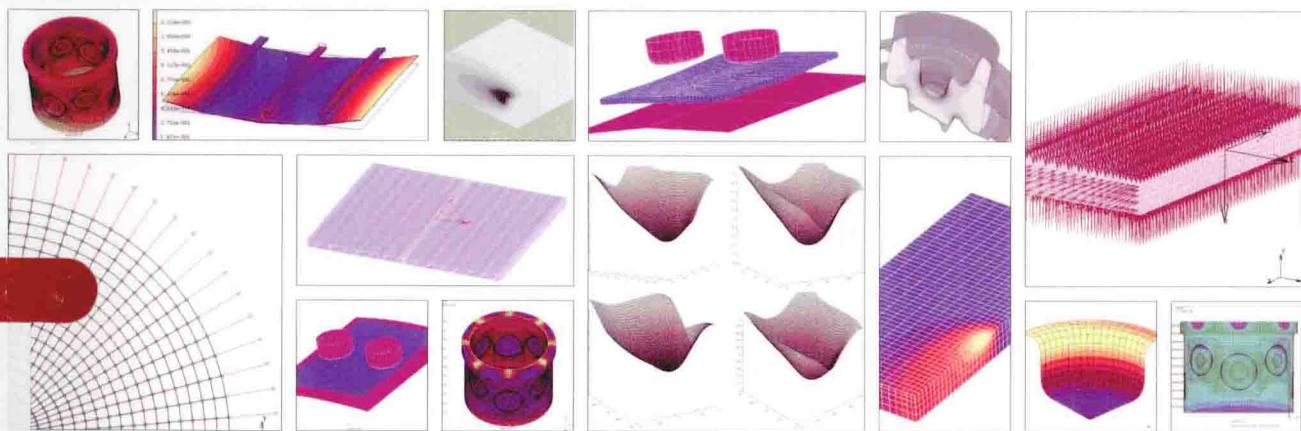


CAE分析大系

# MSC.Marc 工程实例 详解

© 董志波 刘雪松 马瑞 刘建光 王苹 编著



- 一本具备标准操作流程的 MSC.Marc 教程
- 一本结合材料加工过程的工程实例图书
- 一本完美融合工程与学术案例的图书
- 一本 SimWe 论坛推荐的 MSC.Marc 图书



- 全部案例源文件
- 用户子程序
- 图书 + 微信订阅号 + SimWe 论坛 = 可沟通交流的生态系统教程

微信 (iCAX) 立体化阅读支持



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

CAE分析大系

# MSC.Marc

## 工程实例 详解

© 董志波 刘雪松 马瑞 刘建光 王苹 编著

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

MSC. Marc工程实例详解 / 董志波等编著. -- 北京 :  
人民邮电出版社, 2014. 9  
(CAE分析大系)  
ISBN 978-7-115-35154-8

I. ①M… II. ①董… III. ①有限元分析—应用软件  
IV. ①0241.82-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第109512号

## 内 容 提 要

本书结合一系列的工程应用实例,系统地讲解 MSC.Marc 在工程领域的数值模拟分析。全书分为三篇,共 15 章,即入门篇(第 1~2 章)、焊接应用篇(第 3~12 章)和材料工程应用篇(第 13~15 章)。入门篇:主要讲解了 MSC.Marc 的基本功能和特点、焊接和材料加工过程中常用的功能模块和简单实例分析,通过这部分的学习,读者能够快速了解软件的基本功能和简单的材料工程过程模拟计算分析方法。焊接应用篇:结合大量的工程实例,包括常用的焊接方法的模拟实例,如电弧焊(电弧摆动和电弧旋转)、激光焊、钎焊、搅拌摩擦焊、焊接变形的控制方法(反变形和随焊碾压)和一些大型焊接构件模拟过程的常见问题及解决方法,此部分也对焊接过程模拟的模型建立、问题求解和后处理结果中需要考虑的关键问题进行了讨论和分析,通过此部分的学习,读者不仅可以掌握焊接过程的模拟方法,还可以进行材料的自定义和子程序的二次开发。材料加工应用篇:主要介绍了板材成形和体积成形过程的模拟分析,通过此部分的阅读,能够使读者掌握成形过程中模拟的基本理论和关键技术,并且能够利用 Marc 软件进行相关成形过程的数值模拟研究工作。

本书适合材料工程、焊接技术与工程和结构工程等领域的高校老师和研究生、工程技术人员等阅读和参考。

本书的随书光盘中提供了书中涉及的所有 mud 模型文件和用户子程序文件,以供读者参考和学习。

---

◆ 编 著 董志波 刘雪松 马 瑞 刘建光 王 苹  
责任编辑 杨 璐  
责任印制 程彦红

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 19  
字数: 682 千字 2014 年 9 月第 1 版  
印数: 1-3 000 册 2014 年 9 月河北第 1 次印刷

---

定价: 49.80 元(附光盘)

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

# 前 言

MSC.Marc 是国际上功能最强的大型通用有限元软件之一，其基于位移法的有限元程序，在非线性方面具有强大的功能。拥有能够真实反映材料加工过程的本构模型，能够进行焊接过程和材料加工过程的计算，具有强大的接触处理功能来模拟金属与模具、结构与卡具之间的接触问题，具备处理焊缝金属填充问题的能力，并提供多种焊接热源模型，可以灵活、准确地处理复杂材料加工过程中的应力传递问题。

