

摘要

电阻点焊具有生产效率高、易于实现自动化、可靠性好、性能稳定等优势，是一种不可或缺的材料加工方法。通过数值模拟优化焊接工艺参数，从而提高焊接质量是材料加工中一种重要分析方法。目前关于点焊熔核组织方面的数值模拟还比较少，所以本文在数值模拟的基础上研究了电阻点焊熔核组织及其微观形貌。

首先建立了热、电耦合的温度场计算模型，该模型考虑了焦耳热源和对流边界条件，以及材料热物理性能参数随温度的变化。基于 ANSYS 的热电单元计算了电阻点焊温度场，得到电阻点焊加热的特点和点焊热循环曲线。然后根据点焊熔核的冷却速度，结合焊接连续冷却组织转变图（CCT 图），得到了电阻点焊熔核组织，建立了预测点焊熔核组织的方法。根据该方法，对低碳钢 Q235 点焊熔核组织进行了预测，点焊工艺参数是：电流 8.6KA、通电时间 240ms、压力 1600N，得出点焊熔核组织主要是贝氏体、少量的铁素体和马氏体。然后通过实验验证了组织预测的准确性。

提出了基于元胞自动机的模拟点焊熔核微观组织形貌的模型，该模型在宏观温度场计算的基础上通过细化网格进行微观组织模拟计算。晶粒采用连续形核公式异质形核，通过捕获四周的液态元胞晶粒生长，考虑了温度梯度和成分过冷对晶粒形核和生长的影响。将复杂的计算结果利用图形实时显示出来，不同的晶粒用不同的颜色表示，使结果更加直观。

通过 MATLAB 语言编程，得出点焊时两种典型的微观组织形貌：柱状晶和“柱状+等轴”组织。通过实验发现，低碳钢的点焊熔核组织主要是粗大的柱状晶，铝合金点焊熔核组织主要是“柱状+等轴”晶，与模拟的微观组织形貌基本吻合，证明了利用元胞自动机模拟微观组织形貌是可行的。

关键词： 电阻点焊熔核；组织预测；微观组织形貌；元胞自动机；数值模拟

ABSTRACT

Resistance spot welding (RSW) has the advantage of high efficiency, easy automation, reliability, and stability, which made it an essential material processing method. It is an important analysis method in material processing to optimize welding parameters by numerical simulation and therefore enhance the joint quality. Now there is little numerical simulation on the microstructure of spot welding, so this paper studies the microstructure, and the morphology of the spot welding nugget based on the numerical simulation.

Firstly, established a model based on heat, electrical coupling to calculate the temperature field, which considered Joule heat supply, convection boundary conditions, and the thermal physical properties of the material varying with temperature. The spot welding temperature field is calculated based on the ANSYS heat and electrical element; we received the heating characteristic and the thermal cycle curve of resistance spot welding. Then according to the nugget cooling rate and CCT chart, we got the microstructure of spot welding nugget, and established a method to prediction the microstructure of the spot welding nugget. In this way, we researched the nugget microstructure of Q235, with the experiment parameters as follows: 8.6KA current, 240ms electrified time, 1600N pressure. The nugget microstructure is mainly made up of bainite, with little martensite and ferrite. Then we verified the correction of the conclusion by experimental actions.

Also established a model to simulate the morphology of the spot welding microstructure based on cellular automata method, which calculated by refining the grid based on the macro temperature field calculation. Crystals are heterogeneous nucleated by continuous forming formula, and grown up by capturing the liquid state cells all around, and the effect of temperature gradient and ingredient overcooling was considered. The complex calculation results were displayed in real-time images with different colors means different crystals, which makes the result visual and straightforward.

The two typical kinds of microstructure of spot welding nugget were obtained through the MATLAB programming and calculating: the columnar microstructure and the columnar-equiaxed microstructure. The experiment indicated that the low carbon

steel spot welding nugget have thick columnar crystals, and aluminum alloy spot welding nugget are made up of columnar- equiaxed crystals, which coincides with the numerical simulation result, and meanwhile verified the microstructure morphology simulation method based on the cellular automata method is feasible.

KEY WORDS : RSW nugget, microstructure prediction, microstructure morphology, cellular automata, numerical simulation

第一章 绪论

1.1 本课题的意义

焊接是主要的金属材料连接方法，点焊作为金属加工技术的一个分支，在现代制造业中占有不可替代的作用，被广泛应用于航空、航天、能源、机械、电子、车辆及轻工部门^[1]。在焊接生产中，电阻点焊具有生产效率高、易于实现机械化和自动化、可靠性好、性能稳定和方法简单等优势，成为汽车车身装配的主要连接手段，在轿车车身装配中占据着举足轻重的地位。

目前，我国的汽车工业正处于黄金发展时期。2008 年我国汽车销售量突破 900 万辆，2009 年汽车产销双赢分别达到 1300 多万辆，预计 2010 年的汽车产量会突破 1600 万辆。随着中国经济的持续发展，新车新款和新能源动力汽车不断亮相，中国将成为世界汽车制造大国和产业强国。根据统计，每辆汽车白车身需要 4000~6000 个焊点，由此可知点焊技术在保证汽车车身结构的强度和提高生产效率中起着重要作用^[2]。提高点焊质量能带来经济效益，还能提高企业在日益激烈的市场经济中的竞争力。点焊焊接时间短，这种方法焊接能量集中，热影响区小，变形小，生产率高，不需要保护气体而直接进行焊接。因为点焊熔核是在电极压力下两工件接触面上形成，不暴露于空气中，所以焊点接头不产生高温氧化，点焊质量良好，并具有良好的接头性能。

