

普通高等教育“十三五”规划教材

Polyflow软件基础

及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用

Polyflow RUANJIAN JICHU JIQI ZAI
SHUANGLUOGAN JICHU FANGZHEN
GUOCHENGZHONG DE YINGYONG

毕超◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用

毕超 编著



机械工业出版社

本书以双螺杆挤出为例,对 Polyflow 软件的基本操作方法进行了全面的介绍。全书共 8 章:第 1 章介绍了作者使用该软件进行模拟仿真的心得体会;第 2 章对使用 Gambit 软件划分网格的前处理过程进行了讲解,让读者充分体会网格规划在划分网格环节的重要性;第 3 章是使用 Polyflow 软件进行流场分析的基础部分,不仅包括流场设定的具体过程和使用后处理软件 Field-View 观察流场结果的具体方法,而且还对流场设定文件的修改、网格重叠技术的原理以及系列化流场计算问题的设定参数管理进行了讲解;第 4 章在第 3 章获得流场结果的基础上,基于示踪粒子轨迹跟踪技术实现了对混合过程的统计评价,并着重介绍使用 Polystat 统计模块进行统计分析的具体方法;第 5 章介绍非等温仿真问题的设定方法,并对比了两种非等温问题的出口和入口温度边界的计算结果;第 6 章讲述了适应性网格技术在双螺杆挤出仿真中的应用,以及由 CSV 文件转换获得 Polyflow 类型文件的操作过程;第 7 章讲述了螺杆受力状态的计算方法和相关场量的观察方法;第 8 章讲述了滑移条件和周期性边界条件的具体应用方法。

本书在编写过程中,为了便于读者学习,加入了大量的设定过程截图,还将计算结果的分析方法引入每一章,便于读者形成流场计算结果的分析思路。

本书使用的软件包括 Gambit (版本号 2.4)、Polyflow (版本号 15.0) 以及 Fieldview (版本号 10)。这些软件目前有多多个可用版本,各版本之间差异不大。如读者在使用非本书介绍的版本时发现较大差异,以致影响阅读,欢迎与编者交流。

本书内容全面丰富,难度由浅入深,适合于广大高分子材料加工相关专业的大专、本科、研究生及科研工作者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用/毕超编著. —北京:机械工业出版社, 2018. 7

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-59660-8

I. ①P… II. ①毕… III. ①计算流体力学—应用软件—高等学校—教材
IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 073235 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:姜 凤 责任编辑:姜 凤 陈瑞文 张金奎

责任校对:樊钟英 封面设计:马精明

责任印制:张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.75 印张 · 334 千字

0001—2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-59660-8

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前 言

聚合物加工过程数值仿真是提高相关行业设备开发和工艺改进效率的有效途径。本书中,笔者以从2003年开始学习和使用 Polyflow 软件的心得体会着手,结合十余年的教学经验,以双螺杆挤出为背景,对 Polyflow 及其配套软件 (Gambit、FieldView、Polyfuse 和 Polystat 等) 的使用方法进行了讲解。从内容上看,本书内容全面丰富,涵盖了 Polyflow 模拟中大部分的核心内容,如稳态和瞬态问题、等温和非等温问题、流动仿真和混合过程统计等。此外,还包括流场计算中的网格重叠技术、适应性网格技术、运动部件受力状态以及周期性边界条件和滑移边界条件的使用方法。

在本书的学习过程中,希望读者能够从头开始,特别是第2~4章的内容,要按顺序学习。在掌握 Polyflow 软件的基础知识后,学习第5~8章的内容就会比较简单。读者最好一边看书,一边操作软件,并体会每一个设定环节在整个仿真设定中的具体作用,这样才能熟练掌握使用 Polyflow 软件进行仿真的方法。对于有相关模拟经验的读者,建议先阅读本书的第1章,体会笔者学习和使用该软件的心得。对于基础相对薄弱的读者,建议在学习本书内容后,在开始自己的模拟研究工作前,阅读本书的第1章。

在开始 Polyflow 仿真之旅前,笔者希望读者能够记住一句话:“最复杂、最全面的仿真模型往往不是最合适、最有效的”。

本书献给我女儿毕安亿、儿子毕家辉、妻子赵昕楠以及已在天国的父亲。

因个人水平有限,在编写过程中难免会有疏忽和错误之处,恳请读者批评指正。欢迎广大读者与笔者联系,电子邮件是 bichao812@sohu.com、bichao@mail.buct.edu.cn。也可通过扫描本书每页上的二维码,将阅读时发现的问题以及需要与编者交流的问题上传,编委会及时回复。

