

ELECTROMAGNETIC FORMING

电磁成形

李春峰 等 著



科学出版社

电磁成形

Electromagnetic Forming

李春峰 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是有关电磁成形技术的专著,书中较系统地介绍电磁成形在国内外的发展现状、最新研究成果以及前景展望。内容几乎涵盖电磁成形在金属塑性成形领域应用的所有方向。全书共12章,主要包括电磁成形技术基础、电磁成形设备、管坯电磁成形与校形、板坯电磁成形与辅助成形、管坯电磁连接、双金属管电磁复合、电磁铆接及粉末磁脉冲压实等。

本书可作为材料加工领域的本科生、研究生教材,也可作为从事金属塑性加工,尤其是高速率成形研究和应用的科研工作者及工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电磁成形 = Electromagnetic Forming/李春峰等著. —北京:科学出版社,2016.7

ISBN 978-7-03-049191-6

I. ①电… II. ①李… III. ①电磁成形-研究 IV. ①TG391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 147009 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 霍明亮 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年7月第一版 开本:720×1000 B5

2016年7月第一次印刷 印张:25 1/4

字数:493 000

定价:168.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电磁成形自 20 世纪 50 年代出现,至今已走过 60 个年头。作为一种先进的特种塑性成形方法,在工业领域,尤其在航空、航天、汽车及国防等领域得到广泛应用。计算机模拟技术的发展及先进实验技术的应用,为电磁成形的理论研究提供了更加有力的手段。对于瞬间(毫秒)发生的现象,搞清其发生发展过程、变形特性及成形机理成为可能。深入的理论研究有力地推动了该项技术的工业应用。由初期简单的板管成形向更广泛应用扩展,出现了辅助成形、复合成形、粉末致密、焊接等新的成形方法。

自电磁成形问世以来,我国高等院校、科研院所及工厂的科学技术人员为电磁成形的理论研究及推广应用作出了不懈的努力,使得我国电磁成形技术的发展与国际保持同步。由于电磁成形具有特殊的变形方式和变形特点,其尤其适合一些难成形材料和特殊形状零件的成形。该项技术不但在塑性加工领域有广阔的发展空间,而且在其他领域也有广阔的应用前景。

本书作者多年来从事电磁成形理论研究及工艺应用工作,在多个应用方向都有较深入系统的研究。为进一步推动电磁成形技术在我国的发展应用,在参考国内外大量相关文献的基础上,作者结合自己的研究成果,编写此书。

本书共 12 章,第 1 章和第 2 章由李春峰编写;第 3 章由赵志衡编写;第 4 章由李忠编写;第 5 章由于海平编写;第 6 章由江洪伟编写;第 7 章由邓将华、张旭编写;第 8 章由刘大海编写;第 9 章由李敏编写;第 10 章由徐志丹、于海平编写;第 11 章由徐俊瑞编写;第 12 章由范治松、于海平编写。最后由李春峰统稿。于海平在本书编写和出版过程中做了大量组织工作。

北京航空航天大学万敏教授对本书做了精心细致的评审,提出了宝贵的修改意见和建议,在此深表谢意。

感谢国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(2011CB012805)对本书出版的支持。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 6 月 1 日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁成形技术发展历史	1
1.2 电磁成形技术基本原理及特点	2
1.3 电磁成形技术的应用	4
参考文献	5
第 2 章 电磁成形技术基础	6
2.1 引言	6
2.2 磁场分析	6
2.2.1 管坯电磁胀形时磁场的对称性	7
2.2.2 边界条件	8
2.2.3 有限元方法求解磁场	9
2.3 放电电流分析	12
2.4 磁场及放电电流测量	15
2.4.1 磁场测量	15
2.4.2 放电电流测量	16
2.5 磁场力及放电能量	18
2.5.1 磁场力	18
2.5.2 放电能量	20
2.6 变形分析	21
2.6.1 管坯的变形过程	21
2.6.2 平板毛坯变形过程	23
2.7 电磁成形数值分析方法	26
参考文献	28
第 3 章 电磁成形设备	30
3.1 引言	30
3.1.1 电磁成形设备的发展概况	30
3.1.2 电磁成形设备的组成	31
3.2 充电回路	35
3.3 放电回路	38

