



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 特种成形与连接技术

李春峰 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 特种成形与连接技术

李春峰 主编

高等教育出版社

## 内容简介

随着科学技术的发展及新兴学科的出现,尤其是新材料的不断出现,使常规的成形工艺焕发了新的活力,且一大批特种成形与连接技术不断产生并应用于机械制造及材料成形中。“特种”是“常规”的发展,也是学科前沿的重要体现。

本书重点介绍近年发展起来的特种成形与连接技术,主要包括电磁成形、超塑性成形、粘性介质压力成形、板料柔性成形、半固态成形、电磁约束铸造、快速成形、消失模铸造、扩散连接、激光焊接等 10 种塑性成形、铸造及焊接领域的新技术、新原理。

本书是高等学校材料成形及控制工程专业教材,也可供相关专业研究生及科研工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

特种成形与连接技术/李春峰主编. —北京:高等教育出版社,2005.5

ISBN 7-04-015873-6

I. 特... II. 李... III. ①工程材料-成形-高等学校-教材②工程材料-连接技术-高等学校-教材  
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 028518 号

策划编辑 庚欣      责任编辑 李京平      封面设计 王睢      责任绘图 朱静  
版式设计 王艳红      责任校对 王效珍      责任印制 孔源

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总 机 010-58581000

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 北京四季青印刷厂

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landracom.com>

<http://www.landracom.com.cn>

开 本 787×1092 1/16

印 张 23.25

字 数 570 000

版 次 2005 年 5 月第 1 版

印 次 2005 年 5 月第 1 次印刷

定 价 29.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 15873-00

# 前 言

材料成形与连接技术已有几千年的发展历史,在机械制造业及材料成形中发挥了重要作用,是先进制造技术的重要组成部分。随着科学技术的发展及新兴学科的出现,尤其是新材料的不断出现,使常规的成形工艺焕发了新的活力,且一大批特种成形与连接技术不断产生并应用于机械制造及材料成形中。“特种”是“常规”的发展,也是学科前沿的重要体现。

随着教学改革的深入,特种成形与连接技术课程已在多所学校相关专业开设。教学实践证明,本门课程不但利于学生对成形工艺基础知识及常规成形与连接技术的理解,而且使学生了解最新兴起的材料成形与连接新技术及学科前沿最新研究成果,对于扩大学生视野、激发创新意识、培养创新能力具有重要意义。但至今未有这一课程的正式教材出版,新教材的缺乏严重制约了授课效果及对学生的培养。为了满足教学需要,我们编写了这本“十五”国家级规划教材。

本书作者在该领域有着多年的教学经验和科研实践。在编写中,以作者的科研成果为基础,结合国内外最新发展,集中阐述了最新发展起来的塑性成形、铸造和焊接领域的新技术、新原理。

当然,作为特种成形与连接技术还远不止书中所选内容,但这里介绍的10种特种成形与连接技术最具代表性,是在该领域的最新发展,已经显示出十分诱人的前景,而且大多数已经得到实际应用,具有很大的发展潜力,已成为该领域前沿性研究的热点。

本书在编写中力图突出以下特点:

## 1. 基础性

特种成形与连接技术是常规成形与连接技术的发展与补充,涉及物理学、化学、电磁学、力学、冶金学、动力学、自动化及计算机技术等,充分反映了基础理论与专业知识相结合的特点。

## 2. 学科前沿性

本书内容反映了材料成形与连接领域前沿的科研成果和学科发展方向,通过本书的学习将把学生带入学科的最新研究领域。

## 3. 学科交叉性

书中介绍的各种特种成形与连接技术几乎都是学科交叉的产物,既反映了基础学科及新兴学科在材料成形与连接领域的应用,也反映了材料成形与连接技术与各学科结合焕发的活力。

本书由哈尔滨工业大学李春峰(第1、2章)、张凯锋(第3章)、王忠金(第4章)、罗守靖(第6章)、丁宏升(第7章)、曾松岩(第8章)、魏尊杰(第9章)、冯吉才(第10章)、陈彦斌(第11章)及吉林大学李明哲(第5章)共同编写,李春峰统稿。北京航空航天大学周贤宾教授对本书进行了认真的审阅,在此表示感谢。