编 者



目 录

前 言

基 础 篇

第 1 章 Polyflow 软件介绍及软件使用心得	2
1.1 Polyflow 软件的组成及其模块功能介绍	2
1.2 建立仿真模型的基本流程	3
1.2.1 几何建模及网格划分	3
1.2.2 流场的设定	3
1.2.3 后处理流场提取及统计分析	3
1.3 Polyflow 软件使用心得体会	3
1.3.1 双转子混合器端面形状的优化分析	4
1.3.2 熔体齿轮泵稳压性能的分析	5
1.3.3 往复式单螺杆销钉挤出机机筒销钉的搅拌作用分析	7
第 2 章 双螺杆挤出模型的网格划分	10
2.1 几何模型及仿真工程的建立	10
2.1.1 几何模型	10
2.1.2 仿真工程的建立	11
2.2 螺纹元件部分的网格划分	11
2.2.1 指定求解器	13
2.2.2 几何模型的导入	13
2.2.3 体网格划分	13
2.2.4 边界和区域设定	14
2.2.5 网格输出	15
2.3 螺纹元件对应的流体区域部分的网格划分	15
2.3.1 指定求解器	16
2.3.2 几何模型导入	16
2.3.3 体网格划分	16
2.3.4 边界和区域设定	25
2.3.5 网格文件导出	25
2.4 啮合盘对应流体区域的网格划分	26
2.4.1 指定求解器	26
2.4.2 几何模型导入	26
2.4.3 体网格划分	27



2.5 网格文件格式转换及组合	34
2.5.1 格式转换	34
2.5.2 网格组合	35
思考题	37
第3章 双螺杆等温瞬态流动问题的有限元求解	38
3.1 流场仿真任务的创建	38
3.2 流场计算任务的设定过程	38
3.2.1 流场任务的创建及其类型的设定	38
3.2.2 瞬态等温流场子任务的设定	40
3.2.3 数值参数的设定	48
3.2.4 后处理子任务的设定	51
3.2.5 结果输出的设定	52
3.2.6 流场输出管理	53
3.2.7 文件管理	54
3.2.8 程序运行	54
3.3 使用 FieldView 软件观察流场结果	57
3.3.1 结果文件的导入及显示窗口初始化	57
3.3.2 流体区域边界上的剪切速率分布	58
3.3.3 瞬态数据的动态显示	62
3.3.4 截面上的速度向量分布	63
3.3.5 挤出方向上的剪切速率变化曲线	66
3.4 在瞬态任务的基础上完成稳态任务的设定	68
3.5 网格重叠技术	69
3.5.1 网格重叠技术简介	69
3.5.2 推荐的插值关系	70
3.5.3 运动部件复杂运动模式的检查	70
3.5.4 注意事项	70
3.6 系列化流场计算问题的设定参数管理	72
3.6.1 构建模拟参数表格	72
3.6.2 构建新建仿真任务的数据列表	72
3.6.3 结果对比	72
思考题	74
第4章 双螺杆挤出混合性能的统计分析	75
4.1 混合任务的设定	75
4.1.1 仿真任务的创建	75
4.1.2 计算区域的设定	76
4.1.3 边界条件的设定	77
4.1.4 流场的定义	78
4.1.5 示踪粒子的生成	79
4.1.6 粒子轨迹跟踪参数的设定	80
4.1.7 存储属性的选择	81
4.1.8 结果的存储	82
4.1.9 运动部件的定义	84



4.2 混合性能评价指标体系的建立	86
4.2.1 启动 Polystat 统计模块	86
4.2.2 数据读取	86
4.2.3 示踪粒子运动轨迹的动态显示	88
4.2.4 停留时间分布的统计	92
4.2.5 分布混合特性的衡量——分布指数、分离尺度	98
4.2.6 分散混合特性的衡量——最大剪切应力、少组分粒径变化	112
思考题	118

