

## 摘要

冷却系统是注塑模具的重要组成部分。对大多数模具，冷却是通过冷却液在冷却管网内的流动来实现的。注塑模具冷却管网的分析计算，是在基本参数已定的基础上，来确定各管段的流量和各个节点的压力。

管网分析的意义，不但在于可以确定冷却液压力泵（大多为水泵）是否能提供足够的压力以保证管网的流量，而且当管网有内部支路时，可以计算各支路的流量分配。

注塑模具的冷却管网和水力管网具有异类相似性。管网计算的理论研究发展到今天，已经取得了卓有成效的成绩。因此模具管网的计算参考借鉴了水力管网计算的一些理论算法。例如在已知的注塑模 CAE 软件中，如世界著名的 MPI、C-MOLD 以及我国的 Z-MOLD，在管网分析中均套用了通常管网计算方法。

但是，目前的模具冷却管网分析仍然存在一些不足。首先，用于管网分析的两大类算法——节点法和回路法——均存在一定的缺陷；其次，是否通常的管网分析完全适用于注塑模的冷却管网分析这一特殊问题，尚未见令人信服的分析报告。本文在深入研究管网计算理论的基础上，针对模具冷却管网的特殊性，主要进行了以下工作：

- 1、在对传统的管网计算理论深入分析的基础上，归纳总结了各种计算方法。并对各种算法进行比较，针对以往算法中的不足，提出了一种新的管网计算方法——修正流量的节点法。构造了新节点法的数学模型，给出了计算程序框图。
- 2、根据新算法的数学模型，采用 C++ 语言编写了电算程序。并通过算例，证明了新方法能有效的克服传统方法的弊端。
- 3、进行了模具冷却管道的流量——压力关系实验，对实验数据进行了研究分析，与理论计算结果进行了比较。结果表明，目前的注塑模冷却管网的计算方法存在严重缺陷，包括 MPI 在内的 CAE 软件给出的计算结果均有重大误差。本文分析了问题产生的原因，对原有模具管网计算理论进行了一些修正，提出了指导模具冷却管网计算的一些定性结论。

关键词：管网；节点法；回路法；注塑模具；冷却系统

## ABSTRACT

The cooling system plays important role the injection molding. To most injection mold, the cooling is realized through the coolant flowing in pipe network. So-called cooling pipe network analysis is to determine the flow rate for each segment and the pressure at segment joints (nodes) when the basic parameters are known.

By the analysis, not only can we be sure whether the coolant pump can provide enough press to ensure the flow rate of the network, but also we can predict the coolant-flow distribution in all subcircuits if they exist.

The cooling pipe network of injection mold is similar to the water network to a certain degree. Up to date, the general pipe network analysis is well developed, so its theory and numerical method is also widely applied to the pipe network analysis in the cooling system of injection mold. For example, some CAE software for injection mold, such as MPI, C-MOLD, which are considered as word class software, and Z-MOLD developed in our country, are using the general technique of pipe network analysis. However, there are still some shortcomings in the current numerical analysis for cooling pipe network of injection mold. Firstly, both junction method and loop method, two main methods used for the network analysis, have their own disadvantages. Secondly, whether the general network analysis is completely applicable to our special problem is questionable, and no convincing research has been reported.

On the basis of the theory of pipe network analysis, the present work is concentrated on the special study of the cooling pipe network of injection mold. The main work is as follows:

1. The traditional pipe network analysis was deeply studied, and various numerical methods were reviewed and compared. A new numerical solution to the pipe network analysis, named as junction method with flow rate modification, was presented to overcome the shortcomings existing in the present analysis. The related mathematics model was formulated and the computational frame diagram was given.


2. Based on the new method, the computer program code was written with C++ language. The given examples proves that the new method is more powerful and can successfully overcome the disadvantages of the present numerical methods.
3. The experiment was made to determine the flux-pressure relation in the cooling pipe of the mold. The experimental data were analyzed and compared to the theoretical calculation. It was shown that the current calculation methods of the cooling pipe network of injection mold have serious problem. The results calculated by almost all CAE software, including MPI, are not correct. The reason of the problem was analyzed and some modification to the previous cooling pipe network analysis of injection mold was given, including some qualitative conclusion

**Keyword: Pipe network; Junction method; Loop method; Injection mold; Cooling system**

## 郑 重 声 明

本人的学位论文是在导师指导下独立撰写并完成的，学位论文没有剽窃、抄袭等违反学术道德、学术规范的侵权行为，否则，本人愿意承担由此产生的一切法律责任和法律后果，特此郑重声明。

学位论文作者（签名）：



2016年6月8日

## 第一章 绪论

### 1.1 模具 CAD/CAE/CAM 简介

在现代机械制造业中,模具工业已成为国民经济中一个非常重要的行业,许多新产品的开发和生产,在很大程度上依赖于模具制造技术,特别是在汽车、轻工、电子和航天等行业中尤显重要。模具工业发展的关键是模具技术的进步,模具技术又涉及到多学科的交叉。模具作为一种高附加值和技术密集型产品,其技术水平的高低已成为衡量一个国家制造业水平的重要标志之一。世界上许多国家,特别是一些工业发达国家都十分重视模具技术的开发,大力发展模具工业,积极采用先进技术和设备,提高模具制造水平,已取得了显著的经济效益。

目前,整个工业生产的发展特点是产品品种多,更新快,市场竞争日趋激烈。为了适应用户对模具制造的高精度、短交货期、低成本的迫切要求,模具工业正广泛应用现代先进制造技术,来加速模具工业的技术进步,满足各行各业对模具这一基础工艺装备的迫切需求<sup>[1,2]</sup>。

模具 CAD/CAE/CAM 是改造传统模具生产方式的关键技术,是一项高科技、高效益的系统工程。模具 CAD, CAE, CAM 的基本概念如下:

- ① CAD:CAD(ComputerAidedDesign)是指工程技术人员以计算机为工具,用自身的专业知识,对模具进行总体设计、绘图、分析等设计活动的总称,是一项综合性技术。
- ② CAE:CAE(ComputerAidedEngineering)是以现代计算力学为基础,以计算机仿真为手段的工程分析技术,是实现模具优化设计的主要支持模块。模具 CAE 主要是指用计算机对模具产品进行性能与安全可靠性的分析,对其未来模具的工作状态和运行行为进行模拟,及早发现设计缺陷,并证实未来工程、产品功能和性能的可用性与可靠性。
- ③ CAM:CAM(ComputerAidedManufacturing)有狭义与广义之分。狭义 CAM 通常指对模具加工数控程序的编制,包括刀具路线的规划、刀位文件的生成、刀具轨迹仿真以及后置处理和 NC 代码生成等。模具 CAM 是指利用计算机实现从模具图样到产品制造过程中的直接和间接活动。包括对物质流动和信息流动的直接控制、管理和监督,也包括工艺准备、生产作业、计划、数控程序编制等,其核心内容是实现产品加工过程中的数控编程的自动化<sup>[3,4]</sup>。

现代化制造加工业,应以使用模具 CAD/CAE/CAM 技术来实现优质、高效、低成

本的产品生产为目标以适应用户对产品个性化的追求。在我国,有许多模具企业大都凭经验或已经在设计、制造等方面分散使用 CAD/CAE/CAM 单项技术来实现生产,由于产品信息相当复杂,要实现企业生产自动化,在分离的 CAD, CAE, CAM 之间还需要大量的人工工作,这给企业自动化生产带来了极大的障碍。这种“自动化孤岛”的方法使整个生产过程资源共享率低、信息不流畅,导致研制产品周期长、更新换代慢,难以在国际竞争中生存和发展。

国外推广 CAD/CAE/CAM 技术成功的经验表明:企业取得显著效益,很多是从集成应用中得到的,而不是单项应用的结果。模具 CAD/CAE/CAM 是模具 CAD, CAE, CAM 的集成,它以计算机软件的形式,为企业提供一种有效的辅助工具,使工程技术人员借助于计算机对产品性能、模具结构、成形工艺、数控加工及生产管理进行设计和优化。其中心思想是让用户在统一的环境中实现 CAD/CAE/CAM 协同作业,以便充分发挥各单元的优势和功效。

如今,模具 CAD/CAE/CAM 技术能显著缩短模具设计与制造周期,降低生产成本和提高产品质量已成为模具界的共识<sup>[5]</sup>。

## 1.2 注塑模具的优化设计<sup>[6-10]</sup>

模具是赋予制品固定的几何形状,用以重复大量生产成品的工具。对于注塑模具,设计时除了要考虑产品外形、塑件壁厚外,还需要充分考虑浇口位置、流道排列、冷却管路配置、滑块、顶出机构等。模具设计人员完成成品图与模具图绘制后,再去加工模具,然后试模,之所以进行试模,是因为没有人能准确预测塑料在模具内部的成型情况,而这一部份因素却决定了产品品质。当试模得到的产品不是原先所预期的,而有缺陷时,只能通过加以修改模具来得到较好的产品。为了一次试模就能够得到良好的产品,首先要达到模具的最佳设计。设计人员应该先了解模具内部的成型情形,在模具设计前就先把相关因素考虑进来,才能获致良好成品。

模具 CAE 技术正是解读模具内部成型所有信息的有效工具。

塑料模具 CAE 技术是根据塑料加工流变学和传热学的基本理论,建立塑料熔体在模具型腔中的流动、传热的物理数学模型,利用数值计算理论构造其求解方法,利用计算机图形学技术在计算机屏幕上形象、直观地模拟出实际成型过程。CAE 技术的应用带来的直接好处是在模具制造之前就能发现设计中存在的问题,修改图纸而不是返修模具,减少试模、修模次数和模具报废率,缩短模具设计制造周期,降

低成本, 提高产品质量。

CAE 技术在注塑模具设计中的作用主要体现在以下几方面:

### 1、优化塑料制品

塑件的壁厚、浇口数量、位置及流道系统设计等对于塑料制品的成败和质量关系重大。以往全凭制品设计人员的经验来设计, 往往费力、费时, 设计出的制品也不尽合理。利用 CAE 分析技术, 可以得到制品的实际最小壁厚, 优化制品结构, 降低材料成本, 缩短生产周期, 保证制品能全部充满。

### 2、优化模具结构

通过 CAE 分析, 可以得到最佳的浇口数量与位置, 合理的流道系统与冷却系统, 并对型腔尺寸、浇口尺寸、流道尺寸和冷却系统尺寸进行优化, 在计算机上进行试模、修模, 大大提高模具质量, 减少修模次数。

### 3、优化注塑工艺参数

由于经验的局限性, 工程技术人员很难精确地制定出最合理的工艺参数并确定最优的工艺方案。而借助 CAE 分析软件, 工程技术人员可确定可以确定最佳的注射压力、保压压力、锁模力、模具温度、熔体温度、注射时间、保压时间和冷却时间, 以注塑出最佳的塑料制品。

塑料模 CAE 技术的运用是塑料成型加工及模具设计发展过程中的一个重要里程碑。它可使设计人员避免设计中的盲目性, 使工程技术人员在模具加工前完成试模工作, 也可使生产操作人员预测工艺参数对制品外观和性能的影响。总之, 设计人员和生产人员可利用塑料模 CAE 技术有目的地修正设计方案和工艺条件, 克服因经验少、工作疏漏而造成的不良后果, 多快好省地进行新产品、新工艺的研究, 以适应日益激烈的竞争环境。

## 1.3 注塑模具的冷却系统

### 1.3.1 模具内的热交换

注塑模具可以视为一个热交换系统, 注塑模具内的热交换主要表现在三个方面, 一是熔融塑料通过与模具型腔的接触面, 以热传导方式将热量传递给模具,

如图 1.1 所示的 a 点；二是模具通过置于其内的冷却管道将大部分热量传递给冷却剂，由冷却剂将热量带走，这是一个对流换热过程，如图 1.1 中的 c 点；三是模具直接通过其外表面与周围空气进行对流换热，将部分热量释放掉，如图 1.1 中的 b 点。塑料释放的总热量等于由模具外表面和冷却系统带走的热量之和。

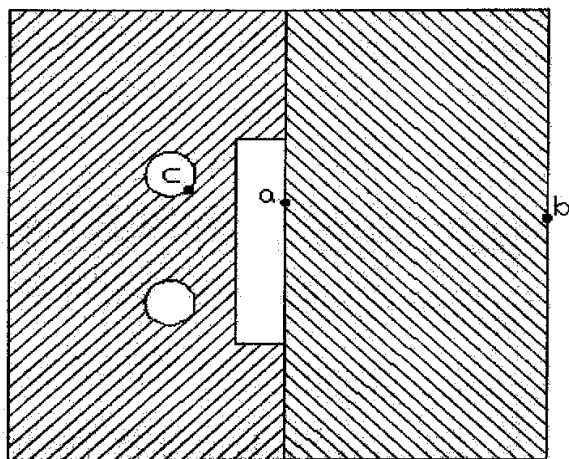


图 1.1 注塑模具截面图

Fig.1.1 Sectional view of injection mold

### 1.3.2 模具温度对塑件成型的影响<sup>[11-17]</sup>

模具温度状态对成型制品有着显著的影响，当模具温度过高或过低、温度分布不均时，会使得制品产生以下缺陷：

#### 1. 塑件翘曲变形

翘曲变形是塑件常见的质量缺陷之一。消除塑件翘曲变形要从注塑过程参数、塑件材料及结构、模具结构及温度等多方面去考虑，其中均匀一致的模具温度尤为重要。当模具温度不均匀时，与较冷模腔面接触的熔体很快冷却下来，而与较热部分接触的熔体则会继续收缩，因此收缩不均匀使塑件产生翘曲变形。

#### 2. 塑件表面质量

塑件的表面质量缺陷主要包括表面无光泽、凹凸不平及出现明暗相间条纹等情况。模具温度控制不当是产生这些缺陷的主要原因之一。一般来讲，提高模具的温度可改善塑件的表现质量。



### 3. 塑件内部应力。

减少塑件内应力或使塑件截面上内应力分布均匀化可提高塑件的物理性和使用寿命。塑件内部应力主要包括取向应力和温度应力。取向应力是在充模和冷却过程中, 由于聚合物大分子形状发生变化和一定的构象被固定下来而产生的, 它主要与注塑过程参数(如熔体温度、注塑压力及保压时间等)有关。温度应力则是由于冷却不均匀而产生的, 它与冷却系统的设计有关。除上述几方面外, 模具的温度状态还直接影响着塑件的收缩率、力学性能及充填性能。