电阻点焊是一个多因素耦合的时变非线性过程，通过电、热、力、磁等多个因素综合作用^[3-5]。电阻点焊的焊接方式包括双面点焊、单面点接、单点点焊和多点点焊等，焊点的尺寸和拉伸强度受电极直径和压力、通电电流、通电时间和分流等因素影响。点焊中经常出现飞溅、焊点表面质量差、熔核尺寸波动大等问题，需要对点焊工艺进行科学的研究。由于熔核形成过程的不可见性和瞬时性给实验研究带来了很大困难，使得对点焊过程机理的认识一直不够深入。目前，继实验和理论推导之后又出现了一种新的分析手段，计算机数值模拟。这种分析方法由于对条件限制少，节省成本提高效率，已经渗透到各个研究领域。数值模拟不局限于点焊实验条件的限制，为点焊研究提供了有效的理论分析方法，可灵活地研究点焊过程中的各种影响因素，对点焊质量的研究与发展有重要作用，同时可以帮助人们进行一些在现有实验条件下比较难实现或完成的研究。

焊接过程中剧烈的加热和冷却过程使焊接接头的微观组织发生剧烈变化，导致焊接接头强度和塑性、韧性的变化。焊接过程影响因素较多，难以直接建立物

理模型和数学模型来研究,为了了解焊接过程对材料性能的影响,动态再现焊接接头组织变化,很多学者对焊接过程进行了数值模拟。随着计算机技术的发展和对焊接本质的进一步认识,对焊接接头凝固过程和微观组织的数值模拟取得了一定的研究成果。通过模拟焊接接头的微观组织,可以预测不同焊接条件下接头组织的形态,从而为优化焊接工艺和改善接头性能的提供指导。

1.2 焊接数值模拟的发展

焊接数值模拟是指在实验的基础上,通过一系列控制方程来描述焊接过程或其某一方面的特征,在定性分析的基础上推测和预测极端情况下尚不为人知的规则,实现对复杂焊接现象的模拟,比如数值模拟焊接热过程、焊缝金属凝固和焊接接头固态相变、焊接热影响区氢扩散行为、焊接应力和应变、焊接结构的疲劳裂纹扩展和断裂韧性等,帮助人们认清焊接过程的本质和规律。通过对焊接现象和过程的数值模拟,可以优化结构设计和工艺参数,从而减少试验工作量,提高生产效率和焊接接头的质量。

1.2.1 点焊数值模拟的国内外进展

随着计算机技术的发展,数值模拟在焊接中的应用越来越广泛。近些年来很多学者应用有限元方法研究电阻点焊过程,并得到了一定的进展。1997年, H.Huh 等通过三维的热电模型研究了电极形状对点焊的影响。模型中考虑了电极与工件以及工件之间的接触电阻随温度的变化,但将其假设为随温度变化的线性关系,并且忽略了压力对接触电阻的影响。研究表明电极的椭圆度对电流分布和产热都有影响。1999年, K. S. Yeung 和 P. H. Thornton 建立模型分析了点焊时电极的瞬态热过程,提出了提高电极寿命的方法^[6]。Jamil. A .Khan 等人建立三维的铝合金点焊模型^[7],研究了焊接电流、工件间接触电阻和电极与工件的接触电阻对点焊熔核形成过程的影响。

在国内,林忠钦等对白车身点焊装配过程建立了轴对称模型进行分析,但在模型中没有提及接触电阻的问题。李宝清等通过建立热、力、电耦合的电阻点焊过程有限元模型,分析了点焊过程中产热过程和能量分布,研究了铝合金电阻点焊过程的机理。天津大学的罗震^[8]通过稳定分布的理论对铝合金点焊时的初始接触电阻进行了研究,给点焊质量控制提供了指导。作者还根据电压信号的能谱分析、点焊过程声音信号的时频域分析、点焊电极位移的动态变化研究提出了基于遗传算法的神经网络技术来检测点焊质量。马迎兵对点焊过程中的电极压力进行了研究,指出不同的电极压力曲线对提高焊点强度和焊点质量的规律^[9]。作者在

文中设计了以马鞍形为主的四种不同形状的压力曲线,然后通过拉伸剪切实验研究它们对点焊接头抗拉强度的影响,与恒压情况相比它们都不同程度地提高了点焊接头强度。

2008年天津大学的罗保发采用SYSWELD有限元软件建立了铝合金电阻点焊的热、力、电耦合模型,动态模拟了点焊熔核形成、长大的全过程^[10]。文中考虑了材料物理参数随温度的非线性变化以及结晶潜热的处理,研究了铝合金点焊时组织的变化,为研究和控制点焊接头质量提供了方法。叶茂^[11]等还提出了基于有限元的点焊熔核反问题研究,作者的思路是首先根据点焊接头的性能要求通过受力分析得到满足要求的熔核尺寸,然后根据有限元模型模拟出熔核,对点焊工艺参数的制定提供指导。文中最后给出圆台形的熔核受力性能最好,更加符合实际情况。赵熹华等根据流体力学和传热学的计算原理,考虑了液态金属的对流传热,材料物理性能参数和接触电阻随温度的变化,相变潜热对形核热过程的影响等因素,建立了铝合金点焊传热和液态金属流动过程的轴对称有限元模型^[12]。计算结果表明,在熔核中心轴线附近对流流速最大达 10^{-1} mm/s,回流环从熔核中心向边缘传递能量,降低熔核内的温度梯度,有利于熔核的生长。实验验证与计算结果吻合良好。燕山大学的李静采用SYSWELD有限元软件建立了点焊有限元分析模型。在温度场的基础上计算出点焊接头中应力分布不均匀,熔核中心的应力比较小,热影响区的应力高,在工件间贴合面接触边缘附近残余应力最大^[13]。

到目前为止,电阻点焊中研究比较多的是热、电、力行为,通过耦合热、电、力建立点焊模型,研究点焊过程形核机理以及焊点的力学性能。但是目前还未有人对点焊相变过程进行研究,进行点焊微观组织的数值模拟研究。