提 高 篇

第5章 双螺杆挤出非等温问题求解	120
5.1 物性参数与边界条件	120
5.1.1 几何模型	120
5.1.2 网格划分	120
5.1.3 边界条件	121
5.1.4 物性参数	122
5.2 非等温流场计算任务的设定	122
5.2.1 创建仿真任务	123
5.2.2 输出的设定	149
5.2.3 流场结果管理	151
5.2.4 文件管理	152
5.2.5 任务运行	152
5.3 对比方案的设定	153
5.4 程序运行过程及结果对比	156
5.4.1 程序运行过程	156
5.4.2 结果对比	157
第6章 适应性网格技术在双螺杆挤出仿真中的应用	162
6.1 适应性网格技术	162
6.1.1 inside 场	163
6.1.2 细化方案	163
6.1.3 相关参数	163
6.2 使用适应性网格技术时 Polydata 的操作方法	164
6.2.1 网格文件	164
6.2.2 相关设定	164
6.3 由 CSV 类型文件转换获得 Polyflow 类型文件	168
6.3.1 转换数量的切换	169
6.3.2 被转换文件的选择	170
6.3.3 计算区域的选择	170
6.3.4 网格细化次数的设定	171
6.3.5 拓扑关系	171
6.3.6 输出结果类型	171
6.3.7 保存和退出	172



6.3.8 转换结果	173
6.4 混合任务的设定	173
6.5 结果分析	173
第7章 挤出过程中螺杆的受力状态分析	177
7.1 求解前的准备	177
7.1.1 运动部件的网格文件	177
7.1.2 运动部件的边界条件	177
7.1.3 强度理论和物性参数	177
7.2 运动部件弹性变形后处理子任务的设定	178
7.2.1 子任务计算区域的设定	179
7.2.2 物性参数和系统单位的设定	180
7.2.3 位移边界条件的设定	181
7.3 流场结果观察及结果分析	184
7.3.1 导入结果文件	184
7.3.2 背景及显示设定	184
7.3.3 螺杆元件应力云图显示	185
7.3.4 螺杆元件变形显示设定	190
第8章 滑移条件和周期性边界条件	192
8.1 滑移条件的使用	192
8.1.1 滑移条件	192
8.1.2 基于运动部件的滑移问题设定	192
8.1.3 结果分析	197
8.2 周期性边界条件的使用	198
8.2.1 流场任务的设定	199
8.2.2 混合任务的设定	202
8.2.3 计算结果的对比	204



基础篇



基础篇



本章主要介绍 Polyflow 软件的组成及其模块功能，并对使用该软件的基本流程进行介绍，最后结合笔者的使用经验和几个典型的使用案例，讲述使用 Polyflow 软件进行流场求解时所思考的两个问题。

1.1 Polyflow 软件的组成及其模块功能介绍

Polyflow 软件的基本框架如图 1-1 所示。

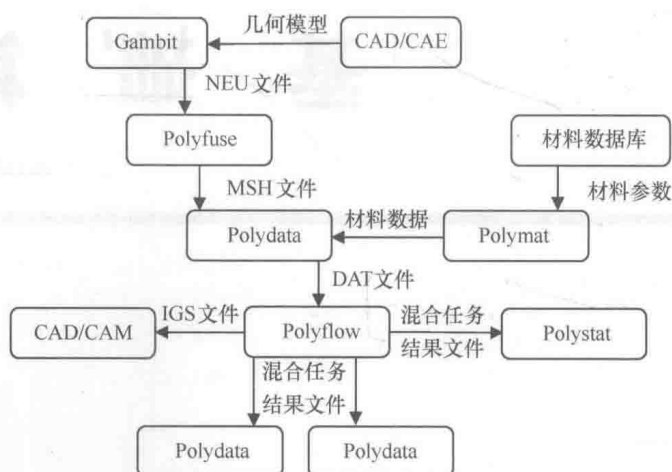


图 1-1 Polyflow 软件的基本框架

ANSYS Polyflow 是基于有限元算法的计算流体动力学软件，主要用于等温、非等温、二维或三维、稳态或瞬态黏性和黏弹性流体流动的仿真。该软件中的主要模块及功能介绍见表 1-1。

表 1-1 ANSYS Polyflow 的主要模块及功能介绍

模块名称	功能介绍
Polyflow	流场计算求解器，是软件的核心。调用 Polydata 模块设定生成的 dat 文件进行流场求解
Polydata	流场设定前处理模块。在该模块中可以完成物理模型、物性参数、边界条件、数值参数等环节的设定
FieldView	图形后处理软件，同类型软件还包括 CFD-Post、Flpost 等。利用该类软件可进行流场的可视化，提取流场分布结果



(续)

模块名称	功能介绍
Polydiag	监视流场计算的迭代收敛过程
Polyfuse	可以实现网格文件的组合，生成可用于各种计算问题的网格文件
Polystat	统计后处理模块。使用粒子轨迹跟踪技术获得示踪微元流动轨迹并记录沿着轨迹流场参数的变化后，利用统计方法来定量地分析流场的混合特性
Polymat	Polyflow 软件支持基于实验数据的仿真计算。将实验测得的物性数据（流变参数）数据输入 Polymat 模块。在 Polydata 中启动相关选项后，即可通过对实验数据的插值来构建物料的流变方程
Gambit	网格划分前处理模块。可以实现同样功能的软件还有 ANSYS ICEM CFD 和 Polymesh 等。这些前处理软件可以导入 .igs、.x_t、.sat 等多种格式的几何模型，并对其进行网格划分