3.3.1	放电开关	38
3.3.2	传输线	44
3.3.3	放电回路设计的注意事项	45
3.4	保护回路	46
3.4.1	电容器过流保护	47
3.4.2	过压保护	48
3.4.3	卸荷保护	50
3.4.4	断电保护	51
3.5	控制及触发回路	51
3.5.1	控制回路	51
3.5.2	触发回路	56
	参考文献	56
第4章	管坯电磁胀形	58
4.1	引言	58
4.2	直螺线管线圈电磁胀形的数值模拟	64
4.2.1	模拟结果分析	64
4.2.2	工艺参数对电磁胀形的影响	69
4.3	异型线圈电磁胀形分析	85
4.3.1	阶梯形线圈电磁胀形的数值模拟	86
4.3.2	组合线圈电磁胀形的数值模拟	93
4.4	管坯电磁胀形试验分析	102
4.4.1	直螺线管线圈自由电磁胀形	102
4.4.2	阶梯线圈自由电磁胀形	112
4.5	展望	115
	参考文献	115
第5章	管坯电磁缩径	118
5.1	引言	118
5.2	管坯径向动态加载屈曲	118
5.2.1	动态屈曲问题的特点	118
5.2.2	动态冲击屈曲判别准则	119
5.2.3	管坯电磁缩径屈曲研究进展	120
5.3	管坯电磁缩径压缩失稳临界条件	121
5.3.1	管坯电磁缩径电动力学分析	121
5.3.2	管坯电磁缩径塑性动力分析	125
5.3.3	压缩失稳条件建立	130

5.4	管坯电磁缩径变形分析	133
5.4.1	数值模拟模型	133
5.4.2	成形系统参数对变形的影响	135
5.4.3	管坯电磁缩径稳定性分析	139
5.5	展望	146
	参考文献	146
第6章	管坯电磁精密校形	148
6.1	引言	148
6.2	电磁校形工艺研究现状	148
6.2.1	电磁校形的优点	148
6.2.2	国内外的研究现状	149
6.2.3	电磁校形技术在汽车中的应用	149
6.3	管件电磁校形数值模拟	151
6.3.1	电磁校形模型建立	151
6.3.2	电磁场-结构场顺序耦合模型	152
6.4	管件电磁校形变形分析	153
6.4.1	模具与管件间间隙对校形的影响	154
6.4.2	放电电压对管件电磁校形的影响	157
6.4.3	放电次数对改善校形效果的作用	158
6.4.4	管件材料对管件电磁校形的影响	159
6.4.5	管件长度对管件电磁校形的影响	161
6.4.6	管件厚度对管件电磁校形的影响	163
6.4.7	放电能量对管件电磁校形的影响	164
6.4.8	放电频率对管件电磁校形的影响	165
6.4.9	相对高度对管件电磁校形的影响	168
6.5	铝合金筒形件校形数值模拟	170
6.5.1	一次放电成形模拟	170
6.5.2	多次放电成形模拟	171
6.6	铝合金筒形件校形结果分析	173
6.7	展望	176
	参考文献	176
第7章	电磁铆接	178
7.1	引言	178
7.2	电磁铆接力解析	183
7.3	电磁铆接数值模拟	184

7.3.1	数值模拟方案的确定	184
7.3.2	数值模拟结果分析	185
7.4	电磁铆接铆钉变形机理	191
7.4.1	绝热剪切变形机理	191
7.4.2	绝热剪切微观组织	197
7.5	电磁铆接过程中动态塑性变形行为	203
7.5.1	铆接过程受力分析	203
7.5.2	电磁铆接过程干涉量模型	204
7.6	电磁铆接工艺	214
7.6.1	复合材料结构电磁铆接	215
7.6.2	大直径铆钉电磁铆接	217
7.6.3	电磁铆接试样质量分析	219
7.7	展望	223
	参考文献	223
第8章	电磁辅助冲压成形	225
8.1	引言	225
8.2	电磁辅助冲压过程数值解析	228
8.2.1	电磁辅助冲压有限元分析理论基础	229
8.2.2	电磁辅助冲压成形有限元分析方案及流程	233
8.2.3	电磁辅助冲压有限元分析实例	235
8.3	电磁辅助冲压成形分析	240
8.3.1	板坯准静态-动态顺序加载塑性行为	240
8.3.2	电磁辅助板坯变形特征	248
8.4	展望	249
	参考文献	250
第9章	粉末磁脉冲压实	252
9.1	引言	252
9.1.1	磁脉冲压实原理	252
9.1.2	磁脉冲压实的应用	254
9.2	磁脉冲压实数值解析及有限元模拟	259
9.2.1	磁脉冲压实方程的建立	259
9.2.2	磁脉冲压实有限元分析	268
9.3	粉末磁脉冲压实工艺分析	277
9.3.1	温度对 Ti6Al4V 粉末压坯性能的影响	277
9.3.2	放电电压对 Ti6Al4V 粉末压坯性能的影响	277