本书结合一系列的工程应用实例，系统地讲解 MSC.Marc 在工程领域的数值模拟分析。全书分为 3 篇，共 15 章，即入门篇（第 1~2 章）、焊接应用篇（第 3~12 章）和材料工程应用篇（第 13~15 章）。入门篇主要讲解 MSC.Marc 的基本功能和特点、焊接和材料加工过程中常用的功能模块和简单实例分析，通过此部分的阅读，使读者能够快速了解软件的基本功能和简单的材料工程过程模拟计算分析。焊接应用篇结合大量的工程实例，包括常用的焊接方法的模拟实例，如电弧焊（电弧摆动和电弧旋转）、激光焊、钎焊、搅拌摩擦焊、焊接变形的控制方法（反变形和随焊碾压）和一些大型焊接构件模拟过程常见问题及解决方法，并且此部分内容对焊接过程模拟的模型建立、问题求解和后处理结果中需要考虑的关键问题都进行了讨论和分析，使读者不仅可以掌握焊接中的模拟过程，同时还可以进行自定义材料和子程序的二次开发。材料加工应用篇主要介绍了板材成型和体积成型过程的模拟分析进行了详细介绍，通过此部分的阅读，能够使读者掌握成型过程中模拟的基本理论和关键技术，并且能够利用 MSC.Marc 软件进行相关成型过程的数值模拟研究工作。

## ❏ 适合读者

本书适合于材料加工工程、焊接技术与工程和结构工程等领域的高校老师和研究生、工程技术人员等阅读和参考。

## ❏ 配套资源

本书随书光盘中提供了书中所有章节涉及的 mud 模型文件和用户子程序文件，以供读者参考和学习。

## ❏ 互动平台的支持

为了方便读者的交流，我们为这本书还专门配备了微信公众平台：iCAX。读者只需要用微信服务号输入或者扫描二维码登录平台。



需要指出，本书力求读者能够利用 Marc 有限元分析软件，进行焊接及材料加工过程的数值模拟分析，并能够解决实际工程问题，并且本书提供工程实例的模型文件和用户子程序文件，但由于时间仓促和模拟过程相对较复杂，同时作者水平和能力有限，在书中难免有错漏处，欢迎给我们来信 info@dozan.cn 批评指正。

全书编写分工如下：全书章节安排及统稿由董志波负责，第 1、2、5、10、11、12 章由董志波执笔，第 7、8、9、15 章由刘雪松和王莘执笔，第 3、4 章由马瑞执笔，第 6、13、14 章由刘建光和姬书得执笔，参与本书工作的还有郑文健、宋奎晶、张德雨、张家铭、郭军礼等。

# 目 录

第 1 章 MSC.Marc 的功能和特点	9	3.2 焊接热过程分析基本流程	59
1.1 MSC.Marc 软件简介	9	3.3 多层多道电弧焊热过程模拟	60
1.1.1 MSC.Marc 软件产品	9	3.3.1 问题描述	60
1.1.2 MSC.Marc 软件的主要功能	10	3.3.2 几何模型建立及单元网格划分	60
1.1.3 MSC.Marc 软件在材料加工中的适用性	10	3.3.3 构建有限元模型	61
1.2 MSC.Marc 基础	10	3.3.4 材料特性定义	61
1.2.1 MSC.Marc 的软件接口功能	10	3.3.5 焊道及填充金属的定义	62
1.2.2 MSC.Marc 功能模块简介	11	3.3.6 初始条件及边界条件定义	63
1.2.3 MSC.Marc 的求解流程	11	3.3.7 焊接边界条件定义	65
1.3 本章小结	12	3.3.8 载荷工况定义	66
第 2 章 MSC.Marc 快速入门	13	3.3.9 JOB 定义及提交	67
2.1 MSC.Marc 的功能模块	13	3.3.10 多层多道焊电弧焊热过程模拟结果	68
2.1.1 Mesh Generation 模块	13	3.4 电弧摆动焊过程模拟	70
2.1.2 Geometric Properties 模块	16	3.4.1 问题描述	70
2.1.3 Material Properties 模块	18	3.4.2 几何模型建立及单元网格划分	71
2.1.4 Modeling Tools 模块	21	3.4.3 材料属性定义	72
2.1.5 Contact 模块	21	3.4.4 初始条件定义	72
2.1.6 Initial Conditions 模块	23	3.4.5 热力学边界条件定义	72
2.1.7 Boundary Conditions 模块	24	3.4.6 子程序定义	73
2.1.8 Mesh Adaptivity 模块	26	3.4.7 初始条件	74
2.1.9 Loadcases 模块	27	3.4.8 载荷工况的定义	75
2.1.10 Jobs 模块	29	3.4.9 JOB 定义及提交	75
2.1.11 Results 模块	35	3.4.10 摆动焊模拟结果分析	76
2.1.12 MSC.Marc 静态菜单	36	3.5 旋转电弧焊过程模拟	77
2.2 焊接热过程模拟简单示例	37	3.5.1 问题描述	77
2.2.1 问题的描述	37	3.5.2 有限元模型建立	77
2.2.2 建立有限元模型	37	3.5.3 子程序定义	78
2.2.3 设置模型的材料属性	40	3.5.4 旋转电弧模拟结果分析	79
2.2.4 定义焊接路径	44	第 4 章 激光焊接过程模拟分析	81
2.2.5 定义边界条件	44	4.1 综述	81
2.2.6 定义求解条件	47	4.2 问题描述	82
2.2.7 JOBS 定义及作业提交	48	4.3 有限元模型的建立	83
2.2.8 后处理分析	49	4.3.1 几何模型建立及单元网格划分	83
2.3 本章小结	52	4.3.2 材料属性定义	83
第 3 章 电弧焊焊接过程模拟分析	53	4.3.3 初始条件定义	84
3.1 弧焊基本理论	53	4.3.4 热力学边界条件定义	84
3.1.1 焊接电弧	53	4.3.5 子程序定义	85
3.1.2 电弧焊熔化现象	56	4.4 载荷工况的定义	88
3.1.3 电弧焊的分类	56	4.5 JOB 定义及提交	88
3.1.4 电弧焊的热源模型	57		