1.2.2 焊接组织预测的国内外进展

一直以来焊接工作者的重要研究方向之一是:改善焊接接头的质量、控制焊接接头中裂纹的发生,研究焊缝和影响区中的组织形态变化以及组织变化对性能的影响^[14]。然而,由于焊接热影响范围很小、焊接热循环加热时间短、变化快、温度变化范围大,因此在试验中很难直接测定焊接热影响区或焊缝中的相变。另外,通过试验研究焊接相变动力学和相变规律,在方法和设备上还存在一定的困难。但是从上世纪八十年代开展模拟焊接热循环的研究工作以来,对相变研究的困难得到了一定解决,并且促进了焊接CCT (Continuous Cooling Transformation) 图研究制定工作的迅速发展。

在国外,在不到20年的时间里,通过模拟热循环使得焊接CCT图的测定达到了比较完善的程度。各大型焊接研究院、所,都相继自行研制了大型全自动快速膨胀仪,使测定焊接CCT图水平有很大提高。使大家对焊接相变过程、焊接组织

与工艺之间的关系,有了更深刻的认识。通过焊接CCT图的研究,对选择能够使焊缝性能最优化的焊接材料、制定最佳焊接规范和焊后热处理工艺、控制焊接裂纹等缺陷的发生均有重大的实际意义。哈尔滨焊接研究所从上世纪60年代就开始重视焊接组织相变的分析研究工作,对与焊接工艺和微观组织相关的焊接缺陷也进行了大量的分析研究。制定了15MnVN、20SiMn、A3、15MnVNR、BHW-35等焊接CCT图,为制定钢材的焊接标准提供了焊接工艺参数,并为分析焊接热影响区组织和性能的变化提供了数据。

随着计算机在焊接中的应用,焊接过程软件分析已经成为一种趋势。依据钢的焊接CCT图可以正确选择焊接材料,确定最佳焊接工艺及制定焊后热处理规范,得到满足使用性能要求的焊后组织。由于焊材和母材的多样性造成了焊接CCT图的种类繁多,不易整理和搜集;同时CCT图的应用原理较为复杂,需要大量的计算和分析,此过程如果人工操作会需要消耗很多工时和难以避免的计算误差。电子版焊接CCT曲线库充分运用了计算机快速运算、超大容量的信息存储功能,有利于焊接CCT图的推广与应用。

研究发现焊接接头性能和冷却时间之间有一个最佳化^[15]。在临界冷却时间下,接头有足够的韧性同时强度不会明显的下降。临界冷却时间值可以通过实验、材料的碳当量和连续冷却转变曲线(SH-CCT图)等确定。焊接方法、焊接参数、焊接尺寸等因素将会对该冷却时间产生影响。这些因素可以在温度场计算时作为初始条件输入,从而求得熔合区的冷却时间。适当变化参数便可改变临界冷却时间,从而达到焊接接头性能最佳化。随着数值模拟研究深入,温度场、相变和热应力三者之间的耦合作用越来越受到人们的重视。目前常见的预测模型,是利用组织状态图和相变动力学的计算公式,结合焊接热循环曲线,通过耦合焊接传热和组织变化给出瞬态组织预示程序。

张初冬编写了能够模拟焊接过程瞬态组织的程序,该程序是以焊接热传导程序为基础设计而成的^[16]。利用状态图和相变动力学中的计算公式,给出了相变的特征温度和奥氏体连续冷却过程中组织转变速度的公式,该程序能对不同焊接条件下已知钢材成分的,焊接接头在焊接过程中及焊后任一瞬间、任一点处各组织的体积百分数,并绘出各组分的等值分布图。作者应用这一程序模拟了低合金钢管线环焊缝手工焊微观组织,进一步验证了该程序的可行性。李志勇等建立了8大系列合金包含200多幅焊接CCT图形的数据库,同时包括相关材料的成分库^[17]。在不同焊接条件下通过VB编程实现成分预测、冷裂性判定、组织判定和性能判定等功能。输入焊接工艺参数后计算冷却时间,根据焊接CCT图对焊接热影响区和焊缝的组织进行预测;在组织预测的基础上,对焊接接头性能和冷裂性倾向进行判断;从而使运用焊接CCT图预测组织性能的过程软件化,实现焊接工艺优化。

文中验证了15MnVN手工电弧焊时焊缝组织,说明该软件能够对焊后接头的组织性能准确预测。有利于焊接CCT图的推广和应用,具有重要的工程意义。王后孝,魏艳红等通过三维移动串热源简化熔化极气体保护焊(GMAW)的热输入,通过建立的串热源模型,模拟了JG590低合金钢的焊接热过程^[18]。通过观察焊接接头和熔合线横截面的几何尺寸实验验证了模拟的准确性。文中还分析评价了目前常用的 $t_{8/5}$ 计算公式,有经典传热理论式、D.Vver理论经验公式和Michio经验公式,利用本文模型可以计算出不同材料和焊接工艺参数条件下的 $t_{8/5}$ 。结合JG590钢焊接连续冷却组织转变图(CCT图),成功预测了其焊接热影响区(HAZ)的组织及硬度。

1.2.3 焊接微观组织模拟的国内外进展

焊缝及热影响区(HAZ)的微观组织决定着接头的性能。焊缝组织受焊缝金属及母材成分、焊接热循环、奥氏体晶粒大小、夹杂物尺寸和分布等因素的影响,形成过程复杂^[19]。可以通过相变热力学计算铁素体、贝氏体、马氏体等形核孕育时间和开始转变的温度;通过相变动力学计算新生相的生长速度和最终百分比含量。在不平衡的连续冷却过程中,相变热力学、动力学计算都比较困难,而且组织转变过程中一些变量还无法用现有的物理模型和数学表达式来表示,因此,模拟接头微观组织有一定的困难。但随着计算机技术的发展,在焊接领域里计算机模拟的应用越来越广泛。目前很多学者进行了大量的研究,并取得了阶段性的进展。