9.3.3	加热温度对 Cu 粉末压坯密度的影响	278
9.3.4	电压对 Cu 粉末压坯密度的影响	279
9.3.5	TiO ₂ 粉末的磁脉冲压实	280
9.3.6	PZT 陶瓷粉末的磁脉冲压实	280
9.3.7	x PMS-(1- x)PZN 陶瓷粉末的磁脉冲压实	281
9.3.8	铁磁性纳米粉末的磁脉冲压实	282
9.4	磁脉冲压实机理分析	283
9.5	展望	284
	参考文献	284
第 10 章	管坯电磁连接	288
10.1	引言	288
10.2	管坯电磁连接技术概况	288
10.2.1	管坯电磁连接技术原理与特点	288
10.2.2	管坯电磁连接技术应用现状	291
10.3	异种金属磁脉冲焊接接头力学性能及微观组织	292
10.3.1	磁脉冲焊接接头力学性能	292
10.3.2	波形界面特征	295
10.3.3	晶粒细化现象	297
10.3.4	过渡区形貌、结构及成分	298
10.4	铝/钢异种金属管件磁脉冲焊接工艺	302
10.4.1	外管变形过程	302
10.4.2	冲击速度测量	304
10.4.3	工艺参数对碰撞速度的影响	307
10.5	展望	315
	参考文献	315
第 11 章	镁合金板坯电磁成形	317
11.1	引言	317
11.2	镁合金板坯的电磁单向拉伸成形	323
11.2.1	变形过程分析	324
11.2.2	速度对单向拉伸的影响	326
11.2.3	单向拉伸极限应变	327
11.3	镁合金板坯的电磁胀形	330
11.3.1	放电参数对胀形高度的影响	331
11.3.2	速度和应变速率的变化规律	333
11.3.3	电磁胀形成形极限	334

11.4	镁合金板材的电磁驱动胀形	336
11.4.1	驱动片对磁压力的影响	336
11.4.2	不同材料的驱动片对胀形的影响	338
11.4.3	动态驱动成形极限	339
11.5	镁合金板材电磁平面应变成形	340
11.5.1	放电参数对变形高度的影响	341
11.5.2	平面应变成形极限	342
11.6	镁合金壳体件的电磁成形	343
11.6.1	AZ31 镁合金壳体磁脉冲成形工艺试验	344
11.6.2	放电参数对成形高度的影响	345
11.6.3	缺陷分析	347
11.6.4	成形分析	349
11.7	展望	355
	参考文献	356
第 12 章	双金属管电磁复合	358
12.1	引言	358
12.2	双金属管电磁复合技术原理、特点及研究现状	358
12.2.1	外包覆型 Al/Fe 双金属管电磁复合	360
12.2.2	内衬型 Al/Fe 双金属管电磁复合	362
12.2.3	双金属管电磁复合技术研究现状分析	363
12.3	Al/Fe 双金属管电磁复合过程塑性变形规律	365
12.3.1	复管变形协调性分析	365
12.3.2	冲击接触界面材料塑性变形特征	373
12.4	Al/Fe 双金属管电磁复合界面组织结构	377
12.4.1	扩散界面	377
12.4.2	熔合界面	382
12.5	展望	389
	参考文献	390

第 1 章 绪 论

电磁成形是利用磁场力使金属坯料变形的高速率成形方法。因为在成形过程中载荷是以脉冲的方式作用于毛坯,因此又称为磁脉冲成形^[1]。电磁成形时,电能极短时间里转化为空气中的高压冲击波,并以脉冲波的形式作用于毛坯,使它产生塑性变形。其重要特征,一个是能量释放时间短,仅为微秒级,而变形为毫秒级,因此变形功率极高。再一个是工件变形速度快,材料主要靠获得的动能,在惯性力作用下成形。