4.6 激光焊模拟结果分析 .....	89	7.4 初始条件 .....	133
<b>第 5 章 电子封装焊点软钎焊过程模拟 .....</b>	<b>91</b>	7.5 焊道及填充金属的定义 .....	133
5.1 钎焊工艺与温度曲线 .....	91	7.6 热学边界条件的定义 .....	135
5.2 非线性钎料本构关系 .....	92	7.7 力学边界条件 .....	136
5.3 有限元模型的建立 .....	93	7.8 子程序定义 .....	137
5.3.1 几何模型建立及单元网格划分 .....	93	7.9 载荷工况的定义 .....	138
5.3.2 材料特性定义 .....	94	7.10 JOB 定义及提交 .....	140
5.3.3 子程序定义 .....	96	7.11 铝合金型材随焊激冷模拟结果分析 .....	141
5.3.4 初始条件定义 .....	98	<b>第 8 章 反变形法用于 35# 钢平板焊接过程模拟 .....</b>	<b>144</b>
5.3.5 热力学边界条件的定义 .....	98	8.1 综述 .....	144
5.3.6 接触条件定义 .....	100	8.2 反变形法控制焊接变形原理 .....	144
5.3.7 载荷工况的定义 .....	101	8.3 有限元模型的建立 .....	144
5.3.8 JOB 定义及提交 .....	103	8.3.1 几何模型建立及单元网格划分 .....	145
5.4 后处理结果分析 .....	103	8.3.2 材料特性定义 .....	148
5.5 其他材料本构关系的二次开发 .....	105	8.3.3 焊接路径及焊缝金属的设定 .....	148
5.6 本章小结 .....	112	8.3.4 接触体及接触表的设定 .....	149
<b>第 6 章 搅拌摩擦焊焊接过程的模拟分析 .....</b>	<b>113</b>	8.3.5 力学边界条件的设定 .....	151
6.1 综述 .....	113	8.3.6 热学边界条件的设定 .....	152
6.2 搅拌摩擦焊的基本理论 .....	113	8.3.7 载荷工况的设定 .....	152
6.2.1 搅拌摩擦焊的原理 .....	113	8.3.8 Job 的设定 .....	154
6.2.2 搅拌摩擦焊的焊接工艺参数 .....	114	8.4 焊后结果分析 .....	154
6.3 搅拌摩擦焊的热源模型 .....	114	8.5 反变形模拟中的几点说明 .....	155
6.3.1 不考虑搅拌针产热的热源模型 .....	115	<b>第 9 章 随焊碾压用于铝合金平板对接焊接模拟 .....</b>	<b>156</b>
6.3.2 考虑搅拌针产热的热源模型 .....	115	9.1 综述 .....	156
6.4 搅拌摩擦焊对接接头有限元模型的建立 .....	116	9.1.1 问题描述 .....	156
6.4.1 几何模型的建立 .....	116	9.1.2 随焊碾压控制焊接热裂纹的原理 .....	156
6.4.2 有限元网格的划分 .....	117	9.2 随焊激冷有限元模型的建立 .....	156
6.4.3 材料参数的定义 .....	118	9.3 材料特性定义 .....	157
6.4.4 初始条件的定义 .....	119	9.4 初始条件 .....	161
6.4.5 热学边界条件的定义 .....	120	9.5 焊道及填充金属的定义 .....	161
6.4.6 载荷工况的定义 .....	122	9.6 热学边界条件的定义 .....	163
6.4.7 JOB 定义与提交 .....	124	9.7 定义接触条件 .....	164
6.5 搅拌摩擦焊温度场的模拟结果分析 .....	125	9.8 定义力学边界条件 .....	167
6.6 本章小结 .....	126	9.9 载荷工况的定义 .....	169
<b>第 7 章 随焊激冷用于铝合金型材焊接模拟 .....</b>	<b>127</b>	9.10 JOB 定义及提交 .....	172
7.1 综述 .....	127	9.11 铝合金平板对接随焊碾压模拟结果 分析 .....	173
7.1.1 问题描述 .....	127		
7.1.2 随焊激冷控制变形原理 .....	128		
7.2 随焊激冷有限元模型的建立 .....	128		
7.2.1 几何模型建立及单元网格划分 .....	128		
7.2.2 构建有限元模型 .....	128		
7.3 材料特性定义 .....	130		