1.2 建立仿真模型的基本流程

1.2.1 几何建模及网格划分

首先需要将几何模型导入前处理软件。以 Gambit 软件为例，可以导入 .igs、.x_t 等多种格式的三维模型，也可以导入 .sat 等多种格式的二维模型。在该软件中不仅可以进行边界层设定，而且可以通过对线网络的设定来控制面网格的布置和数量，甚至可进一步控制三维体网格划分模式。Gambit 软件针对 Polyflow 求解器的网格文件扩展名为 .neu，需要在 Polyman 模块中转换为 .msh 格式的文件。对于由多个几何体组成的计算模型，还需在 Polyfuse 模块中进行组合和相关操作。

1.2.2 流场的设定

将网格 .msh 格式的文件放入到仿真文件树内，双击 .msh 文件启动 Polydata 模块。这里可以设定物理模型（稳态问题、瞬态问题、演变问题、流场计算任务或混合任务，以及计算的维度）、物性参数、边界条件、网格重置（针对运动边界条件）、运动部件的运动、流场参数（包括流函数及压力特征点）、数值计算参数、输出结果类型和输出控制参数等。

1.2.3 后处理流场提取及统计分析

流场计算任务获得流场结果后，可以使用 FieldView 等后处理软件进行流场观察和结果提取。对于混合任务所得结果，可以使用 Polystat 模块进行统计后处理分析，以获得流场混合特性的定量评价指标。

1.3 Polyflow 软件使用心得体会

在进行模拟前，首先要明确研究目标。在充分分析研究对象的基础上，提出所要分析的性能，根据要分析的性能规划仿真任务的特征。这是相当重要的一步，只有充分了解需求，才能为满足需求建立仿真计划。以螺杆混合特征分析为例，如果要研究双螺杆转速对物料的



轴向混合效果的影响,那么就要建立三维等温模型,二维模型无法体现轴向流动。如果问题转换为黏性生热对出口胶料温度的影响,就需要选用非等温模型。同时,这一步中还要明确采用定性还是定量的方法对所研究的问题进行分析。对应上述问题,停留时间分布指标是描述轴向混合性能的重要指标。为了获取这样的结果,需要在瞬态流场结果的基础上进行混合任务计算,从而进行统计量化分析。其次,要建立仿真问题的物理模型。一方面需要对流场模型进行简化,去除对流场计算影响不重要的几何特征,另一方面需要明确流场模型中需要突出的几何细节。例如,在双螺杆啮合盘元件流场模拟中,可以忽略啮合盘轮廓的微小倒角,但是要突出相邻啮合块之间的轴向间隙。再次,要分析模型所需要施加的边界条件类型。对于等温问题要考虑流动边界条件,而非等温问题,除了流动边界条件外,还要考虑温度的边界条件。以非等温流动为例,如果出口边界存在与主流方向相反的流动,那么一般的outflow类型温度边界条件将无法真实地描述流场特征。这是因为,从该区域流出的流体温度是由系统计算获得的,但从出口截面流入的流体温度应该是来自其下游区域入口边界的回流温度。所以,选择给定流入计算区域的流体温度的出口条件,即流出流体区域的节点温度由系统计算获得,而从出口边界流入的温度由边界条件给定。本书将在后续章节中讨论这类边界条件的使用。最后,要判断采用的计算机是否有足够的计算能力完成计算。随着计算机技术的发展,计算机的内存和CPU均得到飞速提高。在计算能力能够保证的情况下,要思考如何用最经济的方式来获得能够满足需要的计算结果。

归根结底,在进行数值仿真之前要考虑以下两个问题:①想要通过数值模拟得到什么结果;②以什么样的计算模型能够最经济地得到所需结果。笔者结合多年使用软件的经验,通过几个典型的案例来讨论一下这两个问题。

1.3.1 双转子混合器端面形状的优化分析

双转子混合器在高分子材料混合加工过程中使用非常广泛,图1-2所示为其混炼段转子结构。首先我们来回答第一个问题,在仿真中想要研究转子截面形状对混合性能的影响。然后再看为了开展所期望的研究,需要建立什么样的计算模型,才能以最经济的方式得到所需的结果。