电磁成形时,作用力可达 300~500MPa,材料变形速度可达 300m/s。

1.1 电磁成形技术发展历史

早在 20 世纪 20 年代初,物理学家 Kaptila 在脉冲磁场中做实验时发现,形成脉冲磁场的金属线圈易胀大、胀破^[2],这一现象启发了人们对电磁成形原理的思考。尽管人们早就发现了这一原理,它却没有马上得到应用。直到 1958 年,美国通用电力公司在日内瓦举行的第二次国际和平原子能会议上展出了世界上第一台电磁成形机。1962 年,美国的 Brower 和 Harvey 经过改进和完善,发明了用于工业生产的电磁成形机,并申报了专利,注册商标为 Magneform^[3]。从此电磁成形引起各工业国的广泛关注和高度重视,并取得了不少应用成果,其中美国和苏联处于领先地位。

电磁成形技术的发展历程,大体可分为三个阶段。

1. 电磁成形技术的推广应用及设备研制

20 世纪 50~70 年代,电磁成形作为一种新工艺,一经提出,即得到工业发达国家的广泛关注,有大量的相关论文发表。文章主要集中于电磁成形原理介绍及应用实例。工业应用主要集中于航空、航天领域的传统材料及工序,如管材的胀形、缩径、连接装配及板材的胀形等。电磁成形设备的研制得到较快发展,60 年代中期,出现了储能为 50kJ、200kJ 和 400kJ 的电磁成形机。70 年代中期已有 400 多台电磁成形机运行于各种生产线上,150 多家工厂使用了这种工艺,多数机器用于大批量生产。这些设备脉冲电流一般在 100~400kA,放电周期为 100 μ s 左右。到了 80 年代中期,设备最大储能达 500kJ,并逐渐实现系列化和标准化^[1]。

2. 电磁成形理论及数值模拟方法研究

电磁成形过程涉及电学、磁学、电动力学、塑性动力学等多学科内容,而且,电动力学过程与塑性动力学过程都相当复杂,尤其是成形过程中电磁学过程与动力学过程交互影响,使得理论研究困难重重^[4]。20世纪90年代,计算机技术的快速发展为理论研究提供了强有力的工具,各国学者更加关注电磁成形理论的研究。电磁成形在微秒级时间内放电、毫秒间完成的变形,传统手段很难捕捉瞬间发生的现象和过程,利用计算机技术则使之成为可能。计算机技术将电磁场与力场有机结合,电磁成形的电磁场、应力场、应变场、温度场、速度场乃至毛坯的瞬间变形过程都清晰地摆在人们面前。

3. 电磁成形新加工方法的研发应用

20世纪末及21世纪初以来,随着加工业高速发展,高强度、低成形性材料应用日渐增多。在汽车制造业,为减少能源消耗和降低大气环境污染,以铝合金代替钢板制造覆盖件成为研究热点。纳米材料的出现也对新的制备工艺提出强烈要求。电磁成形新的发展高潮随之到来。其主要特征是在传统工序广泛成熟应用的基础上,出现大量新的加工方法,代表性的如低压电磁铆接及自动化铆接、电磁焊接、异种材料电磁复合、电磁辅助冲压成形、电磁粉末致密及新材料加工等。

1.2 电磁成形技术基本原理及特点

电磁成形装置原理如图1-1所示^[5]。该装置主回路由充电回路和放电回路组成。充电回路包括升压变压器7、整流元件1、限流电阻2和脉冲电容器组6。放电回路包括脉冲电容器组6、高压开关3、金属坯料4和成形线圈5。电磁成形原理如图1-2所示^[6]。当螺线管线圈中通过电流时,由于电磁感应,管坯5上将会产生感应电流(涡流),其方向与螺线管线圈3中的电流方向相反。这一感应电流所产生的反向磁通穿过管坯5,迫使磁力线4密集于螺线管线圈3和管坯5的间隙内。密集的磁力线4具有扩张的特性,因而坯料外表面各部分都受到一个沿径向向内的冲击压力。当冲击压力值达到坯料材料的屈服应力时,管坯5便产生压缩变形。电磁成形原理也可以用放置在磁场中的电流受到洛伦兹力这一物理现象来加以解释。若将螺线管线圈3置于管坯5的内部,则坯料将受到径向向外压力而产生胀形。换用不同结构的线圈,能对不同尺寸的金属毛坯进行塑性加工。