<b>第 10 章 大型容器焊接过程模拟研究</b> .....	175	12.2 PyPost 后处理模块简介	224
10.1 综述	175	12.2.1 PyPost 模块主要对象类型	225
10.2 大型容器有限元模型的建立	175	12.2.2 PyPost 模块主要函数	226
10.2.1 几何模型建立及单元网格划分	175	12.3 PyPost 后处理入门实例精讲	230
10.2.2 构建有限元模型	176	12.3.1 程序实例精讲 1	230
10.3 材料特性定义	178	12.3.2 程序实例精讲 2	232
10.4 焊接路径及填充金属的定义	179	12.4 焊接后处理开发应用实例	234
10.5 初始条件及边界条件定义	181	12.4.1 焊接热循环曲线提取	234
10.5.1 初始条件定义	181	12.4.2 焊接熔池形貌提取	238
10.5.2 装卡条件	182	12.4.3 焊接变形数据提取	245
10.5.3 对流换热条件定义	183	12.4.4 焊接残余应力提取	247
10.5.4 焊接条件定义	184	<b>第 13 章 板材成形过程模拟分析</b> .....	250
10.6 载荷工况定义	186	13.1 综述	250
10.7 JOB 定义及提交	188	13.2 板材成形工艺特点分析	250
10.8 大型容器焊接模拟结果	190	13.3 板材成形过程数值模拟基本理论 及关键技术	251
<b>第 11 章 飞机壁板结构焊接过程模拟分析</b> .....	193	13.3.1 弹塑性有限元法	251
11.1 综述	193	13.3.2 板材成形过程数值模拟若干 关键技术	255
11.2 飞机壁板 T 型接头有限元模型的建立	193	13.4 圆筒形零件冲压成形过程数值模拟	259
11.2.1 几何模型建立及单元网格划分	193	13.4.1 有限元模型建立	259
11.2.2 构建有限元模型	194	13.4.2 单元定义	259
11.3 材料特性定义	196	13.4.3 材料特性定义	260
11.4 激光热源模型与双光束的实现	199	13.4.4 接触条件定义	262
11.5 初始条件和边界条件	200	13.4.5 边界条件设置	264
11.5.1 初始条件定义	200	13.4.6 加载步长设置及模拟参数控制	266
11.5.2 装卡条件定义	201	13.4.7 JOB 定义及提交	267
11.5.3 工件与环境对流换热条件定义	203	13.4.8 拉深筋设置	269
11.5.4 激光热源及焊接路径加载	204	13.4.9 铝合金板材圆筒拉深模拟结果分析	270
11.5.5 子程序定义	206	13.5 常见板材成形过程缺陷分析	271
11.6 载荷工况定义	208	13.5.1 起皱	272
11.7 JOB 定义及提交	210	13.5.2 破裂	272
11.8 飞机壁板焊接模拟结果	212	13.5.3 回弹	274
11.9 飞机壁板焊接工艺研究	213	13.6 本章小结	275
11.9.1 飞机壁板温度场	213	<b>第 14 章 体积成形过程模拟分析</b> .....	276
11.9.2 飞机壁板应力结果	214	14.1 综述	276
11.9.3 飞机壁板变形结果	215	14.2 体积成形工艺特点分析	276
<b>第 12 章 基于 python 的焊接后处理</b> .....	217	14.3 体积成形过程数值模拟基本理论 与关键技术	277
12.1 Python 语言介绍	217	14.3.1 刚（黏）塑性有限元法基本原理	277
12.1.1 Python 语言特点	217	14.3.2 体积成形过程数值模拟若干 关键技术	282
12.1.2 Python 语言编程基础	218	14.4 轮毂零件热锻过程热—力耦合 有限元分析	284
12.1.3 Python 的 Module（模块）介绍	223	14.4.1 几何模型导入	285
12.1.4 Python 语言的执行	223		

14.4.2 有限元分析模型建立 .....	285	第 15 章 网格尺寸对焊接结果精度的影响 .....	299
14.4.3 材料特性定义 .....	287	15.1 综述 .....	299
14.4.4 接触条件定义 .....	287	15.1.1 问题描述 .....	299
14.4.5 初始工况定义 .....	291	15.1.2 模拟工作方案 .....	299
14.4.6 网格重划分参数设置 .....	292	15.1.3 力学边界条件 .....	301
14.4.7 加载步长设置及模拟参数控制 .....	292	15.2 铝合金平板模拟结果分析 .....	301
14.4.8 JOB 定义及提交 .....	293	15.3 本章小结 .....	304
14.4.9 轮毂零件热锻过程模拟结果 .....	296		
14.5 本章小结 .....	298		



CAE分析大系

# MSC.Marc 工程实例 详解

© 董志波 刘雪松 马瑞 刘建光 王苹 编著

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

MSC. Marc工程实例详解 / 董志波等编著. — 北京 :  
人民邮电出版社, 2014.9  
(CAE分析大系)  
ISBN 978-7-115-35154-8