目前,焊接接头微观组织模拟方法主要有确定性方法,概率性方法和相场法三大类。

1. 确定性方法

确定性方法是指在给定时刻,通过确定的函数得出一定体积熔体内晶粒的形核密度和生长速率。该确定函数可以通过具体的实验求得。现在很多学者利用确定性方法研究微观组织。运用确定性方法建立的模型,能够预测等轴晶晶粒度、柱状晶的定向生长等微观组织的特征。如文献^[20]中给出了焊缝奥氏体晶粒尺寸计算模型,从晶粒长大的热力学基本原理出发,考虑焊接条件的影响,以及焊缝金属合金元素对晶粒长大的影响。在连续冷却条件下建立了一个低合金钢焊缝金属中奥氏体晶粒尺寸的计算模型,晶粒的大小跟碳原子的扩散速率有关。但确定性方法忽略了一些晶体学行为,例如柱状晶的择优生长,柱状晶向等轴晶的转变,晶粒尺寸的变化等。

2. 概率性方法

上世纪八十年代,人们根据概率方法提出了一种新的研究晶粒的随机性方

法, 其中比较典型的是蒙特卡罗MC (Monte Carlo) 法和元胞自动机CA (Cellular Automata)法。MC方法根据界面能最小的原理, 以概率统计理论为基础, 通过随机抽样手段对晶粒生长过程进行模拟^[21]。MC法没有分子动力学中的迭代计算, 可以保证收敛性, 不会出现数值不稳定的情况。MC法的优点是收敛速度与所研究问题的维数无关, 容易确定它的误差。另外MC法的计算量小, 所需机时少, 这也是它相对于确定性方法的一个优点。

CA法最早是由Von Neumann和Ulam提出的仿生物体模型, 随后逐渐完善被应用到数学、物理、城市交通和材料科学等领域。CA法是一种理想化模型, 离散变量进行计算, 是一种建立模型的基本思想和方法。随着计算机科学的发展, 1985年S.Wolfram深入研究了CA法的理论及应用, 较系统地给出了一些数学理论基础和统计描述, 逐渐地让人们认识到元胞自动机的价值, 从而激发起对它的研究兴趣。元胞自动机在材料科学中可以用在模拟铸件的凝固、再结晶长大、晶粒生长等方向^[22-24]。

3. 相场法

近几年, 一种新的可以直接模拟微观组织的方法—相场法逐渐受到大家的热捧。相场法是一种计算技术, 引入新变量—相场 ϕ 而得名, 可以在枝晶尺度上真实地模拟微观组织的形貌^[25,26]。系统中的相具有恒定的相场值, 例如固相区 $\phi=0$, 液相区 $\phi=1$, 固液界面上 ϕ 值在0~1之间连续变化, 相场法可以模拟固液界面处新相和母材界面复杂的生长过程。相场方法以金兹堡—朗道相变理论为基础, 在统计学基础上通过微分方程来表达扩散、热力学驱动力的综合作用。求解相场参数需要考虑外部温度场、溶质场、流场等, 在使用显式差分时界面厚度与网格步长需要满足一定条件。相场方程的解描述了金属固液界面的形态、曲率以及界面的移动。

目前, 相场法在凝固过程枝晶生长的模拟中取得了成就, 但在模拟固态相变过程中组织转变仍需要进一步研究。蒙特卡罗方法主要用在模拟焊接热影响区晶粒生长过程, 而CA法已被广泛应用在凝固和固态相变的微观组织转变模拟上。在国内, 李殿中等^[27]建立了枝晶尖端生长动力学模型, 用元胞自动机方法研究了晶粒的生长和择优晶向的影响, 得出了柱状晶到等轴晶转变的规律。然后用这种方法模拟了镍基合金叶片凝固过程, 得出了微观晶粒生长过程并且用计算机动态彩色显示结果。在进一步研究的基础上建立了金属凝固时温度场、浓度场、应力应变场的数值模拟和金属成型过程中组织演变的宏—微观耦合模型, 又用元胞自动机方法模拟了金属成型过程中的组织演变。张林, 关小军等在元胞自动机的应用上也做了一系列的研究, 推动材料微观组织的模拟^[28,29]。

1.3 本课题的主要研究内容

目前对点焊熔核组织的数值模拟还比较少,本文的主要目的是对电阻点焊熔核组织进行预测,并通过元胞自动机模拟微观组织形貌。

本课题从以下几个方面展开研究。

(1) 通过建立热、电耦合有限元模型,计算电阻点焊温度场,得到点焊温度场的特点和热循环曲线。

(2) 介绍焊接接头固态相变的特点,建立基于冷却速度和焊接连续冷却曲线(CCT图)的熔核组织预测方法。

(3) 介绍元胞自动机方法和微观组织模拟的数学物理基础,建立模拟点焊熔核微观组织形貌的模型。

(4) 通过建立的元胞自动机模型,模拟点焊熔核柱状晶和“柱状+等轴”晶的微观组织形貌。

第二章 点焊温度场的模拟

2.1 电阻点焊基本原理

电阻点焊是一种应用广泛的材料连接方法。通过适当的物理-化学过程，使金属表面形成金属键连成一个整体是焊接的目的。压力焊同时还在焊接区施加一定的压力，过程类似于熔化焊，但是在压力作用下提高了接头的质量。电阻焊是通过金属的电阻热和塑性变形能量使分离的金属表面形成金属键，在结合面上产生晶粒得到焊点。下面将介绍电阻点焊的特点和接头的形成过程。

2.1.1 电阻点焊的特点

点焊是将装配成搭接接头的焊件用压力压紧在两电极之间，利用内部电阻热熔化母材金属，使金属达到原子键连接，形成满足一定尺寸焊点的电阻焊方法。点焊在电子、仪表、家用电器的部件装配连接上广泛地应用，同时在交通运输及航空航天工业上冲压件、金属构件的焊接上大量应用。为了保证点焊的质量，首先点焊接头需要具有一定的强度，这主要取决于熔核尺寸、焊点及周围热影响区内金属的显微组织及缺陷情况。其次设计时需要让金属在焊接时具有较好的焊接性^[30]。