模具温度状态除了对制品会产生如上的影响, 对注塑周期也起着非常重要的作用。主要表现在缩短注射周期可使成型速度加快, 塑件生产效率提高。在一个注射周期中, 开模、闭模、注射及保压时间一般远小于塑件的固化及冷却时间, 而且通常已处于最低值, 因此缩短注射周期的关键是降低塑件的固化及冷却时间, 对塑件的固化及冷却时间影响最大的因素是模具型腔表面的温度, 降低模具温度可使这一时间显著减小, 从而使塑件的生产效率提高。

#### 1.3.3 冷却系统的结构形式<sup>[18, 19]</sup>

因为高温融体带入模具的热量, 其中绝大部分经模具传给冷却系统, 由冷却介质带出模具, 其余热量由模具外表面以对流、辐射的方式传给周围环境, 所以模具温度的控制和调节主要是靠冷却系统来完成的。因此设计出合理、高效的冷却系统, 使模具温度朝着有利于生产的方向变化, 是一项很重要的工作。

冷却系统主要由冷却管道组成, 其间可以连接软管、折流管、喷管和吸热针等。随着制件的形状及其所需的冷却温度不同, 冷却系统的结构形式变化多样。

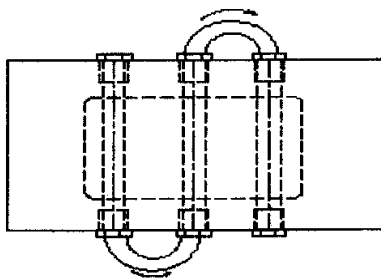


图 1.2 简单冷却管道

Fig.1.2 Simple cooling channel

简单冷却管道是最常见的一种形式，通过在模具上直接打孔，并通以冷却介质，在模外通过软管连接冷却回路，如图 1.2 所示。通常分为串联和并联两种基本型式。如图 1.3

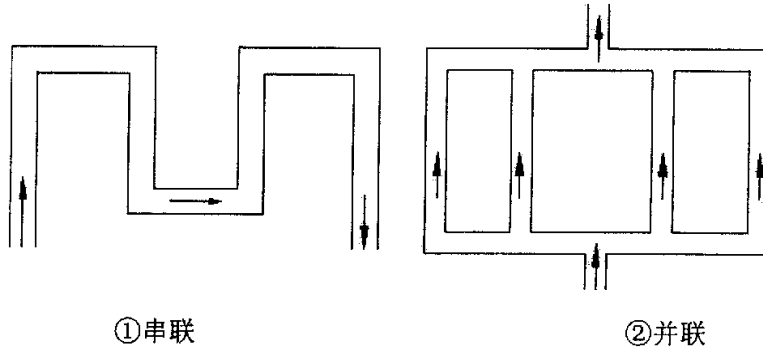


图 1.3 基本冷却管道

Fig.1.3 Basic cooling channel

①in series

②parallel connection

有些深型腔的型芯冷却，需要在型芯中打出盲孔，再放入隔板，沿着型芯的形状开设冷却水道。如图 1.4 所示。

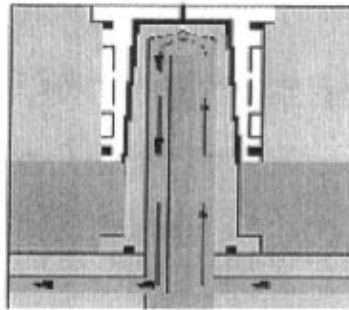


图 1.4 隔片式冷却管道

Fig.1.4 Septa cooling channel

对于长型芯的冷却，通常的做法是在型芯中间装有一个喷水管。冷却水从喷水管喷出，分流向周围冷却型芯壁。如图 1.5 所示。

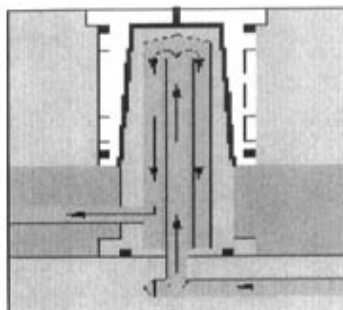


图 1.5 喷流式水道

Fig.1.5 Cascade cooling channel

在模具的冷却系统装置中，也经常用到热管，它是一种特制的散热用标准件，将它的一端插入小直径型芯中吸热，另外一端置于循环冷却液中散热。是一种高效率而容易应用的散热器。热管也可以用铍青铜代替，但散热效率要降低 50% 左右。如图 1.6 所示。

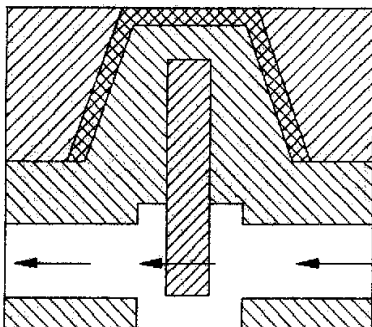


图 1.6 导热型芯式水道

Fig.1.6 The cooling channel with heat conduction core

### 1.3.4 冷却系统的设计

冷却系统的主要设计参数包括：冷却管道的尺寸、位置及各冷却管道的连接关系等几何参数和冷却介质的流量、进口温度等物理参数。衡量注射模冷却系统好坏的标准有两条：一是使注射模冷却时间最短，二是使注塑型腔表面温度均匀。一个好的冷却系统应该使模具达到快速、均衡的冷却，以减少冷却时间，提高成型效率，并减少或避免塑件翘曲变形、残余应力及表面质量缺陷等，提高产品质量。冷却系统作为注塑模具的重要组成部分，其配置的好坏直接影响着模具的实用性，故在进行模具设计时，应尽量科学、合理的设计、配置冷却系统，以有效

缩短冷却时间、提高产品质量和生产效率。

长期以来,注塑模冷却系统的设计主要采用传统的方法,冷却管道的布置和冷却参数的确定往往在设计到最后阶段凭设计者的经验和直觉进行,缺乏理论依据和科学的计算方法,往往导致模具成型效率低,塑件的质量也难以保证。为了确定冷却系统参数对冷却时间及模壁温度的影响,优化冷却系统设计,国内外学者开展了大量的研究工作。

20 世纪 80 年代以来,由于 CAD 技术及有限元等数值计算方法的广泛应用,用有限元法和边界元法分析计算注塑模温度分布和冷却时间等取得了较大进展,并且形成了把数值模拟与图形结合起来,使冷却系统的计算机模拟技术实用化的 CAE 技术,在国际市场上出现了一些商品化的注塑模冷却分析 CAE 软件。利用这些软件,可在计算机上对注塑模冷却过程进行数值模拟,在给定冷却系统设计参数后,即可计算出模具型腔的温度、热流分布、各冷却管道的效率及冷却时间等,帮助设计者判断设计是否满意,并通过交互修改设计方案,在模具制造之前使设计达到优化。注塑模冷却过程的数值模拟技术可使冷却系统的设计建立在科学分析、定量计算的基础上,避免因冷却系统设计不合理造成的反复试模、修模,降低模具设计、制造成本,提高塑件质量和成型效率,为设计人员优化注塑模冷却系统设计和工艺条件提供先进实用的工具。

然而在利用计算机对注塑模具冷却过程进行数值模拟时,模拟结果的可靠程度在很大程度上取决于模具冷却管网中流量分布的计算是否可靠。特别是对复杂管网(有闭合回路)系统更是如此。注塑模具的冷却系统管网分析旨在根据管网的几何参数和入口流量,计算各管道的流量和各点的压力,从而确定所需要的冷却泵的功率和管道的对流换热系数。

因此,注塑模具的管网计算对冷却系统的 CAE 分析具有非常重要的意义。

#### 1.4 管网计算发展概况<sup>[20]</sup>

管网的设计计算从手算到电算,从凭经验设计到优化设计是与计算方法及计算工具的发展过程相适应的。

最早使用的管网水力分析方法是众所熟知的哈代·克罗斯(Hardy Cross)法。它是以能量方程——回路(环)的水头损失平衡为准则,并引进校正流量的概念

而导出非线性方程组，然后将其线性化来求解。方程的欲求变量是环的校正流量，方程的个数就是管网的基环数。由于这一方法采用的是迭代方法，且迭代公式简单，便于手工计算，所以在无计算机的年代里，这一方法占有绝对的“统治”地位。

80 年代初，我国管网水力计算的计算机程序大多基于哈代法。但是，由于在线性化的过程中，简化过多（从物理意义上讲是忽略了环与环之间的相互影响）而导致收敛速度慢，且初始值（初始流量分配）对收敛的影响较大，因此为了加快收敛速度，不少学者对原迭代公式进行了修正，如考虑校正流量  $\Delta q$  的步长因子，而我国同济大学的杨钦教授则提出了所谓的校正流量分配法，考虑了邻环之间相互影响的传布系数，减少了迭代次数。70 年代以后，随着网络（图论）技术的应用发展，便利用图论来构造管网的节点方程和环方程，这些方程都是以矩阵来描述的，方程形式简洁明了，使得人们对系统、方程本身的性质及其应用有了更直观、更深刻的了解。而且，求解这些方程的各种方法易于在计算机上实现。应用较多的是利用牛顿迭代法来求解节点方程和环方程，由于应用牛顿法求解时所形成的雅可比（Jacobi）矩阵是一对称正定、带状的稀疏矩阵，即可利用效率极高的平方根法来求解相应的线性方程组，又可采用带宽压缩存贮技术，节约大量内存。这种方法收敛速度快、精度高、存贮量小，目前，即使在微机上也可对任何现实的大型管网进行水力分析计算。

如今，无论是国内国外，有关管网的水力分析的算法及应用程序均已相当成熟，随着系统工程理论、最优化技术及控制、计算机技术等学科不断发展，以及它们之间的相互交叉、渗透，管网的水力计算及优化设计技术，必将全面的应用到实际工程之中。

## 1.5 本文的主要工作

注塑模具的冷却管网和水力管网具有异类相似性。在处理模具管网的计算时参考借鉴了水力管网计算的一些理论算法。但是，目前的模具冷却管网分析仍然存在一些不足。

首先，用于管网分析的两大类算法——节点法和回路法——均存在一定的缺陷；其次，是否通常的管网分析完全适用于注塑模的冷却管网分析这一特殊问题，

尚未见令人信服的分析报告。

本文在深入研究管网计算理论的基础上，针对模具冷却管网的特殊性，主要进行了以下工作：

- 1、详细总结了用于管网计算的两大类方法，并对这两种方法进行比较，针对以往算法中的不足，提出了一种新的管网计算方法——修正流量的节点法。构造了新节点法的数学模型，给出了计算程序框图。
- 2、根据新算法的数学模型，采用 C++ 语言编写了电算程序。并通过算例，证明了新方法能有效的克服传统方法的弊端。
- 3、进行了模具冷却管道的流量——压力关系实验，对实验数据进行了研究分析，与理论计算结果进行了比较。对原有模具管网计算理论进行了一些修正，提出了指导模具冷却管网计算的一些定性结论。

## 第二章 管网分析基本理论

### 2.1 管网图形的概念

进行管网水力计算时，须先有一张管网的计算简图。这张简图就是一张网络图。计算简图可以是各种各样的，对于给水管网，如果不考虑各管段的位置、长度、形状及截面大小等情况，将各交汇点与管段（分支）之间的连接关系用点和有向线段来表示，我们就可以将管网原平面布置的形状用网络图的形式描绘下来，并称为管网计算简图。图中的线称为边，代表实际管段；各管段的交汇点称为节点，节点也包括配水源节点，如泵站、水塔等。用标号将节点及管段一一标明。通过这张图，我们就能对节点与管段之间的相互关系一目了然。在管网水力计算中，通过计算简图，我们不仅要了解节点与管段（点与线）的相互关系，而且要了解管段之间成环的个数和关系，这些环就是回路。

所谓回路就是指将边的一部分，按一定的秩序排列，第一条边的一端联接第二条边的一端，这样一条边一条边地连接起来，最后一条边的另一端恰与第一条边的另一端衔接，这样的一些边的集合就组成一个回路（环）

根据管网的复杂程度，通常可分为树状网和环状网两种主要形式。树状网为“树枝”图形，是没有环的管网。环状网是由一个或一个以上的回路组成的图形。如图 2.1 所示。

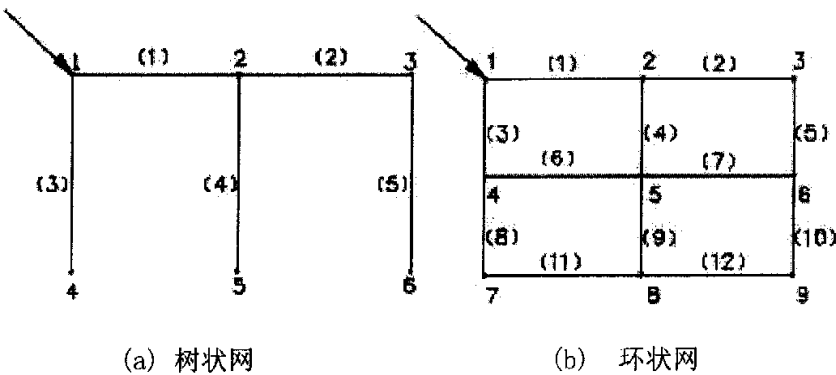


图 2.1 树状网和环状网

Fig. 2.1 Branch and Looped Networks

(a) Branch Network (b) Looped-Network

## 2.2 流体力学的基本定律<sup>[21]</sup>

通常，冷却液在管道内的实际流动是在三维空间内的流动，但是，模具冷却管道的管径比较小，而且我们冷却分析的主要目的是研究冷却液的热传导行为，没有必要精确的研究它的三维流动情况，为此，采用工程实际中常用的简化方法，把冷却管道内冷却液的流动简化为轴向一维流动，即一元不可压缩稳态流动。这样，管道的流量计算带来了方便。所谓一元流动是指流速、压强和密度等物理量只是一个空间坐标的函数，对于冷却管道，这些参数只沿着管道长度方向变化，其他方向无变化。