恳请读者对书中错误与不当之处给予批评指正。

编者

2004年5月

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1	5.5 板料柔性成形展望 .....	135
1.1 特种成形与连接技术特点 .....	1	参考文献 .....	136
1.2 成形与连接技术发展趋势 .....	2	<b>第6章 半固态成形</b> .....	140
参考文献 .....	3	6.1 半固态成形特点及应用范围 .....	140
<b>第2章 电磁成形</b> .....	4	6.2 半固态成形基本理论 .....	149
2.1 电磁成形特点及应用范围 .....	4	6.3 半固态成形工艺过程分析 .....	161
2.2 电磁成形工艺基础 .....	8	6.4 半固态压铸 .....	170
2.3 电磁成形典型工艺分析 .....	18	6.5 半固态模锻 .....	173
2.4 工装及设备设计 .....	26	6.6 半固态加工研究进展与预测 .....	179
2.5 电磁成形技术展望 .....	32	参考文献 .....	181
参考文献 .....	32	<b>第7章 快速成形</b> .....	182
<b>第3章 等温成形与超塑性成形</b> .....	35	7.1 快速成形特点及应用范围 .....	182
3.1 等温成形与超塑性成形的特点及应用 范围 .....	35	7.2 快速成形技术 .....	185
3.2 等温成形与超塑性成形的材料及工艺 规范 .....	37	7.3 反求工程与快速成形 .....	196
3.3 等温锻造与超塑性成形的变形力计算及 设备选择 .....	39	7.4 快速成形技术的应用 .....	199
3.4 等温锻造与超塑性成形的摩擦与润滑 .....	41	7.5 快速成形技术展望 .....	208
3.5 等温模锻与超塑性成形工艺与应用 .....	42	参考文献 .....	209
3.6 等温锻造与超塑性锻造工艺实例 .....	47	<b>第8章 电磁约束铸造</b> .....	212
参考文献 .....	50	8.1 电磁约束铸造成形特点及应用范围 .....	212
<b>第4章 粘性介质压力成形</b> .....	53	8.2 电磁约束铸造成形原理 .....	217
4.1 粘性介质压力成形的特点及应用范围 .....	53	8.3 影响电磁约束铸造工艺的因素分析 .....	222
4.2 成形装置结构 .....	65	8.4 电磁约束铸造装置及工艺参数 .....	242
4.3 粘性介质压力与压边力控制和 成形质量 .....	66	8.5 电磁约束铸造技术展望 .....	252
4.4 轴对称曲面件粘性介质局部内压扩径、 外压缩径成形 .....	88	参考文献 .....	252
参考文献 .....	93	<b>第9章 消失模铸造</b> .....	254
<b>第5章 板料柔性成形</b> .....	95	9.1 消失模铸造特点及应用范围 .....	254
5.1 板料柔性成形的特点及应用范围 .....	95	9.2 消失模铸造工艺流程及工艺参数 .....	259
5.2 增量成形 .....	97	9.3 消失模铸造工艺理论基础 .....	274
5.3 多点成形 .....	104	参考文献 .....	281
5.4 多点成形系统 .....	125	<b>第10章 扩散连接</b> .....	283
		10.1 扩散连接的特点及应用范围 .....	283
		10.2 扩散连接设备 .....	293
		10.3 扩散连接工艺 .....	295
		10.4 新材料及异种材料的扩散连接 .....	299
		参考文献 .....	325

<b>第 11 章 激光焊接</b> .....	327	11.3 激光焊接设备 .....	347
11.1 激光焊接特点及应用范围 .....	327	11.4 激光焊接新技术 .....	354
11.2 激光焊接原理及工艺 .....	330	参考文献 .....	364

# 第1章

## 绪论

材料成形与连接技术已有几千年的发展历史,在材料成形及机械制造业中发挥了重要作用,成为先进制造技术的重要基础和组成部分。随着科学技术的发展和新兴学科的出现,使常规的成形与连接工艺焕发了新的活力,同时出现了一大批特种成形与连接技术。特种成形与连接技术集常规的成形与连接技术几千年尤其是近百年发展之大成,是广大科技工作者及工程技术人员智慧的结晶,充分体现了学科基础性、学科前沿性及学科交叉性。与常规成形与连接技术相比,特种成形与连接技术已有本质上的差别。

### 1.1 特种成形与连接技术特点

#### 1. 特殊的成形或连接机理

变形速率是影响材料变形行为的主要因素之一。电磁成形和超塑性成形处于两种极端的变形速度,因而出现了新的变形现象。

电磁成形使材料以  $300 \sim 600 \text{ m/s}$  的速度在毫秒级的时间内完成变形。这一异乎寻常的变形速度使其变形机理完全不同于常规的塑性变形。常规塑性变形中,变形金属始终受到外力作用,直至变形结束。而电磁成形中,磁场力的作用时间仅为微秒级,在磁场力作用结束时金属只发生少量变形,而其变形的主要部分是在加速度作用下靠金属获得的动能实现的。因此,电磁成形可明显提高材料成形极限,提高材料成形精度及表面质量。

超塑性成形则是以  $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  的应变速率在较长的时间里(相对常规塑性成形)完成变形,使材料的变形极限显著提高,延伸率最高可达  $2\ 000\%$ ,这种成形极限对于其他变形方法是无法想象的。当然,超塑性成形的变形机理已完全不同于常规塑性变形。尽管尚无定论,但比较一致的看法认为这是一种蠕变行为。