点焊具有接头质量高、辅助工序少、不需要焊接材料和没有烟尘污染等电阻焊方法的通性，还有以下一些自身的特点：

- (1) 焊件是靠尺寸不大的熔核来连接，在两焊件的贴合面上熔核均匀、对称的分布；
- (2) 点焊的工艺特点是电流大、时间短、在压力状态下进行焊接，所以点焊熔核不可见，并且有塑性环的保护；
- (3) 点焊是热和机械共同作用的焊接过程，通过热作用熔化贴合面上的母材金属，通过机械力使焊接区发生塑性变形。

2.1.2 点焊接头的形成过程

点焊是在热与机械（力）作用下形成焊点的过程。一个焊点的形成需要经过加压、通电加热、维持和休止等阶段。点焊焊接循环中的各个阶段都有重要作用，了解每一阶段的意义和在工作时的具体作用为制定合理的点焊工艺，得到性能良

好的焊点有帮助。

点焊接头由熔核、塑性环、周围母材金属三部分组成，通过预压、通电加热和冷却结晶这三个连续的点焊焊接循环过程形成。图 2-1 描绘了典型点接接头的形成过程^[30]。

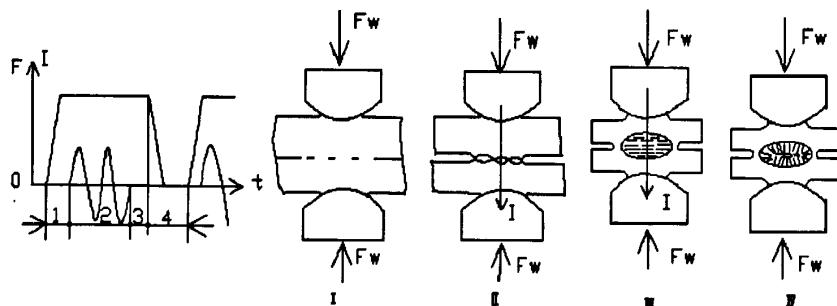


图 2-1 点焊接头形成过程

I—预压阶段 II、III—通电加热阶段 IV—冷却结晶阶段

1. 预压阶段 通电之前对工件进行加压，这个过程的特点是 $F_w > 0$ 、 $I = 0$ 。点焊循环开始时，在不通焊接电流的情况下，通过伺服电机施加扭矩对工件产生一个预压力。通过电极压力清除一部分不平的接触表面和氧化膜，暴露出导电的金属，在被焊工件表面形成导电接触点，保持了接触电阻的稳定。为焊接电流的顺利通过，控制熔核内的裂纹和夹杂以及减少点焊过程中的飞溅做好准备。当焊件厚度大，材料变形阻力大，焊接部位刚性过大变形困难，或材料表面氧化膜太厚清理不良时，可以通过提高预压力或用较小的预热电流，以保证焊接区能紧密接触。

2. 通电加热阶段 此阶段的特点是 $F_w > 0$ 、 $I > 0$ ，在热和机械力的共同作用下形成塑性环、熔核，并随着不断的通电加热继续长大，形成所需要尺寸的点焊熔核。在通电开始的一段时间里，由于电阻热接触点不断扩大，固态金属受热膨胀，在焊接压力的作用下发生塑性变形并挤向板缝；紧跟着开始出现液态熔核并且不断长大，最终达到所需的熔核尺寸。切断电流停止加热后，维持两电极对工件的压力，液态熔核将在压力的作用下冷却结晶。

在通电加热阶段，液态熔核周围的母材，温度升高后在电极压力作用下发生塑性变形和再结晶形成塑性环。塑性环使得工件周围的气体不能侵入熔核，从而控制熔核中的金属发生冶金反应，同时也保证液态熔核金属不形成飞溅沿板缝被挤出。

3. 冷却结晶阶段 这一阶段点焊工艺特点是 $F_w > 0$ 、 $I = 0$ ，液态熔核在压力的作用下冷却结晶。焊点的最终性能取决于组织的类型和组织的大小、分布、

状态等，所以冷却结晶过程对点焊很重要。三种典型的点焊熔核凝固组织是：柱状组织、等轴组织、“柱状+等轴”组织，主要在于材质和焊接工艺规范的不同。一般情况下，熔核凝固组织很少完全是等轴晶。柱状组织经常出现在钛、镍等纯金属中，或者结晶温度区间比较窄的合金（如钛合金、钢、合金钢等）的熔核组织中。“柱状+等轴”晶的微观组织形貌在铝合金薄板点焊中很常见。

2.2 点焊温度场的模拟

焊接热过程具有不均匀性、瞬时性、复杂性和不稳定的特征，然而焊接应力场和应变场取决于温度场，它还跟结晶、相变紧密联系。因此准确计算和测量点焊热过程是组织模拟的前提。点焊熔核的不可见性和无损检测的困难，使得通过建立有限元模型来研究点焊过程具有很大的实际应用价值。点焊过程中工件和电极头的物理性能参数，比如比热、焓、电阻率等随时间变化，是一个瞬态热过程，本文使用大型有限元计算软件 ANSYS 来求解点焊温度场。

2.2.1 有限元模型的建立

点焊熔核形成过程包括力、热、电、冶金等物理化学过程，而且这些因素之间相互作用，使得点焊过程瞬态变化。在有限元模拟过程中，将对求解结果影响不大的因素进行以下简化和假设：

- (1) 考虑到电极和工件的对称性，电压和电流分布的近似对称性，通过两次轴对称，取点焊时 1/4 实体模型进行计算；
- (2) 假设点焊过程中电极压力保持不变，并且均匀分布在电极的轴截面上，将其等效为压力；
- (3) 在模拟过程中，忽略了汤姆逊效应的影响。