虽然三维流场模拟可以直观地分析三维流场特性,但是在这个模拟中我们更偏重采用二维模型,因为模拟要解决的问题是端面形状的影响,2D模型忽略了轴向的流动,这使得计算中轮廓的影响更加突出。与此同时,为了获得更清晰的转子轮廓构型,需要在模拟中引入适应性网格技术,以更清楚地描述轮廓形状对混合效果的影响。利用这一模型计算得到的流场结果如图1-3所示。这样的结果足以分析转子截面形状对混合性能的影响。

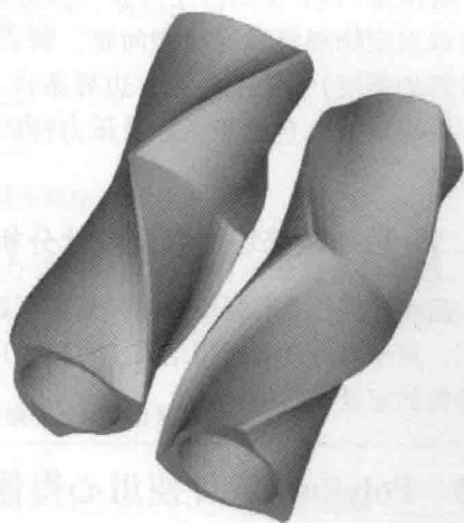


图1-2 双转子混合器转子模型



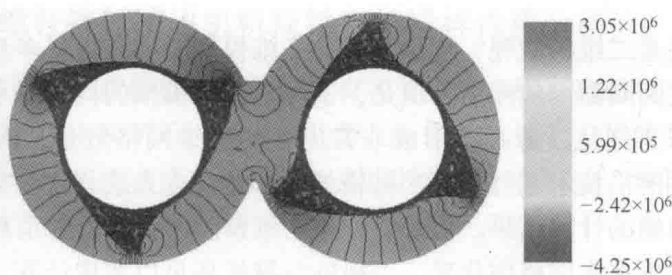


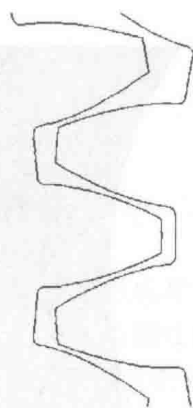
图 1-3 双转子混合器二维压力场模拟结果

1.3.2 熔体齿轮泵稳压性能的分析

熔体齿轮泵在挤出加工过程中起到稳定挤出的作用。模拟中要通过出口流量的实时变化来分析齿轮泵的稳压性能。这就回答了第一个问题。那么需要什么样的模型才能以最经济的方式获得所需的结果呢？下面考虑以下三方面问题：①能够描述瞬态流动状态下齿轮泵出口流量；②能够充分描述齿轮泵啮合区内物料的流场特征；③入口能够施加产量或压力波动条件。为了解决这三个问题，现进行如下考虑：使用网格重叠技术进行瞬态流场计算；使用适应性网格技术可以对啮合区沿转子轮廓进行网格细化；使用系统自带的余弦函数给定入口的流率或法向应力。除了常规流场设定外，还要考虑以下几个问题：

(1) 齿轮修形

在齿轮泵工作时，标准齿轮啮合会形成一个封闭的空间，主要就是将原本连续的流体空间分割为多个独立空间，从而造成模拟无法正常进行。为此，在建模时，要考虑使用双驱动形式齿轮泵，假设两个轴独立驱动，且还需对齿廓进行修形，以保证两齿轮啮合齿两侧均有一定间隙，齿轮啮合模型如图 1-4 所示。

图 1-4 齿轮啮合模型
(包含轮齿间隙)

(2) 流量平衡

对于一个具有入口和出口的流场模型来说，在保持质量守恒且流体不可压缩的情况下，入口流率与出口流率一致，这样也就无法分析齿轮泵是否能起到稳定挤出的作用。为此，在流场入口区域附近加设了一个回流口（见图 1-5）。这样流量平衡变为

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{bf} \quad (1-1)$$

式中， Q_{in} 为入口流率； Q_{out} 为出口流率； Q_{bf} 为回流口流率。 Q_{out} 反映齿轮泵的输送能力的同时，还可以反映出口流率的波动状况。而入口过多的流量将从回流口流出，这与实际情况下，齿轮泵造成的压力回流是一样的。

