

哈尔滨理工大学

硕士学位论文

元胞自动机的研究及模型的建立

姓名：吕凯

申请学位级别：硕士

专业：计算机应用技术

指导教师：陈德运

20070301

元胞自动机的研究及模型的建立

摘 要

元胞自动机算法是目前世界上被广泛关注的算法之一，它在近几十年来，经过不断的发展和完善，已成为一种有着广阔应用前景的算法思想。它的出现使得很多应用传统的算法解决起来相当困难或根本无法解决的问题，得以妥善的解决。元胞自动机算法是一种全新的计算机算法，它以系统单元化思想作为应用基础，同时将系统进化的客观规律融入了算法中，具有传统算法所无法比拟的特点和优势，具有极好的泛用性和稳定性。

在机械加工过程中，铣刀片在切削过程中受到周期性的热冲击，切削热产生的温度场对刀片造成破损，温度场在切削过程中呈现出非常复杂的变化，研究切削热和切削温度的产生和变化规律是揭示刀具破损的产生机理的重要手段。

为了解决上述问题，本文以铣刀片在切削过程中所产生的温度场为研究对象，用元胞自动机对刀具实体进行网格划分，建立铣刀片温度场的元胞自动机模型，从而研究铣刀片在切削过程中的优化机制，使铣刀片的切削性能达到最优化。

本文的重点是建立基于温度场的元胞自动机模型并根据二维元胞自动机温度场模型判断切削参数、刀具槽行、刀具几何参数对温度场的影响，从而提出优化铣刀片切削性能的推理机制。虽然元胞自动机思想是一种新的算法思想，但是它有很大的发展前景，并且把元胞自动机思想应用于模拟机械切削中温度场的分布，尚属首例。因此本文的研究，可以为元胞自动机的研究及应用带来创新作用。

关键词 元胞自动机；温度场；切削热；铣刀片

Establishment of Model and Research on Cellular Automata

Abstract

Cellular automata algorithm is one of the most attentive algorithms in the world today. This algorithm has been ceaselessly developed much better and has become very useful in many fields in the past decades. Many problems that are very difficult or totally not to be solved by traditional algorithms now can be worked out well by cellular automata. Cellular automata algorithm is a holy new advanced computing algorithm. It's based on the idea that every system can be divided into many cells; it takes the natural principles of evolution into it. So it has many advantages out of other algorithms as well, and it is more stable and more adaptive.

In mechanical process, milling insert get the seasonal heated impact in cutting process, the cutting heat produced the temperature field that works milling insert disrepaired, in the period of the cutting process the temperature field take on the complicated changing. So studying the producing and changing rules of the cutting heat and the cutting temperature is the important method that can open out the mechanism of the milling insert dilapidation.

In order to solve the problem, this thesis takes the temperature field which milling insert produced in cutting process as the research object, carries on the grid division of the cutting tool entity with the cellular automata, establishes the cellular automata's model of the milling insert temperature field and studies the optimized mechanism of the milling insert in cutting process, it can enable the cutting value of the milling insert arrive the optimization.

The main contribution of the thesis is the establishment of model on cellular automata based on temperature field and judging the influence of the cutting parameter, cutting tool's trough line and cutting tool's geometry parameter to temperature field, According to the model of the cellular automata's temperature

field, we can propose the mechanism that enables the cutter blade's cutting value arrive the optimization. Although cellular automata thought is one new algorithm thought, but it has the very big prospects for development, and it is the first time that applying cellular automata thought to the simulating temperature field distribution of machine cutting. Therefore this thesis's studying may bring the innovation function for research and application of cellular automata.

Keywords cellular automata; temperature field; cutting heat; milling insert;

哈尔滨理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《元胞自动机的研究及模型的建立》，是本人在导师指导下，在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名： 吕凯

日期：2007 年 3 月 15 日

哈尔滨理工大学硕士学位论文使用授权书

《元胞自动机的研究及模型的建立》系本人在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨理工大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨理工大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门提交论文和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨理工大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于

保密 ☐，在 年解密后适用授权书。

不保密 ☒。

（请在以上相应方框内打√）

作者签名： 吕凯

日期：2007 年 3 月 15 日

导师签名： 陈志成

日期：2007 年 3 月 15 日

第1章 绪论

1.1 背景介绍

目前,在车铣刀片三维复杂槽型设计中存在的瓶颈是各种分析结果不能直接有效地驱动槽型重构。自组织是指一个系统在内在机制的驱动下,自行从简单向复杂、从粗糙向细致方向发展,不断地提高自身的复杂度和精细度的过程;元胞自动机 $CA^{[1][2]}$ (Cellular Automata)是研究自组织过程的有效工具,在揭示复杂系统的演化规律等方面有独到之处。目前已有元胞自动机在三维实体和曲面重构中的初步应用,显示了元胞自动机的独特优势。王安麟教授等人根据元胞自动机的模型和过程,设计了 CA 在结构拓扑形态设计中的应用步骤,用力学规则和神经网络方法进行归纳、整理、分类和学习,得到了进化规则,进行自下而上自动完成结构形态,实现了多种方法融合的元胞自动机的设计方法。李才伟创建了多元随机元胞自动机,用于模拟自然界广泛存在的自组织现象,建立了若干自组织行为的元胞自动机模型,并用自己编制的 PC $Windows$ 环境下的通用元胞自动机程序,模拟了 BZ 振荡反应、定向压力下结晶条带形成、三分子化学反应等自组织过程。元胞自动机已经成为研究非均匀动态系统和非线性复杂系统的一种有效工具,在很多领域都得到了应用。

元胞自动机算法经过不断的发展和完善,已成为一种有着广阔应用前景的算法思想。 CA 算法是一种全新的计算机算法,它以系统单元化思想作为应用基础,同时将系统进化的客观规律融入了算法中,具有传统算法所无法比拟的特点和优势,具有极好的泛用性和稳定性。国外的研究始于 90 年代,目前正处于不断的探索阶段,算法本身也还不够完善。

本课题将用模拟元胞自动机自组织的动力学行为,解决三维复杂槽型铣刀片新槽型的动态设计和优化设计难题,设计开发抗粘结破损、抗冲击破损的铣刀片,为基于元胞自动机的三维复杂槽型可转位铣刀片提供原创性设计理论和方法。

1.2 国内外研究现状

元胞自动机算法是一种简单而又具有巨大用途和广泛应用前景的数学算

法。它主要采用了一种新的思想来处理复杂的系统的仿真和系统发展的预测。它的基本思想就是将系统分解为多个元胞, 根据任何系统中各个相邻单元之间存在一定的交互作用关系, 而每个单元的状态都是整个系统在一些简单的规则作用下不断进化的结果。只要通过一些方法找到这些规则, 那么, 复杂的系统就可以使用这些规则来预测系统将来的发展情况, 而这些规则本身确实十分简单的, 并且可以通过对简单系统的研究得到。

元胞自动机起源于 20 世纪 40 年代, “现代计算机之父”冯·诺伊曼设计可自我复制的自动机时, 参照了生物现象的自繁殖原理, 提出了元胞自动机的概念和模型。它是一时间和空间都离散的动力系统, 散步在规则格网中的每一元胞取有限的离散状态, 遵循同样的作用规则, 依据确定的局部规则同步更新, 大量元胞通过简单的相互作用而构成动态系统的演化, 不同于一般的动力学模型, 元胞自动机不是由严格定义的物理方程定义的物理方程或函数确定, 而是用一系列模型构造的规则构成。凡是满足这些规则的模型都可以算是元胞自动机模型 20 世纪 70 年代, Conway 编制的“生命游戏”是最著名的元胞自动机模型, 显示了元胞自动机在模拟复杂性系统的无穷潜力。引起了物理、数学、生物、计算机、地理等领域专家的兴趣, “生命游戏”被认为是元胞自动机研究的真正开始。20 世纪 80 年代是元胞自动机理论的大发展时期。沃夫曼从动力学的角度对元胞自动机进行了分析, 并将计算机理论应用于元胞自动机的研究。20 世纪 90 年代元胞自动机在各个领域得到了广泛的应用。此后元胞自动机主要应用在计算机图形学、生物学、复杂的社会经济现象如城市发展模拟与预测, 热扩散, 并行计算等领域^[3]。

1.3 CA 模型应用于机械切削的重要意义

当代铣削技术不断飞速发展, 而铣刀片的效能是保证铣削加工产品质量和降低成本的重要因素之一。由于各种新技术和新产品的开发和应用, 对铣刀片的性能提出了更高的要求, 这就在铣刀片的研究开发和选择使用两个方面都要求我们找到科学的、实用的铣刀片评判方法。研究铣刀片的温度场, 对其进行评判, 对于优选铣刀片、优选切削参数和新槽型的开发非常具有实际意义。

在机械加工过程中, 造成制造系统不稳定、非正常停机的主要原因是连续切削过程的切屑控制、刀具磨损及断续切削过程的刀具破损。这一问题是制约着自动化、无人化制造系统提高产品质量和生产效率, 加快企业市场响应速度的巨大障碍。为确保系统正常运行, 提高设备利用率, 解决好车削断屑和铣削

刀具破损成为自动化生产过程中的关键问题之一。如何减少或避免铣刀片破损,控制车削切屑形成,使之有规律地卷曲并折断是提高机械制造过程生产效率的关键,也是国内外急需解决的学术上和技术上的难题。由于断屑槽对切屑处理、切削阻力、刀具寿命、加工精度等方面的重要作用,可转位刀片从平刀片逐渐发展成带有二维槽型、三维槽型,槽型趋向于三维复杂化。对于断续切削的铣削而言,冲击破损和粘接破损是铣刀片失效的主要形式。切削力和切削热是产生这两种破损的根本原因,切削过程中刀具受到周期性的热冲击和力冲击,在刀体内产生恶劣的应力场和温度场直接导致铣刀片破损失效。王志勇等人进行了切入类型分类及切入破损研究,申请者则进行了切出破损的研究。Berliner 对温度场和刀具表面的热量流动进行了计算。Masuda 研究了切削奥氏铁时刀片破损的机理,Radules 对连续切削和断续切削的温度场进行了研究,建立了温度场的预测模型^[4]。Liu Defu 研究了正交切削系统温度分布规律,建立其温度场有限元分析模型,给出了切削力、剪切角等实验数据,并利用热传导有限元法计算多种切削条件下的温度分布^[5]。Fel adshtein 对切削奥氏铁的刀片温度场进行了有限元分析,El Hossainy 将切屑的影响考虑在内进行了有限元的模拟,Grzesik 进行了切削温度的试验研究,Fang Du 则对涂层刀具的温度场进行了有限元分析,Young Hong T 建立了刀-屑接触的温度分布模型,Chakraverti 从由切削热而产生的热应力及热疲劳的角度,对断续切削时刀具破损的机理进行了研究^[6]。但是,这些研究工作都是针对平前刀面铣刀片的。为了改善刀具的切削性能,近年来,工业界转而采用带有槽型的铣刀片代替平前刀面铣刀片。李振加等在研究铣削机理和试验研究的基础上,开发了一种新型三维槽型铣刀片—波形刃铣刀片,并在直线刃铣刀片铣削力槽型基础上,建立了波形刃铣刀片铣削力模型;对三种槽型的铣刀片进行了切削温度试验,根据切削条件建立了温度场有限元分析的边界条件,并对不同槽型铣刀片的三维温度场进行了有限元分析。

为了从根本上解决这一难题,我们将采用元胞自动机自组织方法,用元胞自动机模型来模拟切削过程中温度场的分布,对基于温度场的模糊综合评判结果进行槽型重构等研究。

1.4 课题来源及论文内容

本课题来源于国家自然科学基金项目“三维复杂槽型车铣刀片自组织动态设计的研究”(50575062)。

本项目的研究是一个新的尝试。本文主要从提高三维槽型铣刀片的切削性能,优选出性能更好的槽型出发,进行三维槽型铣刀片温度场数学模型及其应用的研究,为铣刀片三维槽型的优选提供程序设计依据,建立一套基于温度场的利用元胞自动机的研究方案,来优化三维槽型铣刀片的切削性能,以改进我国铣刀片品种单一,自行开发设计少的落后面貌。

本课题将以铣削试验为基础,以元胞自动机自组织理论为依据进行温度场的模拟仿真分析,以得到的刀具破损判据为根据,判断槽型的优劣。基于温度场的抗破损判据,进行三维复杂槽型铣刀片的构造与重构,将切削试验、理论分析和数学建模有机地结合在一起,获得优化后的新槽型。主要分为以下两部分研究内容:

1. 建立铣刀片的元胞自动机模型 用元胞自动机理论对刀具实体进行网格划分,建立 2D 铣刀片元胞自动机模型。

2. 研究基于温度场元胞自动机模型的二维复杂槽型铣刀片的推理机制 根据试验得到铣刀片前刀面温度分布,研究温度场的单独效应,并与有限元方法结合进行温度场的分析,用元胞自动机模拟温度场的扩散过程,从而建立基于温度场的元胞自动机模型,从该模型中研究铣刀片的温度分布,提出一套推理机制,使三维复杂槽型铣刀片的切削性能达到最优化。

第2章 CA 系统分析

2.1 元胞自动机的产生

自然界是一个复杂而又庞大的系统，它将许多事物，例如：有生命的，没有生命的，动态的，静态的，等等容纳在一起，构成了一个变化无穷的，精彩绝伦的世界。在这样一个世界里，我们就像一个个微小的分子或单元被吸收进一个十分纷繁的物质空间中，而整个空间所组成的系统在随着时间的流逝或空间位置的迁移千变万化，我们周围的一切，包括我们自己都在做着不停息的，无法捉摸的变化。这些变化经常是复杂的，或者说是毫无规律可寻的，但是我们却明明发现正是这些变化和变化的主体构成了一个整体上总是保持稳定的世界。在我们的想象中，事物是变化着的，而且是没有规律的，永不循环的，那么这些变化着的事物的集合是怎么可能组成一个健强性的整体的呢？

我们还意识到在复杂系统及其变化规律的研究中，使用传统的思想和方法已经不能给我们比较满意的结果，要想更加深入的了解这些复杂系统，就必须从崭新的角度，应用更为灵活和具有泛用性的方法来处理这些复杂系统。

元胞自动机思想正是基于这个考虑被提出来的。

早在 20 世纪 50 年代，就有一些针对简单孤立的 CA 模型的研究开始，那时，主要将 CA 系统看作为一个实际模型的框架来研究这样一个可以自动进化成不同结果并自动修正的自动机器^[7]。这时的研究方向比较狭窄和单一。