I. ①M… II. ①董… III. ①有限元分析—应用软件  
IV. ①0241.82-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第109512号

## 内 容 提 要

本书结合一系列的工程应用实例,系统地讲解 MSC.Marc 在工程领域的数值模拟分析。全书分为三篇,共 15 章,即入门篇(第 1~2 章)、焊接应用篇(第 3~12 章)和材料工程应用篇(第 13~15 章)。入门篇:主要讲解了 MSC.Marc 的基本功能和特点、焊接和材料加工过程中常用的功能模块和简单实例分析,通过这部分的学习,读者能够快速了解软件的基本功能和简单的材料工程过程模拟计算分析方法。焊接应用篇:结合大量的工程实例,包括常用的焊接方法的模拟实例,如电弧焊(电弧摆动和电弧旋转)、激光焊、钎焊、搅拌摩擦焊、焊接变形的控制方法(反变形和随焊碾压)和一些大型焊接构件模拟过程的常见问题及解决方法,此部分也对焊接过程模拟的模型建立、问题求解和后处理结果中需要考虑的关键问题进行了讨论和分析,通过此部分的学习,读者不仅可以掌握焊接过程的模拟方法,还可以进行材料的自定义和子程序的二次开发。材料加工应用篇:主要介绍了板材成形和体积成形过程的模拟分析,通过此部分的阅读,能够使读者掌握成形过程中模拟的基本理论和关键技术,并且能够利用 Marc 软件进行相关成形过程的数值模拟研究工作。

本书适合材料工程、焊接技术与工程和结构工程等领域的高校老师和研究生、工程技术人员等阅读和参考。

本书的随书光盘中提供了书中涉及的所有 mud 模型文件和用户子程序文件,以供读者参考和学习。

- 
- ◆ 编 著 董志波 刘雪松 马 瑞 刘建光 王 苹  
责任编辑 杨 璐  
责任印制 程彦红
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
三河市海波印务有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 19  
字数: 682 千字 2014 年 9 月第 1 版  
印数: 1-3 000 册 2014 年 9 月河北第 1 次印刷
- 

定价: 49.80 元(附光盘)

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

# 前 言

MSC.Marc 是国际上功能最强的大型通用有限元软件之一，其基于位移法的有限元程序，在非线性方面具有强大的功能。拥有能够真实反映材料加工过程的本构模型，能够进行焊接过程和材料加工过程的计算，具有强大的接触处理功能来模拟金属与模具、结构与卡具之间的接触问题，具备处理焊缝金属填充问题的能力，并提供多种焊接热源模型，可以灵活、准确地处理复杂材料加工过程中的应力传递问题。

本书结合一系列的工程应用实例，系统地讲解 MSC.Marc 在工程领域的数值模拟分析。全书分为 3 篇，共 15 章，即入门篇（第 1~2 章）、焊接应用篇（第 3~12 章）和材料工程应用篇（第 13~15 章）。入门篇主要讲解 MSC.Marc 的基本功能和特点、焊接和材料加工过程中常用的功能模块和简单实例分析，通过此部分的阅读，使读者能够快速了解软件的基本功能和简单的材料工程过程模拟计算分析。焊接应用篇结合大量的工程实例，包括常用的焊接方法的模拟实例，如电弧焊（电弧摆动和电弧旋转）、激光焊、钎焊、搅拌摩擦焊、焊接变形的控制方法（反变形和随焊碾压）和一些大型焊接构件模拟过程常见问题及解决方法，并且此部分内容对焊接过程模拟的模型建立、问题求解和后处理结果中需要考虑的关键问题都进行了讨论和分析，使读者不仅可以掌握焊接中的模拟过程，同时还可以进行自定义材料和子程序的二次开发。材料加工应用篇主要介绍了板材成型和体积成型过程的模拟分析进行了详细介绍，通过此部分的阅读，能够使读者掌握成型过程中模拟的基本理论和关键技术，并且能够利用 MSC.Marc 软件进行相关成型过程的数值模拟研究工作。

## ☒ 适合读者

本书适合于材料加工工程、焊接技术与工程和结构工程等领域的高校老师和研究生、工程技术人员等阅读和参考。

## ☒ 配套资源

本书随书光盘中提供了书中所有章节涉及的 mud 模型文件和用户子程序文件，以供读者参考和学习。

## ☒ 互动平台的支持

为了方便读者的交流，我们为这本书还专门配备了微信公众平台：iCAX。读者只需要用微信服务号输入或者扫描二维码登录平台。



需要指出，本书力求读者能够利用 Marc 有限元分析软件，进行焊接及材料加工过程的数值模拟分析，并能够解决实际工程问题，并且本书提供工程实例的模型文件和用户子程序文件，但由于时间仓促和模拟过程相对较复杂，同时作者水平和能力有限，在书中难免有错漏处，欢迎给我们来信 info@dozan.cn 批评指正。

全书编写分工如下：全书章节安排及统稿由董志波负责，第 1、2、5、10、11、12 章由董志波执笔，第 7、8、9、15 章由刘雪松和王苹执笔，第 3、4 章由马瑞执笔，第 6、13、14 章由刘建光和姬书得执笔，参与本书工作的还有郑文健、宋奎晶、张德雨、张家铭、郭军礼等。