扩散焊接完全不同于常规焊接融化—凝固的冶金过程,而是在一定温度、压力的作用下,使被连接金属间出现原子相互扩散形成新的扩散层的化学反应过程。正由于这样一种新的连接机理使扩散焊接可用于塑性差或熔点低的同种材料,或用于互不相溶解或在熔焊时产生脆性金属间化合物的异种材料的连接。

#### 2. 特殊的成形或连接方式

局部加载是实现省能和变形柔性化的有效途径,增量成形和多点成形是典型的局部加载变形方式。它将大型零件的变形区化整为零,在材料的局部范围内加载,可明显降低变形力,同时通过对局部点的调整实现对不同曲率、不同形状零件的加工,因而实现了零件成形的柔性化。

由于零件形状的不同,其变形特点、难易程度有很大差别。若能控制零件的变形顺序,则对

于复杂形状零件的成形是非常理想的。粘性介质成形使之成为现实。经过调整模具内不同部位粘性介质的压力,可控制不同部位材料的变形顺序,因而提高零件的成形性。

消失模成形采用了“自消失”的模样,即浇铸结束后模样汽化、分解而消失,不需后续处理,减少了传统铸造成形的处理型芯工序,且明显提高了产品质量。

快速成形完全摒弃了靠金属流动而使之达到需要形状的传统成形方法,而代之以离散一堆积的过程。这一全新的变形方式使成形过程的难易程度与待成形物理实体形状和结构的复杂程度无关,大大降低了加工难度,并实现了设计制造一体化。

### 3. 特殊的施力介质

常规塑性成形的外力一般来自于压力机,通过模具作用于材料而使之发生变形。铸造成形则是靠材料重力和外加压力使材料实现流动成形,而电磁场作用下的成形则完全不同于常规成形。

电磁成形不但不同于常规的刚模成形,而且与软模成形(液体、气体、橡胶等施压介质)也有较大差别。它不是靠常规的静压力,而是依靠磁场力使金属成形,没有对材料的直接接触,因而不但提高了材料的成形极限,且提高了零件的表面质量和尺寸精度。

电磁铸造成形用磁场力取代传统的铸型,在电磁力的约束下液态金属在非接触或无铸型下连续成形,改变了传统的铸件与铸型传热过程,使传统的凝固方式发生变化,因而可获得均匀的细化组织或定向凝固组织。

粘性介质成形的施压介质既不是刚模,也不是软模,而是靠一种半固态的特殊粘性介质。它既具有液体的流动性,还具有一定的“刚性”,可以满足封闭容器内不同部位的粘性介质具有不同压力的要求,实现了变形体的不同部位、变形过程的不同阶段压力可调,使变形更加可控。

激光焊接摒弃了传统电、气等能源,而是利用了高能束流,不但使焊接的材料范围更加广泛,而且使焊接过程更方便、更高效、更可靠。

### 4. 特殊的变形体状态

塑性加工和铸造成形的区别在于,前者的变形体是固态,而后者是液态。半固态成形则打破了这一传统的界线,它的变形体是介于固态和液态之间的半固态。半固态成形利用了金属从液态向固态或从固态向液态过渡时的特性,综合利用了铸造加工和塑性加工的某些长处。如:半固态成形比铸造加工温度低,零件性能明显优于铸造零件;比塑性加工省力,金属流动性好,能成形更加复杂的零件。

随着新兴学科的出现及材料加工学科与相关学科的交叉,必将推动成形与连接技术更快发展。

## 1.2 成形与连接技术发展趋势

### 1. 省能

节省能源已是新时期经济发展的一个重要课题,也是成形与连接技术的发展方向。其主要途径一个是在传统能源利用中,争取通过减低拘束系数、降低流动应力及减少接触面积等方法减小成形力;另一个就是新能源的开发利用。增量成形、超塑性成形、半固态成形、旋压、摆辗、辗锻、激光焊接、电子束焊接、离子束焊接等工艺就是很好的例子。



## 2. 精密

实现“近净成形”的成形技术可有效减少后续加工,节省原材料,降低生产成本,已成为材料加工中的重点发展方向。伴随着新材料和精密构件对成形技术的更高需求,类似等温成形、粉末锻造、精密冲压、粘性介质成形、精密铸造等新的特种成形技术必将不断出现。

## 3. 柔性

为了满足未来社会产品多样化的需求和不确定市场环境,柔性化成形与连接技术将是一个重要的发展方向。

柔性成形技术对产品变化有很强的适应性,可高效、低耗地满足多种产品的需求,主要体现在单模、无模成形技术上,如高能率成形、电磁约束铸造成形、快速成形、粘性介质成形、增量成形、多点成形、内高压成形等。