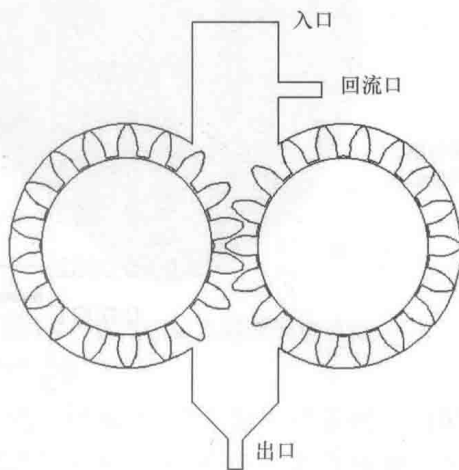


图 1-5 齿轮泵几何模型



(3) 模型维度

采用三维模型还是二维模型呢？理论上说，三维模型能够获得更多流场细节特征，如齿轮端面与泵体侧壁之间间隙内的流动。但是，实际上三维模拟的计算是不容易实现的。这是因为间隙中的网格需要细化，势必会形成非常庞大的三维网格数量，消耗非常多的计算资源。即便使用适应性网格技术进行了多次网格细化，通常也无法获得清晰的运动部件表面轮廓，也就无法获得精确的计算结果。但是，使用二维模型时计算资源消耗大的问题可以得到解决，使用三次甚至更多次网格细化后，一般的计算机还足以完成计算。此时运动部件边界的清晰度足以满足齿轮泵稳压性能的计算精度要求，所以建议使用二维模型。

综上所述，计算中使用了图 1-5 所示的 2D 几何模型，解决了啮合间隙、流量平衡及轮廓边界网格细化的问题。图 1-6 给出了齿轮泵流场特征。图 1-7 给出了入口和出口流量曲线。由图 1-7 可以看出，当入口流量有较大波动时，出口流率可以保持稳定，即体现了齿轮泵的稳压能力。