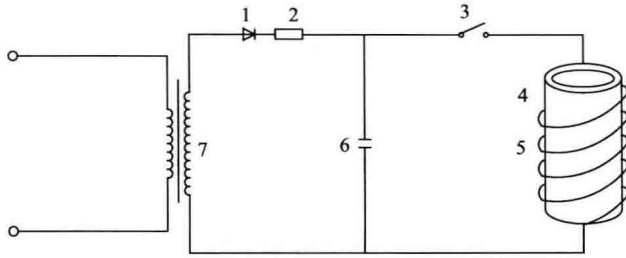


图 1-1 电磁成形装置原理图

1-整流元件；2-限流电阻；3-高压开关；4-金属坯料；5-成形线圈；6-脉冲电容器组；7-升压变压器

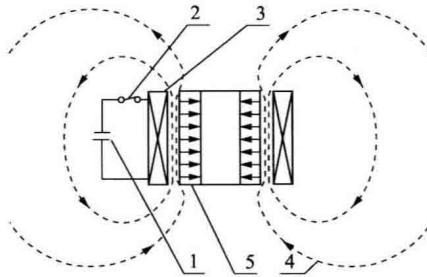


图 1-2 电磁成形原理图

1-脉冲电容器；2-高压开关；3-螺线管线圈；4-磁力线；5-管坯

电磁成形与其他加工方法的主要区别是：磁场力在瞬间作用于毛坯上且无机械接触，所以是一种高速度、高质量的加工方法。它具有如下突出的优点^[7,8]。

(1) 电磁成形过程中，在脉冲压力作用下，工件获得很大的加速度，可以大幅度提高材料的成形极限。

(2) 电磁成形可对复杂零件进行高精度加工，残余应力小，回弹小。

(3) 磁场可以通过非导体材料，所以可以对非金属涂层或放在容器内的工件进行成形加工。

(4) 电磁成形可进行复合及混合加工，缩短加工周期。

(5) 电磁成形属单模成形，简化了模具制造，增加了加工柔性。

(6) 电磁成形加工过程容易实现能量控制和生产自动化、机械化。

在电磁成形分析及工艺设计中，应充分注意其与传统塑性变形的不同。

(1) 高速变形引起材料性能异乎寻常的变化。

(2) 材料变形主要靠获得的惯性，磁场力与应变没有我们习惯的对应关系。

(3) 材料变形主要不是发生在磁场力作用期间，而是在磁场力作用之后。

(4) 变形毛坯受到的是沿厚度方向衰减的体积力。

1.3 电磁成形技术的应用

电磁成形技术主要应用于航空、航天、兵器、汽车制造及电子等领域。电磁成形技术在美国和俄罗斯的国防领域应用较多,如大型构件(导弹弹体、飞机机翼、燃料箱)的精密校形、膜片无毛刺冲裁、航空航天用异型管的加工、复杂外形管件加工、飞机操纵杆的连接、核燃料棒的成形、核废料容器的密封等。在美国汽车制造业中应用电磁成形技术制造传动轴减少了工序,提高了效率,降低了成本,改善了工人的劳动条件^[9]。在电子领域,可用电磁成形一次放电完成小电机外壳和骨架的固定装配。超大型电磁成形设备也已被用于火箭上燃料室零件的生产以及飞行器气体涡轮发动机热交换器的连接^[1,10]。大型客机及运载火箭装配中使用了先进的自动电磁钻铆系统^[11]。

电磁成形可完成多种成形工艺,按加工毛坯的不同,可完成如下典型工艺(表 1-1)。

表 1-1 电磁成形的典型工艺

电磁成形种类	电磁成形的典型工艺
管坯成形	胀形、缩径、校形、连接、焊接、复合、侧翻边和冲侧孔等
板坯成形	胀形、校形、压印、翻边、冲裁、辅助成形、卷接和焊接等
体积成形	铆接、镦锻等
粉末成形	粉末致密