按照流体力学的有关理论，流体的运动首先要满足连续性条件，即流体连续地充满所占据的空间，流动时不形成空隙，其次，流体的运动还必须满足质量守恒、动量守恒以及能量守恒三大定律。

### 1、质量守恒定律

管道任一截面的质量流量为：

$$G = \rho AV = \rho Q \quad (2-1)$$

其中： $\rho$ —流体密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$A$ —管道横截面的面积， $\text{m}^2$ ；

$Q$ —流体体积流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$V$ —该截面上的流体平均流速， $\text{m}/\text{s}$ ；

对于管道中的稳态流动，流过任意两截面的质量流量  $G_1$ 、 $G_2$  应该满足  $G_1 = G_2$ ，即

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (2-2)$$

$\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为两截面上的流体密度，对于不可压缩流体，有：

$$Q_1 = Q_2 \quad (2-3)$$

### 2、能量守恒定律

流体的机械能有三种形式：动能、势能、压能。单位质量流体的机械能为：



$$E = gZ + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (2-4)$$

其中:

$E$ —单位质量流体的机械能, J/kg;

$Z$ —流体的垂直高度, m;

$g$ —重力加速度, m/s<sup>2</sup>;

$P$ —压力, N/m<sup>2</sup>;

$V$ —流体的平均速度, m/s;

若设  $E_1$  为单位质量流体在 1 截面的能量,  $E_2$  为单位质量流体在 2 截面的流量,  $E_m$  为外界加进的能量,  $E_f$  为摩擦消耗的能量, 则有能量守恒方程:

$$E_1 + E_m = E_2 + E_f \quad (2-5)$$

即

$$gZ_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + E_m = gZ_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + E_f$$

两边同除以  $g$ , 则有

$$Z_1 + \frac{P_1}{g\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{E_m}{g} = Z_2 + \frac{P_2}{g\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{E_f}{g}$$

令

$$g\rho = \gamma, \quad \frac{E_m}{g} = h_m, \quad \frac{E_f}{g} = h_f; \text{ 则:}$$

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + (Z_1 - Z_2)$$

对注塑模具冷却管网:

$V_1 = V_2$ ,  $Z_1 = Z_2$ , 所以能量守恒方程变为

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma}$$

### 3、动量守恒

$$\vec{F} = \rho Q (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) \quad (2-6)$$

式中  $\vec{F}$ —作用在流体上外力的合力，N。

## 2.3 管网计算的基本概念

### 2.3.1 冷却液的流动状态<sup>[22, 23]</sup>

由于液体具有粘滞性，使液体在流动时具有不同的流态。冷却液的流动状态指冷却液在模具的冷却管道中是以层流方式还是以紊流方式流动。

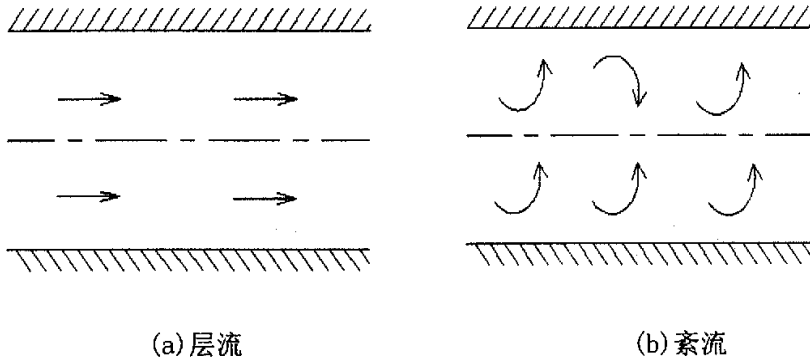


图 2.2 层流和紊流

Fig. 2.2 Laminar flow and disorderly flow

(a) Laminar flow

(b) disorderly flow

冷却液若以层流方式（图 2.2(a)所示）运动，模具内的热量在冷却孔的径向只能以热传导的方式进入冷却液中，冷却效率低。紊流则不同，因为冷却液在孔径方向有质量交换（图 2.2(b)所示），热量可以热传导和对流的方式有效地从孔壁传入冷却液中。冷却液处于层流还是紊流，其冷却效果相差 10~20 倍。为提高冷却系统的效率，应确保模具冷却管道中的冷却液处于紊流状态。1883 年，英国物理学家雷诺（Reynolds）在实验的基础上给出了判断流动形态的无量纲准则数—雷诺数  $Re$ ，通常用雷诺数  $Re$  来判断冷却液是处在层流状态还是处在紊流状态。 $Re$  计算公式为：

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (2-7)$$

式中:  $\rho$ ——冷却液的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$D$ ——冷却孔的直径,  $\text{m}$ ;

$V$ ——冷却液的流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$\mu$ ——冷却液的动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

当  $\text{Re} < 2000$  时, 不论冷却液的性质和管径大小如何均为层流, 通常  $\text{Re} > 2000$  时为紊流。为使冷却液处于紊流状态, 冷却液的流速 (或流量) 应达到一定值。但需要注意的是冷却液变成紊流后, 传热效果不因流速的增加而显著增加, 因此, 没有必要过分增大冷却液的流速而浪费能源。

### 2.3.2 温度对冷却液流动状态的影响

一般来言, 降低冷却液的温度, 可以增加模具传向冷却液的传热速率。但当冷却液温度过低时, 由于冷却液的粘度增大使  $\text{Re}$  减小而改变了冷却液的流动状态, 反而降低了传热效率。对最常用的冷却液——水来说, 其粘度随温度的降低而迅速增大, 两者之间的关系为:

$$\mu = \frac{0.001792}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (2-8)$$

其中  $t$  为冷却液的摄氏温度。

当冷却液温度从  $40^\circ\text{C}$  降为  $10^\circ\text{C}$  时, 粘度由  $6.63 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  增大为  $1.32 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 增加了一倍。因此当冷却液的温度由  $40^\circ\text{C}$  降为  $10^\circ\text{C}$  时, 为维持相同的流动状态, 必须将冷却液的流速相应提高 1 倍。

因此实际生产中, 在冷却液流速一定的情况下, 应合理选择其温度, 确保冷却液处于紊流状态。

### 2.3.3 管网中的水头损失

#### 1、水头损失。

液体沿管路运动时, 一方面由于液体粘滞性在直管内所产生的摩擦力将阻止液体作相对运动; 另一方面, 在管路中总是有闸门、弯头等各种不同类型的局部装置, 这些不同的边界条件将对液体运动产生一定的影响, 甚至形

成旋涡区，造成对液体运动的额外阻力。液体运动必须克服阻力做功而消耗部分机械能，被消耗的机械能转化为热能而散失掉。单位重量液体所损失的机械能称为水头损失。

## 2、沿程阻力及沿程水头损失。

沿程阻力是指液流沿着全部流程上的直管段所产生的摩擦力，为了克服沿程阻力而引起的水头损失称为沿程水头损失，沿程水头损失用  $h_f$  表示沿程水头损失公式如下：

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (2-9)$$

其中：

$g$ ——重力加速度， $\text{m/s}^2$ ；

$l$ ——冷却液孔长度， $\text{m}$ ；

$d$ ——冷却管道直径， $\text{m}$ ；

$V$ ——冷却液流速， $\text{m/s}$ ；

$\lambda$ ——沿程阻力系数

## 3、局部阻力及局部水头损失。

流体的局部边界急剧变化，从而引起液流的显著变形并伴随有旋涡形成，它所产生的额外阻力称为局部阻力。管道进口，变径管和阀门等处，都会产生局部阻力。克服局部阻力所引起的水头损失称为局部水头损失。局部水头损失用  $h_m$  表示。和沿程水头损失相似，局部水头损失一般也用流速水头的倍数来表示。局部水头损失的通用计算式为：

$$h_m = \xi \frac{V^2}{2g} \quad (2-10)$$

$\xi$  称为局部阻力系数； $V$  冷却液流速。管道上总的水力损失可表示为：

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \quad (2-11)$$

局部损失和沿程水头损失相比很小，故在管网计算时一般略去不计。

### 2.3.4 阻力系数的计算

冷却液在冷却管道中流动时,其阻力系数 $\lambda$ 的计算根据流动形态的不同采用不同的计算公式。首先应区别流动状态是层流还是紊流,而在紊流状态下,按照流动情况的不同,还要区别管道是水力光滑管还是水力粗糙管。由边界层理论可知,因为冷却液具有粘性,在靠近管壁处存在粘性底层,当管道的粗糙度小于粘性底层时,冷却液的流动状态不受管道粗糙度的影响,此流动状态下的管道称为水力光滑管;当管道的粗糙度大于粘性底层时,管壁的粗糙突起部分暴露在主流区域,造成旋涡并增大能量损失,此时管壁粗糙度对流动状态产生影响,该流动状态下的管道成为水力粗糙管。

其中沿程阻力系数与雷诺数( $Re = \frac{4\rho Q}{\pi\mu D}$ ,  $\mu$ 为冷却液粘度)有关,阻

力系数的计算公式分别为:

$$\lambda = \begin{cases} 64 / Re & (Re \leq 2000) \\ 0.000016(4000 - Re) + 0.00001989(Re - 2000) & (2000 < Re \leq 4000) \\ 0.3164 / Re^{0.25} & (4000 < Re) \end{cases}$$

### 2.4 本章小结

本章作为整个管网分析计算的基础,首先介绍了管网简图的基本概念,接着对管网计算中涉及到的流体力学的一些基础理论进行了讲解。最后,本章重点论述了管网计算中的基本概念,目的是对整个管网计算建立一个清晰的物理背景。

## 第三章 管网水力计算

### 3.1 管网计算的基本方程<sup>[24]</sup>

管网水力计算的主要任务是，在管径等相关参数已定的基础上，求出各管段的实际流量。整个分析计算建立在以下方程上：

1、Darcy-Weisbach 方程（沿程压头损失公式）

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3-1)$$

流体的体积流量为  $Q = \frac{\pi D^2 V}{4}$ ，代入上式得

$$\Delta p = \lambda \frac{8\rho L}{\pi^2 D^5} Q^2$$

记

$$\beta = \frac{8\rho L}{\pi^2 D^5}$$

则：

$$\Delta p = \lambda \beta Q^2 \quad (3-2)$$

式中：

$h_f$  为压头损失（沿程摩擦阻力损失）； $\Delta p$  为管道两端的压差； $\rho$  为液体的密度； $g$  为重力加速度； $L$  为管道长度； $D$  为管道直径； $V$  为液体流速； $\lambda$  为沿程阻力系数。

$\Delta p = \lambda \beta Q^2$  建立了管道两边压力差和管道中体积流量的关系。

### 2、节点方程

对管网中任意一点而言，流进的流量与流出的流量的代数和为零，即

$$\sum_{j=1}^k Q_{ij} = q_i \quad (3-3)$$

式中： $i, j$  为节点编号；

$Q_{ij}$  ——与  $i$  节点相连管道的流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$q_i$ ——外界供给  $i$  节点的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

管段流量  $Q_{ij}$  的符号可任意假定。

对于有  $N$  个节点  $M$  条管道的管网, 共有  $N-1$  个独立的流量方程, 即  $i=1, 2, \dots, N-1$ 。写成矩阵形式为:

$$[B]\{Q\} = \{q\} \quad (3-4)$$

式中:

$[B]$ —— $(N-1) \times M$  的基本关联矩阵;

$\{Q\}$ —— $M \times 1$  的列阵;

$\{q\}$ —— $(N-1) \times 1$  的列阵;

### 3、回路方程

一个回路内净压头损失的代数和为零, 即

$$\sum_{i=1}^{l_j} h_{ij} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, L) \quad (3-5)$$

式中

$h_{ij}$ —— $j$  回路中  $i$  管道的压头损失;

$l_j$ —— $j$  回路中所包含管道的条数;

$L$ ——管网的基本回路数,  $L = M - (N - 1)$ 。

由  $V = Q/A$ , 式(3-1)可变换为

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{A} \right)^2 = KQ^2 \quad (3-6)$$

由方程(3-6), 方程组(3-5)可写为

$$\sum_{i=1}^{l_j} K_i Q_{ij}^2 = 0 \quad (j=1, 2, \dots, L) \quad (3-7)$$

写成矩阵形式为

$$[C][K]\{Q^2\} = \{0\} \quad (3-8)$$

式中

$[C]$ —— $L \times M$  的基本回路矩阵;

$[K]$ —— $M \times M$  的对角阵;

$\{Q^2\}$ —— $M \times 1$  的列阵;

## 3.2 管网计算方法

### 3.2.1 管网计算方法分类<sup>[25-36]</sup>

管网计算可分为:

1. 流量已分配时, 求出各管段的经济管径和水头损失;
2. 在管网基本参数确定的情况下, 即在管径、管长, 进水口流量或水压等已知的条件下, 求出管网中各个管道的流量和各节点的压力。

水温一定时, 任何管流可用流量 $q$ 、水头损失 $h$ 、管径 $d$ 、管长 $l$ 和管壁条件 $\lambda$ 等五个变量描述。因 $d$ 、 $l$ 、 $\lambda$ 一般为已知, 只有 $q$ 、 $h$ 为未知, 而 $h$ 和 $q$ 的关系可由水力学公式表示。管网计算时, 消去 $h$ , 以 $q$ 为未知量的计算方法, 称为流量法(也可称为回路法)。消去 $q$ , 以节点水压 $H$ 为未知量的计算方法, 称为水压法(也可称为节点法)。这是管网计算传统的两种主要方法。

### 3.2.2 流量法<sup>[37-40]</sup>

流量法也称为回路法, 即围绕回路(或环路)列能量方程, 假设各个管路流量 $Q_i$ , 然后对每个回路进行流量的修正 $\Delta Q_i$ , 即得到联系各 $\Delta Q_i$ 的方程组, 进而迭代求解获得各管道的真实流量。

对于有 $N$ 节点,  $M$ 条管道的管网共有 $N-1$ 个独立的流量方程,  $M-(N-1)$ 个独立的能量方程, 将 Darcy-Weisbach 方程代入能量方程可得 $M-(N-1)$ 个关于 $Q$ 的二次方程。因此总共可以得到 $M$ 个独立的关于流量 $Q$ 的方程, 其中 $N-1$ 个线性