## 4. 绿色

随着制造业的发展,绿色环保将是材料成形与连接技术面临的重要课题。减少和消除成形过程中对环境的污染是绿色制造的主要内容之一。电磁成形、消失模成形、电磁约束铸造成形、扩散焊接等技术已做出了很好的尝试。

## 5. 信息化、智能化

现代计算机技术、信息技术不但促进了传统成形与连接技术的发展,而且不断产生新的特种成形与连接技术。计算机模拟仿真技术、CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM 技术在成形与连接技术中的广泛应用已经使工艺设计、模具设计与制造更加科学化、自动化。变形预测、组织预测已经成为可能。成形与连接技术已从“经验型”逐渐走向科学化、信息化、智能化。

## 参考文献

- 1 王仲仁. 特种成形技术. 北京:机械工业出版社,1995
- 2 刘飞. 21 世纪制造业的绿色变革与创新. 北京:机械工业出版社,2000,36(1)
- 3 Vermeulen H. Design for precision: current status and trends. CIRP Annals Manufacture, 1998, 47 (2)
- 4 周贤宾. 塑性加工技术的发展——更精、更省、更净. 中国机械工程, 2003(1)
- 5 中国锻压协会秘书处. 中国锻压行业未来发展方略. 锻压技术, 2003(1)

# 第 2 章

## 电磁成形

### 2.1 电磁成形特点及应用范围

电磁成形是高能率成形方法之一。

高能率成形 (high energy rate forming) 也称高速成形 (high velocity forming), 是一种在极短时间内 (微秒级) 释放高能量而使金属变形的成形方法。

高能率成形主要包括:

- (1) 利用高压气体使活塞高速运动来产生动能的高速成形。
- (2) 利用炸药产生化学能的爆炸成形。
- (3) 利用电能的电液成形及电爆成形。
- (4) 利用磁场力的电磁成形。

一般情况下, 高能率成形主要指后三种形式。电磁成形、电液成形及电爆成形设备原理是相同的, 只是放电介质不同。

表 2-1 为三种高能率成形方法的特性对比。

表 2-1 高能率成形特性

特性 成形方法	成形速度/(m·s <sup>-1</sup> )	成形时间/s	压力/MPa	功率/kW
电爆成形	≥300	5 × (10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-6</sup> )	6 × 10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>
电液成形	≥300	5 × (10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-6</sup> )	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
电磁成形	≥300	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-5</sup>	300 ~ 500	10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>5</sup>

电磁成形也称磁脉冲成形。它是利用脉冲电容器突然释放储存的能量, 通过线圈产生强而短促的磁场, 同时在金属毛坯上产生感应磁场, 利用磁力使金属成形。

早在 20 世纪 20 年代, 人们在脉冲磁场中做实验时发现, 形成脉冲磁场的金属线圈很容易胀大、胀破。这一现象启发了人们对电磁成形基本理论的探索。

尽管人们很早就发现了这一原理, 却没有马上得到应用。直至 1958 年, 美国通用电力公司设计的第一台电磁成形装置才问世。经几年完善, 在 1962 年, 美国的 Brower 和 Harvey 首次成功地把磁场力用于金属成形, 并对这一成形设备申报了专利, 注册名为 Magneform。此后,

电磁成形技术引起许多工业国的重视,并逐渐用于工业生产。20世纪60年代中期就出现了储能400 kJ的电磁成形机;70年代中期,已有400多台电磁成形机用于生产,150余个工厂使用这种工艺;80年代,电磁成形技术在美国、苏联、日本等国的工业生产中得到广泛应用,苏联、美国的电磁成形机已标准化、系列化,并出现一些专用电磁成形机。

目前电磁成形技术已被广泛用于航空、航天、汽车、电子、兵器等工业部门,如导弹卡箍成形、仪器舱校形、飞机透平发动机舱成形,扭矩轴、控制杆及连杆装配,冷却系统管道成形及装配,汽车空气调节储存器、高压软管、振动吸尘盖、油冷却器、热交换器、搅拌轮、汽油注入管及电机外壳附件的装配,万向接头架、驱动连杆、凸轮、齿轮等与驱动轴或万向轴管的连接,熔断器、绝缘器、照明夹具等电子元件的装配;核工业中燃料棒的成形装配,弹壳组装等。电磁铆接已被广泛用于波音737、747、767、图-154等大型客机机翼大梁的装配。

我国电磁成形技术研究始于20世纪60年代,文化大革命期间中断。70年代末期,哈尔滨工业大学率先开始研究电磁成形的基本理论及工艺,并在先期研制的实验装置的基础上,于1986年研制成我国首台生产用电磁成形机。电磁成形装置原理如图2-1所示。该装置主回路由充电回路及放电回路组成。充电回路包括升压变压器1、整流器2、充电电阻3及电容器4。放电回路包括电容器4、间隙开关5及工作线圈6。