事实上，像许多近代的学术研究课题一样，元胞自动机思想诞生于二次世界大战中^{[8][9]}。在那时，计算机科学还处在初级阶段，当时还不明确将来的计算机无论是在体系结构上还是功能上都是和人的大脑是不同的。1943 年，数学家 Pitts 和神经心理学家 McCulloch 设想了一个由常规的神经元组成的系统，每个神经元相当于一个逻辑单，可以选择不同的逻辑值，而这些逻辑单元可以在下一个时间一起将它们的逻辑值传递到别的逻辑单元，那么，它们综合作用的结果就将是下一个时间系统的结果，这种可以自动进化的机器就是所谓的图灵机(Turing)或有限状态机^[10]。在这同时，计算机之父冯·诺伊曼(John Von Neumann)提出构造一个不确定的生命模型系统的设想，这个系统可以智能的自我进化。后来，冯·诺伊曼将这个模型发展为一个网格状的自动机网络，每个网格为一个单元自动机，单元状态有生和死，相当于人体组织的存活和消亡。这

是早期的元胞自动机思想的应用，它还有很多问题没有明确下来，如：元胞自动机的分布，元胞自动机的状态变化究竟和哪些因素相关以及状态怎样确定等等。

1970 年，剑桥大学数学家 Conway 发明了一种叫做“生命的游戏”的游戏，这个游戏完全体现了动态元胞自动机的特征^[11]。游戏是这样的：

游戏是在一张好像棋盘的平面网格上进行的，这些网格上可以放上棋子或不放，这是由游戏规则决定的。而棋子的意思是代表在放棋子的地方，有一个生命存活，而没有棋子的地方代表没有生命存活。开始时，在网格上随机的摆上一些棋子，然后，按照一定的规则来确定每个有棋子的位置上的棋子将被取走，还是保留和没有棋子的位置上是否将出现新的棋子。规则是：每个棋子有可能有 8 个邻居，而有 4 个是直接相邻的，如果目前的棋子有 2 个或 3 个邻居，那么它将在下一次被考虑前保留，如果，它有 4 个或 4 个以上邻居时，它将被认为是因为人口过多将会死亡而被取走，而它如果只有 1 个或没有邻居，那么将会因为过于寂寞而死，所以也将被取走。同时，如果当前位置上没有棋子，而此位置周围正好有 3 个邻居时，那么这个位置将被放上一个新的棋子。整个游戏就按这个规则进行下去。

游戏的几个状态如图 2-1 所示：

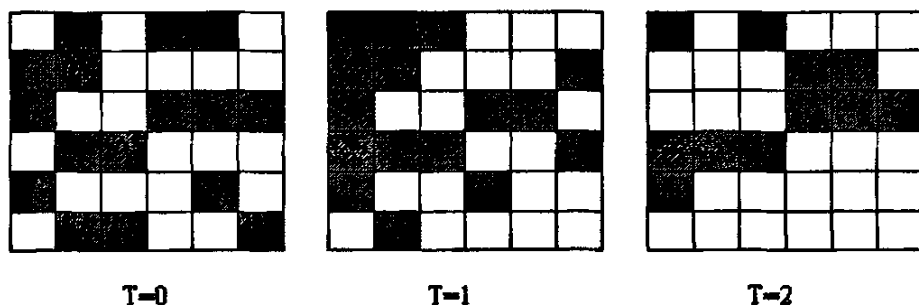


图 2-1 生命的游戏三个连续状态

Fig. 2-1 Three serial states in life game

上图为在游戏过程中任取的三个连续状态。特指明，处于边界的单元判断时认为在网格的外围存在一圈网格，但网格上认为是空白的。

从这个游戏中我们可以发现 CA 系统中存在两个操作对象：单元的状态和系统进化规则。其中单元状态一般可以取二值变量如 0 和 1，其实在复杂的 CA 系统中，单元状态还可以取一段连续的数据如取 1 到 10 之间(包括 1 和 10)的任意值。另一个，系统进化规则，其实规则是一个映射关系的有限集。而这些映射关系都是一些十分简单的进化判断约束条件，如在此游戏中就有如下的

映射关系：

1. 如果某单元有棋子，而现在它有 2 个或 3 个邻居，那么这个棋子保存下来；
2. 如果某单元有棋子，而现在它有 4 个或 4 个以上邻居，那么这个棋子被丢掉；
3. 如果某个单元有棋子，而现在它只有 1 个邻居，那么这个棋子也将被丢掉；
4. 如果某个单元上没有棋子，而它却正好有 3 个邻居，那么在这个单元上就将放上一个新的棋子。

在“生命的游戏”的这个游戏中，实际上体现了一个二维的元胞自动机的运做过程^{[12][13]}。

2.2 元胞自动机与自组织

自组织过程是指非线性的物体在远离平衡到一定程度时形成的时间、空间以至功能的结构或边线出“混沌”行为。这两种可能是：结构与混沌，也并非互不相干，而是往往交替出现，无论是时空规则的结构还是混沌行为都是系统状随时间演化的终极目标或吸引子，孤立系中系统发展到无序的熵取极大值的平衡态，称演化具有第一类时间箭头；若为开系处于远离平衡并出现自组织过程，称演化具有第二类时间箭头^{[14][15]}。

元胞自动机的优点在于能够描写具有局部相互作用的多体系统所表现的集体行为及其时间演化。这种方法是首先将空间分割成由共同的特点或元胞组成的规则的点阵，就像围棋组成蜂窝那样。其中每一格点或元胞对应着有限组数值，以描写该格点或元胞的状态。这些数值与一定的时刻相对应。这些数值同步地随着分立的时间步骤($t=0,1,2,\dots$)按照一定时规则演化。所谓“规则”主要反映近距离内格点间或元胞间的相互作用即局域作用，按照这种规则，某格点在某瞬时的取值决定于该格点和几个相邻格点在前一时刻的取值。

若元胞或格点等距离地分布在一条直线上，叫做一维元胞自动机；若规则分布在平面上，则成为二维元胞自动机，目前只对一维元胞自动机的行为有比较详尽和系统化的认识。对二维元胞自动机虽有进行系统研究的工作，但得出的结论尚不如一维情况充分^[16]。对于初等元胞自动机，即每一个格点只能取 0 和 1 这两个数值中的一个，且仅考虑最邻近两个格点对中间格点的作用的一维元胞自动机，通过对大量计算机实验结果进行分析。人们发现，虽然初始条件

不同, 运算方法多种多样, 得出的元胞自动机的结果也千差万别, 但这些结果总是可以归纳成下面四大类:

1. 元胞自动机的演化达到均匀的, 不随时间变化的定态。
2. 形成一组取值不同但不随时间改变的稳定的结构或是周期结构。
3. 元胞自动机的发展导致“混沌”行为的出现。
4. 发展成为复杂的局域结构。

上面四种发展前景属于初等元胞自动机^[17]在无规则初始条件下演化的“吸引子”。前面三种大致可与连续动力系统的普通吸引子“极限点”, “极限环”以及“混沌”奇怪吸引子相类似。四种结局虽然不同, 但都属于有序结构。每一类结构的形式和特点要由它们各自对应的吸引子的性质来决定。

从无序的初始状态发展成有序结构, 表明演化过程具有第二类时间箭头。这意味着元胞自动机的演化完全可以用于描述自组织过程。

2.3 CA 思想概述及其组成

2.3.1 CA 基本思想

CA 即 Cellular Automata, 称作单元自动机, 它就是一种模型, 可以让大量的简单单元在某些简单的本地规则作用下产生各种复杂的系统状态。这种模型的结构很简单, 它是由很多的格子集合在一起所组成的, 而每个格子就好像一个容器。而这个容器没有别的用处, 只是作为一个代表, 它告诉我们, 在容器所在的那个位置上有没有放东西或放了多少。模型的实现主要依靠一些简单的规则。这些规则每次作用时都是只对几个相邻的容器起作用, 所以称它为本地规则。这些规则的作用是规定每个容器里面放不放东西, 这是由它周围相邻的容器是不是放了东西所决定的, 比如说, 往一些容器里放东西时, 为了某种原因, 如美观性, 往往先看一看, 某个容器的相邻的容器是不是放了东西, 如果放满, 就决定在那个空的容器里放东西。

通常, 单元自动机是一套格子的 n 维组合, n 为自然数, 每个格子驻留了一个有限状态自动机, 每个自动机以其相邻的, 具有有限状态的单元格的状态作为输入。然后输出一个处于同一有限状态集合的状态, 它可以作如下表示: $\{s_1, \dots, s_n\}^{\Sigma} \Rightarrow \{s_1, \dots, s_n\}$ 其中: Σ 表示有限状态 $s_1 \dots s_n$ 组成的子集, \Rightarrow 为映射操作, n 为有限状态的个数。即元胞自动机的状态是与其相邻的自动机状态交互作用的结果。

元胞自动机的相邻单元取舍情况一般如图 2-2 所示：

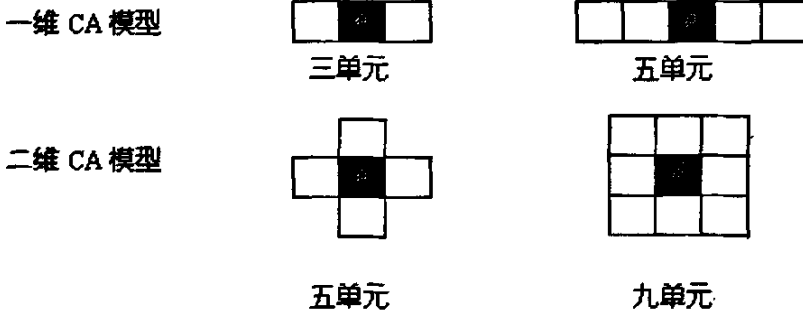


图 2-2 CA 模型

Fig. 2-2 CA model

以上模型均将中央单元作为邻居，实际上，也可以不包括中央单元。CA 模型是建立在一个简单状态集和一套本地交互规则基础上的，是可以自我发展、自我完善的、可以不断扩展并可以按一定规则描述复杂系统状态和预测系统未来的自动机器。

将上面“生命的游戏”的例子的单元自动机系统数学模型化后。我们就可以用这样一个公式来表示 CA 模型的系统状态和规则应用情况。任意时刻某单元的取值 a 由公式(2-1)确定：

$$a'_{i,j} = f(a_{i,j}^{-1}, a_{i-1,j}^{-1}, a_{i+1,j}^{-1}, a_{i-1,j-1}^{-1}, a_{i-1,j+1}^{-1}, a_{i,j-1}^{-1}, a_{i,j+1}^{-1}, a_{i+1,j-1}^{-1}, a_{i+1,j+1}^{-1}) \quad (2-1)$$

事实上，这个模型是一个二维 CA 模型，在 CA 思想的应用中还可以建立一维，二维和多维 CA 模型。它们都是按照这样一个简单的方法建立起来的可以模拟和仿真大型复杂的静态，动态和混合形式的系统。从算术的关系角度来看 CA 模型实际上是从有限状态机(Finite State Machine)演绎而来的，但是 CA 模型在更高层次上处理一维、二维或多维复杂系统的状态演化。它主要处理单元阵列上单元状态的读、写和更新的过程。

2.3.2 CA 的组成

1. 元胞 元胞又可称为单元，或基元，是元胞自动机的最基本的组成部分、元胞分布在离散的一维、二维或多维空间上。

2. 状态 状态可以是 $\{0, 1\}$ 的二进制形式，也可以是 $\{s_0, s_1, \dots, s_l, s_k\}$ 整数形式的离散集。严格意义上，元胞自动机的元胞只能有一个状态变量，但在实际应用中，往往将其进行扩展。

3. 元胞空间 元胞所分布在空间网点的集合就称为元胞空间。

元胞空间的几何划分：理论上，它可以是任意维数的欧几里德空间规则划分，目前研究多集中在一维和二维的元胞自动机上，对于一维元胞自动机，元胞空间的划分只有一种，而高维的元胞自动机，元胞空间的划分就可以有多种形式，对于最常见的二维元胞自动机，二维元胞空间通常可以按照三角，四方或六边形三种网格排列，如图 2-3 所示：

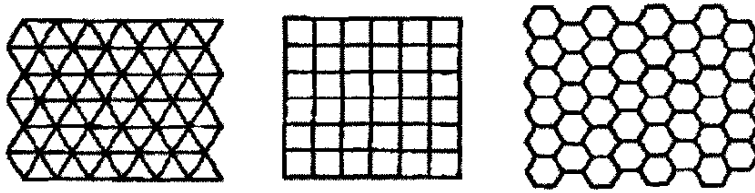


图 2-3 元胞空间的常用划分方式

Fig. 2-3 The common plotting fashion of the CA space

这三种规则的元胞空间划分在建模的时候各有优缺点：

三角网格的优点是有相对较少的邻居数目，这在某些时候很有用，可以大大减少运算量，其缺点是在计算机的表达与显示上不太方便，需要转换维四方网格。

四方网格的优点是简单而且直观，而且特别适用于计算机环境下进行表达显示。其缺点是不能较好的模拟各向同性的现象。

六边形网格的优点是可以较好的模拟各向同性的现象，因此模型更加自然和真实，其缺点和三角网格一样，不利于表达显示。

边界的处理：实际上，在模拟指定的元胞自动机演化规则的时候，不可能处理无限的网格，系统都是有限的、有边界的。显然，属于网格边界的格位不具有与其他内部网格一样的邻居。为了确定这些边界网格的行为，可以指定不同的演化规则，以考虑适当的邻居。即对边界上格位的信息进行编码，并根据这些信息选择不同的演化规则。按照这种方法，还可以定义几种完全不同行为的边界^[18]。

另外一种方法是，不是在系统边界上使用不同的演化规则，而是在边界处扩展格位邻居^{[19][20]}。例如，一种通用的解决办法是在假设周期或循环的边界条件，就是假想网格嵌入像环面一样的拓扑结构中。在二维网格条件下，指左右连接和上下连接。

图 2-4 中给出一维网格中几种可能的边界条件。假定用边界外的一组虚元胞扩大网格，固定边界是用预先复制的元胞使邻居完整，通过对虚元胞赋予格

位值，获得绝热的边界，映射边界相当于在虚元胞中复制其他邻居的值。如图 2-4 所示：

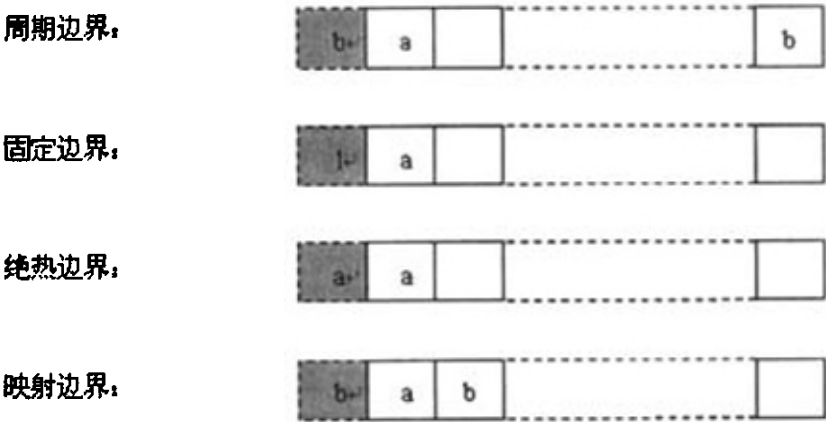


图 2-4 各种边界条件

Fig. 2-4 Several boundary condition

4. 邻居 按照定义，元胞自动机的演化规则是局部的，对于指定的元胞的状态进行更新只需要知道其邻居元胞的状态，某元胞需在其内搜索的空间叫做邻居，原则上，对于邻居的大小没有限制，只是所有的元胞的邻居的大小都要相同。实际上往往只由相邻的元胞构成邻居。