方程， $M - (N - 1)$  个非线性方程，即：

$$[B]_{(N-1) \times M} \{Q\}_{M \times 1} = \{q\}_{(N-1) \times 1}$$

$$[C]_{L \times M} [K]_{M \times M} \{Q\}_{M \times 1} = \{0\}_{L \times 1}$$

由上述方程可解出每条管道的流量，再由 Darcy-Weisbach 方程即可求出各节点的壓力。

## 1、方程组的解法

解关于流量方程组的常用方法有线性理论法 (LTM) 和 Newton-Raphson 法 (NRM)。

### (一) 线性理论法

该方法的基本思想是将非线性方程线性化，即利用：

$$h_{ji} = K_i Q_i^2 = [K_i Q_i^{(n-1)}] Q_i^{(n)} = K'_i Q_i^{(n)}$$

其中  $Q_i^{(n-1)}$  为第  $n-1$  次迭代结果； $Q_i^{(n)}$  为第  $n$  次迭代结果。

将  $M$  个方程均化为线性方程，然后用迭代法求解。

这种方法的缺点是每迭代一次都需要解  $M$  元线性方程组，计算量大且收敛速度慢。

### (二) NR 法 (牛顿—拉夫森法)

该方法的基本思想是减少未知量个数，将  $L$  个回路的修正法量作为未知量。

其基本步骤为：

- ① 找出满足  $(N-1)$  个流量方程的  $\{Q\}^0$  作为初值。
- ②  $\{Q\}^0$  一般不满足能量方程，将其修正使其满足能量方程。即用 NR 法解非线性方程组

$$\sum_{i=1}^{l_j} K_i (Q_i^0 + \Delta Q_i)^2 = 0 \quad (j=1, 2, \dots, L)$$

求出  $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_L$ ,

则

$$Q_i = Q_i^0 + \sum_{j=1}^L \Delta Q_j$$

该方法编程复杂，且对初始流量有要求，需要有较好的初值。

2、初始流量的确定<sup>[20, 41-42]</sup>

流量法进行管网计算时，常常需预先进行管段流量分配，而这又是一个比较复杂费时的过程，特别是对大型复杂管网。原则上，各管段中的初始流量可以任意给，只要它满足节点方程即可。下面介绍一种初始流量分配的方法，基本思想是流体总是沿着阻力最小的方向流动。以图 3.1 所示管网为例进行说明。

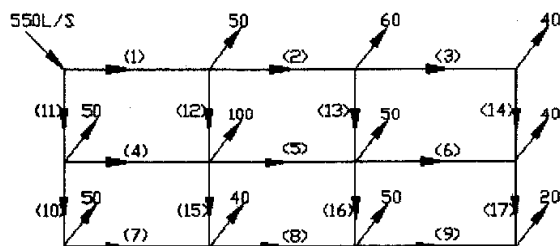


图 3.1 管网示例

Fig.3.1 Sample for pipe net

## (1) 在管道网络图上找一颗树

所谓管道网络图的树，就是指通过所有节点而又不构成环的所有管段线路，相当于通常说的树枝状管网。图 3.2 实线所示管段构成图 3.1 管网图的一棵“树”，它们通过所有节点但又不形成回路，树上的各管段称之为树枝；虚线所示称之为“余树”，相当于连通管。由此可见，环状管网可看作是在树枝网上加上连通管后形成的，只要“树”的两节点间加一管段（“余树枝”），即构成环。

(2) 对于取定的那棵树，从“树梢”节点退到“树根”节点（通常为水源节点或参考节点），按连续性条件求出各树枝流量（管段流量）。

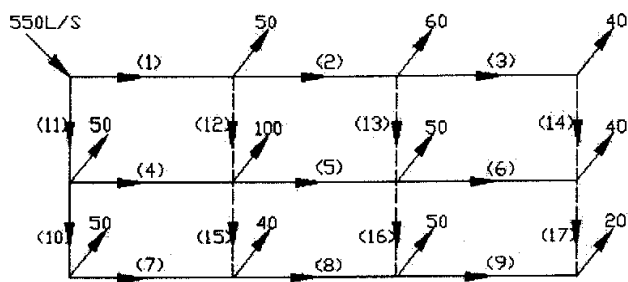


图 3.2 “树”与“余树”

Fig.3.2 “tree” and “co-tree”

$$Q_3^{(0)} = 40, Q_2^{(0)} = 60 + Q_3^{(0)} = 100, Q_1^{(0)} = 50 + Q_2^{(0)} = 150;$$

$$Q_6^{(0)} = 40, Q_5^{(0)} = 90, Q_4^{(0)} = 190;$$

$$Q_9^{(0)} = 20, Q_8^{(0)} = 70, Q_7^{(0)} = 110;$$

$$Q_{10}^{(0)} = Q_7^{(0)} + 50 = 160, Q_{11}^{(0)} = Q_4^{(0)} + Q_{10}^{(0)} + 50 = 400;$$

(3) 余树枝上的流量，即虚线所示管段流量取为零。

$$Q_{12}^0 = Q_{13}^0 = Q_{14}^0 = Q_{15}^0 = Q_{16}^0 = Q_{17}^0 = 0$$

按上述方法求得的初始管段流量是满足连续性方程的，只要“树”一旦选定，各管段初始流量就被唯一地确定了。

初始管网流量的分配是基于回路进行的，因此事先必须要找出模具管网中所有的回路。利用图论理论可以建立管网的网络图模型，从而可以求出管网中的基本回路。

### 3、计算流程图<sup>[43]</sup>

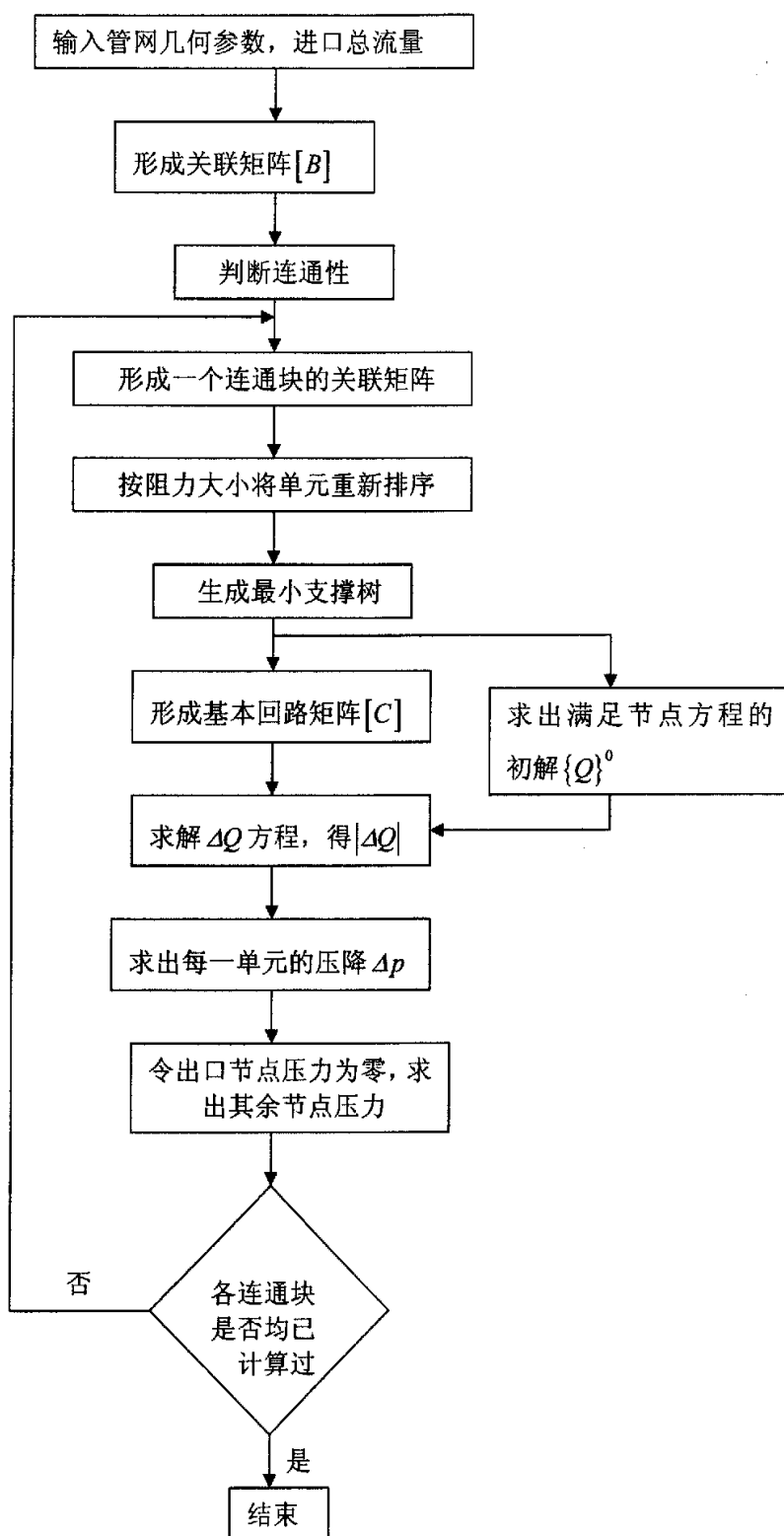


图 3.3 程序框图  
Fig. 3.3 Diagram of program

### 3.2.3 节点法<sup>[44-49]</sup>

节点法是以节点水压  $p$  为未知量的管网计算方法。即在管网的每个节点处列出满足流量平衡的连续性方程, 而流量  $Q$  可用管道沿程水头损失  $h_f$  来表示,  $h_f$  与管道两端的压力差  $\Delta p$  有关, 这样最终便得到以每个节点处压力  $P_i$  表示的方程组, 然后迭代求解获得所要求的结果。

用节点法计算管网时的方程为:

1、以管道两端压差  $\Delta p$  表示的管段流量  $Q$ ;

$$\Delta p = \lambda \beta Q^2 \quad (3-9)$$

2、连接在节点  $i$  上各管段的流量应满足节点方程;

$$\sum_{j=1}^k Q_{ij} = q_i \quad (3-10)$$

3、回路方程在节点法中自动满足;

#### (一) 数学模型

在一个独立的管网中, 对于由节点  $i$  和  $j$  定义的管段, 其内部的流量可由式 (3-9) 计算:

$$Q^2 = \frac{|P_i - P_j|}{\lambda \beta_{ij}} \quad (3-11)$$

定义流出节点的流量为正, 流入为负, 并记  $Q_{ij}$  为由节点  $i$  流至节点  $j$  的流量, 式 (3-11) 可进一步改写为有向流形式:

$$Q_{ij} = \frac{P_i - P_j}{\lambda \beta_{ij} |Q_{ij}|} = g_{ij} (P_i - P_j) \quad (3-12)$$

其中

$$g_{ij} = \frac{1}{\lambda \beta_{ij} |Q_{ij}|} \quad (3-13)$$

类似于电学中的电导， $g_{ij}$  在这里可称作液导。

对于管网中任一节点  $i$ ，由管网内部各管道流入流出节点  $i$  的液体总和应等于管网外部对节点  $i$  的输入输出总和  $q_i$ ，故有

$$\sum_j Q_{ij} = \sum_j g_{ij} (p_i - p_j) = q_i \quad (3-14)$$

对管网中所有的节点均建立类似的方程，可得到一方程组：

$$Gp = q \quad (3-15)$$

### (二) 方程组的解法

式(3-15)为一个线性方程组。此线性方程组的系数矩阵  $G$  具有对称、稀疏、带状分布以及正定、主元占优势的特点，其系数矩阵在计算机中的存储方法采用一维变带宽压缩存储。

对方程组的求解，可以利用此前介绍的三角分解法，这样更能节省计算时间。具体解算时，需要给管网中节点压力或管段流量赋予一个初值，确定各管道中的初始流量  $\{Q_i^0\}$ ，然后反复迭代求解，直至收敛，即可得到各节点的压力，进而利用公式(3-10)得到各管段的流量。

确定初始流量的方法很多，初始流量越接近实际流量，则求解时收敛越快。

需要指出的时，由  $g_{ij} = \frac{1}{\lambda \beta_{ij} |Q_{ij}|}$  可以看出，初始流量不可取零，否则液导趋于无

穷大，最终得到的液导矩阵奇异。

### (三) 算法步骤

- ① 输入管网原始参数；
- ② 输入初始节点压力或各管道的初始流量；
- ③ 当  $\{p\}^n$  已知时，计算各管段的液导  $g_{ij}$ ，形成液导矩阵  $G$ ，并进行一维变带宽压缩存贮；
- ④ 形成常数项列阵  $q$ ；

⑤ 解算  $Gp = q$ ，得到各个节点压力  $\{p\}^{n+1}$ ，由公式  $Q^2 = \frac{|p_i - p_j|}{\lambda \beta_{ij}}$  和公式

$$g_{ij} = \frac{1}{\lambda \beta_{ij} |Q_{ij}|} \text{ 计算出各管道的液导 } g_{ij}。$$

⑥ 核对  $\|p^n - p^{n-1}\| < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为一小数) 如满足，退出循环，否则重复步骤③。

### 3.3 本章小结

本章首先介绍了管网计算的一些基础方程，管网计算的各种方法均是建立在这些基础方程上。接着对管网计算方法分类进行了回顾与总结。重点对当前管网计算所使用的两大类方法——流量法及节点法进行了详细的介绍，并比较了两种方法的优缺点。

## 第四章 管网计算方法的改善

如前面章节所述,目前用于管网计算的两种主要方法是回路法和节点法。回路法的基本思路是在管网中围绕回路列回路方程,以各个管路的流量为待求量。其基本做法,是假设各个管路流量,然后根据每个回路的压力不平衡量对流量进行反复的修正,直至修正量足够小。

回路法是一种传统的管网计算方法,其应用的也最为广泛。使用这种方法列回路方程时,必须要事先确定管网中所有的回路。将图论的基本原理用于管网计算,是一项创造性的工作,虽然可以使用图论的方法找到所有的回路,但这样也导致了算法复杂,降低了程序的可读性。而且,回路法所采用的迭代算法,本质上属于反投影法,迭代次数多,效率低下。当管网进水口参数输入不为流量控制,而为压力控制时,处理起来也多有不便。