# 目 录

第 1 章 MSC.Marc 的功能和特点	9	3.2 焊接热过程分析基本流程	59
1.1 MSC.Marc 软件简介	9	3.3 多层多道电弧焊热过程模拟	60
1.1.1 MSC.Marc 软件产品	9	3.3.1 问题描述	60
1.1.2 MSC.Marc 软件的主要功能	10	3.3.2 几何模型建立及单元网格划分	60
1.1.3 MSC.Marc 软件在材料加工中的适用性	10	3.3.3 构建有限元模型	61
1.2 MSC.Marc 基础	10	3.3.4 材料特性定义	61
1.2.1 MSC.Marc 的软件接口功能	10	3.3.5 焊道及填充金属的定义	62
1.2.2 MSC.Marc 功能模块简介	11	3.3.6 初始条件及边界条件定义	63
1.2.3 MSC.Marc 的求解流程	11	3.3.7 焊接边界条件定义	65
1.3 本章小结	12	3.3.8 载荷工况定义	66
第 2 章 MSC.Marc 快速入门	13	3.3.9 JOB 定义及提交	67
2.1 MSC.Marc 的功能模块	13	3.3.10 多层多道焊电弧焊热过程模拟结果	68
2.1.1 Mesh Generation 模块	13	3.4 电弧摆动焊过程模拟	70
2.1.2 Geometric Properties 模块	16	3.4.1 问题描述	70
2.1.3 Material Properties 模块	18	3.4.2 几何模型建立及单元网格划分	71
2.1.4 Modeling Tools 模块	21	3.4.3 材料属性定义	72
2.1.5 Contact 模块	21	3.4.4 初始条件定义	72
2.1.6 Initial Conditions 模块	23	3.4.5 热力学边界条件定义	72
2.1.7 Boundary Conditions 模块	24	3.4.6 子程序定义	73
2.1.8 Mesh Adaptivity 模块	26	3.4.7 初始条件	74
2.1.9 Loadcases 模块	27	3.4.8 载荷工况的定义	75
2.1.10 Jobs 模块	29	3.4.9 JOB 定义及提交	75
2.1.11 Results 模块	35	3.4.10 摆动焊模拟结果分析	76
2.1.12 MSC.Marc 静态菜单	36	3.5 旋转电弧焊过程模拟	77
2.2 焊接热过程模拟简单示例	37	3.5.1 问题描述	77
2.2.1 问题的描述	37	3.5.2 有限元模型建立	77
2.2.2 建立有限元模型	37	3.5.3 子程序定义	78
2.2.3 设置模型的材料属性	40	3.5.4 旋转电弧模拟结果分析	79
2.2.4 定义焊接路径	44	第 4 章 激光焊接过程模拟分析	81
2.2.5 定义边界条件	44	4.1 综述	81
2.2.6 定义求解条件	47	4.2 问题描述	82
2.2.7 JOBS 定义及作业提交	48	4.3 有限元模型的建立	83
2.2.8 后处理分析	49	4.3.1 几何模型建立及单元网格划分	83
2.3 本章小结	52	4.3.2 材料属性定义	83
第 3 章 电弧焊焊接过程模拟分析	53	4.3.3 初始条件定义	84
3.1 弧焊基本理论	53	4.3.4 热力学边界条件定义	84
3.1.1 焊接电弧	53	4.3.5 子程序定义	85
3.1.2 电弧焊熔化现象	56	4.4 载荷工况的定义	88
3.1.3 电弧焊的分类	56	4.5 JOB 定义及提交	88
3.1.4 电弧焊的热源模型	57		