上述工艺中,对毛坯施加作用力可分为两种方式,一种是将磁场力直接作用于毛坯,如管坯胀形、缩径、校形等。此种受力方式中,毛坯所受磁场力与变形间没有传统成形工艺中的对应关系,材料是在磁场力施加后以惯性力实现变形。另一种是磁场力驱动动力头对毛坯施加作用,如电磁铆接、镦锻及粉末致密等。此种受力方式中,材料受力与变形间有传统成形工艺类似的对应关系,差别在于此时毛坯获得了极快的变形速度。

电磁成形理论研究及技术应用中,应对如下几个问题加以关注:

(1) 为了深入研究电磁成形变形机理及变形行为,如电磁成形改变材料成形性机理、电磁铆接铆钉绝热剪切带的形成、电磁焊接界面变形行为及形成机制、电磁粉末致密机制、磁脉冲辅助冲压成形变形机理研究等,冲击动力学、分子动力学及微观变形分析等理论和研究方法是重要研究手段。

(2) 为获得瞬间变形场信息,如速度场、应变场、位移场等,需开发和应用先进的实验技术手段。

(3) 同其他成形新技术一样,电磁成形有其本身的特点和适用性。针对某些

特定的零件,该工艺有无比的优越性。但有些情况下,如深筒形零件成形、微细管件成形(尤其胀形)、导电性不好的材料成形、无法形成涡流毛坯的成形等,使用电磁成形将是困难的,甚至是不可能的。

(4) 与其他工艺相结合的复合成形将是电磁成形的一个重要发展方向。目前的实验研究表明,磁脉冲辅助板材冲压成形技术(普通冲压成形与电磁成形相结合)有望为难成形材料加工提供新的手段。

(5) 电磁成形设备改进仍有较大空间。如采用多路放电技术、高性能放电开关技术,使用高比容电容器,以及与加热和检测设备的结合等。

电磁成形技术自 20 世纪 50 年代出现以来,作为一种特种塑性加工方法,在工业领域得到广泛应用。由于电磁成形技术特殊的变形方式和特点,可以预见,未来它不但在塑性加工领域拓展应用,而且在其他领域也将有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 李春峰. 高能率成形技术. 北京: 国防工业出版社, 2001: 1-5.
- [2] Birdsall D H, Ford F C, Furth H P. et al. Magnetic Forming. *American Mechanist/Metalworking Manufacturing*, 1961, 105: 117-121.
- [3] Robertn S. Electromagnetic Metal Forming. *Manufacturing Engineer*, 1978, 2: 74-75.
- [4] 张守彬. 电磁成形胀管过程的研究及工程计算方法. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1990: 1-90.
- [5] 清华大学电力系高电压技术专业. 冲击大电流技术. 北京: 科学出版社, 1978: 136-179.
- [6] 鈴木秀雄, 根岸秀明, 村田真. 電磁成形法の基礎と工業利用の實際. *塑性と加工*, 1984, 25(8): 694-700.
- [7] 佐野利男, 村越庸一, 高桥正青. 等. 电磁力超高速塑性加工法. 常乐, 译. *国外金属加工*, 1988, (2): 20-25.
- [8] Bely I V, Fertik S M, Khimenko L T. *Electromagnetic Metal Forming Handbook. English Version Book Translated by Altynova M M. Columbus; Ohio State University*, 1996: 10-45.
- [9] 美国金属学会. 金属手册. 9 版. 北京: 机械工业出版社, 1994: 120-165.
- [10] Zhang W W. *Intelligent Energy Field Manufacturing-Interdisciplinary Process Innovations. New York: CRC Press*, 2010: 471-504.
- [11] Hartmann J, Meeke C. Automated wing panel assembly for the A340-600. *SAE Technical Paper Series*, 2000-01-3015.