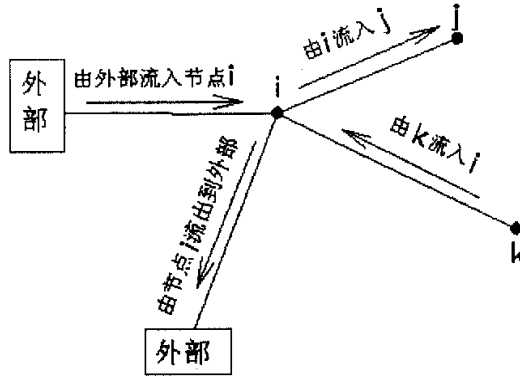
节点法是以管路的交叉点(节点)的压力作为未知量,以进出节点的流量总和等于外部的输入(出)流量建立方程,前面章节已对其基本原理做了详细介绍。运用节点法编制的管网计算电算程序具有占内存少、运行时间短、收敛速度快及精度高的特点,因此这一方法近年来在管网计算中得到了广泛的应用。然而,节点法也有缺陷:当某一段管路两端的压力相等,没有液体流动时,液导矩阵奇异。

本文将就节点法提出一个新算法:修正流量的节点法。该方法即可以绕过图论,不用确定所有回路,又可在保持传统节点法优点的同时,可以不必处理奇异矩阵,并且迭代速度快,计算精度高,具有实际应用价值。

### 4.1 修正流量节点法的数学模型

在一个独立的管网中,为分析的方便,我们可以任取管网中一节点*i*。如图4.1所示。节点*k*、*j*分别通过管道与节点*i*直接相连。





4.1 节点流量平衡

Fig. 4.1 balance of fluid at node

不妨令  $p_k \geq p_i$ ,  $p_i \geq p_j$ , 记由节点  $k$  流入节点  $i$  的流量为  $Q_{ki}^-$ , 由节点  $i$  流出至节点  $j$  的流量为  $Q_{ij}^+$ , 流入节点  $i$  的外部流量为  $q_i^-$ , 由节点  $i$  流出到外部的流量为  $q_i^+$ , 则我们可以建立如下流量平衡方程:

$$q_i^+ + \sum_j Q_{ij}^+ = q_i^- + \sum_k Q_{ki}^- \quad (4-1)$$

对上式两边取平方, 有

$$\left( q_i^+ + \sum_j Q_{ij}^+ \right)^2 = \left( q_i^- + \sum_j Q_{ij}^+ \right)^2 - \sum_j (Q_{ij}^+)^2 + \sum_j (Q_{ij}^+)^2$$

记

$$\left( q_i^+ + \sum_j Q_{ij}^+ \right)^2 - \sum_j (Q_{ij}^+)^2 = r_i^+ \quad (4-2)$$

由前面介绍可知, 对于由节点  $i$  和  $j$  定义的管段, 其内部的流量

$$Q^2 = \frac{|p_i - p_j|}{\lambda \beta_{ij}} \quad (4-3)$$

记  $Q_{ij}$  为由节点  $i$  流至节点  $j$  的流量. 注意到  $p_i \geq p_j$ , 则式(4-2)化作

$$\left( q_i^+ + \sum_j Q_{ij}^+ \right)^2 = r_i^+ + \sum_j \frac{p_i - p_j}{\lambda \beta_{ij}} \quad (4-4)$$

类似的，记

$$\left(q_i^- + \sum_k Q_{ki}^-\right)^2 - \sum_k (Q_{ki}^-)^2 = r_i^-$$

则有

$$\left(q_i^- + \sum_k Q_{ki}^-\right)^2 = r_i^- - \sum_k \frac{p_i - p_k}{\lambda \beta_{ik}} \quad (4-5)$$

由式(4-4)和(4-5)，式(4-1)取平方后化作

$$\sum_m \frac{p_i - p_m}{\lambda \beta_{im}} = r_i^- - r_i^+ \quad (4-6)$$

进一步，令

$$K_{im} = \frac{1}{\lambda \beta_{im}}$$

$$r_i = r_i^- - r_i^+$$

则式(4-6)最终化作

$$\sum_m K_{im} (p_i - p_m) = r_i$$

对管网中的所有节点列出类似的方程，则可得到与传统节点法相似的联立方程组：

$$Kp = r \quad (4-7)$$

## 4.2 矩阵方程组的计算

### (一)方程解算<sup>[50-52]</sup>

方程组  $Kp = r$  的系数矩阵  $K$  仍可称为液导矩阵，由于系数矩阵中的元素

$K_{im} = \frac{1}{\lambda \beta_{im}}$ ，所以  $K$  不再存在奇异的问题。它是对称、稀疏的，可以用通常有限元

方法中常用的一维变带宽压缩存储和进行  $LDL^T$  三角化分解，求解速度是非常快的。

由于式(4-7)中的左右端均与流速有关，因此为非线性的。考虑到本方程组不存在

奇异问题，可以简单的设各节点压力（或流速）的初值为零。在得到节点压力之后，计算管网的流量，修正式(4-7)的左右端，重新计算，直至收敛。收敛准则可由下式确定：

$$\|p^n - p^{n-1}\| < \varepsilon \quad (\varepsilon \text{ 为一小数}) \quad (4-8)$$

### (二) 计算流程图

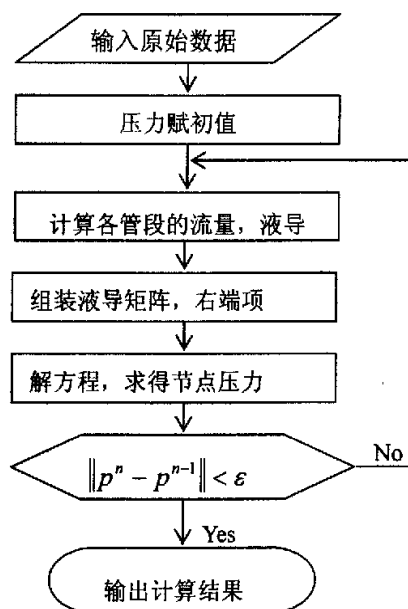


图 4.2 计算程序框图

Fig.1 The computational flowchart

### (三) 算法特点

本文提出的这种修正流量的节点法对比于此前的回路法，由于不必确定管网中的回路，因此算法简单，运行时间短、收敛速度快；相比于传统的节点法，则无需考虑某管段流量为零时导致的方程奇异。

本文还增加管网入口参数的可选择性，既可以给定入口流量，也可以给定入口压力，都能够进行分析计算；这使得此算法更易于处理各种复杂情况，具有实际应用价值。

另外，该方法还有一个潜在的优点。如果阻力系数作为常数，式(4-7)中的液导矩阵是不变的，因此可以一次性的生成和分解，变化的仅仅是右端项。此时收敛速度将会成倍增加。

### 4.3 算例分析

假设一水力管网，如图 4.3 所示。管网划分为 14 个管道，11 个节点，节点 1 为进水口，节点 5 为出水口。进水口流量  $q = 1.667 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ，各管段长度均为 2 米，管径相等，均为 20 毫米，设水温为 30 摄氏度。

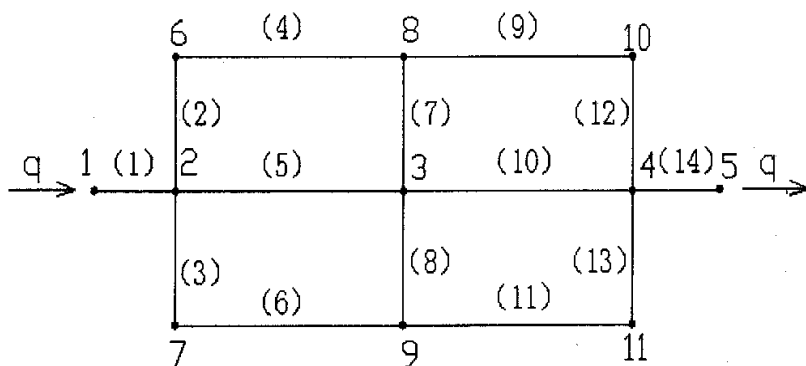


图4.3 算例的管网分布

Fig.2 The pipe network of the example

采用本文所述修正流量节点法的数学模型用C++语言进行了编制计算，其结果列于表4.1、表4.2。

由结果可以看出，各相邻管段间的流量是相互平衡的；基于管网的几何对称性，流量的分布也是对称的；节点的压力也满足对称要求。

本算例中，由于对称性，节点 3、8、9 的压力应该相等，而管段 7、8 中液体保持静止。此时用传统的节点法将会遇到麻烦，但用本文方法则毫无障碍的求得了精确解。

表 4.1. 管网流量分布  
Tab.4.1 Flow rate in pipe network

管段号	流量 $Q$ $/(m^3 \cdot s^{-1})$	管段号	流量 $Q$ $/(m^3 \cdot s^{-1})$
1	$16.67 \times 10^{-5}$	7, 8	0
2, 4	$4.95911 \times 10^{-5}$	9, 12	$4.95911 \times 10^{-5}$
3, 6	$4.95911 \times 10^{-5}$	11, 13	$4.95911 \times 10^{-5}$
5, 10	$6.75285 \times 10^{-5}$	14	$16.67 \times 10^{-5}$

表 4.2. 管网压力分布  
Tab.4.2 Nodal press in pipe network

节点号	压力 $p$ /Pa	节点号	压力 $p$ /Pa
1	348.252	5	0
2	203.832	6, 7	188.979
3	174.126	8, 9	174.126
4	144.42	10, 11	159.273

#### 4.4 本章小结

针对模具冷却管网的数值分析，本文提出一种基于流量迭代的节点法，建立了该方法的数学模型，并通过一个算例进行了验证。对比于此前的回路法，由于不必确定管网中的回路，因此算法简单，运行时间短、收敛速度快；相比于传统的节点法，则无需考虑某管段流量为零时导致的方程奇异。本文方法更易于处理各种复杂情况，具有实际应用价值。

## 第五章 注塑模具的管网计算

注塑模具的冷却管网计算，其目的是根据管网的几何参数和入口流量，计算各管道的流量和各节点的压力，从而确定所需要的冷却泵的功率和管道的对流换热系数。冷却液在模具冷却管道中的流动与液体在普通的管网中的流动具有许多相似之处，故对模具冷却管网进行分析计算时，参照了前面章节所介绍的管网算法。但是，模具又有它自身的特殊性，这使得其管网计算有别于普通管网计算。

### 5.1 注塑模具冷却管网的特殊性

如前所述，注塑模具冷却系统主要是由冷却管道，水嘴及外接皮管等组件构成。根据制件的形状及其所需的冷却温度，注塑模具冷却系统的组成形式各不相同。对于一些简单的冷却系统，冷却管道往往通过外接皮管构成一个串行通路，通路中的任何一处的流量恒等于入水口流量。

有些冷却系统中的冷却水道根据设计需要彼此交接，从而形成较为复杂的回路结构。如图 5.1 所示。

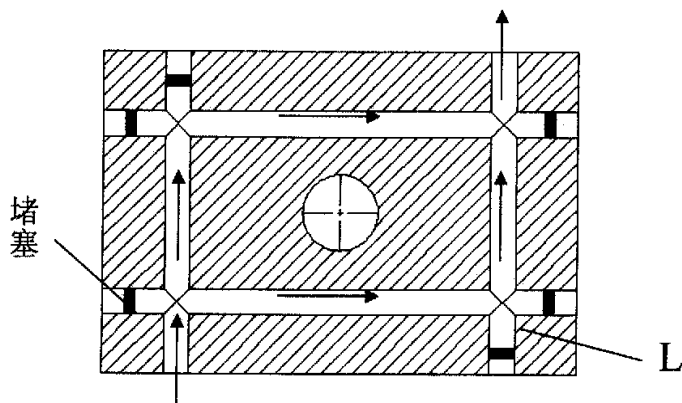


图 5.1 管网示例

Fig. 5.1 Sample for pipe net

模具管网计算简图具体做法是将冷却系统中的冷却水道视为一条线段，即网图中的边，冷却水道的交接点视为网图中的节点，进水口，出水口也视为节点。忽略由于堵塞而形成的微小管段（如类似于  $L$  处）。对边和节点进行编号，构成管网简图。如图 5.2 是图 5.1 的计算简图

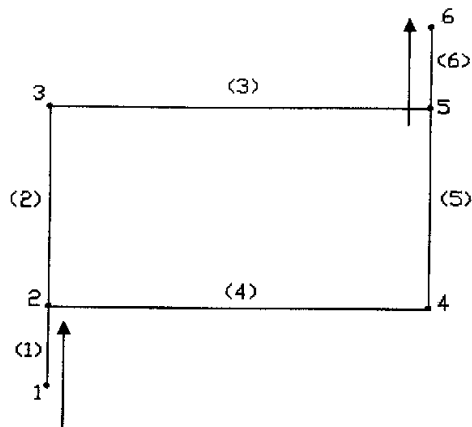


图 5.2 计算简图

Fig. 5.2 Network Configuration Simplification

对于注塑模具的冷却管网来说，由于受到模具结构的限制，与通常管网相比，其管网结构比较简单，管道长度非常短，而且冷却水粘度收温度影响较大。

5.2 管道的局部水头损失<sup>[53-54]</sup>

局部水头损失一般发生在液流过水断面突变、液流轴线急剧弯曲或液流前进方向上有明显的局部障碍等处。水流经过管道出口、弯道、突扩、突缩及闸门等局部构件时，都产生了一定的局部水头损失。

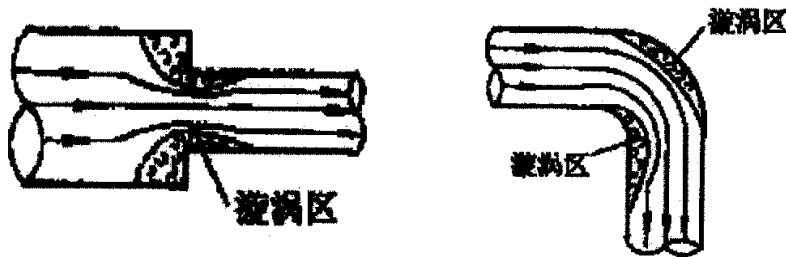


图 5.3 局部水头损失图

Fig. 5.3 Local head loss

沿程和局部水头损失在液体内部的物理成因是相同的。它们都是液流克服液流阻力做功而产生的，只是由于产生的外部条件不同，而导致表现的形式不同而已。

这里需要说明，局部水头损失是集中发生在局部构件前后的一定流段内的，在该流段内，显然也同时伴生着沿程水头损失，而且这两种水头损失相互影响，使得水头损失过程复杂而难以计算。