通常，二维元胞自动机考虑两种邻居：一是 Von Neumann 邻居，由一个中心元胞(要演化的元胞)和与其相邻接的东、西、南、北、四个方位的四个元胞组成；另一是 Moore 邻居，他由一个中心元胞和与其相邻接的东、西、南、北，以及东北、西北、东南、西南共 9 个元胞。两种标准邻居如图 2-5 所示：

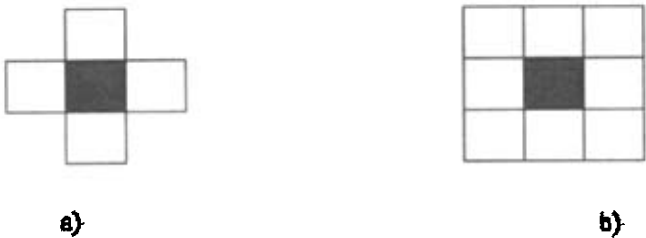


图 2-5 两种标准邻居

a) Von Neumann 邻居 b) Moore 邻居

Fig. 2-5 Two standard neighbors

a) Von Neumann neighbor b) Moore neighbor

5. 规则 根据元胞当前状态以及邻居状态确定下一时刻该元胞状态的动力学函数, 简单讲, 就是一个状态转移函数。

6. 时间 元胞自动机是一个动态系统, 它在时间维上的变化是离散的, 即时间 t 是一个整数值, 而且连续等间距。一般来说, 一个元胞在 $t+1$ 时刻的状态只决定于 t 时刻该元胞状态及其邻居元胞的状态, 显然, 在 $t-1$ 时刻的该元胞及其邻居元胞状态间接(时间上延迟)影响了元胞在 $t+1$ 时刻的状态。

由以上对元胞自动机的组成分析, 我们可以更加深入的理解元胞自动机的概念, 用符号来表示, 元胞自动机是一个四元组: $A = \{L_d, S, N, f\}$, 这里 A 表示一个元胞自动机, L_d 表示元胞空间, d 是一个正整数, 表示元胞自动机内元胞空间的维数, S 是元胞的有限的离散的状态集合, N 表示一个所有临域内元胞的集合, 包括中心元胞, f 表示状态转移函数。

2.4 CA 边界问题分析

通常元胞自动机边界^{[21][22]}问题的处理方法基于两个不同思想:

1. 认为所有系统处于一个封闭的环境中, 在系统内部所有单元等同, 所以无须考虑边界问题, 但此系统是有限系统。
2. 认为边界问题可以容入系统内部处理, 只是在处理这些事实上的边界的时候, 按照等同与系统内部的单元来处理时, 增加附加条件。

对于思想 1, 通常采用以下处理方法: 将系统的边界连接起来: 如图 2-6 所示:



图 2-6 一维 CA 模型边界问题

Fig. 2-6 Problem of one dimension CA model boundary

上图是在处理一维 CA 模型^{[23][24]}边界问题时, 采用的方法是将两个边界单元连接起来, 这样, 系统就相当于一个封闭系统, 所有单元都可以按一个进化规则来处理, 二维的依次类推, 如图 2-7 所示:

二维边界处理时, 可以将上边界单元和下边界单元连接起来, 左边界单元和下边界单元相连接对角顶点相连接。



图 2-7 二维 CA 系统的边界问题

Fig. 2-7 Problem of two dimensions CA model boundary

思想 2 的解决方法是，将系统边界的外围，人为的加上一个附加边界，这个附加边界的出现将使以前的边界单元成为系统内部单元，这样，这些单元就可以和其他的单元采用相同的规则处理，从而，达到系统进化的一致性。当然附加的边界单元实质上是不参与系统进化的。

在上面的解决方法是在系统的外围人为的加上一个附加单元层，从而使实际进化系统单元达到统一，避免处理上的各种困难。但是以下问题是需要解决的，否则无法用这些方法。

1. 确定附加单元的分布 由于单元的分布情况不同，则系统进化过程中，附加单元对实际进化单元的作用就将不同。所以这个问题处理的质量将直接影响系统的最终结果。

2. 按照系统需求拟订附加单元的状态 由于附加单元的状态在进化过程中将影响实际进化单元，同时又由于，附加单元的状态在整个进化过程中保持不变，所以它们的状态一定要符合系统进化初始条件的要求，比如，初始化时，各个单元的状态是否对将来的系统进化结果的影响可以忽略。

3. 附加单元状态和系统进化的关系处理 这个问题主要存在于那些系统状态可以按不同形式处理的时候，比如，有时为了便于计算机处理而将二维 CA 系统的进化过程可以转化为一维 CA 系统来进化，这时附加边界单元的状态和实际进化单元的关系将要随着系统的形式不同而不同。

2.5 CA 的应用方法

CA 方法是一种用来分析一个静态或动态系统的方法，它主要通过对一个系统的抽象化，模型化来定义一个系统的状态，而在此过程中，它不象一般的数学物理方法那样死板的描述或仿真一个系统^[26]，因此，在分析一个较为复杂的系统时，那将是十分困难的，甚至是不可能的。CA 方法采用了一些新的思想来简化分析过程，同时又可以达到较好的仿真效果，同时它又更为稳定和可靠^[26]。CA 方法分析一个系统包括以下几个方面内容：

2.5.1 确定要研究的对象系统的性质

1. 此系统是否一个自组织系统(Self-Organization) 因为对于一个系统, 是否自组织系统是决定在分析系统过程中如何划分模块和简化数学模型的重要参照依据之一, 因此在用 CA 方法分析系统时, 若此系统是自组织系统, 即在系统内部只有本地交互因素, 而无外界相关因素。那么, 此系统将表现出一种相对稳定性(Robust)。这样将有利于整个系统的综合分析, 而实际上, 系统因存在混沌吸引子(Attractors)而呈现一种混沌状态。

2. 此系统是一个静态系统还是一个动态系统 因为要确定系统是动态还是静态是涉及到确定后来的算法的重要因素, 因为静态系统和动态系统的建模是完全不同的, 静态系统的内部结构是稳定的, 而动态系统是不稳定的, 但可能系统特性是收敛的。

3. 此系统是一维、二维系统还是三维或多维系统 因为系统的状态与系统的维数关系密切, 同时维数不同 CA 方法的应用也不同, 而且还可能包括线性维和非线性维。

2.5.2 确定系统规则

系统规则^[27]的确定是整个系统 CA 分析的核心。CA 在处理系统时, 总是将系统细分为可以建模的单元, 这些单元的分析是较为简单的, 我们将一个建模单元的各种状态在外界条件下的变化情况确定下来, 然后通过一些方法确定整个系统的各个单元状态来预测其他单元以至整个系统各个单元的状态, 故而规则的确定及完善情况也关系到将来系统状态预测的结果。

2.5.3 系统结构的规划

系统结构的确定是整个系统 CA 分析中也是相当重要的。CA 在够建过程中, 总是考虑到系统的结构。系统在确定了状态迁移之后, 就可以确定系统的逻辑结构, 将这些结构进行综合和优化之后, 就可以将模块化的结构投入使用。

2.6 CA 算法分析思想与应用

2.6.1 CA 算法分析思想

2.6.1.1 CA 算法模型 A. I. Adamashii 在《Identification of fuzzy Cellular Automata》中认为: CA 模型是可以被多维的具有可选整型变量值的格子, 其中每个单元可以选取一个特定的集合中的某个状态, 并且这些状态均可以根据一个本地的转换功能函数作出改变, 而此功能函数是由附近的其他单元的状态作为输入的因素^{[28][29]}。这个定义也就是说一个 CA 模型是由一系列的单元所组成的格子状系统, 其中, 每一个单元的值均属于某一个集合, 而且, 每一个单元的值由其附近的单元的前一个状态决定目前状态, 依次类推, 整个系统就按照此功能函数作线性或非线性状态变化。

例如: 在日常生活中, 有些棋类就是给出一种初始状态和一系列规则, 然后, 由不同的对弈者选择不同的规则根据当前棋局状态做出下一个棋局状态的预测, 再作决定。当然对弈的结果只有两种可能: 一方胜出或和局。

在上面的例子中, 我们提到两个内容: 一方面是系统的初始状态^[30], 一方面是系统的规则^[31]。

首先分析一下初始状态: 在例子中, 我们给出的初始状态只是不同的棋子布局, 这种布局将是影响以后布局的源泉。假使我们在开始时给出另一种布局状态, 那么, 整个结局将是完全不同的。这即说明, 初始状态是影响一个系统状态的因素。但是我们又发现即使初始状态不变, 每一棋子按这些规则运行下去后, 整个棋局仍是极其微妙。

接下来分析以下规则: 规则是我们事先给出的, 用来约束系统状态的条件集合。在分析一个较为复杂的系统时, 我们一般先选取一个有代表性的较小的, 不是太复杂的系统来分析, 通过实验等方法来确定一系列有用的关系网(规则)。一般我们可以认为这种分析是正确的。然后将这种规则应用于那些较复杂的系统, 这样分析复杂系统时就较为容易。同时我们发现将一个规则应用于一些系统中时, 通常系统状态有以下几种结果:

- 系统状态趋于稳态;
- 系统状态逐渐膨胀;
- 系统状态渐渐收缩;
- 系统状态周期变化;

2.6.1.2 CA 算法模型的构造

1. 系统分析 首先系统分析是对一个系统进行仿真分析的第一环节, 只有处理好系统分析才能有一个较好的建模, 同时在建模时主要应用 CA 思想。在进行系统综合分析时, 首先按系统的状态受影响的复杂程度将系统分为:

简单系统: 简单系统主要指系统内部较为稳定, 同时所有输入只有内部本地交互响应, 而无外部输入响应的系统。

复杂系统: 复杂系统一般指包括外部复合条件的响应系统, 而这类系统又可以划分为多个简单系统, 而这些简单系统又可以按另一种 CA 规则规划的系统, 这里仅论述一下简单系统。

接下来的工作是对系统进行格状分割, 这个过程的关键是将整个系统看作无数个小单元, 而每个小单元又具有可选状态, 当我们取一初始状态进行分析时, 一定要注意, 每个小单元与别的单元发生的影响作用应该是本地的, 即相邻近的, 同时影响单元的数目或者说决定某一单元状态的其他单元数一定要远远小于整个 CA 系统的单元总数, 我们可以通过一些方法进行这个范围的调整, 如实验法, 主要目的是保证算法应用的独立性。

2. 初始状态的确定 初始状态指已经经过划分的各单元的初始值, 这些状态可以是布尔值或者一段连续变量值, 这里关键是注意初态要具有代表性和一般性, 全面性。当然, 对于已经简化了的 CA 单元, 对其进行全面分析并不十分困难, 所以应尽量考虑到初始状态本身以及其受影响后, 响应的种种状态变化, 否则还要进行细分, 或对其状态进行分段整合。

3. 规则构造 在经过以上两个步骤以后, 就可以来确定整个系统的规则。在确定 CA 规则时要考虑以下内容:

系统单元维数, 维数是确定规则的基本要素, 只有确定系统细分后的维数才能考虑从什么样的基本规则入手, 才能考虑某一个单元是受线性影响还是受非线性或复合影响。

单元响应半径, 一般在用 CA 算法分析时都要确定单元响应半径, 也就是单元对那些相邻单元状态的刺激进行响应, 他们的范围怎样, 例如一维系统半径就是影响其单元状态的前几个和后几个单元所在的范围, 而二维可以确定圆形或方形半径范围。

响应的重数及各重属性, 在一个本地响应范围内, 有可能某个单元是几重状态响应叠加下做出的响应, 这时就将每一种响应关系进行综合。注意在进行分析时必须全面而准确。

规则的时间和空间处理, CA 算法处理系统并做出系统状态预测时都要考

虑到时间和空间段的处理, 因为单元响应都是时空相关的, 所以确定的系统状态也是时间, 空间相关的。

规则的构造源, 规则如何得出是整个规则构造的核心, 同时, 此规则确定的正确与否直接关系到系统状态预测的成功与否, 规则确定是一个总结和完善的过程, 有很多手段可以用来确定规则, 如实验观察法等。

2.6.2 当前 CA 思想应用的范围

早先 J.von Neumann 将 CA 系统看作是一个由许多单元格所组成的可以自我进化和配置的整体^{[32][33]}, 其中每个单元格拥有 5 个相邻的单元格, 并且每个单元格的状态可以取 2 种。这是 CA 系统最先应用的雏形, 随后 CA 思想的理论和应用逐渐扩展到许多分散的领域, 例如: 图案识别, 生物建模, 以及各种物理系统, 计算机并行处理, 等等。

近年, 通过对常规 CA 系统的体系研究, 已经较为清晰的将 CA 系统划分为引人注目的几种类型。应用于本地相邻的一维 CA 系统的静态机制最早是由 Wolfram 在他的经典论文里提出的。接着 Martinetal.应用代数多项式将一维 CA 系统的特点表达出来^[34]。更为通用的基于代数矩阵的工具是由 Dasetal 在刻画附加 CA 系统的行为特性时提出的^[35]。

在最近 20 年来, 基于 CA 思想的更为广阔和多样的应用被提出来, 主要的应用可以归类为以下几种:

1. 物理系统的仿真, 如: 一些对生长过程的模型化进行仿真, 裂变反应系统的仿真, 流体力学的仿真和类孤立系统的行为仿真。
2. 生物的模式化, 包括可自我再生模型, 生物体系及其处理, 脱氧核糖核酸(DNA)序列。
3. 图象处理。
4. 语音识别。
5. 分类计算及素数生成的计算。
6. 仿真机。
7. 计算机体系结构。
8. 自测安装(BIST, Build-In-Self-Test)结构用于伪随机性, 伪彻底性, 确定性图案生成和信号处理。
9. 简单可测试性有限状态机(FSM)的综合。
10. 编码校错。

11. 伪相连存储器。
12. 通用及完善的哈希函数生成。
13. 波段失效诊断。
14. P 模式乘法器。
15. 块状和流线型密码系统。
16. 断裂学和混沌学。