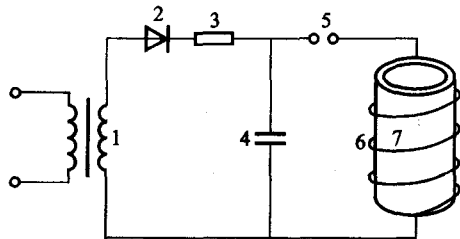


图 2-1 电磁成形装置原理图

- 1—升压变压器; 2—整流器; 3—充电电阻;  
4—电容器; 5—间隙开关; 6—工作线圈;  
7—管坯

来自网络的交流电经变压器及整流器后变为高压直流电并向电容器充电。电容器储能达到预定值后,导通间隙开关,强脉冲电流通过工作线圈瞬时释放。

管坯电磁成形原理如图2-2所示,当工作线圈1通过强脉冲电流 $i$ 时,线圈空间就产生一均匀的强脉冲磁场2(图2-2a)。如果将管状金属坯料(管坯)3放在线圈内,则管坯外表面将会产生感应脉冲电流 $i'$ ,该电流在管坯空间产生感应脉冲磁场 $2'$ (图2-2b)。放电瞬间在管坯内部的空间,放电磁场与感应磁场方向相反而相互抵消。管坯与线圈之间放电磁场与感应磁场方向相同而得到加强,其结果是使管坯外表面受到很大的磁场压力 $p$ 的作用(图2-2c)。如果管坯受力达到屈服点,将会引起缩径变形。若将线圈放到管坯内部(图2-3),其结果是使管坯内表面受到强大磁场力,驱动管坯发生胀形变形。

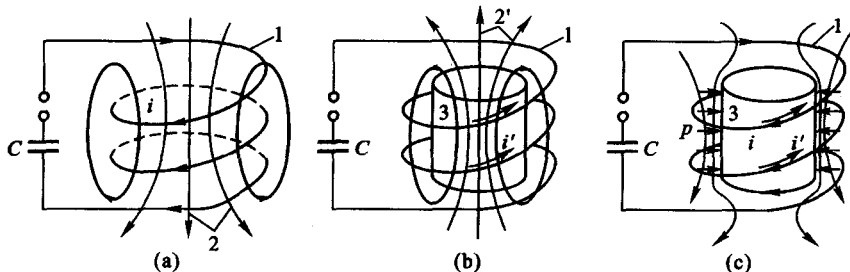


图 2-2 管坯电磁缩径原理图

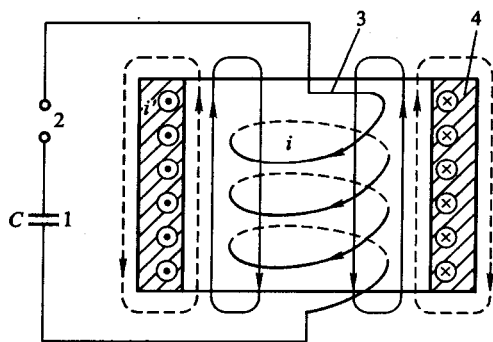


图 2-3 管坯胀形原理图

板坯电磁成形原理如图 2-4 所示,间隙开关闭合时,储能电容器对工作线圈放电并在其周围产生一脉冲磁场,该磁场磁感应强度  $B$  因穿过工件平面而产生感应电流,感应电流产生的磁感应强度为  $B'$ 。放电瞬间, $B$  与  $B'$  在工件内部方向相反而相互削弱,在线圈与工件之间则方向相同而得到加强。因而工件受到背离线圈的磁脉冲力而发生变形。

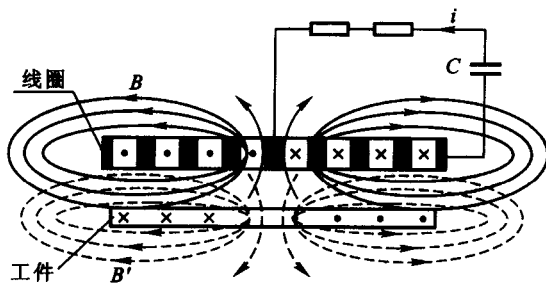


图 2-4 板坯电磁成形原理图

上述的几种电磁成形原理都是使工件向背离线圈的方向变形。也可使线圈产生吸引力,使工件产生朝向线圈的变形。

### 1. 电磁成形的特点

(1) 在电磁成形过程中,在脉冲压力作用下,金属获得很大的加速度,并获得很大的动能,金属成形主要是靠这种动能来实现的。

(2) 电磁成形可实现快速加工,而且放电能量可准确控制,易于实现机械化、自动化。

(3) 磁场可以穿透非金属材料,所以可对有非金属涂层或放在容器内的工件进行成形加工。

(4) 电磁成形以磁场为介质向工件施加压力,无需机械接触,因此对工件不产生摩擦,也无需润滑。

(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) 电磁成形的零件精度高,残余应力低,弹复小。

### 2. 电磁成形典型工艺

电磁成形常用于平板毛坯及管状毛坯的成形,其典型工艺主要有:

(1) 管毛坯胀形 如图 2-5a 所示,工作线圈置于管内,当脉冲电流通过线圈时,磁压力将管坯外推贴模。此法可用于胀形及连接工艺。

(2) 管毛坯缩径 如图 2-5b 所示,将工件置于线圈内,磁压力将工件向内压缩贴模,此法常用于成形及连接工艺。

(3) 平板毛坯成形 如图 2-5c 所示,将一螺旋形扁平线圈对着平板毛坯放置,当脉冲电流通过线圈时,电磁力将工件推向模具。此法可用于平板毛坯成形、精整、冲裁等。

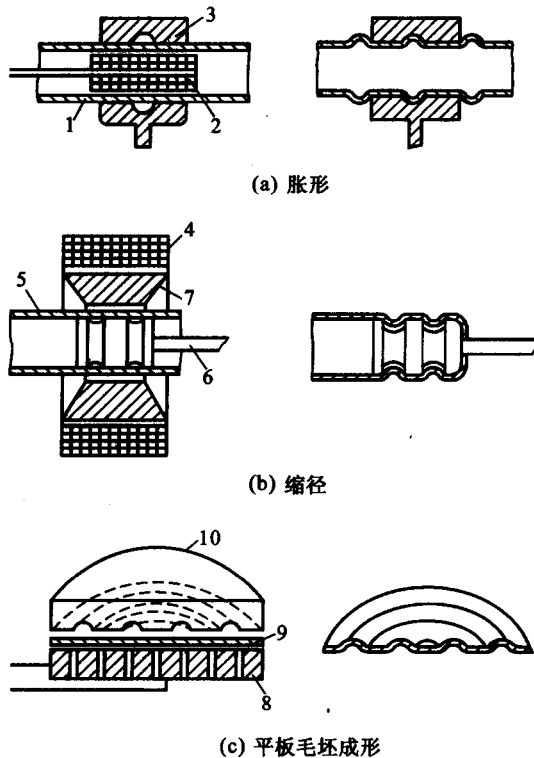


图 2-5 电磁成形典型工艺

1、5—管坯; 2—胀形线圈; 3—模具; 4—缩径线圈; 6—杆件;  
7—集磁器; 8—平板线圈; 9—毛坯; 10—模具

(4) 连接 电磁成形非常适于管与管、管与杆、管与板的连接工艺,可实现管与芯轴的连接、软管与接头的连接以及金属材料与玻璃、陶瓷等脆性材料的连接,连接强度甚至可超过母材强度。

(5) 冲裁 可在平板毛坯上冲孔,尤其适于板厚小于 0.5 mm 的薄板或复合材料,可以实现无毛刺冲裁。

(6) 粉末压实 电磁成形可在不加热的情况下对金属粉末压实,可保证材料在致密过程中晶粒不生长大。

此外,电磁成形还可用于多种工序的复合成形、异型管成形、封瓶、铆接等。

## 2.2 电磁成形工艺基础

### 2.2.1 磁场分析

求解成形过程中的磁压力是电磁成形理论研究的基本问题之一。磁压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压力求解为例,分析其磁场特性。管坯电磁胀形的磁压力计算可采用电路等效法、磁路等效法、解析法及数值模拟等方法,目前多采用磁路等效法近似求解磁压力。这种方法只能得到作用于管坯上磁压力的平均值,无法获得磁压力的分布场景,且误差较大,给变形分析带来困难。近年来有限元法在电磁成形磁压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在于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。

#### 2.2.1.1 管坯电磁胀形时磁场的对称性

磁场具有叠加性。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。根据磁场的叠加性,管坯电磁胀形时所受的磁压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  $B$  为

$$B(\rho, \varphi, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{J \times R^0}{R^2} dV = B_\rho e_\rho + B_\varphi e_\varphi + B_z e_z \quad (2-1)$$

式中  $dV$ ——电流点源周围的体积元,该点源的电流密度是  $J$ ;

$R$ ——电流点源到该任意点的距离;

$R^0$ ——电流点源指向该任意点的单位矢量;

$V$ ——电流分布区域;

$\mu_0$ ——真空磁导率;