实际水头损失的计算中，一般假定局部水头损失集中发生在边界条件突变的局部构件断面上，而不影响沿程水头损失。这样处理，就可将实际上相互影响、难以分割的两种水头损失视为互不干扰、各自独立发生的水头损失分别加以计算，既方便实用，又不会影响总水头损失的计算结果。因此，某流段上的总水头损失，就是该流段中各分段的沿程水头损失和各局部构件上的局部水头损失的总和，即：

$$h_w = \sum h_f + \sum h_m \quad (5-1)$$

一般认为，当管段长度为管径的 1000 倍以上时，才可不计局部损失。在普通的给水管网中，水流产生的局部水头损失和沿程水头损失相比，其值很小，通常在管网分析计算时，局部水头损失常忽略不计。

### 5.3 冷却管道流量—压力关系实验

如前所述，模具管网有其结构特殊性，此前的管网计算方法能否完全适用于模具冷却管网还有待探讨。本文进行了冷却管道的流量—压力关系实验，通过对实验数据的处理分析，给出了指导模具管网计算的定性结论。

#### 5.3.1 实验装置介绍

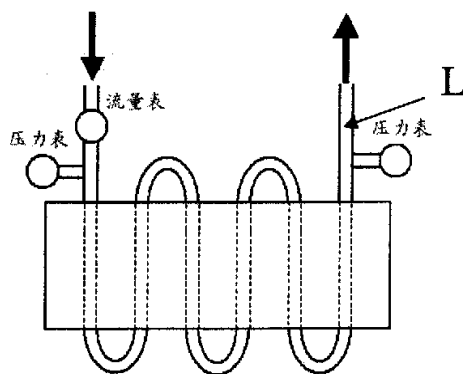


图 5.4 实验装置图

Fig.5.4 Experiment settings

#### 1、实验设置



现有两块模板，一模板的尺寸为  $70\text{ cm} \times 25.7\text{ cm}$ ，称之为宽板。另一模板的尺寸为  $70\text{ cm} \times 15.5\text{ cm}$ ，称之为窄板。分别在两模板上平行开设 6 条直径为  $\Phi 8\text{ mm}$  的冷却管道，并通过外接皮管将这些冷却管道顺序相连成一串联通路。

如图 5.4 所示。分别在模板进水口处及出水口处安装有压力表和流量计。

## 2、所测变量

实验中所记录的变量数据有两个：一是当流过的水体积  $V=0.001\text{ m}^3$  时，所需要的时间  $t$ ；二是此时进水口的压力值  $p$ 。管道中的体积流量  $Q$  可通过公式  $Q=\frac{V}{t}$  计算出，从而可计算  $Q^2$ 。

## 5.3.2 实验过程及数据处理

### (一)第一次实验

#### 1、实验数据处理

第一次分别对宽板和窄板进行了实验，实验装置如图 5.4。此实验中的水流通路从进水口开始到出水口为止，为一串联管路。如前章节所述，沿程水头损失方程可变形为：
$$\Delta p = kQ^2 \quad (5-2)$$

式中  $k$  为液流阻抗，可以看做是流量的平方和压力损失之间的比例系数。

在实验中观察到，无论模板进水口处的压力怎样变化，模板出口处的压力显示总是为零。则由式 (5-2) 可知，进水口与出水口的压差  $\Delta p$  与  $Q^2$  的关系可用数据处理得到的进水口压力  $p$  与  $Q^2$  的关系图来表示。

依据宽板和窄板实验所得到的  $p$  和  $Q^2$ ，做压力——流量平方关系图，一个压力  $p$  对应一个  $Q^2$ ，这样得到一些散点，将这些点依次连接得到一折线图。如图 5.5，图 5.6 所示。

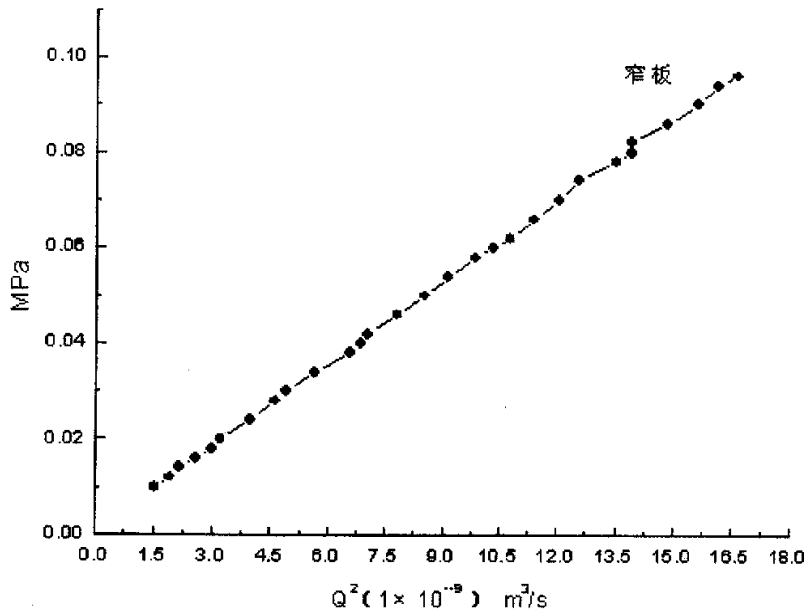


图 5.5 进口压力与流量平方关系图(窄板)

Fig.5.5 The relationship of Entrance Pressure and Flow rate Square (narrow template)

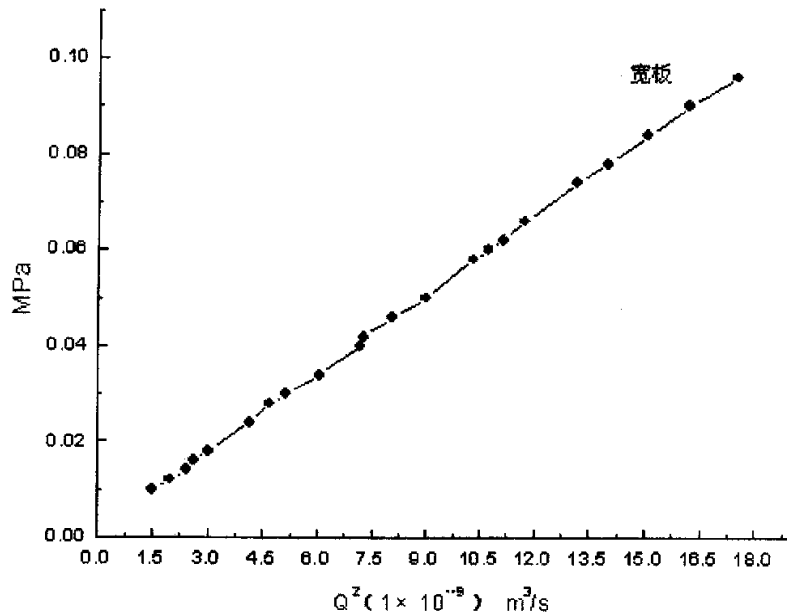


图 5.6 进口压力与流量平方关系图(宽板)

Fig.5.6 The relationship of Entrance Pressure and Flow rate Square (broad template)

从以上两图可以看出两板所测得的压力与流量的平方很接近线性关系。用最小二乘法对实验数据进行线性拟合，并在同一坐标下表示。如图 5.7 所示。

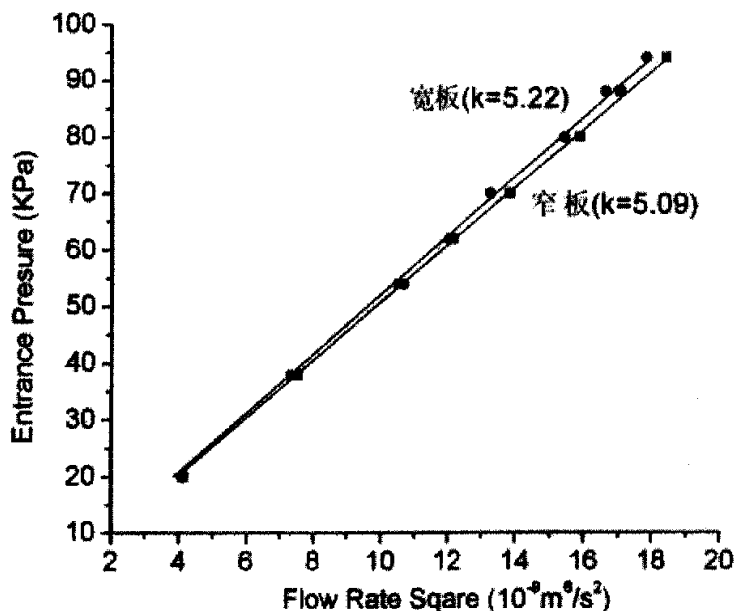


图 5.7 两次实验所得拟合曲线图

Fig. 5.7 Fitting curves graph of two experiments

## 2、实验结果分析

第一次实验数据处理按照传统模具管网计算的思路，只考虑沿程阻力引起的水头损失。在此实验中，两块板的实验装置和实验条件相同，其冷却通路均有六条模具冷却通道和五个外接皮管构成。沿程阻力包括模具冷却管道沿程阻力及外接皮管的沿程阻力。

从图 5.7 中可以看出， $p$  与  $Q^2$ （即  $\Delta p$  与  $Q^2$ ）成线性关系。其关系图线的斜率  $k$  即为液流阻抗。并可得出宽板冷却通路的液流阻抗为 5.22，窄板为 5.09。设单位长度（1 cm）的冷却管道的液流阻抗为  $k_d$ ，并假设单个外接弯管的液流阻抗为  $k_w$ ，则有：

$$\begin{cases} (6 \times 25.7 \times k_d) + 5k_w = 5.22 \\ (6 \times 15.5 \times k_d) + 5k_w = 5.09 \end{cases}$$

则  $k_d = 0.0021$

从模板出口处的压力表到皮管的最终出口(如图 5.4 中的 L 处),大约长 1.5m。在实验过程中,观察到无论模板进水口处的压力怎样变化,模板出口处的压力显示总是为零。表明外接皮管对流体的沿程阻力非常小。因此,在注塑模具冷却管网分析中,可以认为外接皮管壁足够光滑,单个外接弯管的沿程阻力为  $k_w$  无限小,整个外接皮管的沿程阻力可以忽略不计。

对宽板来说其冷却通路的液流阻抗应为:

$(6 \times 25.7 \times k_d) + 5k_w = (6 \times 25.7 \times 0.0021) = 0.32382$ , 可以看出与实验所得宽板的总液流阻抗 5.22 相差甚远。对于窄板也有类似的结果。

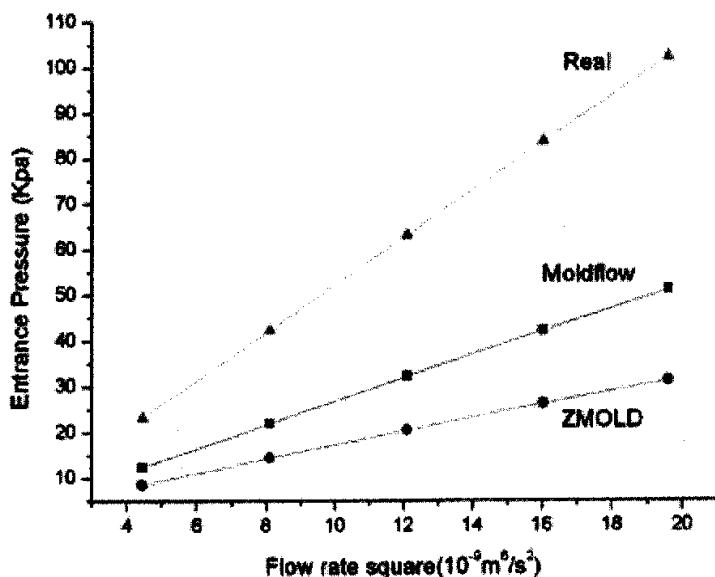


图 5.8 实验测量和 Moldflow 与 Z-mold 的模拟结果比较

Fig.5.8 Compared the experiment result with the simulation results of Moldflow and Z-Mold

图 5.8 是将窄板的实验测试结果和 Moldflow 及 Z-mold 的模拟结果做比较,可以发现 Moldflow 及 Z-mold 的计算结果是有很大误差的。而从结果分析可得,无论是模具管道的沿程阻力还是外接弯管的沿程阻力,它们对冷却通路的总阻力贡献甚小,完全可以也忽略不计。此前的管网计算只考虑了沿程阻力,并没有考虑局部阻力,从而导致出现这种严重的计算误差。

## (二) 模具管网局部水力损失分析

由流体力学可知,液体在管网中流动时若发生方向和流速的改变,会产生局

部的水头损失。在大多数的水力管网计算中，局部水头损失相对很小，故称之为 Minor Loss.，往往忽略不计。此前的模具冷却管网计算参照了普通管网的计算模型，也未曾考虑局部水头损失。

但由第一次实验结果分析可知，沿程阻力只占冷却通路总阻力的很微小一部分，因此有必要对局部水头损失进行考虑。在本实验装置中，唯一可能的两种局部水头损失发生在水嘴和皮管转向。