2.7 本章小结

元胞自动机是一种新的算法，在近年的发展中，已成为一种有着广阔应用前景的算法思想。本章首先介绍了元胞自动机的产生和发展，然后介绍了元胞自动机的思想和组成部分，其中元胞自动机的思想和组成是元胞自动机模型的重要部分，最后介绍了它的算法分析思想和应用范围，在元胞自动机的应用范围上，我们可以看出元胞自动机思想已经在很多领域有所应用。本章为后文的元胞自动机模型的建立提供了依据并打下了基础，是本文的基础内容。

第3章 铣刀片铣削温度试验和温度场研究

3.1 铣刀片切削温度实验

目前, 铣刀刀片的材料主要采用硬质合金和金属陶瓷等脆性材料。这类材料硬度高但韧性较差, 在断续切削时易造成刀具破损, 铣削时产生的热应力造成热疲劳损伤是其破损的主要原因之一^{[36][37]}。因此测出铣削时的切削温度值, 研究温度场以及受热密度函数^[38]特别是表面受热密度函数, 可为研究铣刀刀片的破损原因及槽型优选提供关键数据和依据。为此, 本文研制了一套铣削瞬时切削温度测量实验。该实验能测出切削过程中各个瞬时的切削温度, 进而对温度曲线进行拟合, 对温度场和受热密度函数进行分析, 为可视化温度场和建立受热密度函数打下有力的基础。该实验由切削温度测量装置和切削温度数据采集与处理软硬件系统组成。

3.1.1 基本原理

切削温度的测量是切削试验中重要的技术, 可用来研究各因素对切削温度的影响, 也可以为校核切削温度的理论计算做准备, 还可以把所测温度作为控制切削过程的信号源^[39]。目前, 比较成熟的测量切削温度的方法是热电偶法, 热电偶又分为人工热电偶和自然热电偶, 人工热电偶^{[40][41]}可以测量前刀面接触区某点的瞬态温度值, 克服了自然热电偶只能测量平均温度的缺点, 基于本试验的研究目的, 我们采用了人工热电偶的测温方法, 同时在测量中引入了轴端集流环前置放大电路系统, 从而更能准确地反映出切削区测量点的实际值。

人工热电偶法的基本原理是热电偶的热端焊接在刀具预定要测量温度的点上, 通过信号传输系统和动态数据采集系统及镍-铬合金热电偶分度表, 就可以测得焊接点上的温度变化。

3.1.2 试验装置的制备

整个试验装置的制备如图 3-1 所示, A/D 卡有四个通道, 温度的测量是温度信号经热电偶、放大电路和集流环进入 A/D 卡的一个通道; 力的信号由测力仪经动态应变仪和放大电路进入 A/D 卡上的其余三个通道。这样, 经过动态数

据采集系统实现了一次切削同时测得铣削力和铣削温度。

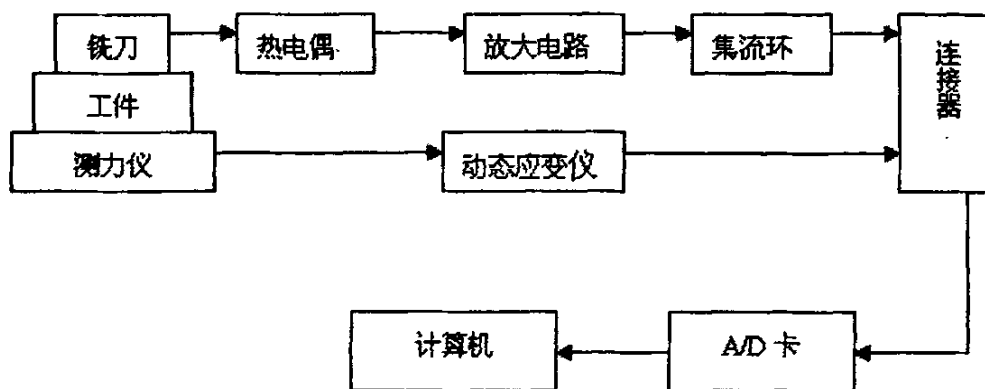


图 3-1 试验装置

Fig. 3-1 Examination equipment

3.1.3 试验参数及获得的数据

本试验所采用的测温传感器为 K 型标准热电偶，它的正极为镍铬合金导线，负极为镍硅合金导线。热电偶的测量端采用绞状点焊形成。焊接时用电源电压为 220V 交流电，通过石墨电极产生电弧熔解热电偶的两极。测量铣削温度时，为了防止两根热电极短路，在一根热电极外面套上橡胶绝缘管后，和另一根热电极并在一起插入耐高温绝缘管中，然后利用电容放电原理将热电偶的热端焊接到刀片测温孔底部。确保热电偶两极之间以及每一极与孔壁之间绝缘后，用环氧树脂填充固定测温孔。热电偶在刀片上的安装方法如图 3-2 所示。

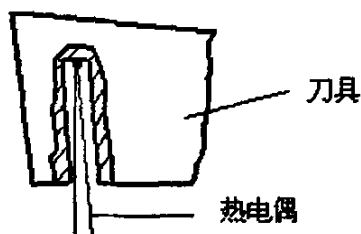


图 3-2 热电偶的安装方法

Fig. 3-2 Installment method of the thermocouple

铣削温度试验采用新型的三维复杂槽型铣刀片(波形刃铣刀片)，刀盘直径 $D=160\text{mm}$ ，工件材料为 45 号钢，工件被铣削尺寸：宽 $W=83\text{mm}$ ，长 $L=200\text{mm}$ 。

在固定切深 $a_p=2\text{mm}$ ，每分进给量 $f=36\text{mm/min}$ ，刀盘转速 $n=385\text{rpm}$ 的条件下，测出了 6 个点的温度。测温点的分布如图 3-3 所示，其中 1-6 点各点的坐标分别是(2.0, 2.0)、(2.0, 3.5)、(2.0, 5.0)、(3.5, 2.0)、(3.5, 3.5)、(3.5, 5.0)。可以计算出刀盘转动一周的时间（转动周期）为 $T=0.1558\text{s}$ ，切削时间 $t=0.0271\text{s}$ 。

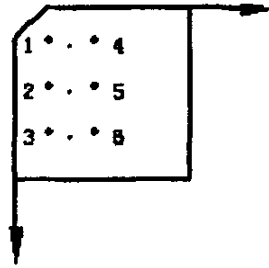


图 3-3 刀片上测温点的分布

Fig. 3-3 Distribution of temperature measuring point on the insert

试验数据的采集使用北京惯性技术研究所 FAS-4DEE-2 动态数据采集处理系统。设定系统的采集频率为 5Hz，即每 0.2s 采集一个点。系统的采集频率越低，系统受到的干扰也就越小，试验数据也就越精确，误差也就越小。

3.1.4 时刻转换

由于采集的点不在一个周期内，因而需要将这些点都转化到一个周期内（假定切削已进入稳定状态），只要模拟出一个周期内的温度曲线，就可以代表整个切削过程中的温度变化。

选择第 1 点说明计算过程：

1. 取切削达到稳态后的一个切出时刻，此处取为 7.8s。则在实验采集到的波形图上，取 7.8s 为最后的切出时刻，切入时刻为 $7.8\text{s}-0.0271\text{s}=7.7729\text{s}$ 。

2. 取 7.7729s 为自定义时刻的 0 时刻。则刀具在工件上进行切削的时间段为： $7.7729\text{s}+nT \sim 7.7729\text{s}+0.0271\text{s}+nT$ (n 为非负整数)即刀具恰好在工件上进行切削的时间段为： $7.7729\text{s}+nT \sim 7.8\text{s}+nT$ (n 为非负整数)。

3. 但是，由于采集点是每 0.2s 采一点，采集时刻为 0、0.2s、0.4s...因此只有采集时刻恰好是在切削的时间段内才有意义。为此，需要计算出在切削的时间段内的点。编制 C 程序以进行这一步运算：

```

#include "iostream.h"
void main(){
    double a;
    double b;
    for(int i=0;i<=50;i=i++)
    {
        a=7.7729+0.1558*i;
        b=7.8+0.1558*i;
        cout<<"("<<i<<")"<<a<<" "<<b<<endl;
    }
}

```

输出结果 $a \sim b$ 就是在切削的时间段内的点。根据该输出结果判断采集到的点是否在切削的时间段内。例如：在 8.2403s~8.2674s 内，并没有进行采集；而在 8.3961s~8.4232s 时间段内，有一点进行了采集(8.2s)。

4. 从输出结果中取到了适合的点后，需要将其转换为第一个周期内的点，以方便计算。切削达到稳态后，温度的变化也是周期性变化的，温度的变化可以看作一个周期函数，其周期就是刀具的转动周期。因而可以将所有的点都转化到第一个周期内。

该点的转化 C 程序为：

```

#include "iostream.h"
void main()
{
    double a;
    double b=7.7729;
    for(double i=7.8;i<=60;i=i+0.2)
    {
        a=i-b;
        for(int n=1;n<=300;n++)
        {
            if((a-n*0.1558<=0.1558)&&(a-n*0.1558>0))
                cout<<"("<<j<<")"<<a<<" "<<a-n*0.1558<<" "<<endl;
        }
    }
}

```

其中 i 为采集点的时刻, a 为由时刻转换到自定义时刻的值, 输出的结果中的 $a-n*0.1558$ 就是转化到一个周期内的时刻值。

3.1.5 曲线拟合及受热密度函数

1. 去除不符合条件的点(温度值过低或过高, 这是由于采集系统存在干扰而引起的), 在剩余的结果中选取一定个数的点, 用这些点来模拟出温度-时间(T-t)曲线。其 MATLAB 程序如下:

```
t=[0 0.0017 0.0063 0.0095 0.0139 0.0207 0.0227 0.0261];
```

```
T=[130 200 254.5 278.7 348 385.5 423 545.5];
```

```
p=polyfit(t,T,4);
```

其中 t 为时间, T 为温度值, $p=polyfit(t,T,4)$ 函数是用 4 次多项式拟合温度-时间(T-t)曲线。得到的 p 值为 4 次多项式的系数。由于使用 4 次以上的多项式形式过于复杂, 系数较大, 而用 3 次或 3 次以下的多项式拟合形式又过于简单, 所以使用 4 次多项式来拟合曲线。得到结果如下:

$$T=2013495861.9781t^4-51843592.0271799t^3-259355.387927207t^2+21603.6732123466t+142.861088805849;$$

该方程就是第 1 点的 T-t 曲线, 可以认为是该点的受热密度函数。

用 MATLAB 绘制拟合出来的曲线的程序如下:

```
x=[0 0.0017 0.0063 0.0095 0.0139 0.0207 0.0227 0.0261];
```

```
y=2013495861.9781*x^4-51843592.0271799*x^3-259355.387927207*x^2+21603.6732123466*x+142.861088805849;
```

```
x2=0:0.0001:0.0271;
```

```
y2=polyval(p,x2);
```

```
plot(x,y,'o',x2,y2);
```

```
grid on;
```

其中 x 是温度值, y 的表达式就是拟合出来的 4 次多项式, $x2=0:0.0001:0.0271$ 是以 0.0001 为步长的赋值语句, $y2=polyval(p,x2)$ 是多项式求值, $plot(x,y,'o',x2,y2)$ 函数用以绘制曲线, $grid on$ 在绘图窗口中打开网格。

2. 其余 5 点的曲线拟和过程与第 1 点相同, 可以把 6 个点的曲线绘制在一个窗口中。最终得到的 6 个点的温度-时间(T-t)曲线如图 3-4 所示。

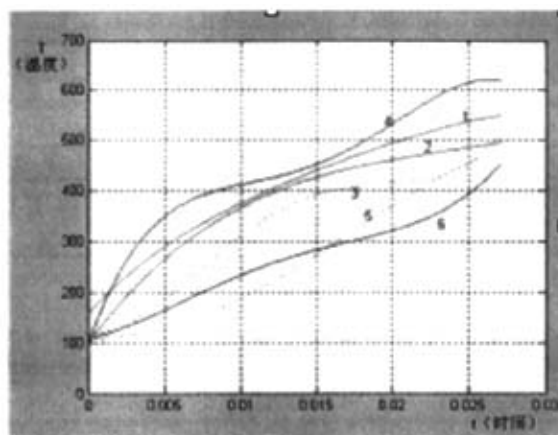


图 3-4 6 个测试点的温度-时间曲线

Fig. 3-4 Temperature-time curve of six testing dot

以上得到的结果就是波形刃铣刀片上 6 个测试点的温度-时间曲线。

3.2 铣刀片温度场数学模型研究

3.2.1 铣刀片热源发热量的计算

1. 瞬时有限大面热源的的温度场的研究是铣刀片温度场数学模型研究中的基础，铣削中的热源可以看作是有限大面热源，解有限大面热源的的温度场要从点热源温度场出发，如图 3-5 所示，根据传热学基本理论，我们知道瞬时点热源的的温度场为公式(3-1)：

$$\theta = \frac{Q_d}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{4at}} \quad (3-1)$$

式中 Q_d —点热源的瞬时发热量(cal);
 ρ —导热介质密度(g/cm³);
 c —导热介质的比热容(cal/g °C);
 a —导热介质的导温系数(cm²/s);
 t —热源瞬时发热后的任意时刻(s)。

按温度场迭加的原理，可推导出各种情况下的温度场的计算公式。为此我们讨论在热源尺寸大小有限的情况下温度场计算问题，先讨论有限长线热源问题。

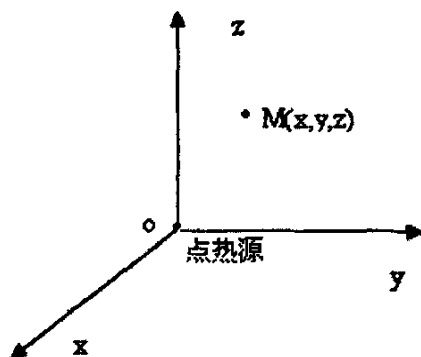


图 3-5 瞬时点热源温度场

Fig. 3-5 Temperature field of the instantaneous dot hot fountain

如图 3-6 所示, 在无限大导热介质中有一长度为 L 的线热源瞬时发热, 其发热量为 Q_s , 求发热后 t 秒任意点 $M(x, y, z)$ 处的温升。

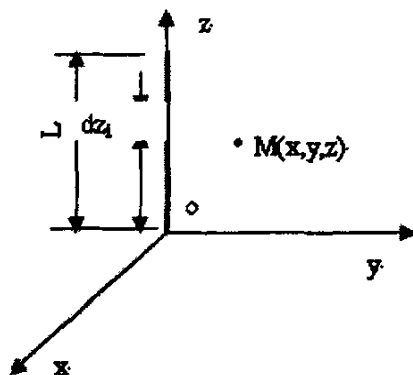


图 3-6 有限长线热源温度场

Fig. 3-6 Temperature field of finite line hot fountain

先观察任一单元线段热源 dz_i 的影响。 dz_i 单元线热源可看作点热源, 其发热量为 $Q_s dz_i$, 这一单元线热源对 M 点作用所产生的温升为公式(3-2):

$$d\theta = \frac{Q_s dz_i}{c\rho(4\pi\alpha t)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2+(z-z_i)^2}{4\alpha t}} \quad (3-2)$$