4.6	激光焊模拟结果分析	89	7.4	初始条件	133
<b>第 5 章</b>	<b>电子封装焊点钎焊过程模拟</b>	<b>91</b>	7.5	焊道及填充金属的定义	133
5.1	钎焊工艺与温度曲线	91	7.6	热学边界条件的定义	135
5.2	非线性钎料本构关系	92	7.7	力学边界条件	136
5.3	有限元模型的建立	93	7.8	子程序定义	137
5.3.1	几何模型建立及单元网格划分	93	7.9	载荷工况的定义	138
5.3.2	材料特性定义	94	7.10	JOB 定义及提交	140
5.3.3	子程序定义	96	7.11	铝合金型材随焊激冷模拟结果分析	141
5.3.4	初始条件定义	98	<b>第 8 章</b>	<b>反变形法用于 35# 钢平板焊接过程模拟</b>	<b>144</b>
5.3.5	热力学边界条件的定义	98	8.1	综述	144
5.3.6	接触条件定义	100	8.2	反变形法控制焊接变形原理	144
5.3.7	载荷工况的定义	101	8.3	有限元模型的建立	144
5.3.8	JOB 定义及提交	103	8.3.1	几何模型建立及单元网格划分	145
5.4	后处理结果分析	103	8.3.2	材料特性定义	148
5.5	其他材料本构关系的二次开发	105	8.3.3	焊接路径及焊缝金属的设定	148
5.6	本章小结	112	8.3.4	接触体及接触表的设定	149
<b>第 6 章</b>	<b>搅拌摩擦焊焊接过程的模拟分析</b>	<b>113</b>	8.3.5	力学边界条件的设定	151
6.1	综述	113	8.3.6	热学边界条件的设定	152
6.2	搅拌摩擦焊的基本理论	113	8.3.7	载荷工况的设定	152
6.2.1	搅拌摩擦焊的原理	113	8.3.8	Job 的设定	154
6.2.2	搅拌摩擦焊的焊接工艺参数	114	8.4	焊后结果分析	154
6.3	搅拌摩擦焊的热源模型	114	8.5	反变形模拟中的几点说明	155
6.3.1	不考虑搅拌针产热的热源模型	115	<b>第 9 章</b>	<b>随焊碾压用于铝合金平板对接焊接模拟</b>	<b>156</b>
6.3.2	考虑搅拌针产热的热源模型	115	9.1	综述	156
6.4	搅拌摩擦焊对接接头有限元模型的建立	116	9.1.1	问题描述	156
6.4.1	几何模型的建立	116	9.1.2	随焊碾压控制焊接热裂纹的原理	156
6.4.2	有限元网格的划分	117	9.2	随焊激冷有限元模型的建立	156
6.4.3	材料参数的定义	118	9.3	材料特性定义	157
6.4.4	初始条件的定义	119	9.4	初始条件	161
6.4.5	热学边界条件的定义	120	9.5	焊道及填充金属的定义	161
6.4.6	载荷工况的定义	122	9.6	热学边界条件的定义	163
6.4.7	JOB 定义与提交	124	9.7	定义接触条件	164
6.5	搅拌摩擦焊温度场的模拟结果分析	125	9.8	定义力学边界条件	167
6.6	本章小结	126	9.9	载荷工况的定义	169
<b>第 7 章</b>	<b>随焊激冷用于铝合金型材焊接模拟</b>	<b>127</b>	9.10	JOB 定义及提交	172
7.1	综述	127	9.11	铝合金平板对接随焊碾压模拟结果分析	173
7.1.1	问题描述	127			
7.1.2	随焊激冷控制变形原理	128			
7.2	随焊激冷有限元模型的建立	128			
7.2.1	几何模型建立及单元网格划分	128			
7.2.2	构建有限元模型	128			
7.3	材料特性定义	130			

第 10 章 大型容器焊接过程模拟研究	175	12.2 PyPost 后处理模块简介	224
10.1 综述	175	12.2.1 PyPost 模块主要对象类型	225
10.2 大型容器有限元模型的建立	175	12.2.2 PyPost 模块主要函数	226
10.2.1 几何模型建立及单元网格划分	175	12.3 PyPost 后处理入门实例精讲	230
10.2.2 构建有限元模型	176	12.3.1 程序实例精讲 1	230
10.3 材料特性定义	178	12.3.2 程序实例精讲 2	232
10.4 焊接路径及填充金属的定义	179	12.4 焊接后处理开发应用实例	234
10.5 初始条件及边界条件定义	181	12.4.1 焊接热循环曲线提取	234
10.5.1 初始条件定义	181	12.4.2 焊接熔池形貌提取	238
10.5.2 装卡条件	182	12.4.3 焊接变形数据提取	245
10.5.3 对流换热条件定义	183	12.4.4 焊接残余应力提取	247
10.5.4 焊接条件定义	184	第 13 章 板材成形过程模拟分析	250
10.6 载荷工况定义	186	13.1 综述	250
10.7 JOB 定义及提交	188	13.2 板材成形工艺特点分析	250
10.8 大型容器焊接模拟结果	190	13.3 板材成形过程数值模拟基本理论 及关键技术	251
第 11 章 飞机壁板结构焊接过程模拟分析	193	13.3.1 弹塑性有限元法	251
11.1 综述	193	13.3.2 板材成形过程数值模拟若干 关键技术	255
11.2 飞机壁板 T 型接头有限元模型的建立	193	13.4 圆筒形零件冲压成形过程数值模拟	259
11.2.1 几何模型建立及单元网格划分	193	13.4.1 有限元模型建立	259
11.2.2 构建有限元模型	194	13.4.2 单元定义	259
11.3 材料特性定义	196	13.4.3 材料特性定义	260
11.4 激光热源模型与双光束的实现	199	13.4.4 接触条件定义	262
11.5 初始条件和边界条件	200	13.4.5 边界条件设置	264
11.5.1 初始条件定义	200	13.4.6 加载步长设置及模拟参数控制	266
11.5.2 装卡条件定义	201	13.4.7 JOB 定义及提交	267
11.5.3 工件与环境对流换热条件定义	203	13.4.8 拉深筋设置	269
11.5.4 激光热源及焊接路径加载	204	13.4.9 铝合金板材圆筒拉深模拟结果分析	270
11.5.5 子程序定义	206	13.5 常见板材成形过程缺陷分析	271
11.6 载荷工况定义	208	13.5.1 起皱	272
11.7 JOB 定义及提交	210	13.5.2 破裂	272
11.8 飞机壁板焊接模拟结果	212	13.5.3 回弹	274
11.9 飞机壁板焊接工艺研究	213	13.6 本章小结	275
11.9.1 飞机壁板温度场	213	第 14 章 体积成形过程模拟分析	276
11.9.2 飞机壁板应力结果	214	14.1 综述	276
11.9.3 飞机壁板变形结果	215	14.2 体积成形工艺特点分析	276
第 12 章 基于 python 的焊接后处理	217	14.3 体积成形过程数值模拟基本理论 与关键技术	277
12.1 Python 语言介绍	217	14.3.1 刚(黏)塑性有限元法基本原理	277
12.1.1 Python 语言特点	217	14.3.2 体积成形过程数值模拟若干 关键技术	282
12.1.2 ythPon 语言编程基础	218	14.4 轮毂零件热锻过程热—力耦合 有限元分析	284
12.1.3 Python 的 Module (模块) 介绍	223	14.4.1 几何模型导入	285
12.1.4 Python 语言的执行	223		