当水流通过外接弯管时会产生局部水头损失，如图 5.9 中①；水流通过水嘴时，因为管径收缩或放大，也会产生局部水头损失，如图 5.9 中②。

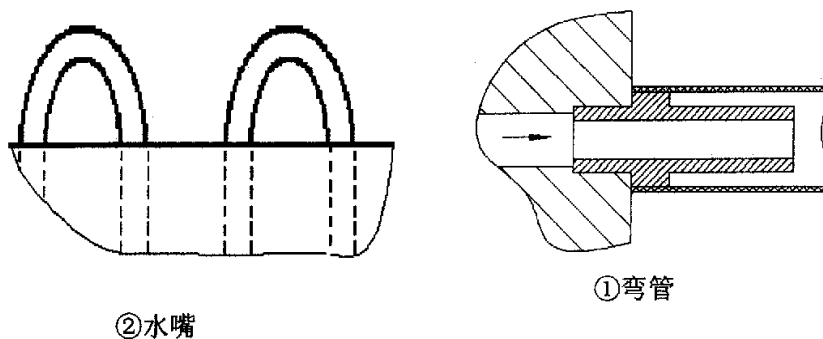


图 5.9 弯管和水嘴

Fig.5.9 Syphon and sphagnum

①Syphon

③Sphagnum

和沿程水头损失相似，局部水头损失一般也用流速水头的倍数来表示。局部水头损失的通用计算式为：

$$h_m = \xi \frac{V^2}{2g} \quad (5-3)$$

$\xi$  称为局部阻力系数； $V$  冷却液流速。

$$\text{因 } h_m = \frac{\Delta p}{\rho g},$$

则局部水头损失可写成：

$$\Delta p = \xi \frac{\rho V^2}{2} \quad (5-4)$$

## (二) 第二次实验

本次实验的主要目的是研究水嘴和皮管转弯产生的局部阻力对总阻力的影响。

1、实验装置及数据处理

本次对窄板做三组实验，分别用到六条，四条及两条模具管道。具体装置安排如图 5.10 所示。

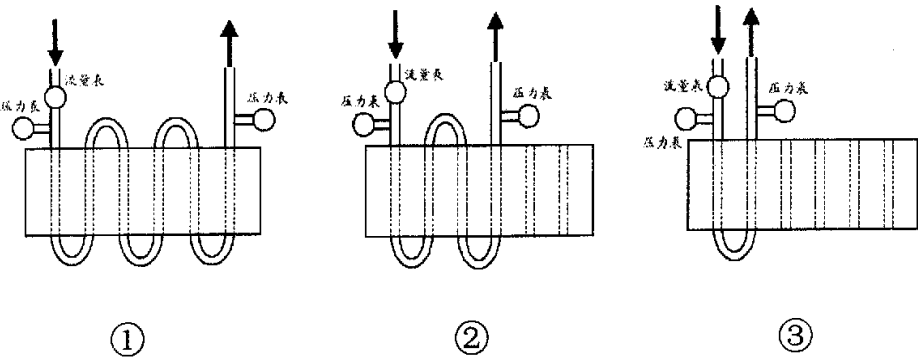


图 5.10 第二次实验装置图

Fig.5.10 Experiment settings of the second experiment

依据宽板和窄板实验所得到的  $p$  和  $Q^2$ ，做压力——流量平方关系图，一个压力  $p$  对应一个  $Q^2$ ，这样得到一些散点，将这些点依次连接成折线图。如图 5.11，图 5.12，图 5.13 所示。

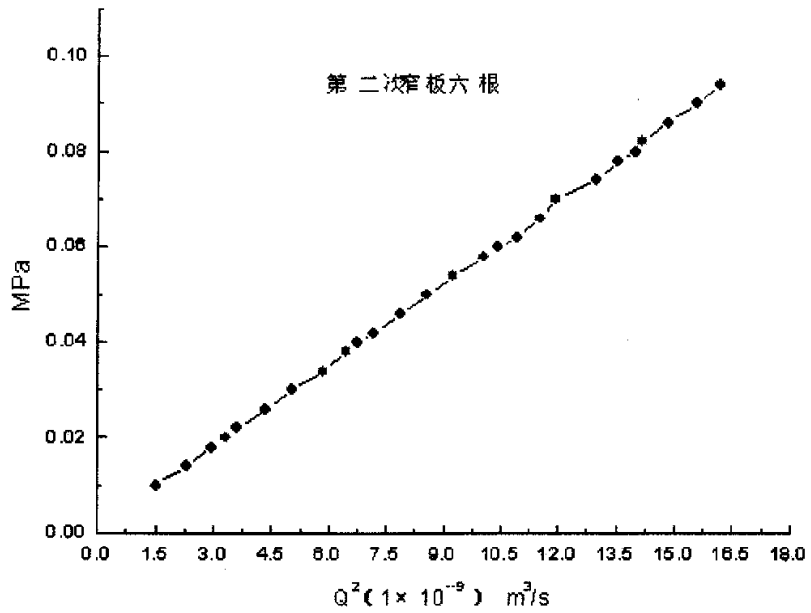


图 5.11 进口压力与流量平方关系图(窄板 6)

Fig.5.11 The relationship of Entrance Pressure and Flow rate Square (narrow template 6)

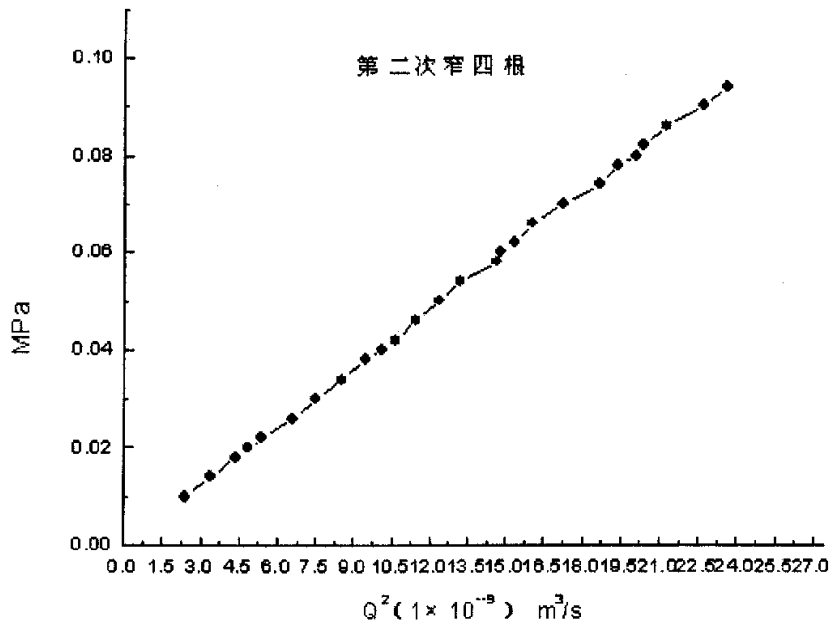


图 5.12 进口压力与流量平方关系图(窄板 4)

Fig.5.12 The relationship of Entrance Pressure and Flow rate Square (narrow template 4)

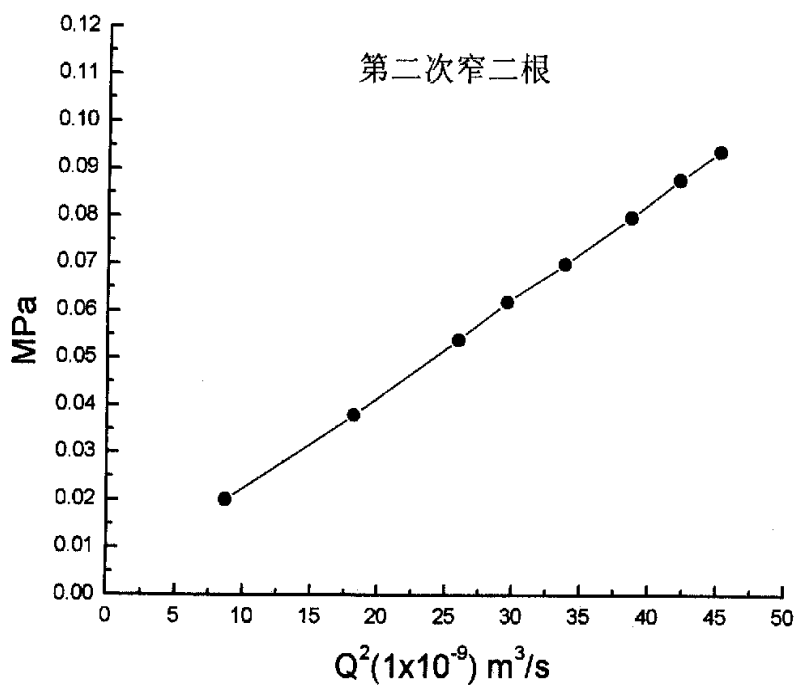


图 5.13 进口压力与流量平方关系图(窄板 2)

Fig. 5.13 The relationship of Entrance Pressure and Flow rate Square (narrow template 2)

从以上三板同样可以看出两板所测得的压力与流量的平方大致呈现线性关系。用最小二乘法对实验数据进行线性拟合，并在同一坐标下表示。如图 5.14 所示。



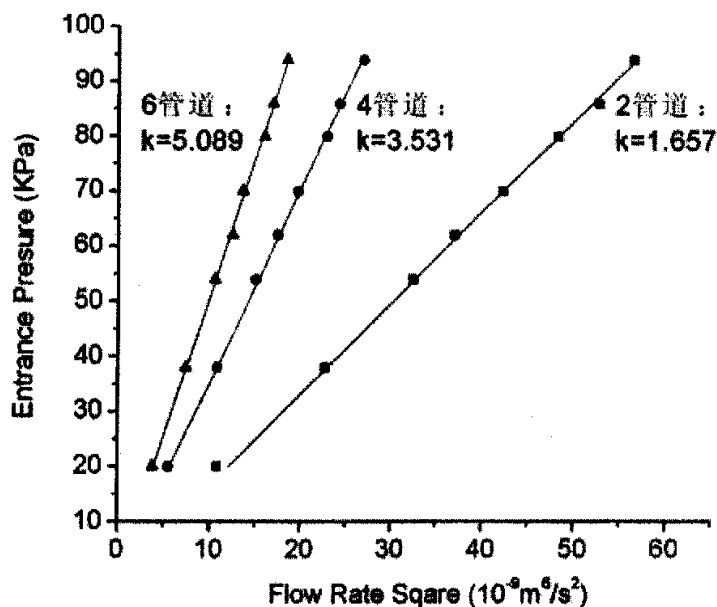


图 5.14 三组实验所得拟合曲线图

Fig. 5.14 Fitting curves graph of three experiments

由图 5.14 可以看出，三组实验所得的图线表示水流通路两端的压差  $\Delta p$  与通路中的流量的平方  $Q^2$  呈线性关系。并随着所用模具冷却管道的增多（即所用到的水嘴和外接弯管也增多），其阻力相应的增大。

## 2、实验结果分析

由第一次实验可知，本实验装置水流通路的沿程阻力对总阻力贡献很小，第二次实验数据处理将忽略水流通路的沿程阻力，令  $k_s$  表示水嘴处产生的局部液流阻抗， $k_H$  表示外接皮管产生的局部液流阻抗，则有如下方程组：

$$\begin{cases} 4k_s + k_H = 1.657 \\ 8k_s + 3k_H = 3.531 \\ 12k_s + 5k_H = 5.089 \end{cases} \quad (5-5)$$

用最小二乘法求解：  $k_s = 0.426$        $k_H = 0.007$

仿照局部水头损失的表达形式，设水嘴局部水头损失公式：

$$\Delta p_s = f_s \frac{\rho V_s^2}{2} = f_s \frac{8\rho}{\pi^2 D_s^4} Q^2 \quad (5-6)$$

$$\text{令 } k_s = f_s \frac{8\rho}{\pi^2 D_s^4}$$

$f_s$  为水嘴阻力系数。

$$\text{则 } \Delta p_s = k_s Q^2$$

$$\text{外接皮管转向的局部水头公式： } \Delta p_H = f_H \frac{\rho V_H^2}{2} = f_H \frac{8\rho}{\pi^2 D_H^4} Q^2 = k_H Q^2 \quad (5-7)$$

$$\text{令 } k_H = f_H \frac{8\rho}{\pi^2 D_H^4}$$

$f_H$  为外接弯管阻力系数。

$$\text{则 } \Delta p_H = k_H Q^2 \quad (5-8)$$

由前面所得的  $k_s$  和  $k_H$  可计算两处的阻力系数为：

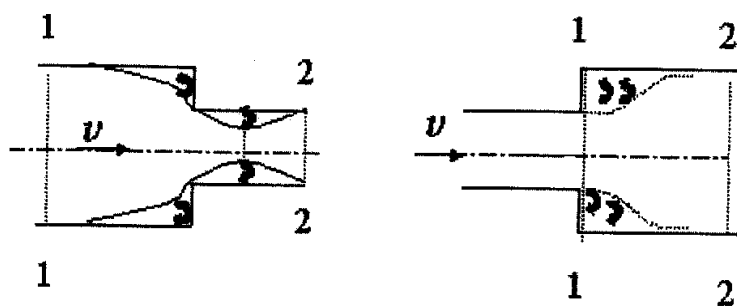
$$f_s = k_s \frac{\pi^2 D_s^4}{8\rho} = \frac{0.426 \times 10^{12} \times 3.1416^2 \times 0.006^4}{8 \times 1000} = 0.681$$

$$f_H = k_H \frac{\pi^2 D_H^4}{8\rho} = \frac{0.007 \times 10^{12} \times 3.1416^2 \times 0.01^4}{8 \times 1000} = 0.086$$

从上述计算结果可以看出，皮管转向的阻力系数很小，同时由于其管径大、速度低，产生的最终皮管局部阻力微不足道，可以忽略不计。

如图 5.6 中②所示，模具管道和外接皮管的内径都比水嘴的内径大。因此，水嘴处的局部损失可分为管径扩大和管径缩小两种情况。如图 5.15 所示。

水嘴处的局部阻力系数对应有两种不同的理论计算公式。设管径放大情况下的局部阻力系数为  $f_{s1}$ ，管径缩小情况下的局部阻力系数为  $f_{s2}$ 。



①管径缩小

②管径放大

图 5.15 水嘴处局部损失

Fig. 5.15 Local head loss in sphagnum

①Reduce the dia of sphagnum

②Increase the dia of sphagnum

理论上的局部阻力系数公式为：

① 管径放大情况：

$$f_{s1} = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 = \left(1 - \frac{6^2}{10^2}\right)^2 = 0.4096$$

② 管径缩小情况

$$f_{s2} = 0.5 \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right) = 0.5 \left(1 - \frac{6^2}{8^2}\right) = 0.219$$