整个线热源对 M 点引起的总的温升为公式(3-3):

$$\theta = \frac{Q_s}{c\rho(4\pi\alpha t)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{4\alpha t}} \cdot \int_{-L/2}^{L/2} e^{-\frac{(z-z_i)^2}{4\alpha t}} dz_i \quad (3-3)$$

令 $\frac{z-z_i}{\sqrt{4at}} = u$, 于是式(3-3)可以写成公式(3-4):

$$\theta = \frac{Q_s}{2c\rho(4\pi at)} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{4at}} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4at}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-L}{\sqrt{4at}}\right) \right] \quad (3-4)$$

公式(3-4)就是有限长线热源的温度场。

根据有限长线热源的温度场可以推导有限大面热源的温度场。如图 3-7 所示, 在无限大导热介质中, 面热源长度为 L , 宽度为 B , 其发热量为 Q_m , 求该热源瞬时发热后 t 秒后任意点 $M(x,y,z)$ 处的温升。

此面热源可以分割成无数窄带状热源, 如图 3-7 所示, 取其中一条 dy_i 来进行考察, 该带状单元热源距原点距离为 y_i , 受此微小有限长带状热源的作用, M 点的微量温升按式(3-4)推导为公式(3-5):

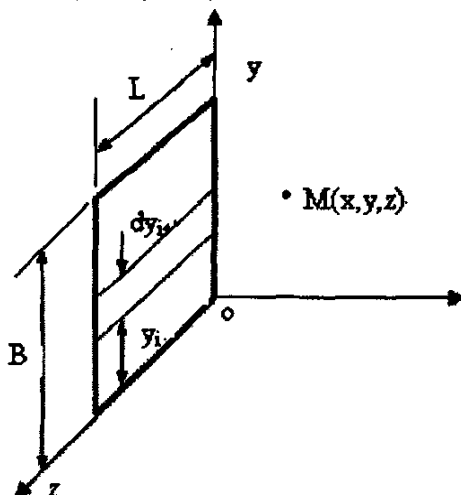


图 3-7 有限大面热源温度场

Fig. 3-7 Temperature field of finite big side hot fountain

$$d\theta = \frac{Q_m dy_i}{2c\rho(4\pi at)} \cdot e^{-\frac{x^2+(y-y_i)^2}{4at}} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4at}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-L}{\sqrt{4at}}\right) \right] \quad (3-5)$$

整个面热源对 M 点造成的总的温升为公式(3-6):

$$\theta = \frac{Q_m}{2c\rho(4\pi at)} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4at}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-L}{\sqrt{4at}}\right) \right] \cdot e^{-\frac{x^2}{4at}} \cdot \int_0^B e^{-\frac{(y-y_i)^2}{4at}} dy_i \quad (3-6)$$

解后得公式(3-7):

$$\theta = \frac{Q_m}{4c\rho(4\pi at)^{1/2}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4at}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-L}{\sqrt{4at}}\right) \right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4at}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-B}{\sqrt{4at}}\right) \right] \quad (3-7)$$

公式(3-7)即为瞬时有限大面热源的温度场。

2. 热源发热量的计算是铣刀片温度场数学模型研究中的核心, 我们已经通过试验测得了铣刀片内部 6 个点的温度, 但是热源的发热量 Q_m 还未得到, 可以通过式(3-7)反推出 Q_m 。

由试验数据分析过程可以知道各个测温点的温度方程。下面以波形刃铣刀片切削参数为 $n=385\text{rpm}$, $f=36\text{mm/min}$, $a_p=2\text{mm}$ 的试验为例, 进行热源发热量 Q_m 的计算, 其余的试验数据的分析步骤和过程与此相同。

已知第 1 点的温度-时间(T - t)曲线为: $T_1=2013495862t_1^4-51843592t_1^3-259355t_1^2+21604t_1+143$; 可以得到第 1 点的温升为公式(3-8):

$$\begin{aligned}\theta_1 &= T_1 - T_{\text{室温}} = T_1 - 25 \\ &= 2013495862t_1^4 - 51843592t_1^3 - 259355t_1^2 + 21604t_1 + 118\end{aligned}\quad (3-8)$$

根据试验后测得的磨损区的尺寸: 长 $L=3.05\text{mm}=0.305\text{cm}$, 宽 $B=1.37\text{mm}=0.137\text{cm}$ 。可以近似认为热源的尺寸与磨损区的尺寸相同, 即热源为一窄带状或长方形热源, 热源的尺寸为: 长 $L=0.305\text{cm}$, 宽 $B=0.137\text{cm}$ 。

则根据公式(3-7), 得到公式(3-9):

$$Q_{m1} = \frac{\theta_1 \cdot 4c\rho(4\pi at)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\frac{z^2}{4at}}}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4at}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-0.305}{\sqrt{4at}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4at}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.137}{\sqrt{4at}}\right) \right]}\quad (3-9)$$

将式(3-8)代入式(3-9)得到公式(3-10):

$$Q_{m1} = \frac{(2013495862t_1^4 - 51843592t_1^3 - 259355t_1^2 + 21604t_1 + 118) \cdot 4c\rho(4\pi at)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\frac{z^2}{4at}}}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4at}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-0.305}{\sqrt{4at}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4at}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.137}{\sqrt{4at}}\right) \right]}\quad (3-10)$$

对于采集点而言, 开始采集的时刻并不是切削的开始时刻, 因而需要对上面的公式进行时刻的转化。最后得到发热量 Q_{m1} 为公式(3-11):

$$Q_{m1} = \frac{(2013495862t_1^4 - 51843592t_1^3 - 259355t_1^2 + 21604t_1 + 118) \cdot 4c\rho(4\pi at)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\frac{z^2}{4at}}}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4a(t_1+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-0.305}{\sqrt{4a(t_1+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4a(t_1+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.137}{\sqrt{4a(t_1+1)}}\right) \right]}\quad (3-11)$$

第 1 点的坐标为(0.08,0.2,0.2)(单位: cm), 代入上式得公式(3-12):

$$Q_{m1} = \frac{(2013495862t_1^4 - 51843592t_1^3 - 259355t_1^2 + 21604t_1 + 118) \cdot 4c\rho(4\pi at)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\frac{(0.08)^2}{4a(t_1+1)}}}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t_1+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-0.105}{\sqrt{4a(t_1+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t_1+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{0.063}{\sqrt{4a(t_1+1)}}\right) \right]}\quad (3-12)$$

根据第 2 点至第 6 点的温度-时间方程还可以算出 Q_{m2} 至 Q_{m6} ，对 Q_{m1} ... Q_{m6} 取平均值进行计算就可以得到最终结果的 Q_m 如公式(3-13)：

$$Q_m = \frac{Q_{m1} + Q_{m2} + \dots + Q_{m6}}{6}$$

$$\approx \frac{(201349586t_1^4 - 51843592t_1^3 - 259355t_1^2 + 21604t_1 + 118) \cdot 4c\rho(4\pi at)^{1/2} \cdot e^{\frac{(0.08)^2}{4a(t+1)}}}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-0.105}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{0.063}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right]} \quad (3-13)$$

3.2.2 温度场数学模型的建立

3.2.2.1 温度场数学模型的计算 我们已经求得了热源的发热量 Q_m ，只要把 Q_m 反代回有限大面热源温度场的温升方程，就可以求得温度场数学表达式。把式(3-13)代入(3-7)并整理就可以得到公式(3-14)：

$$\theta = \frac{\theta_1 \cdot e^{\frac{(0.08)^2 - x^2}{4a(t+1)}} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-0.305}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.137}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right]}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-0.105}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{0.063}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right]} \quad (3-14)$$

其中 $\theta_1 = 201349586t_1^4 - 51843592t_1^3 - 259355t_1^2 + 21604t_1 + 118$

上式(3-14)就是该种切削参数($n=385\text{rpm}$, $f=36\text{mm/min}$, $a_p=2\text{mm}$)下的温度场数学表达式， x 、 y 、 z 为导热体内各点的坐标。

3.2.2.2 表面受热密度函数 对于表面受热密度函数，分为以下 2 种情况：

1. 在波形曲面上，即 $0 \leq y \leq 0.3$ 时，根据波形刃铣刀片的刃形函数：

$$A = 0.02 \cos(2\pi / 0.3) \phi$$

计算得坐标为 $x = (0.02 - 0.02 \cos(2\pi / 0.3 \times z)) + y \cdot \operatorname{tg} \gamma_0$ ，其中 γ_0 为前角，则 θ 的表达式就是公式(3-15)：

$$\theta = \theta_1 \cdot e^u \cdot \frac{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-0.305}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.137}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right]}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-0.105}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{0.063}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right]} \quad (3-15)$$

其中： $u = \frac{(0.08)^2 - [(0.02 - 0.02 \cos(2\pi / 0.3 \times z)) + y \cdot \operatorname{tg} \gamma_0]^2}{4a(t+1)}$

2. 在无槽型部位，即 $x=0$, $y>0.3$, $z>0.3$ 时， θ 表达式为公式(3-16)：

$$\theta = \frac{\theta_1 \cdot e^{\frac{(0.08)^2}{4a(t+1)}} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-0.035}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.137}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right]}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-0.105}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{0.063}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right]} \quad (3-16)$$

可以看出, 此计算公式只是比 6 个测温点的计算公式多乘了一个大于 1 的系数, 这是合乎理论和实际的。而实际上, 由于硬质合金的导热性能非常好, 6 个测温点与对应的表面上的点的温度值相差并不大。

需要注意的是, 以上的公式中, 坐标的单位为了与热扩散率和刀具材料密度的单位一致, 都是以厘米(cm)为单位。

3.3 本章小结

利用传热学理论中的热源法, 以点热源为基础, 基于试验数据, 建立了不规则面热源作用下三维复杂槽型铣刀片的温度场数学模型和受热密度函数, 并对其特例进行了验证。此函数可以为建立基于元胞自动机的温度场模型提供初始化的温度场函数, 是元胞自动机应用于温度场模拟的基础, 同时也可以作为铣刀片槽型优化设计的目标函数, 为进一步研究铣刀片的优化判定打下了基础。

第4章 基于元胞自动机的温度场模型建立

4.1 引言

在机械铣刀片切削过程中, 铣刀片在切削过程中受到周期性的热冲击, 切削热产生的恶劣的温度场对刀片造成破损, 温度场在铣刀片切削过程中呈现出非常复杂的变化, 研究切削热和切削温度的产生和变化规律是揭示刀具破损磨损的产生机理的重要手段。为确保系统正常运行, 提高设备利用率, 解决好车削断屑和铣削刀具破损成为自动化生产过程中的关键问题之一。如何减少或避免铣刀片破损, 控制车削切屑形成, 使之有规律地卷曲并折断是提高机械制造过程生产效率的关键, 也是国内外急需解决的学术上和技术上的难题。为了从根本上解决这一难题, 我们将采用元胞自动机自组织方法, 用元胞自动机模型来模拟切削过程中温度场的分布, 对基于温度场的模糊综合评判结果进行槽型重构等研究。

4.2 二维元胞自动机温度场模型的建立

元胞自动机是 von Neumann 最早提出用于模拟生命系统所具有的自复制功能的, 其数学构造非常简单: 时间、空间和状态变量都是离散集, 且状态有限, 根据简单的局部规则同时运行而得到所有元胞在某时刻的状态全体, 即 CA 的一个构形(Configuration), 元胞自动机的构形随时间变化而呈现出丰富而复杂的瞬间时演化过程。因此元胞自动机可作为一个无穷维动力系统, 它不仅是计算理论的重要模型, 吸引了大批计算机领域的科学去研究其计算力, 而且广泛应用于如数学、物理学、生物学、化学、地理学和经济学等各学科中的非线性现象和分形结构的研究^{[42][43]}。

CA 模型是建立在一个简单状态集和一套本地交互规则基础上的, 是可以自我发展, 自我完善的, 可以不断扩展并可以按一定规则描述复杂系统状态和预测系统未来的自动机器^{[44][45]}。元胞自动机由元胞、元胞的状态空间、邻居及局部规则四部分组成。可用一个四元组表示: $A=(L_d, S, N, f)$ 中 A 为一个元胞自动机; L 为元胞空间, d 为元胞空间的维数; S 为元胞的有限状态集; N 表示一个所有邻域内元胞的组合, 为包含 n 个不同元胞的空间矢量, 表示为

$N=(S_1, S_2, \dots, S_n)$, n 是邻居元胞个数, $S_i \in Z$ (整数集), $i=1, 2, \dots, n$; f 表示将 S_n 映射到 S 上的一个状态转换函数。

本文的目的就是用元胞自动机的这种原理来模拟铣刀片在切削过程中产生温度场的分布情况。首先用元胞自动机来模拟铣刀片切削过程中平面温度场的分布情况, 即二维元胞自动机温度场模型的建立。

4.2.1 元胞的划分

元胞自动机的原理是需要对所研究的客体进行网格划分, 由于要建立 2D 元胞自动机模型, 所以对刀具体表面进行划分, 在区域内进行网格划分, 将连续的求解域离散为不连续的点, 形成离散网格, 所得到的每一个网格可以被定义为一个元胞, 本文所要研究的就是元胞之间温度是如何传递的。对于元胞空间的划分, 通常有三角形、四方形以及六边形三种常用的划分方法。对于三角形划分, 虽然邻居元胞数较少可以减小计算量, 但是三角形划分不利于计算机的表达和显示; 而六边形划分的优点在于体现各向同性, 这里研究的问题的元胞自动机的规则已经很好地体现了这各向同性的特点。所以综合考虑下, 不使用三角形划分和六边形划分, 而采用便于表达和显示的四方形划分。二维元胞自动机模型如图 4-1 所示, 红色部分为切削区, 就是这部分产生热源, 而影响到刀片其他部分的温度。

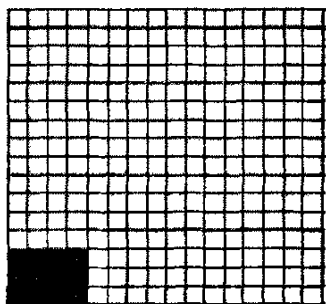


图 4-1 二维元胞自动机模型

Fig. 4-1 CA model of two dimension

4.2.2 元胞邻居的确定

要建立的温度场模型中温度的传递主要就是相邻元胞之间的相互影响, CA 原理是要根据邻居的规则来研究温度的传递, 所以对于温度场模型我们必须定义元胞之间的邻居规则, 在这里我们采用元胞自动机理论中的