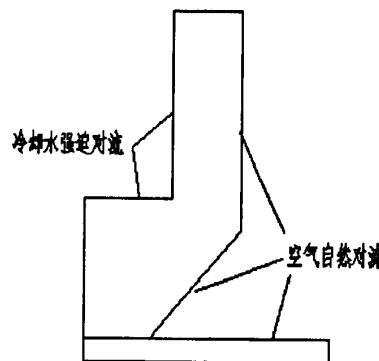


图 2-2 点焊有限元模拟几何模型

基于上述假设, 本文建立了点焊有限元模拟的几何模型, 如图 2-2 所示, 采用锥形平头电极, 端面直径 6mm, 电极主体直径 16mm, 内部水冷处直径 8mm。

2.2.2 热源方程和边界条件

电流通过被焊工件引起的加热是点焊形成接头的主要热量。电流流经导体时, 导体将析热使温度升高, 这是因为导体的电阻吸收电能并转换为热能, 是电流的热效应。电阻点焊时, 电流通过两电极之间的金属区——焊接区时, 金属具有电阻也会析热, 在焊件内部形成热源——内部热源。根据焦耳——楞次定律, 产生的热量为:

$$Q = I^2 R t \quad (2-1)$$

式中 I 为点焊电流的有效值 (A);

R 为焊接区总电阻的平均值 (Ω);

t 为通过点焊电流的时间 (s)。

金属工件内部电阻 R_w 、焊件间接触电阻 R_c 、电极和工件间接触电阻 R_{ew} 组成总电阻 R ($R=2R_w+2R_{ew}+R_c$), 工件电阻率 R_w 和温度有关但与电极压力无关, 接触电阻 R_{ew} 和 R_c 与前期预压力有联系。

在轴对称情况下, 电流场分布可由 Laplace 方程描述, 电流场在轴坐标系下微分控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \rho_r} \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad (2-2)$$

式中 ϕ 为电场内某点电位 (V);

r 、 z 为任意一点坐标;

ρ_r 为焊接区金属的电阻率, 随温度变化 ($\Omega \cdot m$)。

焊接传热过程主要研究焊件上温度分布及其随时间的变化。电阻点焊是典型的有内热源的瞬态传热问题, 焊件获得热能后主要以热传导为主。瞬态非线性热传导控制方程为:

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{Q} \quad (2-3)$$

式中 c 为材料的比热容 ($J/Kg \cdot K$);

ρ 为材料的密度 (Kg/m^3);

T 为温度场分布函数 (K);

t 为时间 (s);

k_x, k_y, k_z 分别是 x, y, z 方向的导热系数 (W/m · K);

\dot{Q} 为内热源。

边界条件的处理对温度场的计算结果影响很大, 本文对点焊过程中热、电边界条件进行以下处理: 上电极端面施加电流及压力; 下电极端面电压设为零。铜电极内的冷却水对流热交换, 通过采用对流系数施加在电极、工件表面。冷却水对电极进行管内强制对流换热, 取其换热系数 $h_w = 3500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。空气自然对流换热系数取 $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。对流边界条件计算方程为:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_a - T_s) \quad (2-4)$$

式中 λ 为材料的热导率 ($\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$);

α 为表面换热系数 ($\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$);

T_a 为周围介质温度 (K)。

本文建立的点焊有限元模拟进行了轴对称简化, 所以在计算温度场时, 将模型对称面设为绝热边界条件, 即

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (2-5)$$

式中 n 为边界表面外法线方向。

2.2.3 帕尔帖效应热和相变潜热的计算

电荷载体在导体中运动形成电流, 不同材料中电荷载体处于不同的能级。在两种材料的交界处, 电荷载体从高级运动到低级将释放能量, 从低级运动到高级将吸收能量, 这些吸收或释放的能量称为帕尔贴效应热。工件接入点焊焊机回路后, 其中一边工件吸收热量, 另一边工件放出热量。

帕尔帖效应热可用材料的热流率表示:

$$q_p = (\Pi_1 - \Pi_2) \cdot J \quad (2-6)$$

式中 J 为流过两材料接触面的电流密度 (A/m^2);

Π_1 为材料 1 的帕尔帖效应热系数 (W/A);

Π_2 为材料 2 的帕尔帖效应热系数 (W/A)。

在焊接过程模拟中温度场的求解是非线性的瞬态传热问题, 建立精确的物理模型是解决问题的关键。焊接冷却过程中的相变将伴随产生相变潜热, 在有限元计算中相变潜热以焓的形式表示:

$$H = \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T} \rho(T) c(T) dT \quad (2-7)$$

式中 $\rho(T)$ 是材料的密度, 随温度变化 (Kg/m^3);

$c(T)$ 是材料的比热, 随温度变化 ($\text{J}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$)。

在整个固态相变过程中, 产生的总的相变潜热是各相值的叠加, 可以用公式 (2-8) 来计算:

$$A = \sum_{j=1}^N A_j V_j \quad (2-8)$$

式中 A_j 是第 j 相的相变潜热;

V_j 是第 j 相转变体积比, $\sum_{j=1}^N V_j = 1$;

N 是材料固态相变中相的总数。

2.2.4 材料热、电物理性能参数

在点焊过程中, 电极和工件材料经历了大范围的温度变化, 材料的热物理性能比如导热系数、电阻率、接触电阻等都随温度变化。目前还没有确定的理论方程表示材料的这些参数与温度的关系, 工程材料手册只是提供了常温下的数据, 在数值模拟计算中普遍采用线性插值的方法获得某些高温性能参数^[31]。进行点焊温度场计算时需要确定电极和工件的下列热、电物理参数: 密度 ρ (Kg/m^3)、比热 C ($\text{J}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$)、导热系数 λ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)、电阻率 R ($\Omega \cdot \text{m}$)、接触电阻等。低碳钢和黄铜电极的密度分别为 $7800\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $8900\text{kg}/\text{m}^3$ 。其它物理参数如表 2-1 及 2-2 所示。