按理论公式计算，水嘴处的理论阻力系数应为  $(0.4096 + 0.219) \approx 0.63$

需要指出的是：在水力学中，管网某处局部阻力系数是在局部构件前后都有足够长的均匀流或渐变流段，并不受其他干扰的条件下由实验测得的。故采用这些系数公式计算时，一般要求各局部构件之间要有一段不小于 20~40 倍管直径的间隔。对于紧连在一起的两个局部构件，其局部阻力系数不等于它们单独分开时的局部阻力系数之和。实际上的总局部阻力系数（即通过实验所得的）比按理论公式用叠加法求得的阻力系数之和大些。

在本实验装置中，水嘴处的局部障碍（管径扩大和管径缩小）之间的距离非常之短，远远小于 20 倍的管径。因此，在本实验中，理论计算所得的水嘴处的阻力系数 0.63 要小于实验所得的阻力系数 0.681。

从实验可知：在模具管网中，局部阻力是管网总阻力的重要来源，计算时必须予以充分考虑。

## 5.4 由实验结果对模具管网计算的再认识

模具冷却管网在形式上与普通的水力管网具有很强的相似性，因此分析计算时大多参考沿用了管网计算时的一些算法。在这些算法中，无论是否考虑了管网的局部损失，均认为沿程损失是管网水头损失的最主要来源，而且流量平方与压降之间的关系是非线性的。

本文通过实验发现实际情况并非如此。模具管网不同于其他管网的最显著特点就是其管段长度非常的短，这决定了模具管网分析与通常的管网分析之间的巨大差异。

通过冷却管道流量——压力关系实验，可以得到如下结论：

1. 由于模具结构的限制，在模具管网中，管线长度很短，局部阻碍的间距很小，这决定了管道中的水流是以一种复杂的，非常规的状态流动，从而沿程水头损失方程失效。由实验可知，在模具冷却管道中的流体阻力是极其微小的，工程应用中可以忽略不计。
2. 实验表明，局部阻力是模具管网中阻力的压倒性来源，绝非 Minor loss。在管网计算时，为计算快捷起见，局部阻力可以作为阻力的唯一来源。
3. 实验数据显示出流量的平方与压降呈明显的线性关系，因此局部阻力系数可以认为是完全由几何形状决定的而与流量无关的常数。
4. 通过此次实验，证明此前模具管网计算数学模型是有错误的，必须重新考虑适合模具管网的算法模型。计算的关键是如何确定冷却管道交接、拐弯、水嘴等处的阻力系数。有一些系数可以从文献中获得，而另一些还需由大量的实验决定。管流与电流有相似性。模具冷却管网计算与电阻电路的物理模型很接近。可令局部阻力等效为一个电阻，而管线相当于电线。各管道的流量平方对应电流。对总阻力起重要作用的不是管线，而是一个个局部阻力，就象电路中的用电器。它们的不同之处在于在交叉点的流量平衡。由于管网中流量的平方——而不是流量本身——与压降成正比，在有支路时，非线性迭代是不可避免的。

## 5.5 本章小结

本章通过一个实验，经过数据处理，对实验结果分析得出了模具管网中阻力的构成，推翻了此前所一直认为的模具管网计算时的阻力理论。证明了局部阻力才是模具管网中总阻力的重要来源。由实验结果给出了指导模具冷却管网计算的一些定性理论。

## 第六章 总结与展望

注塑模具冷却管网的分析计算，是在基本参数已定的基础上，来确定各管段的流量和各个节点的压力。管网分析的意义，不但在于可以确定冷却液压力泵（大多为水泵）是否能提供足够的压力以保证管网的流量，而且当管网有内部支路时，可以计算各支路的流量分配。

模具管网的计算参考借鉴了水力管网计算的一些理论算法。但是，目前的模具冷却管网分析仍然存在一些不足。首先，用于管网分析的两大类算法——节点法和回路法——均存在一定的缺陷；其次，是否通常的管网分析完全适用于注塑模的冷却管网分析这一特殊问题，尚未见令人信服的分析报告。

本文在深入研究管网计算理论的基础上，针对模具冷却管网的特殊性，主要进行了以下工作：

- 1、在对传统的管网计算理论深入分析的基础上，归纳总结了各种计算方法。并对各种算法进行比较，针对以往算法中的不足，提出了一种新的管网计算方法——修正流量的节点法。构造了新节点法的数学模型，给出了计算程序框图。
- 2、根据新算法的数学模型，采用 C++ 语言编写了电算程序。并通过算例，证明了新方法能有效的克服传统方法的弊端。
- 3、进行了模具冷却管道的流量——压力关系实验，对实验数据进行了研究分析，与理论计算结果进行了比较。对原有模具管网计算理论进行了一些修正，提出了指导模具冷却管网计算的一些定性结论

由于时间及本人能力所限，有许多的工作仍待去研究解决，主要有：

- 1、本文通过实验，只是定性得出了模具管网中局部阻力是最重要的阻力来源，而模具管网每一处的局部阻力较复杂，对其定量的计算还需根据实验进行测量。
- 2、需要对此前的管网计算模型进行修正和完善，以使其符合模具管网的实际情况。

## 参考文献

- [1] 华希俊, 张培耘. 模具工业先进制造技术特点及发展概况[J]. 金属成形工艺, 2001, 19(1):1~3.
- [2] 李德群, 张宜生. 模具企业数字制造技术的现状与发展[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2003, (7):10~13.
- [3] 陈国聪, 杜静. 机械 CAD/CAE 应用技术基础[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [4] 刘玲, 周旭东. 模具 CAD/CAE/CAM 的发展和展望[J]. 机械研究与应用, 2004, 17(3):5~8.
- [5] 钟佩思, 沈友徽, 马静敏等. 模具先进制造技术发展趋势综述[J]. 模具制造, 2005, (3):1~4.
- [6] 申长雨, 陈静波, 刘春太等. CAE 技术在注射模设计中的应用[J]. 模具工业, 1998, 205(3):7~12.
- [7] 申长雨, 陈静波, 刘春太等. 塑料模 CAE 技术发展概况[J]. 模具工业, 2001, 239(1):51~56.
- [8] 王健, 贺琼义, 黄伟等. 塑料模具注射过程分析[J]. 天津职业技术师范学院学报, 2001, 11(4):16~19.
- [9] 张君, 董定福, 张远斌等. 注塑成型流动过程 CAE 技术的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002, 25(5):736~738.
- [10] 张国强, 张云. 注塑模设计中的 CAE 技术[J]. 锻压设备与制造技术, 2003, (3):73~74.
- [11] W. C. Bushko, V. K. Stokes. Solidification of Thermoviscoelastic Melts. Part I: Formulation of model problem. Polymer Engineering and Science, 1995, 35(4):351~364.
- [12] S. J. Liu. New Viscoelastic Phase-transformation Model to Simulate the Injection-molding Residual Stress. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 62(10):1537~1550.
- [13] Y. Ulcer, M. Cakmak. Structural Gradients Developed in Injection-molded

- Syndiotactic Polystyrene(sPS). Journal of Applied Polymer Science, 1996, 60(5):669~691.
- [14] B. Xie, D. I. Bigio. Case Studies of Morphology Development for iPP During the Injection Molding Cooling Process. Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings, 1996, (1):842~846.
- [15] S. Cha, F. S. Lai. Analytical Study of Thin-wall Molding in Injection Molding Process. Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings, 1995, (1):765~767.
- [16] S. Cha, F. S. Lai. Analytical Study of Thin-wall in Injection Molding: Filling and Cooling Analysis. Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings, 1996, (1):831~836.
- [17] P. Tantakom, N. R. Schott. Processing Strategies for Thin Wall Injection Molding. - ANTEC, Conference Proceedings, 1998, (1):367~371.
- [18] 李海梅, 申长雨. 注塑成型及模具设计实用技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [19] 成都科技大学等编. 塑料成型模具[M]. 北京:中国轻工业出版社, 1993.
- [20] 许仕荣, 邱振华. 给水管网的计算理论与电算应用[M]. 湖南:湖南大学出版社, 1997.
- [21] 丁祖荣, 单雪雄, 姜楫. 流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [22] 陈静波, 王利霞, 申长雨等. 注射模中冷却系统的流动分析[J]. 模具工业, 1998, 206(4):30~33.
- [23] 金建华, 王烽. 水力学[M]. 湖南:湖南大学出版社, 2004.
- [24] 申长雨, 李倩. 橡塑模具优化设计技术[M]. 北京:化学工业出版社, 1995.
- [25] H. K. Kesavan, M. Chandrashekar. Graph-Theoretic Models For Pipe Network Analysis[J]. Journal of The Hydraulics Division. ASCE, 1972, 98(2):345~364.
- [26] R. H. Mohtar, V. F. Bralts, W. H. Shayya. Finite element model for the analysis and optimization of pipe networks[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(2):393~401.
- [27] M. B. Holloway, M. H. Chaudhry. Comparison of Pipe-Network-Analysis



- Computer Programs[J].Proceedings - Canadian Hydrotechnical Conference, 1983, (2):543~558
- [28] Jeppson, W.Roland, Davis, L.Allen. Pressure Reducing Valves In Pipe Network Analysis[J].ASCE J Hydraul Div, 1976, 7(102):987~1001.
- [29] Onizuka , Kotaro. System Dynamic Approach To Pipe Network Analysis[J].Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(8):728~749.
- [30] Demuren, O.Ayodeji, Ideriah, J.K.Felix .Pipe Network Analysis By Partial Pivoting Method[J].Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(5):327~334.
- [31] Ruggles, Roger, Nur, Mohamed .Interfacing a pipe network analysis model to AutoCAD[J].Civil Engineering Education, 1990, 12(1):21~23.
- [32] Berghout, L.Brendan, Kuczera, George. Network linear programming as pipe network hydraulic analysis tool[J].Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(6):549~559.
- [33] P.Dupuis, Y.Ouellet, J.L.Robert. Modified Element Method For Pipe Network Analysis[J].Journal of Hydraulic Research , 1987 , 25(1):27~40.
- [34] Liggett, A.James, Li-Chung Chen. Inverse transient analysis in pipe networks[J].Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 120(8):934~955.
- [35] 严煦世,赵洪宾.给水管网理论和计算[M].北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [36] 付祥钊.流体输配管网[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [37] 陈静波,申长雨,刘春太等.注塑模冷却分析系统的研究与开发[J].中国塑料,1999,13(4):93~99.
- [38] 陈静波.注射模冷却管网分析计算[J].模具工业,1993,(12):31~33.
- [39] 石宪章,田中,申长雨.注塑冷却系统中管网基本圈的优化[J].中国塑料,2004,5(18):90~92.
- [40] 吕谋,李红卫.给水管网平差计算中各种流量法的分析和比较[J].青岛建筑工程学院学报,1994,4(15):41~47.

- [41] 陈钢军. 环状管网水力计算的图论方法[J]. 华侨大学学报, 1994, 15(4):418~422.
- [42] 石继, 张丰周, 魏. 图论法用于供水管网水力计算的研究[J]. 水利学报, 1999, (2):49~56.
- [43] 申长雨等. 塑料模具计算机辅助工程[M]. 河南科学技术出版社, 1998, 76~79.
- [44] 陈建功. 稀疏矩阵技术在水力管网计算中的应用[J]. 辽宁工学院学报, 1996, 16(3):64~67.
- [45] 李鸣. 管网基本定理及其数学模型[J]. 节水灌溉, 2001, (1):8~11.
- [46] 李光正, 倪胜福. 管网水力计算的一种求解方法[J]. 水电能源科学, 1997, 15(3):43~46.
- [47] 刘同宦, 郝瑞霞, 刘兴年等. 管网水力计算及其在给水工程中的应用[J]. 东北水利水电, 2004, 22(8):4~5.
- [48] 杨东娟, 龙国庆, 张生录. 热水循环管网水力平衡计算方法的探讨[J]. 工程建设与设计, 2005, (5):34~35.
- [49] 王国斌, 吴洪有. 区域集中消防给水系统优化计算探讨[J]. 消防技术与产品信息, 2005, (3):27~28.
- [50] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
- [51] 张韵华, 奚梅成, 陈效群. 数值计算方法和算法[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [52] 李景湧. 有限元法[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 1999.
- [53] 龙北生. 水力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000.
- [54] 李鉴初, 杨景芳. 水力学教程[M]. 北京:高等教育出版社, 1995.

## 致 谢

本文是在导师申长雨教授和赵振峰教授的悉心指导和关怀下完成的。

首先感谢导师申长雨教授三年多来的亲切关怀和悉心指导，他渊博的知识，严谨细致的工作作风，求实创新的治学态度给作者留下深刻的印象，并使作者终身受益，在此由衷的表示敬意和感谢！

衷心感谢赵振峰教授！在论文工作中，我得到了赵老师的大力帮助和指导，他知识渊博、经验丰富、思维开阔，在关键学术问题上提出的宝贵建议使我少走了很多的弯路，我在学业上的每一点进步都倾注了赵老师的心血。特此表示深深的感谢！

感谢橡塑模具国家工程研究中心的刘春太教授、陈静波教授、李倩教授、李海梅教授、王利霞教授、曹伟教授、杨晓东高工、余晓容副教授以及模具中心办公室的田中、谢英、杨杨等老师三年来对作者学习和生活上的帮助！

感谢石宪章博士及张滢老师，他们分别在课题探讨及实验安排方面给予我很大的帮助！

在朝夕相处的三年学习生活中，2003 级研究生陈政、马志国、张翼、赵建、孙彩玉、翟建兴、沈俊芳、郑晓培、陈巍、周应国、闵志宇、路书芬、张雪玲、徐文莉给予我许多的帮助和支持，几年来对作者学习和生活中的启迪和帮助。愿友谊天长地久！

感谢我的父母、姐姐在我上学期间对我的默默关怀和支持！

最后，再次向给予作者关心和帮助的师长、朋友致以诚挚的谢意！

## 附 录

作者在攻读硕士期间发表的论文

- 1、赵振峰, 陈政, 吴海宏, 王静, 申长雨. ABS 注塑制品的模内蠕变试验研究, 实验力学, 待发。
- 2、赵振峰, 王静, 陈政, 申长雨, 谭素琼. 注塑模具冷却管网分析计算, 郑州大学学报(工学版), 已录待发。