14.4.2 有限元分析模型建立 .....	285	第 15 章 网格尺寸对焊接结果精度的影响 .....	299
14.4.3 材料特性定义 .....	287	15.1 综述 .....	299
14.4.4 接触条件定义 .....	287	15.1.1 问题描述 .....	299
14.4.5 初始工况定义 .....	291	15.1.2 模拟工作方案 .....	299
14.4.6 网格重划分参数设置 .....	292	15.1.3 力学边界条件 .....	301
14.4.7 加载步长设置及模拟参数控制 .....	292	15.2 铝合金平板模拟结果分析 .....	301
14.4.8 JOB 定义及提交 .....	293	15.3 本章小结 .....	304
14.4.9 轮毂零件热锻过程模拟结果 .....	296		
14.5 本章小结 .....	298		





# 1

第 章

# MSC.Marc的功能和特点

## 本章导读

MSC.Marc是功能齐全的高级非线性有限元软件，具有极强的结构分析能力。可以处理各种线性和非线性结构分析问题，主要包括：线性/非线性静力分析、模态分析、简谐响应分析、频谱分析、随机振动分析、动力响应分析、自动的静/动力接触、屈曲/失稳、失效和破坏分析等。为满足工业界和学术界的各种需求，提供了层次丰富、适应性强、能够在多种硬件平台上运行的系列产品。

MSC.Marc是国际上通用的有限元分析软件之一，拥有十分丰富的单元库、功能库、分析库和材料库，用户可以根据各种具体的结构分析进行适当的选择。MSC.Marc在材料加工工程中具有很强的适用性，在本章中，主要介绍MSC.Marc功能和特点。

## 知识要点

- ✎ MSC.Marc软件简介
- ✎ MSC.Marc基础
- ✎ 求解流程

## 1.1 MSC.Marc软件简介

MSC.Marc软件是由Analysis Research Corporation（缩写为MARC）开发、维护以及售后的有限元分析软件，是功能齐全的高级非线性有限元软件。对于广阔的工业领域，Marc软件提供先进的虚拟产品的加工过程和运行过程的仿真功能，帮助市场决策者和工程设计人员进行产品优化和设计，解决从简单到复杂的工程应用问题。经过几十余年的不懈努力，Marc软件得到学术界和工业界的大力推崇和广泛应用，成为全球非线性有限元软件行业的主导。

### 1.1.1 MSC.Marc软件产品

MSC.Marc是功能齐全的高级非线性有限软件的求解器，是几十年来有限元分析的理论和软件实践的完美结合，具有极强的结构分析能力，可以处理各种线性和非线性结构分析。MSC.Marc单元库提供了157种单元，包括结构单元、连续单元和特殊单元，几乎每种单元都具有处理大变形几何非线性、材料非线性以及包括接触在内的边界条件非线性的超强能力。MSC.Marc的结构分析材料库提供了模拟金属、非金属、聚合物、岩土和复合材料等多种线性和非线性复杂材料行为的材料模型，采用具有高数值稳定性、高精度和快速收敛的高度非线性问题求解技术。为了进一步提高计算精度和分析效率，MSC.Marc软件提供了多种功能强大的加载步长自适应控制技术，自动确定分析屈曲、蠕变、热弹塑性和动力响应的加载步长。MSC.Marc卓越的网格自适应技术，以多种误差准则自动调节网格疏密，不仅能提高大型线性结构分析精度，而且能对局部非线性应变集中、移动边界或接触分析提供优化的网格密度，保证计算精度的同时也使非线性分析的计算效率大大提高。此外，MSC.Marc支持全自动二维网格和三维网格重划，用于纠正过度变形后产生的网格畸变，确保大变形分析的继续进行。

对非结构的场问题如包含对流、辐射和相变潜热等复杂边界条件的非线性热问题的温度场，以及流场、电场、磁场也提供了相应的分析求解能力；具有模拟流—热—固、声—结构耦合、土壤渗流、电—磁、电—热、热—结构以及自—热—结构等多种耦合场的分析能力。

为了满足高级用户的特殊需要和进行二次开发，MSC.Marc提供了方便的开放式用户环境。这些用户子程序接口几乎覆盖了MSC.Marc有限元分析的所有环节，从几何建模、网格划分、材料选择、边界条件定义到分析求解和结果输