表 2-1 低碳钢 Q235 的物理性能参数

温度 $^\circ\text{C}$	21	93	204	316	427	538	649	760	871	982
比热 C ($\text{J}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	443	452	510	561	611	661	762	2386	1189	1189
导热系数 λ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	64.7	63.2	55.33	49.94	44.86	39.77	39.41	30.50	28.41	27.66
电阻率 $\times 10^{-8}$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	14.2	18.6	26.7	37.6	49.5	64.8	81.8	101.1	111.5	115.8

表 2-2 铜电极的物理性能参数

温度 $^{\circ}\text{C}$	21	93	204	316	427	538	649	760	871	982
比热 C ($\text{J}/\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	397	401	418	431	611	452	464	477.3	485.7	494.1
导热系数 λ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	390.3	390.6	370.1	355.1	345.4	334.9	320	315.5	310.3	305
电阻率 10^{-8} ($\Omega \cdot \text{m}$)	2.64	3	4	5.05	6.19	6.99	8	8.98	9.48	9.98

2.2.5 有限元模型网格的划分

在 ANSYS 计算中采用 PLANE67 单元，该单元具有热和导电能力。主要热平衡是电流产生的焦耳热，每个单元有四个节点，包括温度和电压两个自由度。本文依据单元类型，采用自由网格划分几何模型。由于熔核附近温度变化剧烈，通过细分熔核附近的工件来提高求解精度；同时从计算机功能限制，节约时间考虑，对远离熔核的区域采用大网格。网格模型如图 2-3 所示。

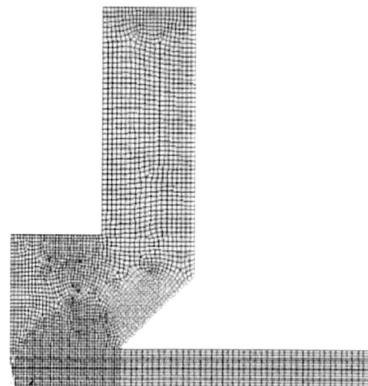


图 2-3 点焊有限元网格模型

2.3 点焊温度场模拟结果及分析

本文用 ANSYS 软件模拟了 1mm 厚的 Q235 低碳钢板点焊温度场。基于上述有限元模型和材料参数，在电极的上端面施加电压，工件贴合面上电压设为零，环境温度设为 25°C ，考虑边界对流和冷却水的强迫对流，设定好求解步骤后计算点焊温度场。点焊工艺参数为：电流 6.8KA，通电时间 240ms，压力 1600N。

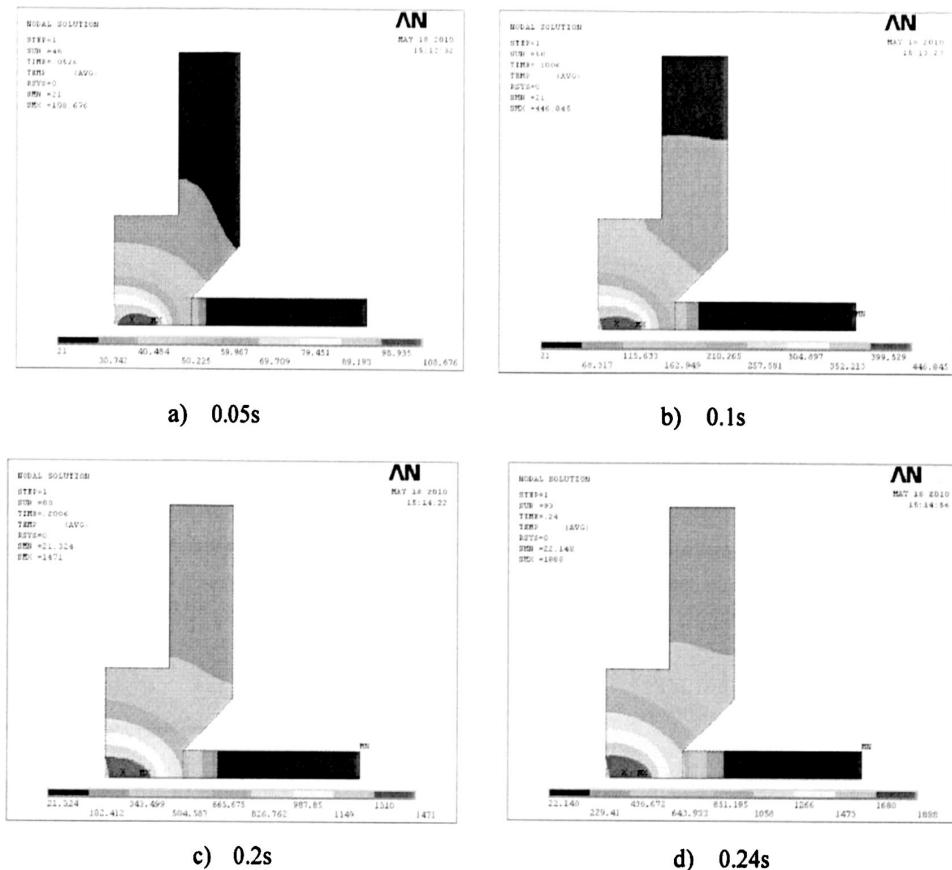


图 2-4 不同时刻的点焊温度场

图 2-4 是四个不同时刻的点焊温度场, 熔核在这段加热过程中形成。从图 2-4 a)点焊初始阶段可以看出, 两工件之间接触面上的产热最多, 温度升高比较快。这是因为点焊开始阶段工件间接触电阻比较高, 从而产热量多, 使接触面附近区域温度很快上升。电阻点焊的内部热源是电阻热, 有研究表明接触电阻的析热量约占总热源的 5-10 %, 随着电极加压和工件的升温这部分热量很快降低、消失。随着点焊过程的继续, 金属电阻率增加, 内部热源不断析出热量, 工件的温度迅速升高, 在 2-4 b)中工件上的最高温度达 500℃, 而在 2-4 c)中工件的最高温度达 1500℃, 达到材料的熔点形成类似椭球形的熔核。通电时间达到 0.24s 时, 工件的最高温度如图 2-4 d)所示, 达到 1700℃左右, 超过了材料的熔点。这段时间里超过材料熔点的区域在增长, 说明熔核在不断长大。从温度场的分布情况可以看出点焊加热的一些特点: 点焊时在两焊件的贴合面处产生集中加热; 而且点焊加热不均匀, 焊接区附件各点的温度不同。图 2-5 给出了距对称轴约 1mm 处工件下表面温度随时间的变化, 也就是点焊热循环曲线。

