车行业开发具有自主知识产权的汽车覆盖件铸造模具,开展消失模数字化精密成形制造方法研究,为单件、小批量金属件的快速制造提供解决方案,是传统砂型铸造的重大革命,有利于推动我国铸造业节能减排技术研究进展。

消失模铸造技术是将与铸件尺寸形状相似的泡沫塑料模样黏结组合成模样簇,刷涂耐火涂层并烘干后,埋在干砂中振动造型,采用微振加负压紧实,在没有芯子的情况下在浇铸和凝固过程中继续保持一定的负压,使泡沫塑料气化继而被金属取代形成铸件的一种新型铸造工艺方法。消失模铸造有多种不同的名称,国内主要的名称有“干砂实型铸造”“负压实型铸造”,简称 EPC 铸造。消失模铸造是一种几乎没有加工余量,铸件无飞边毛刺,且能精确成形的铸造工艺。

1999 年,科技部把消失模铸造技术列为国家重点推广的高新技术。南水北调、西气东输等国家重大工程项目中应用了大量管体件、阀体件等耐蚀/耐磨的铸件。针对不同工况环境,需要开发不同系列的零部件产品。消失模数控加工技术可提供一种成本低、加工速度快、加工精度高的制造方法,用消失模铸造技术快速制造单件、小批量及大型金属件,能够为国家重大工程的顺利实施提供保障。消失模铸造工艺容易实现清洁、批量生产,为设计铸件复杂结构提供了充分的自由。与传统的铸造技术相比,消失模铸造技术具有与无与伦比的优势,被国内外铸造界誉为“21 世纪的铸造技术”和“铸造工业的绿色革命”。

1.2 消失模铸造类型及特点

1.2.1 用模具发泡成形的消失模铸造

用模具发泡成形的消失模铸造的主要特点是,模样在模具中成形和采用负压干砂造型。它主要适用于中小型铸件的大批生产,如汽车或拖拉机铸件、管接头、耐磨件的生产。通常称这种方法为消失模铸造(lost foam casting, LFC)法。

消失模铸造模具发泡成形的工艺流程如图 1-1 所示,将用泡沫塑料制作的模样浸涂耐火涂层后,直接放入可抽真空的砂箱内,填入不含黏结剂和水分的砂子,将泡沫塑料模填砂振实,然后用塑料薄膜覆盖砂箱,抽真空,砂子紧固成铸型。金属液浇入铸型,泡沫塑料模与高温金属液接触,迅速气化,及时抽走产生的气化物,金属液完全取代泡沫塑料模,冷却形成铸件。

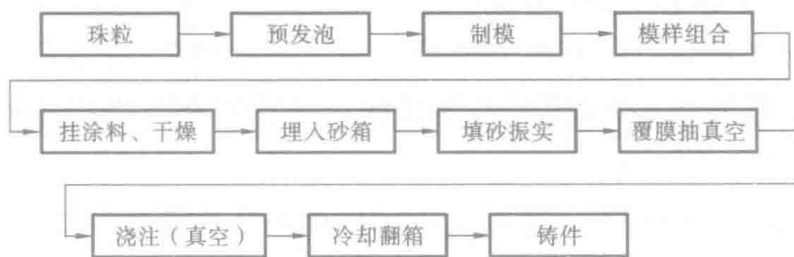


图 1-1 消失模铸造工艺流程

(1) 预发泡。模样生产是消失模铸造工艺的第一道工序。复杂铸件(如汽缸盖),需要数块泡沫模样分别制作,然后再胶合成一个整体模样,每个分块模样都需要一套模具进行生产。另外,在胶合操作中还可能需要一套胎具,用于保持各分块的准确定位。模样的成形工艺分为两步,第一步是将聚苯乙烯珠粒(EPS)预发到适当密度(一般

通过蒸汽快速加热来进行),此阶段称为预发泡。

(2) 制模。经过预发泡的珠粒要先进行稳定化处理,然后再送到成形机的料斗中,通过加料孔进行加料,模具型腔充满预发的珠粒后,开始通入蒸汽,使珠粒软化、膨胀,挤满所有空隙并且黏合成一体,这样就完成了泡沫模样的制造过程,此阶段称为蒸压成形。成形后,在模具的水冷腔内通过大流量水流对模样进行冷却,然后打开模具取出模样。此时模样温度较高而强度较低,所以在脱模和储存期间必须谨慎操作,防止变形及损坏。

(3) 模样组合。模样在使用之前,必须存放适当时间使其熟化稳定。典型的模样存放周期多达 30 天,而对于用特殊设计的模具所成形的模样仅需存放 2 个小时。模样熟化稳定后,可对分块模样进行胶合。对于大批量生产的铸件,其分块模样胶合必须使用热熔胶在自动胶合机上进行,这样才能保证黏合精度。中小批量生产的铸件可采用冷黏胶手工黏合。胶合面接缝处应密封牢固,以减少产生铸造缺陷的可能性。

(4) 挂涂料、干燥。为了每箱浇注可生产更多的铸件,有时将许多模样胶接成簇,把模样簇浸入耐火涂料中,然后在 $30\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($86\sim 140\text{ }^{\circ}\text{F}$) 的空气循环烘炉中干燥 $2\sim 3\text{ h}$ 。干燥之后,将模样簇放入砂箱,填入干砂振动紧实,使所有模样簇内部孔隙和外围的干砂都得到紧实与支撑。