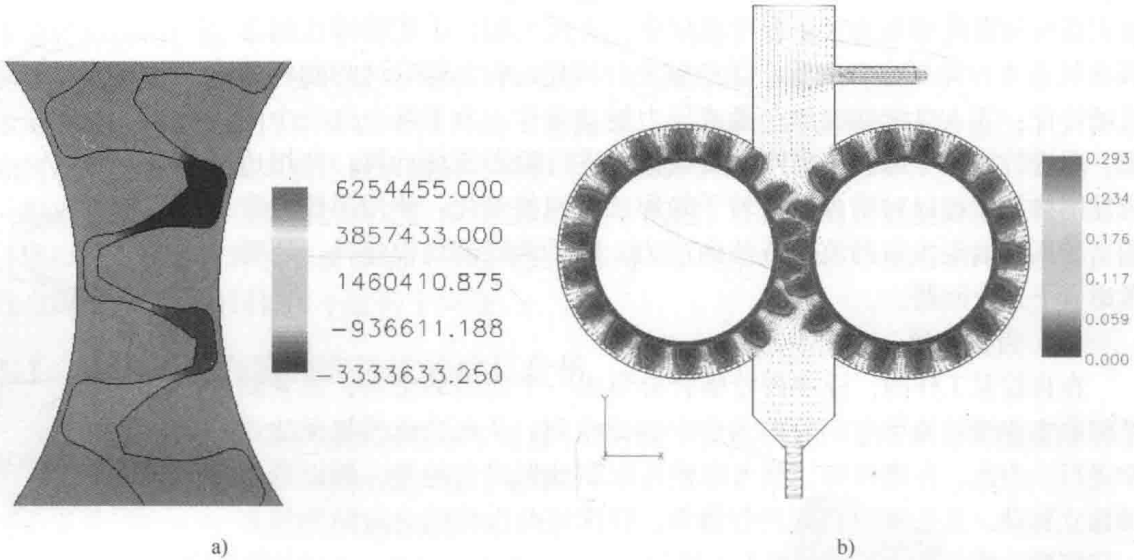


图 1-6 流场特征
a) 压力场 b) 速度场

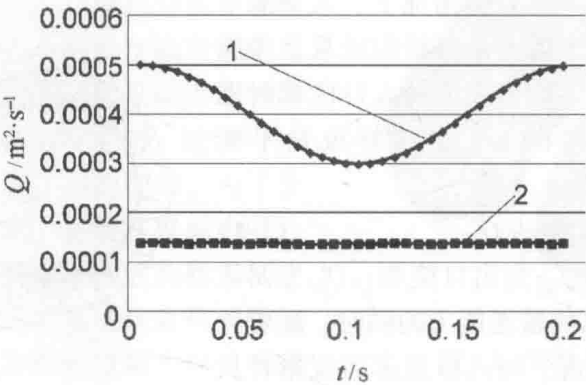


图 1-7 出入口流量曲线
1—入口流率 2—出口流率



1.3.3 往复式单螺杆销钉挤出机机筒销钉的搅拌作用分析

往复式单螺杆销钉挤出机螺杆旋转的同时有往复运动，螺杆运动规律复杂。混炼型螺杆元件的三维几何模型如图 1-8 所示，图中圆柱形几何体为机筒上安装的销钉。螺杆旋转和往复运动的过程中，销钉从螺棱通道中经过，起到搅拌作用。仿真时，要计算机筒上安装销钉的混炼作用。

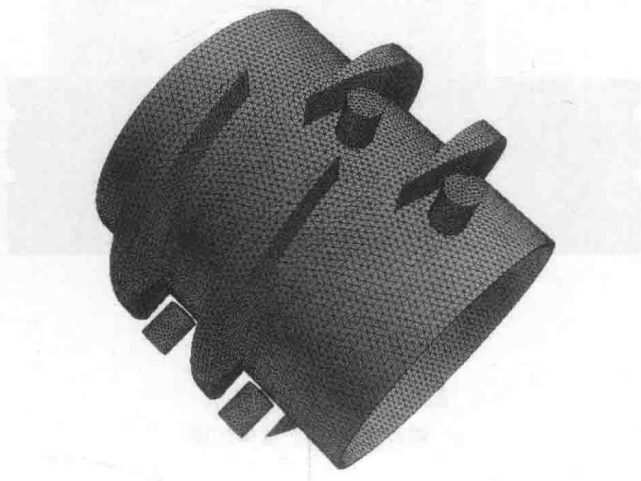


图 1-8 Buss 机混炼元件和销钉的三维模型

从设计角度来看，销钉的混炼作用通过三个途径发挥：①销钉与螺棱侧壁之间形成相对运动，起到剪切物料和清洁螺棱的作用；②销钉与螺杆根径形成相对运动，起到清理螺杆根部作用的同时也起到剪切作用；③销钉在流体流动区域起到搅拌物料流动的作用。理论上，三维模型能够充分描述以上三个方面的特性。但是，使用网格重叠技术后，销钉和螺杆均作为运动部件，其轮廓的清晰程度对流场结果影响至关重要，特别是在量化销钉所起的作用时。使用适应性网格技术是提高运动部件表面轮廓清晰度的有效途径。本例的初始网格如图 1-9 所示，其中包含了边界层网格，以获取机筒和螺杆之间间隙内物料的流动状态。其余位置网格尺寸均约为 2mm。在这个尺寸下，如果网格细化一次，则细化后的网格尺寸为 1mm；细化两次，网格尺寸为 0.5mm，细化三次为 0.25mm。但是，销钉和螺棱之间的间隙最小处在 0.3mm 左右，0.25mm 的网格细化程度无法清晰地描述间隙内的物料流动，因此需要更加细致的网格。但是从三维网格数量的角度来说，细化三次后的网格数量已经非常巨大，考虑后续的由 CSV 格式输出结果转换为 RES 类型结果时的时间消耗，以及混合任务中读取流场结果时的内存消耗，多于三次的网格细化是不合理的。为此，调整思路使用二维模型，将螺杆沿着外径展开，获得二维模型（见图 1-10）。