Von.Neumann 型, 如图 4-2 所示, 这个规则定义了中心元胞在某一时刻受到周围的四个元胞温度的影响, 而对于边线元胞只有 3 个邻居, 边角元胞只有 2 个邻居。它的下一个时刻的状态是受到它本身和它邻居温度的共同影响而产生变化的。

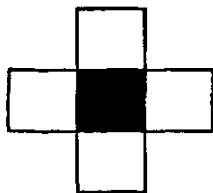


图 4-2 Von.Neumann 型

Fig. 4-2 Von.Neumann model

4.2.3 局部规则的确定

局部规则在建立元胞自动机模型中是最重要的步骤, 温度是如何传递的是根据这个规则而制定的, 本文采用的是 Von.Neumann 型的邻居, 所以研究中心元胞周围的四个元胞对它温度的影响。用热力学来研究元胞之间温度的传递是局部规则制定的基础。物体内部温度的变化与热量有关, 热量的增减引起温度的升降, 为了确定温度场, 必须研究热量在物体内部传导的过程。温度在时间域和空间域中的分布, 称为温度场, 它可表示为公式(4-1):

$$T=T(x, y, z, t) \quad (4-1)$$

若温度不随时间变化, 即 $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, 则 $T=T(x, y, z)$ 称为稳定温度场, 若温度沿 z 向不变, 则称为平面温度场。在任一瞬时, 连接场内相同温度值的各点, 就得到此时刻的等温面。沿等温面切向, 温度不变。而沿垂直等温面的法向, 温度变化率最大。表示一点最大增温率的矢量, 称为温度梯度, 即公式(4-2):

$$\nabla T = n_0 \frac{\partial T}{\partial n} = i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4-2)$$

其中 n_0 是单位矢量, 沿等温面的法线指向增温方向。

在单位时间内通过单位面积的热量, 称为热流密度, 即公式(4-3):

$$q = \frac{1}{s} \frac{dQ}{dt} \quad (4-3)$$

某一点的最大热流密度矢量是沿等温面的法线且指向降温方向。根据传导定律, 热流密度与温度梯度成正比而方向相反, 即公式(4-4):

$$q = -\lambda \nabla T = -n_0 \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4-4)$$

λ 称为导热系数。热流密度在 x 方向的分量是公式(4-5):

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \cos(n, x) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, (x, y, z) \quad (4-5)$$

类似, 在任意方向的热流密度, 等于导热系数乘以温度在该方向的变化率的负值。其中, q_x 为 x 方向上的热流密度; λ_x 为材料沿 x, y, z 方向的热导率; $\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}$ 为 x 方向上的温度梯度。我们可以得到导热方程为公式(4-6):

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q \quad (4-6)$$

式中 ρ 为材料的密度(kg/m^3);

c 为材料的比热容($\text{J}/(\text{kgK})$);

t 为时间(s);

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为材料沿 x, y, z 方向的热导率($\text{W}/(\text{mK})$);

$Q = Q(x, y, z, t)$ 为材料内部的热源密度(W/kg)。

上式中, 第一项为体元升温需要的热量; 右侧第一、二和三项是由 x, y 和 z 方向流入体元的热量; 最后一项体元内热源产生的热量。微分方程的物理意义: 体元升温所需的热量应该等于流入体元的热量与体元内产生的热量的总和。由于我们研究的是二维的温度场模型, 所以简化后的方程, 二维非稳态热传导方程为公式(4-7):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho Q \quad (4-7)$$

在区域内进行网格划分, 将连续的求解域离散为不连续的点, 形成离散网格, 网格步长分别为 $x_{i+1,j} - x_{i,j} = \Delta x$, $y_{i,j+1} - y_{i,j} = \Delta y$, 划分的单元格步长可以是均匀的, 也可以是不均匀的。此模型我们取单元格步长是均匀的, 如图 4-3 所表示:

对于二维各向同性, 无内热源的非稳态热传导微分方程, 利用中心差分法来研究, 差分解法是将函数用离散点的函数值表示, 将微分用有限差分表示, 将导数用有限差商表示, 从而将微分方程化为差分方程—代数方程, 使求解微分方程的问题化为求解代数方程的问题。中心差分法公式(4-8)、(4-9)、(4-10)如下:

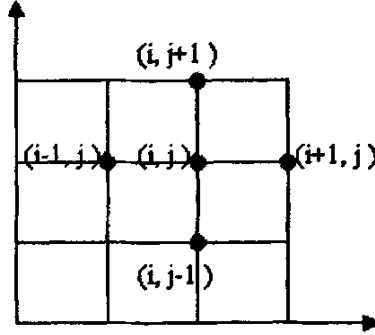


图 4-3 邻居模型

Fig. 4-3 Neighbor model

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i-1,j} + T_{i+1,j} - 2T_{i,j}}{(\Delta x)^2} \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{i,j-1} + T_{i,j+1} - 2T_{i,j}}{(\Delta y)^2} \quad (4-9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t}{\Delta t} \quad (4-10)$$

将(4-8)、(4-9)、(4-10)代入(4-7)可得公式(4-11):

$$\frac{T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{T_{i,j-1}^t + T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i-1,j}^t + T_{i+1,j}^t - 2T_{i,j}^t}{(\Delta y)^2} \right) \quad (4-11)$$

在划分单元时, 我们令 $\Delta x = \Delta y$, 则上式可化为公式(4-12):

$$T_{i,j}^{t+1} = \frac{\lambda}{\rho c} * \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i-1,j}^t + T_{i+1,j}^t + T_{i,j-1}^t + T_{i,j+1}^t) + \left(1 - \frac{\lambda}{\rho c} * \frac{4 * \Delta t}{(\Delta x)^2} \right) T_{i,j}^t \quad (4-12)$$

上式即为元胞在绝热条件下的温度传递公式, 即可以通过中心元胞的温度值和邻居元胞的温度值得到下一时刻该元胞的温度。我们把公式(4-12)定义为元胞自动机的局部规则。

通过对元胞自动机温度场模型中元胞, 元胞空间, 邻居规则, 局部规则的建立完成, 铣刀片温度场模型建立完成, 我们把离散的网格定义为元胞, 元胞空间为二维, 邻居采用 Von-Neumann 型, 局部规则为推导公式(4-12)。

4.2.4 二维元胞自动机温度场模型的确定

通过对元胞自动机温度场模型中重要元素的确定以及切削区温度场的确

定, 我们可以建立二维元胞自动机温度场模型。

在刀片进行切削的过程中, 铣刀片在切削过程中受到周期性的热冲击, 从元胞自动机的局部规则的角度出发, 找寻在简单的热传导问题中, 局部元胞之间的本地规则, 来模拟温度在铣刀片中的传递。从提高三维槽型铣刀片的切削性能, 优选出性能更好的槽型出发, 建立一套基于温度场的利用元胞自动机的研究方案, 来优化三维槽型铣刀片的切削性能。

铣刀片在切削过程中由于摩擦产生的切削热是破坏刀具的重要原因, 我们就是要研究由切削热产生的温度场所带来的温度在刀具内的分布情况。我们通过公式(4-13)可以计算切削区的温度场的温度值。

$$\theta = \frac{\theta_1 \cdot e^{\frac{(0.08^2 - x^2)}{4\alpha(t+1)}} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-0.305}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.137}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) \right]}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-0.105}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{0.063}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) \right]} \quad (4-13)$$

其中 $\theta_1 = 2013495862t_1^4 - 51843592t_1^3 - 259355t_1^2 + 21604t_1 + 118$, 上式(4-13)就是该种切削参数($n=385\text{rpm}$, $f=36\text{mm/min}$, $a_p=2\text{mm}$)下的温度场数学表达式, x 、 y 、 z 为导热体内各点的坐标。

然后我们再通过对上一节的元胞自动机中各个因素的研究来模拟温度在刀片中的分布情况。在元胞自动机的组成中局部规则的确定是决定温度在刀片中是如何传递的, 这是元胞自动机的核心因素, 即公式(4-14)的确定:

$$T_{i,j}^{t+1} = \frac{\lambda}{\rho c} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i-1,j}^t + T_{i+1,j}^t + T_{i,j-1}^t + T_{i,j+1}^t) + \left(1 - \frac{\lambda}{\rho c} \cdot \frac{4 \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \right) T_{i,j}^t \quad (4-14)$$

温度就是通过公式(4-14)来在各个元胞之间传递的, 通过公式(4-14)我们就可以来模拟温度在刀片中各个不同部分的分布以及在切削过程中不同因素变化所带来的温度的变化, 这样来为如何生产更好的三维复杂铣刀片提供评判机制, 从而达到槽型重构的目的。

4.3 本章小结

元胞自动机模型的建立是本文的核心内容, 本章主要研究基于元胞自动机的铣刀片的温度场中元胞是如何划分的, 元胞邻居和元胞的规则是如何确定的, 最后通过元胞自动机模型中各个重要组成部分的确定来建立二维元胞自动机温度场模型。此模型是研究如何使铣刀片在切削过程中达到最优的基础。

第5章 基于 2D 元胞自动机温度场的评价准则

铣刀片温度场分析与评价是根据铣刀片受热密度函数和 2D 元胞自动机温度场模型的原始数据,对铣刀温度场进行的综合评判。评价准则的建立为选择铣刀片设计方案、选择适当的加工用的铣刀片和判断现有铣刀片设计的合理性提供参考。对于基于元胞自动机的铣刀片温度场的评价本文尚属首次,而影响温度场的因素又很多,故而本文从诸多方面来进行温度场评价准则的研究。

本文主要在第四章的基础上,讨论切削参数和刀具几何参数对切削温度场的影响,并在给定的参数范围内寻求其最优值,同时来考虑刀具的使用寿命等因素。

5.1 切削参数对温度场的影响

5.1.1 切削速度对温度场的影响

从温度场的分析中可以看出,切削速度直接影响切削温度场。我们利用第三章推导的温度场数学表达式(5-1)和第四章推导的二维元胞自动机模型公式(5-2)来计算不同切削速度对温度场的影响。

$$\theta = \frac{\theta_1 \cdot e^{\frac{(0.08)^2 - x^2}{4\alpha(t+1)}} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-0.305}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.137}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) \right]}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-0.105}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{0.063}{\sqrt{4\alpha(t+1)}}\right) \right]} \quad (5-1)$$

其中 $\theta_1 = 2013495862t_1^4 - 51843592t_1^3 - 259355t_1^2 + 21604t_1 + 118$

$$T_{i,j}^{t+1} = \frac{\lambda}{\rho c} * \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i-1,j}^t + T_{i+1,j}^t + T_{i,j-1}^t + T_{i,j+1}^t) + \left(1 - \frac{\lambda}{\rho c} * \frac{4 * \Delta t}{(\Delta x)^2} \right) T_{i,j}^t \quad (5-2)$$

在给定的切削速度范围内,切削速度越高,前刀面上切削区和刀屑接触区的温度值就越高,当切削速度从 220r/min 升高到 550r/min 时,前刀面上的温度最大升高了 200°C。铣刀片的温度场与切削速度的关系如图 5-1 所示。

从图中我们可以看出,随着切削速度的增加,切削区的温度也随着增加,这说明不同的切削速度影响着温度的产生和分布。

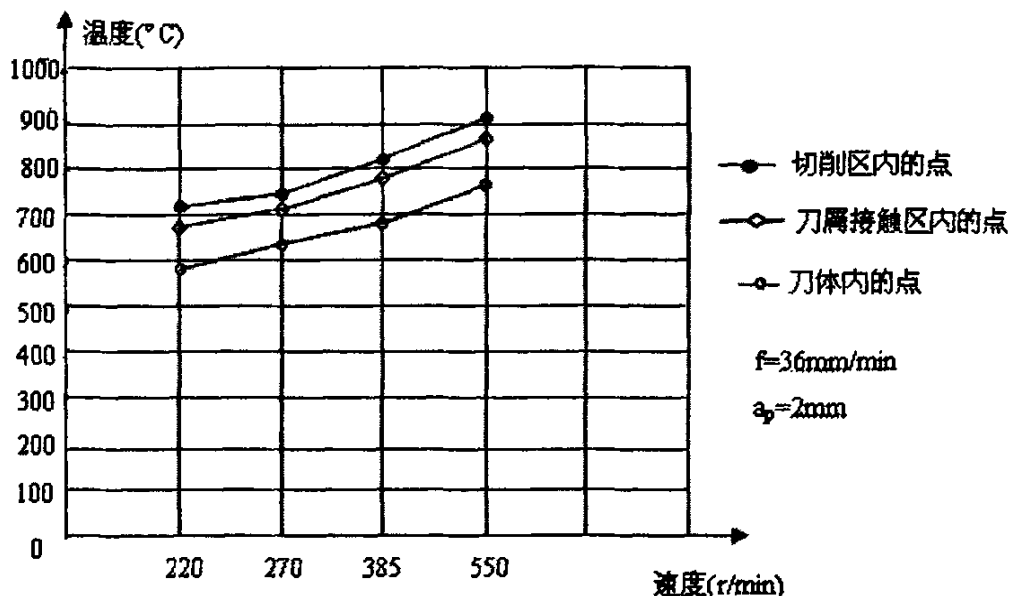


图 5-1 温度场与切削速度的关系

Fig. 5-1 The relationship between temperature field and cutting speed

5.1.2 切削深度对温度场的影响

同理我们利用第三章推导的温度场数学表达式(5-1)和第四章推导的二维元胞自动机模型公式(5-2)来计算不同切削速度对温度场的影响。对 $a_p=1\text{mm}$ 、 $a_p=2\text{mm}$ 和 $a_p=3\text{mm}$ 三种切削深度进行了温度场分析,当切削深度为从 1mm 增加到 3mm 时,前刀面的温度变化不大,这是因为切削深度增大时,切削区产生的热量虽然成比例地增加,但因切削刃参加切削工作的长度也成比例地增加,改善了切削的条件。刀片上点的最高切削温度和进给量的关系如图 5-2 所示(横坐标为铣削一周,刀具切入的时间,纵坐标为切削温度):我们可以看到无论是切削区内的点,刀屑接触区内的点还是刀体内的点,但切削深度逐渐增加的时候,温度也是随着增加的,由此,我们可以得到温度是随着切削深度的增加而逐渐升高的。