$e_\rho, e_\varphi, e_z$ ——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:

$$B_\rho(\rho, \varphi, -z) = -B_\rho(\rho, \varphi, z) \quad (2-2)$$

$$B_z(\rho, \varphi, -z) = B_z(\rho, \varphi, z) \quad (2-3)$$

$$B_\varphi(\rho, \varphi, z) = 0 \quad (2-4)$$

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

$$\frac{\partial B_z}{\partial \varphi} = 0 \quad (2-6)$$

由此可见,圆柱线圈产生的磁场具有以下特点:

(1) 无周向分量,即  $B_\varphi(\rho, \varphi, z) = 0$ 。

(2) 径向分量  $B_\rho$  是关于  $z$  的奇函数, 轴向分量  $B_z$  是关于  $z$  的偶函数。

(3) 所有分量均与坐标分量  $\varphi$  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。求解磁压力时, 将坐标系建立在线圈—管坯系统的几何中心。图 2-6 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。

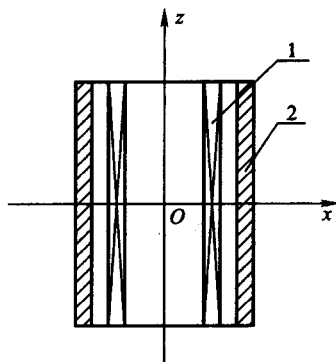


图 2-6 管坯电磁胀形 2D 示意图

1—胀形螺线管线圈; 2—管坯

### 2.2.1.2 边界条件

边界条件即指图 2-6 中  $z$  轴、 $x$  轴上的磁场特性。下面的论述中, 将  $z$  轴称为对称轴,  $z=0$  平面称为对称平面。

#### 1. 对称轴上边界条件

根据磁场叠加性, 电磁胀形线圈和管坯产生的磁场可以看成是多个同轴放置的圆环线圈磁场的叠加, 圆环线圈是指以电流分布的单匝圆形回路。

从有关的磁场分析可知, 圆环线圈磁场在对称轴上的磁矢量  $A$  等于 0。胀形时线圈—管坯系统可以看成是多个圆环线圈的叠加, 因而当线圈与管坯同轴对称放置时, 对称轴上仍具有  $A(0, \varphi, z) = 0$  的特性。

#### 2. 对称平面磁场特性

根据磁场叠加性, 电磁胀形线圈和管坯产生的磁场也可看成是多个同轴放置的单层螺线管线圈的叠加。

由有关的磁场分析可知, 螺线管线圈磁场对称平面上的磁感应强度(柱坐标表示)具有以下特点:

$$(1) B_\rho(\rho, \varphi, 0) = 0。$$

$$(2) B_\varphi(\rho, \varphi, 0) = 0。$$

即螺线管线圈产生的磁场在对称平面( $z=0$ )上磁感应强度的  $B_\rho$ 、 $B_\varphi$  分量均为零, 只有磁感应强度的  $B_z$  分量, 也即在对称平面上磁感应强度与之垂直。根据磁场的叠加性, 管坯电磁胀形时, 只要线圈与管坯同轴对称放置, 那么在对称平面上就具有只含  $B_z$  分量这一特性。

综上所述, 管坯电磁胀形时, 如果线圈与管坯同轴对称放置, 其磁场具有对称性, 属于轴对称场。磁场在对称轴上具有  $A=0$  特性, 在对称平面上磁感应强度与之垂直。可以应用这些磁场特性进行管坯电磁胀形磁压力的数值模拟。

## 2.2.2 放电频率

放电电流的频率越高, 表明振荡电流的变化  $di/dt$  越大。

在忽略电阻因素时, 振荡电流的频率可写为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-7)$$

可见, 放电频率仅与放电回路电感  $L$  及电容  $C$  有关, 减小电感或电容, 都将提高放电频率。

放电频率对电磁成形工艺有重要影响,不同的工艺应选用不同的频率。例如,对于冲裁、校形及连接工艺,应选用较高的放电频率。而对变形量较大的胀形、缩口及其他成形工艺,宜选用较低的放电频率。根据放电频率不同,电磁成形机可分为三种:低频设备( $f=5\sim 20\text{ kHz}$ )、中频设备( $f=20\sim 50\text{ kHz}$ )、高频设备( $f=50\sim 200\text{ kHz}$ )。在实际生产中,应根据不同工艺选用不同频率的设备。

下面分析放电频率对电磁成形的影响。

磁场在工件中的透入深度为:

$$d = \sqrt{\frac{2}{\mu\gamma\omega}}$$

以  $1/\rho$  代替电导率  $\gamma$  ( $\rho$  为材料的电阻率),  $\omega = 2\pi f$ , 则上式变为

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu f}} \quad (2-8)$$

在磁脉冲成形过程中,应选择合适的放电频率,磁场在毛坯材料中的渗透深度不大于毛坯厚度;否则,会有相当多的磁场能量透过毛坯损失掉。在金属与金属连接时,两连接金属间隙中穿透磁场所占的体积随两连接金属的靠近而减小,而磁通量基本保持不变,于是在两连接金属的间隙内磁场将变得很大,形成“磁垫”,产生反冲力而不利于金属的连接。在用金属模成形时,“磁垫”会对金属毛坯的贴模产生排斥作用。