第 2 章 电磁成形技术基础

2.1 引言

电磁成形中,材料变形是由洛伦兹力引起的,因此电磁场理论是电磁成形研究的重要基础理论之一。有关磁场、电场、磁场力及电磁能等有关问题都可用传统的电磁场理论进行分析。

与常规成形方法相比,电磁成形的变形是在瞬间完成的,而磁场力的有效作用时间短于变形时间。这种在极短时间内的变形研究极其困难,同时,变形过程中各物理参数的记录和分析,也对测试手段及分析方法提出了更高的要求。

电磁成形中,材料的变形不是在磁场力直接作用下发生的,而是在由此获得的惯性力的作用下产生的。磁场力与变形没有传统变形那种一一对应关系,因此传统塑性成形理论中有些力与变形的分析方法已不能直接在此应用。有关电流、磁场力及材料的加速度、位移的发生发展及相互关系则对于电磁成形变形过程分析有重要意义。

电磁场与变形的耦合分析是电磁成形全过程研究的关键,单纯靠传统的电磁场理论和数值解析的方法已很难完成。数值模拟方法是电磁成形研究的重要手段,物理场间耦合处理是提高数值模拟水平的核心问题。

2.2 磁场分析

求解成形过程中的磁场力是电磁成形理论研究的基本问题之一。磁场力的计算结果直接用于坯料的变形分析,影响变形计算的求解精度。下面以管坯电磁胀形时的磁场力求解为例,分析其磁场特性。管坯电磁胀形的磁场力的计算可采用电路等效法^[1]、等效磁路法^[2]、解析法^[3]及数值模拟^[4,5]等方法。采用磁路等效法可得到作用于管坯上磁场力的平均值,无法获得磁场力的分布场景,且误差较大。近年来有限元法在电磁成形磁场力的求解中得到应用,有效地提高了求解精度。有限元法的关键问题是根据胀形时的磁场特性确定求解区域,并给出相应的边界条件^[6]。

2.2.1 管坯电磁胀形时磁场的对称性

磁场具有叠加性。所谓磁场的叠加性是指：如果产生磁场的电流分布在两个互不重叠区域，则空间任意一点的磁感应强度等于这两个区域内的电流分别产生的磁感应强度之和^[7]。根据磁场的叠加性，管坯电磁胀形时所受的磁场力是成形线圈中流过的放电电流和管坯中感应电流产生磁场叠加后的作用结果。电磁成形所用成形线圈通常是圆柱形结构，流过感应电流的管坯可视为单匝圆柱线圈，因此圆柱线圈的磁场性质是研究电磁胀形磁场特性的基础。

对于圆柱形线圈，根据 Biot-Savart 定律，以柱坐标表示的空间任意一点处的磁感应强度 \mathbf{B} 为^[8]

$$\mathbf{B}(\rho, \varphi, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{R}^0}{R^2} dV = \mathbf{B}_\rho \mathbf{e}_\rho + \mathbf{B}_\varphi \mathbf{e}_\varphi + \mathbf{B}_z \mathbf{e}_z \quad (2-1)$$

式中， dV 为电流点源周围的体积元，该点源的电流密度是 \mathbf{J} ； R 为电流点源到该任意点的距离； \mathbf{R}^0 为电流点源指向该任意点的单位矢量； V 为电流分布区域； μ_0 为真空磁导率； $\mathbf{e}_\rho, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_z$ 为单位方向矢量。

计算可得，磁感应强度三个方向的分量满足如下的解析表达式：

$$\mathbf{B}_\rho(\rho, \varphi, -z) = -\mathbf{B}_\rho(\rho, \varphi, z) \quad (2-2)$$

$$\mathbf{B}_z(\rho, \varphi, -z) = \mathbf{B}_z(\rho, \varphi, z) \quad (2-3)$$

$$\mathbf{B}_\varphi(\rho, \varphi, z) = 0 \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}_\rho}{\partial \varphi} = 0 \quad (2-5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}_z}{\partial \varphi} = 0 \quad (2-6)$$

由此可见，圆柱线圈产生的磁场具有如下特点：

- (1) 无周向分量，即 $\mathbf{B}_\varphi(\rho, \varphi, z) = 0$ 。
- (2) 径向分量 \mathbf{B}_ρ 是关于 z 的奇函数，轴向分量 \mathbf{B}_z 是关于 z 的偶函数。
- (3) 所有分量均与坐标分量 φ 无关。

因此，对圆柱线圈磁场有限元求解时可以建立 2D 模型。又根据磁场分量的对称性，只要分析其纵剖面的 1/4 场域即可推出其他任意位置的磁场。

管坯电磁胀形时，线圈与管坯均为圆柱形且同轴对称放置。求解磁场力时，将坐标系建立在线圈-管坯系统的几何中心。图 2-1 为管坯电磁胀形 2D 示意图，图中的第一象限部分即为求解区域。