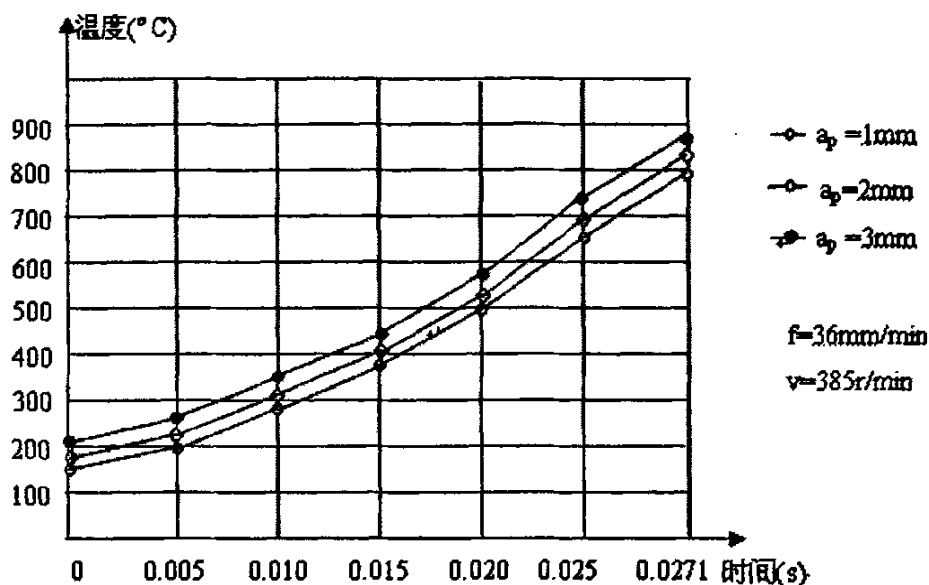


图 5-2 前刀面上一点的温度与切削深度之间的关系

Fig. 5-2 The relationship between temperature and back engagement of some point on the rake face of the tool

5.1.3 进给量对温度场的影响

我们利用第三章推导的温度场数学表达式(5-1)和第四章推导的二维元胞自动机模型公式(5-2)来计算不同切削速度对温度场的影响。进给量对切削温度场也有一定的影响，随着进给量的增大，单位时间内的金属切削量增多，切削过程产生的切削热也增多，使切削温度上升。刀具切入时，刀片上点的最高切削温度和进给量的关系如图 5-3 所示（横坐标为铣削一周，刀具切入的时间，纵坐标为切削温度）。但是切削温度随着进给量的增大而升高的幅度不如切削速度那么明显。

由不同切削参数对温度场的影响所绘制图像我们可以看到，由于不同的切削速度，不同的切削深度，不同的进给量，所产生的温度场是不同的，因此我们可以由图象看出较高的切削速度、较大的切削深度和进给量的增大会带来较高的温度场。

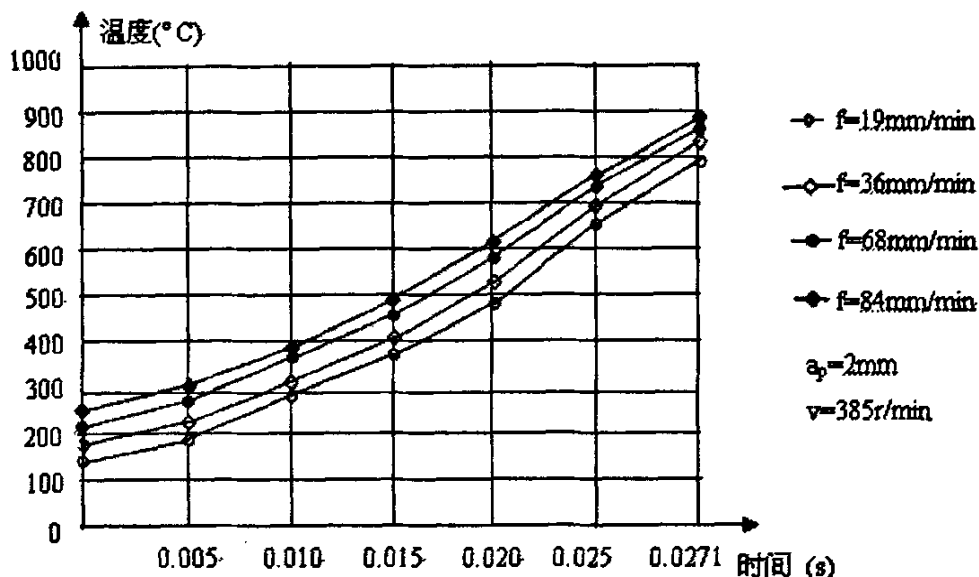


图 5-3 前刀面上一点的温度与进给量之间的关系

Fig. 5-3 The relationship between temperature and feed of some point on rake face of the tool

5.2 刀具槽型对温度场的影响

对刀具的温度场影响最大的因素之一就是铣刀片的槽型，每种槽型的铣刀片的温度场都不相同。

从前人的实验经验我们得出：对于平均铣削温度而言，平刀片的刀-屑接触区的平均铣削温度要高于波形刃铣刀片，而波形刃铣刀片平均铣削温度较低。这是由于平刀片的切削力大，一方面，铣削时切削层金属的弹性变形和塑性变形程度大，产生的热量多；另一方面，切削力大，切屑与前刀面之间的摩擦严重，由摩擦产生的热量也多。因此平刀片的温度较高。而波形刃铣刀片由于其前刀面形状复杂，散热面积大，因此其平均铣削温度低。

同时，对切入切出过程的分析表明，在切入时，平刀片的铣削最高温度集中在刀尖及主切削刃处，而且比波形刃要高，刀屑接触区附近存在较大的温度梯度。切出时，刀片在空气中冷却，温度降低，温度最高处离刀尖和主切削刃有一定距离。刀屑接触区温度的升降，在刀尖及切削刃附近产生热应力，对应每一个切入切出过程，应力变化一次，频繁变化的应力如果达到了极限，将导致刀尖和切削刃的破损。而波形刃则由于曲面前刀面槽型的存在，切屑与点刀

面间接触面积大, 最高温度小于平刀片的最高温度, 铣削温度梯度小, 产生的热应力小于平刀片, 不易产生局部破损。

因此, 由以上论述就可以很容易看出由刀片的槽型对温度场的评价的标准: 在相同的铣削参数下, 波形刃铣刀片的温度场优于平刀片的温度场。

5.3 刀具几何参数对温度场的影响

刀具的几何参数中对温度场有较大影响的首要的就是刀具的刃形, 一定的加工条件必定对应适宜的刃形。另一个参数则是铣刀片的前角。对波形刃铣刀片可以依据前面建立的受热密度函数来进行评价。根据第三章式(3-15), 在有槽型的部位的温度场的公式为式(5-3):

$$\theta = \xi \cdot \frac{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-0.305}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.137}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right]}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-0.105}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{0.063}{\sqrt{4a(t+1)}}\right) \right]} \quad (5-3)$$

$$\text{其中 } \xi = \theta_1 \cdot e^{\frac{(0.08)^2 - [(0.02 - 0.02 \cos(2\pi / 0.3 \times z)) + y \cdot \lg \gamma_0] P}{4a(t+1)}}$$

从上面的公式可以看出, 增大前角, 能够降低刀片的温度。因此, 前角越大, 刀片的温度越低。而铣刀片设计发展的一个趋势正是轴向前角有增大的趋势, 本文从受热密度函数和温度场的角度也验证了这种趋势的合理性。从对铣刀片的定性分析来看, 前角较大, 铣削时的切削层金属的弹性变形和塑性变形小, 铣削力也小, 因此加工过程中产生的热明显减少。

由此应认为, 前角较大的铣刀片具有较低的铣削温度, 前角较大的铣刀片的温度场是合理的。

5.4 本章小结

本章是在第三章和第四章的基础上完成的, 通过第三章建立的温度场数学模型函数和第四章建立的元胞自动机模型来判断切削参数, 刀具槽型, 刀具的几何参数是如何影响温度场的, 最后根据不同参数对温度场的影响来讨论使铣刀片在切削过程中能使其达到最优化的推理机制, 从而判断铣刀片在什么条件下进行切削能达到最优。本章的内容把元胞自动机理论应用与模拟温度的分布实例化, 并通过它的应用得到了优化切削性能的推理机制。

结 论

本文以元胞自动机为基础，铣刀片在切削过程中产生的温度场为研究对象，主要从提高三维槽型铣刀片的切削性能，优选出性能更好的槽型出发，来研究基于温度场的元胞自动机模型。此研究对于优选铣刀片、优选切削参数和新槽型的开发非常具有实际意义。

本文主要获得的结论如下：

1. 通过铣刀片的切削温度的实验，利用传热学理论中的热源法，以点热源为基础，基于试验数据，建立了不规则面热源作用下三维复杂槽型铣刀片的温度场数学模型和受热密度函数，此函数可以作为铣刀片槽型优化设计的目标函数，为进一步研究铣刀片的优化判定打下了基础。

2. 通过对元胞自动机中元胞，元胞邻居，局部规则等重要元素的确定，建立了基于温度场的二维元胞自动机模型，此模型可以模拟在切削过程中温度在铣刀片中是如何分布的，这为提出优化铣刀片的切削性能的推理机制打下了良好的基础，提供了有力的依据。

3. 通过建立的二维元胞自动机温度场模型，来对切削参数，刀具槽行，刀具的几何参数对温度的影响进行判定，最后根据不同参数对温度场的影响来讨论使铣刀片在切削过程中能使其达到最优化的推理机制，从而判断铣刀片在什么条件下进行切削能达到最优。

4. 虽然本文建立了二维元胞自动机温度场模型，但从不同方面说明了二维模型的局限性。由于时间有限，未对其它的关键技术，如：三维元胞自动机温度场模型，以及基于三维模型的推理机制进行深入的研究，但要想在优化槽型这方面取得更深入的成果，还应在元胞自动机这方面投入更大的研究。

参考文献

- 1 杨吉新, 王乘. 元胞单元法. 固体力学学报, 2004, 25(2): 97~98
- 2 杨吉新. 元胞单元法理论研究及程序设计. 武汉理工大学 2002, 9(2): 17~19
- 3 杨吉新. 并行元胞单元法. 计算力学学报, 2006, 23(1): 35~37
- 4 Shinozuka J, Obikawa T. Chip Breaking Analysis from The Viewpoint of The Optimum Cutting Tool Geometry Design. Journal of materials processing technology, 1996, 62(4): 345~351
- 5 Araki T, Yamamoto S. Improvement of Chip Disposability of Erratic Steels by Containing Martensitic Microstructures. American Society for Metals, 2002, 10(6): 131~138
- 6 Tan Guangyu, Yuan Julong. Cause of Brittle Tool Exit Failure in Intermittent Cutting. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 4(2): 107~111
- 7 杨吉新, 王乘. 三维实体问题分析中的元胞单元法. 武汉理工大学学报, 2004, 28(1): 22~25
- 8 贾红伟, 何炎祥. 演化元胞自动机函数优化算法案例研究. 计算机工程与应用, 2005, 41(26): 100~102
- 9 Paul Halpern, Sticks. A Guide to Structurally Dynamic Cellular Automata. Am. J. Phys, 2003, 57(5): 28~39
- 10 A. I. Adamatskii. Identification of Fuzzy Cellular Automata. Automatic Control and Computer Sciences, 1991, 5(6): 75~80
- 11 王安麟, 王炬香. 基于 CA 的结构拓扑设计的研究. 机械强度, 2001, 12(13): 100~102
- 12 曹伟. 元胞自动机与计算机模拟. 丹东纺专学报, 2005, 12(2): 23~24
- 13 杨吉新, 张宝魁. 从力矩分配法到元胞单元法. 武汉理工大学学报, 2004, 26(6): 36~37
- 14 李才伟, 胡瑞安. 自组织现象的元胞自动机模拟与图示. 计算机辅助设计与图形学学报, 1997, 9(6): 532~537
- 15 李才伟, 胡瑞安. 自组织过程的随机元胞自动机模拟. 华中理工大学学报, 1996, 24(9): 64~67
- 16 李才伟, 胡瑞安. 自组织现象的元胞自动机模拟与图示. 计算机辅助设计

- 与图形学学报, 1997, 9(6): 532~537
- 17 杨吉新, 王乘. 非线性元胞单元法初探. 武汉理工大学学报, 2003, 25(9): 32~35
- 18 Li Xia, Anthony Gar-On Yeh. A Cellular Automata Model to Simulate Development Density for Urban Planning. Environment and Planning B, 2002, 29: 431~450
- 19 唐小兵. 元胞自动机方法加速度技术初探. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(6): 602~605
- 20 唐小兵, 沈成武. 平面桁架力学分析中的元胞自动机方法初探. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(2): 105~108
- 21 邓春梅, 陈吉红. 元胞自动机曲线曲面自组织拟合. 机械与电子, 2000, 23(5): 45~47
- 22 Octavio Miramontes, Ricard V. Solé. Collective Behaviour of Random-Activated Mobile Cellular Automata. Physica D, 1993, 63(3): 145~160
- 23 Parimal Pal Chaudhuri, Dipanwita Roy Chowdhry. Additive Cellular Automata. IEEE Computer Society Press, 2004, 9(4): 39~40
- 24 黄兵花, 孔令江. 一维元胞自动机随机交通流模型的研究. 物理学报, 2001, 5(2): 30~35
- 25 Li Xia. A Constrained CA Model for The Simulation and Planning Of Sustainable Urban Forms by Using GIS. Environment and Planning B, 2001, 28(9): 733~753
- 26 王安麟, 王炬香. 基于 CA 的结构拓扑设计的研究—平面薄板加强筋拓扑形态创成的仿真. 机械强度, 2001, 23(2): 181~186
- 27 王安麟, 姜涛. 基于进化元胞自动机的结构拓扑优化. 机械工程学报, 2005, 41(2): 198~200
- 28 Zheng Bojin, Li Yuanxiang. Function Optimization Algorithm based on Cellular Automata. Jisuanji Gongcheng/Computer Engineering, 2003, 29(19): 66~67
- 29 毛宽民, 陈吉红. 基于元胞自动机的曲线曲面迭代逼近算法. 机械工程学报, 2001, 29(4): 38~43
- 30 闫广武. 元胞自动机与人工生命研究进展. 吉林大学学报, 2003, 41(1): 40~44
- 31 Fei Qian, Yue Zhao. Learning Cellular Automata for Function Optimization