变换式(2-8),得

$$f = \frac{\rho}{\pi\mu d^2} \quad (2-9)$$

取  $d$  为工件壁厚  $s$ , 则

$$f = \frac{\rho}{\pi\mu s^2} \quad (2-10)$$

成形材料确定后,可由上式估算磁场在不穿透工件的情况下所需的最低频率。

## 2.2.3 磁场及放电电流测量

### 2.2.3.1 磁场测量

从磁场测量原理看,磁场的测量方法可概括为:磁感线法、电磁感应法、磁通门法、电磁效应法、磁共振法、超导效应法、磁光效应法等。

对于电磁成形,利用电磁感应法来测量磁场是最简单而有效的方法。

将绕有  $N$  匝、截面积为  $S$  的圆柱形探测线圈放在磁感应强度为  $B_0$  的被测磁场之中,当穿过线圈的磁通  $\Phi$  发生变化时,根据电磁感应定律,在线圈中会产生感应电动势,计算公式为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB_0}{dt} \quad (2-11)$$

乘积  $NS$  是探测线圈的结构常数(称线圈常数),只要测出感应电动势对时间的积分值,便可求出磁感应强度  $B_0$  的改变量

$$\Delta B_0 = -\frac{1}{NS} \int e dt \quad (2-12)$$



电磁感应法磁场测量系统原理如图 2-7 所示,接入分流器是为了能将磁场信号与放电电流信号进行对比,利于分析。

磁场测量中,探测线圈即为测量的传感器,其几何尺寸根据被测磁场具体形态选定。探测线圈所测定的磁感应强度一般是线圈内的平均磁感应强度。为了减少因被测磁场不均匀所造成的误差,应该选取截面积小、长度短的“点”状探测线圈。球形探测线圈是一种理想的“点”状线圈,但由于它的绕制工艺复杂而很少采用。圆柱形线圈在满足一定结构尺寸要求的情况下可以认为是接近“点”状线圈的。

单层圆柱形探测线圈的线圈常数可以用计算或实验的方法确定。

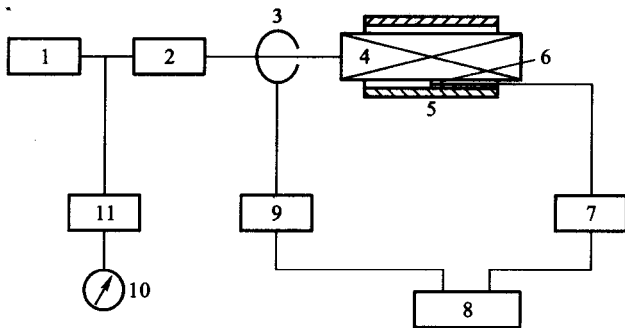


图 2-7 电磁成形磁场测量系统原理图

- 1—储能电容; 2—开关; 3—分流器; 4—胀形线圈;  
5—工件; 6—磁场探测线圈; 7—积分线路; 8—示波器;  
9—传输电缆; 10—电压表; 11—电压传感器

### 2.2.3.2 放电电流测量

电磁成形放电回路的放电电流属冲击大电流,是一变化很快的暂态量,电流强度很高,用普通的计量表难以测量。对于大电流的测试,通常采用以下一些测量方法:用电阻量具、霍尔变换器、磁位计、核磁共振法测量直流大电流,用分流器、磁位计测量脉冲大电流。

采用分流器测量大电流的原理如图 2-8 所示,分流器是一个近似纯阻性的低值电阻,其作用是将脉冲大电流变换成一个可测量的脉冲电压信号。

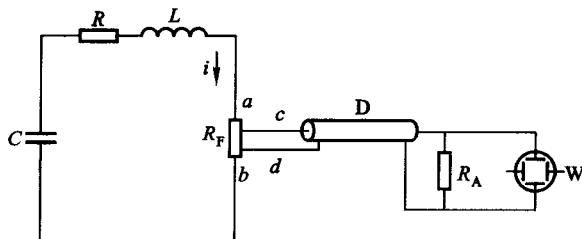


图 2-8 放电电流测试原理图

- $C$ —放电电容;  $L$ —放电回路电感值;  $R$ —放电回路电阻值;  
 $R_F$ —分流器;  $i$ —放电电流;  $D$ —传输电缆;  $W$ —数字示波器;  
 $ab$ —分流器输入端;  $cd$ —分流器输出端;  $R_A$ —匹配电阻