(5) 浇注。模样簇在砂箱内通过干砂振动充填坚实后,抽真空形成负压加强紧实度,铸型就可浇注。熔融金属浇入铸型后,模样气化被金属所取代形成铸件。在消失模铸造工艺中,浇注速度比传统壳型铸造更为关键。如果浇注过程中断,砂型就可能塌陷产生废品。因此,为减少每次浇注的差别,最好使用自动浇注机。

(6) 冷却翻箱及落砂清理。浇注之后,负压保持一段时间,然后释放真空,铸件在砂箱中凝固和冷却,最后落砂。铸件落砂比较简单:倾翻砂箱,铸件就可从松散的干砂中掉出。随后将铸件进行自动分

离、清理、检查并放到铸件箱中运走。干砂经砂处理系统处理冷却后可重新使用。在生产中很少有其他附加工序,金属废料可在生产中重熔使用。

1.2.2 板材加工成形的气化模铸造

板材加工成形的气化模铸造的主要特点是:模样不用模具成形,而是采用市售的泡沫板材,用数控加工机床分块制作,然后黏合而成;通常采用树脂砂或水玻璃砂作为充填砂,或采用干砂负压造型。这种方法主要适用于中大型铸件的单件、小批生产,如汽车覆盖件模具、机床床身的生产等。通常称这种方法为全模铸造(full mould casting, FMC)法。与 LFC 法相比,其制模过程不一样,而后续过程基本一样。

1.2.3 消失模铸造工艺的特点

消失模铸造不产生由于分箱、起模、下芯、合箱和拔模斜度等操作所引起的铸件尺寸误差。由于铸型紧实度高,也不存在型壁移动引起的铸件尺寸误差。只要模型尺寸准确,埋型合理,就可以得到尺寸精度高的铸件。此工艺生产的铸件加工划线时容易找正,加工量均匀,铸件各相对尺寸误差小。铸件表面粗糙度 Ra 值可达 $3.2 \sim 12.5 \mu\text{m}$,铸件尺寸精度等级可达 CT5~CT7。消失模铸造能够减轻铸件毛坯的重量,机械加工余量小,最多为 $1.5 \sim 2 \text{ mm}$,可大大减少机械加工的费用。和传统砂型铸造方法相比,可以减少 $40\% \sim 50\%$ 的机械加工时间。由于使用的是单一型料,所以由型砂造成的铸件缺陷较少,属于实体埋型,铸件无飞边毛刺。在真空状态下可及时抽走泡沫塑料气化产物,改善了实型铸造和砂型铸造时产生的“实型缺陷”,减少了铸件表面皱皮和铸钢件表面增碳缺陷。

消失模铸造工艺设计灵活,为铸件结构设计提供了充分的自由度,可以通过泡沫塑料模样组合铸造出高度复杂的铸件。由于消失模铸造无需配砂混砂,缩短了制模周期,模型制作不需要分型和下芯子,

简化了造型工序,省去了诸如分箱、起模、翻转铸型、修型、下芯和合箱等操作,容易实现一箱浇注多件、一浇口浇注多件。因此,可以提高生产率,特别是对于单件、形状复杂的铸件,效果更明显。

由于无传统铸造中的砂芯,因此不会出现传统砂型铸造中因砂芯尺寸不准确或下芯位置不准确造成的铸件壁厚不均等问题。消失模铸造属于清洁生产,型砂中无化学黏结剂,低温下泡沫塑料对环境无害,旧砂回收率达95%以上。与传统铸造方法相比,消失模铸造工艺的噪声、CO气体和硅石粉尘危害明显减少,显著改善环境,易于实现机械化、自动化和清洁生产。消失模铸造不用人工紧实、铸型修补和打箱,从而大大地减轻了劳动强度,而且该法在浇注时产生的废气可通过密闭管道排放到车间外以进行净化处理,这样也大大改善了生产现场环境。因此,消失模铸造技术符合铸造发展的总趋势,有着广泛的发展前景。

消失模铸造工艺与其他铸造工艺一样,有其缺点和局限性。并非所有的铸件都适合采用消失模工艺来生产,需要根据铸件批量、铸件材质、铸件大小、铸件结构等因素综合考虑采用这种工艺的可行性。批量越大,经济效益越可观。对于材质而言,其适用性由好到差的顺序大致是:灰铸铁—非铁合金—普通碳素钢—球墨铸铁—低碳钢和合金钢。这是因为泡沫塑料在浇注过程中,燃烧分解物对合金溶液的影响不同,例如对含碳低的铸钢件,采用消失模铸造可能会使铸件表皮出现增碳问题。因此决定生产之前,需通过必要的准备以缩短工艺试验、调试周期。铸件结构越复杂,就越能体现消失模铸造工艺的优越性和经济效益。对于结构上有狭窄的内腔通道和夹层的情况,采用消失模工艺前需要预先进行试验,才能投入生产。对一些形状简单的、用砂型铸造方法也可高质量生产的铸件,而且其生产效率、铸件成本比用消失模工艺低,这种情况不一定适合采用消失模铸造方法。表1-1是大批量生产时传统黏土砂型铸造与消失模铸造工艺特点的比较情况。