- Problems. T IEE Japan, 2001, 121(1): 261~268
- 32 Yukio Gunji. The Algebraic Properties of Finite Cellular Automata. *Physica D*, 2002, 6(41): 282~294
- 33 Liu Defu, Yu Xiaoxia. Finite Element Analysis of the Temperature Distribution in Orthogonal Metal Machining. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1999, 8(4): 386~391
- 34 冯春, 马建文. 多维参数反演遗传算法的元胞自动机模型与应用. *地球信息科学*, 2005, 7(1): 34~36
- 35 Jesús Urias. Arithmetic Representations of Cellular Automata. *Physica D*, 2004, 68(93): 437~446
- 36 Berliner E M, Knainov V P. Analytic Calculation of the Temperature Field and Heat Flows on the Tool Surface in Metal Cutting due to Sliding Friction. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1991, 143(5): 379~395
- 37 刘美娟. 三维槽型铣刀片温度场分析及槽型重构技术研究. 哈尔滨理工大学硕士论文, 2003: 27~29
- 38 Hentze H, Trinter H. Chip Breaking Improvement Through Cold Extrusion Molded Free-Cutting Steel. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 113(7): 28~30
- 39 王凤丽. 三维槽型铣刀片温度场可视化及评价准则研究. 哈尔滨理工大学硕士论文, 2003: 26~27
- 40 郭强, 董丽华. 不同槽型铣刀片的切削温度场分析. *工具技术*, 2000, 9(9): 3~5
- 41 李振加. 三维槽型铣刀片受热密度函数与温度场数学模型的研究. 哈尔滨理工大学硕士论文, 2005: 24~27
- 42 王安麟, 姜涛. 进化元胞自动机算法在结构拓扑优化中的应用. *上海交通大学*, 2002, 28(4): 135~140
- 43 刘传国. 基于 CA 的结构形态设计初步研究. *上海交通大学*, 1999, 10(2): 45~47
- 44 沈成武, 唐小兵. 平面桁架力学分析中的元胞自动机方法初探. *武汉科技大学学报*, 2000, 24(2): 105~108
- 45 沈成武, 戴诗亮. 平面弹性力学中的细胞自动机方法. *清华大学学报*, 2001, 41(11): 35~38

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- 1 吕凯, 孙顺龙, 陈德运, 李广慧. 基于 2D 元胞自动机的铣刀片温度场模型建立. 哈尔滨理工大学学报 (已录用)
- 2 吕凯, 陈德运. 元胞自动机理论及模型研究. 黑龙江科技信息, 2006, (12): 69

致 谢

本文的选题、设计和撰写是在我的导师陈德运教授的认真、严格的要求和指导下完成的。在多年硕本的学习和生活中，我得到了陈老师的大力帮助和悉心指导。他严谨的治学态度，精益求精、一丝不苟的科研作风都给我留下了深刻的印象，这将深深影响我对待事业、工作和生活的态度，并让我终生受益。陈老师对我工作能力的培养和生活上的关心照顾，我将永生铭记。

同时也要感谢谭光宇教授，他对于我项目和论文的完成也给予了莫大的帮助，可以说没有谭教授在旁的心细指导，我不可能完成今天的论文，同一课题组的孙顺龙硕士在我完成课题的时候，通过与他的交流和探讨，让我开阔了思路，并给了我有益的启示，在此，也对孙顺龙硕士给予感谢。

最后感谢我的家人和亲友，是他们无私的爱护、支持和鼓励，一直在伴随着我，使得我的学习和工作能够顺利进行。在这里，我向所有帮助我的人表示衷心的感谢！再次对我的导师陈德运教授表示诚挚的谢意！

作者：[吕凯](#)
学位授予单位：[哈尔滨理工大学](#)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [孙顺龙, 谭光宇, 李广慧, 郭卫华, SUN Shun-long, TAN Guang-yu, LI Guang-hui, GUO Wei-hua](#) [基于二维元胞自动机的铣刀片温度场算法研究 -机械工程师2007, "" \(4\)](#)

切削热是铣刀片磨损和破损产生的重要原因. 对铣刀片温度场研究的传统方法是有限元法. 为了实现三维复杂槽型铣刀片槽型优化中能直接利用分析得到的数据进行自组织动态设计, 文中结合切削温度试验, 利用元胞自动机理论对铣刀片温度场进行研究, 建立了二维波形刃铣刀片温度场算法系统, 得出切削中各点的温度场, 为刀片槽型重构奠定基础.

2. 期刊论文 [吕凯](#) [基于2D元胞自动机的铣刀片温度场评价准则研究 -哈尔滨商业大学学报\(自然科学版\) 2009, 25 \(6\)](#)

切削热是铣刀片磨损和破损产生的重要原因, 研究切削热和切削温度的产生和变化规律是揭示刀具破损磨损的产生机理的重要手段. 针对这一问题, 采用元胞自动机思想, 建立以元胞自动机理论为基础的2D铣刀片的温度场模型, 研究铣刀片在切削过程中的评价准则, 解决其他技术无法评价温度场优劣的问题.

3. 期刊论文 [吕凯, 孙顺龙, 陈德运, 李广慧, LV Kai, SUN Shun-long, CHEN De-yun, LI Guang-hui](#) [基于2D元胞自动机的铣刀片温度场模型建立 -哈尔滨理工大学学报2007, 12 \(5\)](#)

铣刀片在切削过程中受到周期性的热冲击, 切削热产生的恶劣的温度场对刀片造成破损, 温度场在铣刀片切削过程中呈现出非常复杂的变化, 研究切削热和切削温度的产生和变化规律是揭示刀具破损磨损的产生机理的重要手段. 针对这一问题, 采用元胞自动机思想, 建立以元胞自动机理论为基础的2D铣刀片的温度场模型, 模拟切削过程中温度的分布, 解决其他技术无法精确计算刀片中温度场分布的问题.

4. 学位论文 [郭吉惠](#) [超快速冷却棒材组织转变的元胞自动机模拟 2007](#)

随着我国国民经济的迅猛发展, 拉动钢材消费激增, 促进了钢铁产业的快速成长. 如何节约资源、提高钢铁产品的性能和使用效率、降低生产成本, 是钢铁工作者所面临的严峻而又艰巨的重大课题.

在实际工程问题中, 将钢筋轧后控冷技术与带有预测性质的数值计算结合起来可以极大地减少在设计新材料, 新产品工艺过程中所要求的大量耗时、耗物的实验数量, 进而极大的加快新产品开发的周期, 降低生产实验的成本, 另一方面, 还可以对生产工艺的原料成份、轧制工艺及冷却制度进行优化, 创造出更高的经济效益.

本论文在以细晶化低成本高强度棒线材生产技术研究与开发项目为背景的基础上, 通过对低碳钢热轧HRB335钢筋的实验研究和理论研究分析, 其主要研究内容和结果概括为以下几个方面:

(1) 分析了超快速冷却的工艺原理, 得到棒材热轧后经超快速冷却, 可以获得铁素体+珠光体的最终组织结构.

(2) 利用ANSYS软件对棒材热轧后超快速冷却温度场进行模拟, 模拟计算结果与实际吻合较好. 分析了棒材心部, 1/2 R处, 表面处温度场分布, 模拟计算结果表明, 在现有超快速冷却设备的布置下, 棒材热轧后通过超快速冷却, 横断面上各点将会得到铁素体+珠光体的两相最终组织.

(3) 对Fe-Si-C多元合金的相变过程, 利用超组元思想建立了铁素体和珠光体相变计算相关的热力学模型, 并将其物理模型结合进元胞自动机格子中.

(4) 在MATLAB中应用元胞自动机模型, 在棒材横断面各点具有相同初始奥氏体晶粒尺寸下, 模拟分析了Φ20和Φ25mm两种规格棒材中心处, 1/2 R处, 表面处微观组织形貌. 得知各点冷却速率对棒材最终组织结构有着相当大的影响, 随着冷却速率的增加, 铁素体晶粒越来越细小, 含量越来越多, 珠光体分布越来越均匀. 组织模拟图与金相组织图的微观组织形貌符合较好.

5. 会议论文 [何东, 朱景川, 刘勇, 王洋](#) [TA15钛合金晶粒演化过程的元胞自动机模拟 2008](#)

通过引入最低能量法则、改进晶界元胞的识别算法, 建立晶粒演化的元胞自动机模型(Cellular Automata, CA). 利用该模型研究了TA15钛合金β单相状态下退火过程中的晶粒演化: 展示了晶粒形貌、拓扑结构的变化; 分析了晶粒生长过程的动力学特征并求得了生长指数; 对模拟空间的晶粒尺寸进行了标定. 结合模拟过程, 做了相关验证性实验, 二者结果吻合较好. 考察了温度因素对晶粒生长的影响, 研究了非均匀温度场下晶粒生长过程及形貌分布特征.

6. 期刊论文 [郭卫华, 谭光宇, 张玉华, 宋龙, 刘保臣, GUO Wei-hua, TAN Guang-yu, ZHANG Yu-hua, SONG Long, LIU Bao-chen](#) [基于CA的复杂槽形铣刀片规则梯度热源温度场分析 -黑龙江工程学院学报\(自然科学版\) 2008, 22 \(1\)](#)

根据铣刀片的边界条件, 结合元胞自动机理论、传热学理论、切削理论, 建立铣刀片前刀面规则梯度热源的元胞自动机模型. 采用VC++与MATLAB混合编程对算法进行可视化仿真, 得到基于元胞自动机算法的铣刀片温度场, 为直接重构铣刀片三维槽形打下基础.

7. 会议论文 [李广慧, 苏颜丽, 刘广军, 谭光宇, 融亦鸣](#) [基于CA的复杂槽形铣刀片规则梯度热源温度场分析 2008](#)

铣削过程中会产生大量的切削热, 同时在铣刀片上形成非稳态温度场分布, 是造成铣刀片破损产生磨损和粘结破损的直接原因.

本研究为了分析规则梯度热源所形成的铣刀片温度场, 建立了铣刀片的边界条件, 并结合传热学和切削理论, 建立了铣刀片前刀面规则梯度热源的元胞自动机模型, 运用元胞自动机演化算法获得了铣刀片的非稳态温度场, 为直接重构铣刀片三维槽形打下了基础.

8. 期刊论文 [许林, 郭洪民, 杨湘杰, XU Lin, GUO Hong-min, YANG Xiang-jie](#) [元胞自动机法模拟铝合金三维枝晶生长 -铸造2005, 54 \(6\)](#)

以元胞自动机模型为基础, 基于晶粒形核和生长的物理过程及热质传输过程, 建立了铝合金凝固过程微观组织形成及枝晶形貌演化的三维元胞自动机模型. 与传统的元胞自动机不同, 该模型不仅考虑了温度场扩散而且考虑了固液相中的溶质扩散、曲率过冷等重要因素. 枝晶尖端生长速度与局部过冷度的关系采用KGT(Kurz-Giovanola-Trivedi)模型, 温度场和浓度场计算采用有限差分法. 使用该模型模拟了单晶生长和多晶生长. 模拟结果表明, 所建立的模型能够合理反映质点形核、单晶粒生长和多晶粒生长, 微观组织形貌的模拟计算结果合理.

9. 学位论文 [赵贤相](#) [基于CA的铣刀片应力场及综合物理场研究 2009](#)

现代制造业正向柔性制造系统、集成制造系统、敏捷制造、虚拟制造和并行工程方向发展, 要实现理想的先进制造过程, 使数控加工设备能够正常运行, 刀具质量的好坏是决定性因素之一. 传统的平前刀面铣刀片已越来越不能满足生产的需要, 设计、开发一种切削力最小, 切削温度最低的新型铣刀片势在必行. 本论文以铣削试验为基础, 运用元胞自动机自组织理论, 对自主研发的三维槽型铣刀-波形刃铣刀片的应力场、温度场以及热-力耦合物理场进行了较为系统的理论分析, 模拟了切削过程中刀片各点的应力、温度及热力耦合后应力分布, 并进行可视化显示, 为后续刀片自组织动态设计奠定了基础.

论文研究的内容如下:

1. 对铣刀片进行了铣削力和铣削温度试验, 利用动态数据采集系统同时测得铣削过程中的铣削力和铣削温度, 并对实验数据进行分析, 为元胞自动机模型的建立提供试验数据.

2. 结合铣削力数学模型，基于局部作用原理，借用有限元离散和插值技术，引入元胞自动机的演化思路，建立了铣刀片应力场CA模型。
3. 利用传热学理论、切削理论建立了铣刀片温度传递模型；依据傅立叶导热定律、差分原理，推导了基于元胞自动机理论的铣刀片温度场计算模型。
4. 结合温度场的分析结果，对铣削过程中交变温度引起的热应力进行了数值模拟，并把热应力与机械应力耦合，得到了铣刀片的热-力耦合物理场模型。
5. 用Matlab进行编程，完成了基于元胞自动机理论的铣刀片应力场、温度场及综合物理场模型的程序实现及可视化图形显示，并把CA法得到的应力场与有限元法计算结果进行比较，把CA法得到的温度场结果对照试验采集到的温度值，结果能够达到期望的精度；运用元胞自动机理论对铣刀片应力场、温度场及热-力耦合物理场进行了分析研究。

10. 学位论文 [张艳华 A1-Cu合金近液相线铸造中组织演变的计算机模拟](#) 2007

半固态成形(Semi-Solid Metal Process, 简称SSM)是在固/液两相区对金属材料进行加工成形的一种方法，能够制备出组织性能良好的材料，近年来受到人们的广泛关注。其中，合适的浆料制备是半固态成形的关键，近液相线铸造技术就是获得半固态浆料的简单高效的方法。实际上，不是所有的合金都适于近液相线铸造，而且不同成分的合金的生产工艺参数也不相同，为了获得具有良好半固态成形性能和使用性能的合金，人们需要进行大量的实验研究，浪费了大量的人力物力，因此通过计算机模拟进行半固态合金设计就成为目前人们关注的课题。本文在国家自然科学基金的资助下，对A1-Cu合金近液相线铸造过程中的组织演变进行了多尺度模拟，为半固态合金设计奠定基础。

本文针对A1-Cu合金近液相线半连续铸造的特点建立了描述成形过程的温度场模型、液固相变的形核和长大模型，并利用有限差分法和元胞自动机法对Cu含量分别为4%、4.5%及5%的A1-Cu合金近液相线铸造进行了温度场和组织演变的模拟，得到了组织演变与合金成分及工艺条件之间的关系，从而得到合适的半固态合金及其成形工艺条件。模拟和研究发现：利用外推法可以成功地描述半连续铸造结晶器出口的边界条件，从而使连续铸造过程温度场的模拟准确高效。在此基础上利用元胞自动机方法模拟了铸锭不同部位的组织演变过程，对于A1-4%Cu、A1-4.5%Cu和A1-5%Cu三种合金进行铸造时，当熔体不保温直接浇注时，边部和心部晶粒差别较大，而当熔体近液相线铸造时即保温一段时间后浇注，可获得均匀细小的晶粒，尺寸均在35 μm左右。模拟结果还表明：当保温2-3min时，浇注温度在液相线温度15K以下、铸造速度为1.5mm/s左右时，可得到均匀细小的晶粒，并能保持较好的均一性；模拟的三种合金都能形成均匀细小的等轴晶，但相比之下A1-5%Cu的晶粒尺寸更小，圆度更大。冷却强度对近液相线铸造组织的边部晶粒情况影响较大，心部晶粒情况影响较小，当水冷系数达到1000 W/(m²·K)即可得到均匀性和圆度较好的晶粒。

综上所述，在A1-4%Cu、A1-4.5%Cu和A1-5%Cu三种合金近液相线铸造时的最佳成分是A1-5%Cu，其合适的成形工艺条件为：铸造速度为1.5 mm/s，水冷系数1000w/(m²·K)，浇注温度在液相线温度15K以下。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1179267.aspx

下载时间: 2010年5月30日