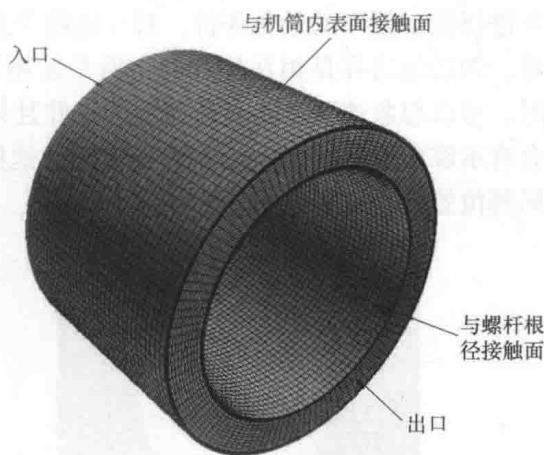


图 1-9 流体区域几何体网格模型



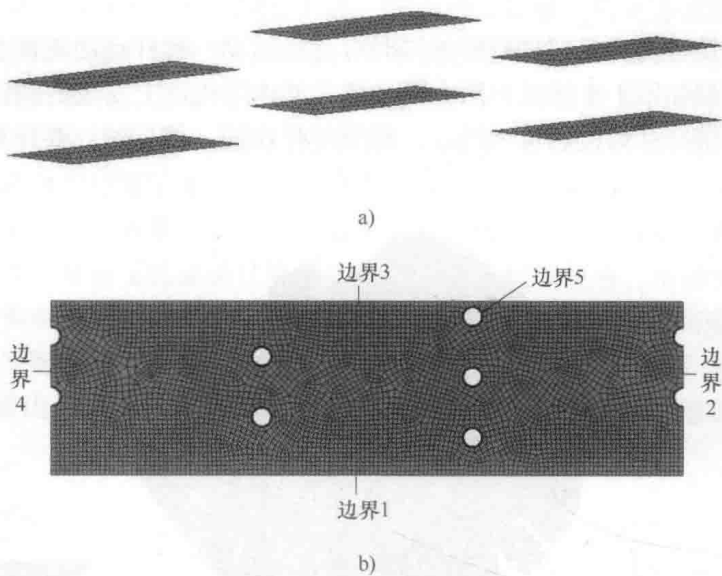


图 1-10 展开 2D 模型
a) 螺杆元件 b) 流体区域

这样就忽略了槽深度方向的影响，从而无法描述销钉发挥作用的第二个途径。此外，将螺杆考虑成运动部件，并且将流体区域与销钉重叠的部分去掉，以构成精确的销钉轮廓。这样不仅减少了运动部件的数量，同时由于具有明确的边界，因此可以使用边界层技术对销钉附近进行局部细化网格设计（见图 1-11）。值得注意的是，使用这个模型还有一个需要解决的问题：流体区域展开所形成的两个侧边的边界条件如何施加？这个边界需要施加合理的边界条件才能使该模型具有使用价值，特别是基于这个模型，后续还要计算示踪粒子轨迹，并进行混合效果的量化评价。对于这两个边界，使用周期性入口和出口条件，从模型表面上看，两边的边界是相互分开的，但是使用周期性入口和出口条件后，在进行混合任务计算时，可以想象这两个边界是连通的。并且只要有足够长的周期来构成完整的计算模型，将不会有示踪粒子从这两个边界离开流场，这样可以保证计算的正确性。图 1-12 给出了流场中局部位置的速度场分布。

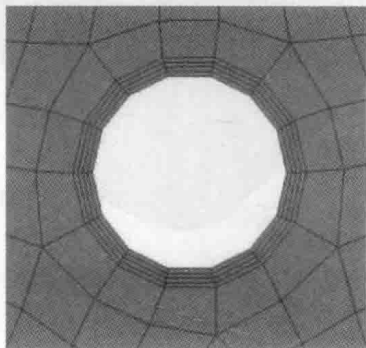


图 1-11 销钉附近的网格划分
(边界层)

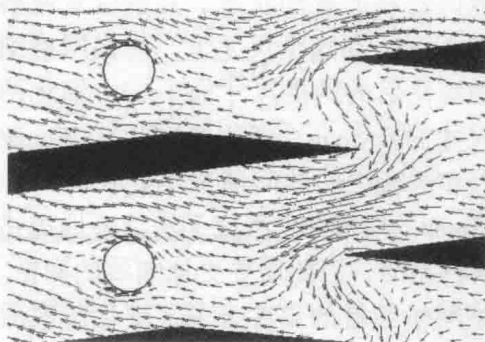


图 1-12 流场内的速度场分布



图 1-13 给出了销钉与螺棱之间间隙内的剪切应力分布。从结果可以看出, 展开后所得的 2D 模型不仅能够精确描述复杂的速度分布状态, 而且可以获得局部间隙内的剪切应力分布, 这些都是 3D 模型无法获得的。可见, 二维模型才是最经济的计算模型。

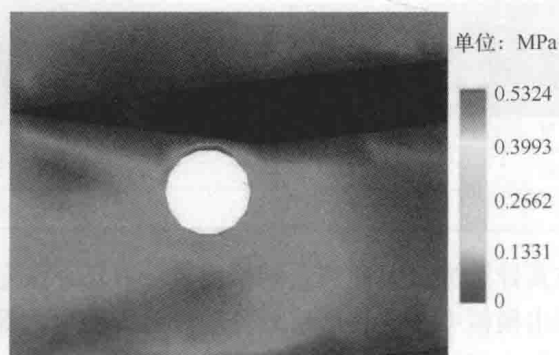


图 1-13 销钉附近的剪切应力分布