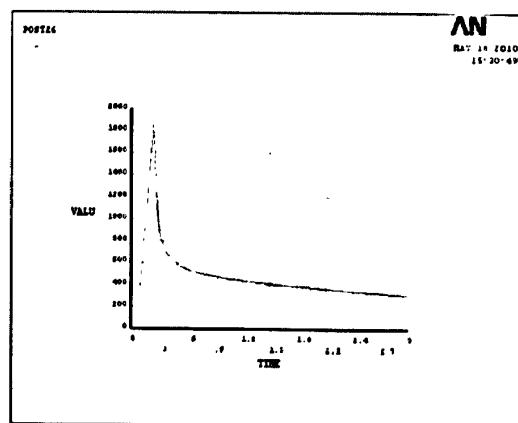


图 2-5 点焊热循环曲线

从图中可以看出电阻热焊接热源虽然跟生产上广泛应用的焊接热源电弧热原理不同：前者需要强大的电力，以工件的电阻来产热；后者是利用气体介质的放电过程产生的热能；但是具有焊接热循环典型的特点快速不均匀的加热和冷却。焊接热循环中对组织性能有影响的参数包括：加热速度 ω_H ，加热的最高温度 T_m ，相变温度以上的停留时间 t_H ，冷却速度 ω_C 或冷却时间 $t_{8/5}$ 、 $t_{8/3}$ 、 t_{100} 。其中加热速度和加热的最高温度将影响奥氏体化后晶粒的大小和溶质的均匀性。过冷奥氏体会在不同温度下发生不同的固态相变，所以点焊熔核的最终组织跟冷却速度或冷却时间有关。很多学者研究了焊缝金属或焊接热影响区的冷却时间从而推测出最终二次组织，本文将通过点焊熔核的冷却时间来预测点焊熔核的二次组织。

2.4 本章小结

- (1) 介绍了电阻点焊的特点和接头的形成过程，包括预压阶段、通电加热阶段和冷却结晶阶段，只有控制好点焊焊接循环过程才能得到性能良好的点焊接头。
- (2) 建立了计算点焊温度场的有限元模型，该模型考虑了焦耳热源和对流边界条件，以及材料热物理性能参数，例如比热、导热系数、电阻率、接触电阻等随温度的变化。基于 ANSYS 的热电单元计算了电阻点焊温度场。
- (3) 根据计算结果分析了电阻点焊加热的特点：点焊时在两焊件的贴合面处产生集中加热；而且点焊加热不均匀，焊点附件各处的温度变化很大。给出了点焊热循环曲线，为预测点焊组织提供了基础。

第三章 点焊熔核组织的预测

焊接技术是一种重要的材料加工方法,它的目的是通过加热或加压或二者并用,在使用或不用填充材料的情况下,使工件达到原子间的结合从而形成永久性连接的过程。焊接接头的形成一般都经历加热、金属熔化、熔池冶金反应、凝固结晶和固态相变。焊接接头的组成包括焊缝、热影响区和过渡的熔合区。在保证焊缝金属的性能的同时必须保证焊接热影响区的性能,这样才能保证接头的使用性能。考虑到金属构件的使用场合,对它的强度、塑性、韧性都有很高的要求,从而焊接接头也需要保证这些性能。焊接接头的性能主要取决于微观组织,而凝固结晶后的组织由材料的化学成分,比如碳当量 C_{eq} ; 焊接方法和焊接工艺决定的焊接热循环,比如相变温度以上停留时间 t_H , 最高温度 T_m , 冷却时间 $t_{8/5}$ 、 t_{100} ; 焊接材料的使用等。所以在制定焊接方法时需要考虑其使用性,依据性能要求判断其应该具备的微观组织特征,从而确定焊接工艺。奥氏体连续冷却组织转变图(CCT图)具有这样的作用。

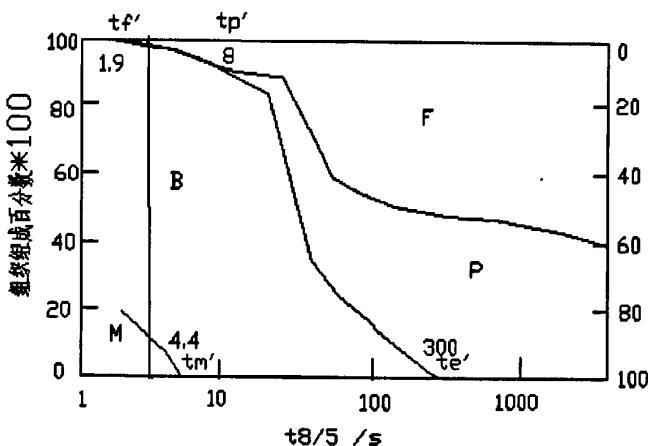
随着计算机技术的发展及其在焊接中的应用,用软件分析焊接过程越来越是一种趋势。通过确定合理的焊接工艺可以得到满意的焊后组织及性能,目前正确选择焊接材料,确定最佳焊接工艺的一个重要依据是钢的 CCT 图。由于焊接 CCT 存在应用较复杂,需要大量的计算和分析等问题,应用快速运算、超大信息存储容量的计算机将有利于焊接 CCT 图的推广与应用。

本章的主要目的就是通过焊接 CCT 图来预测点焊熔核的组织,下面首先介绍低碳钢 Q235 的焊接 CCT 图和固态相变的特点。

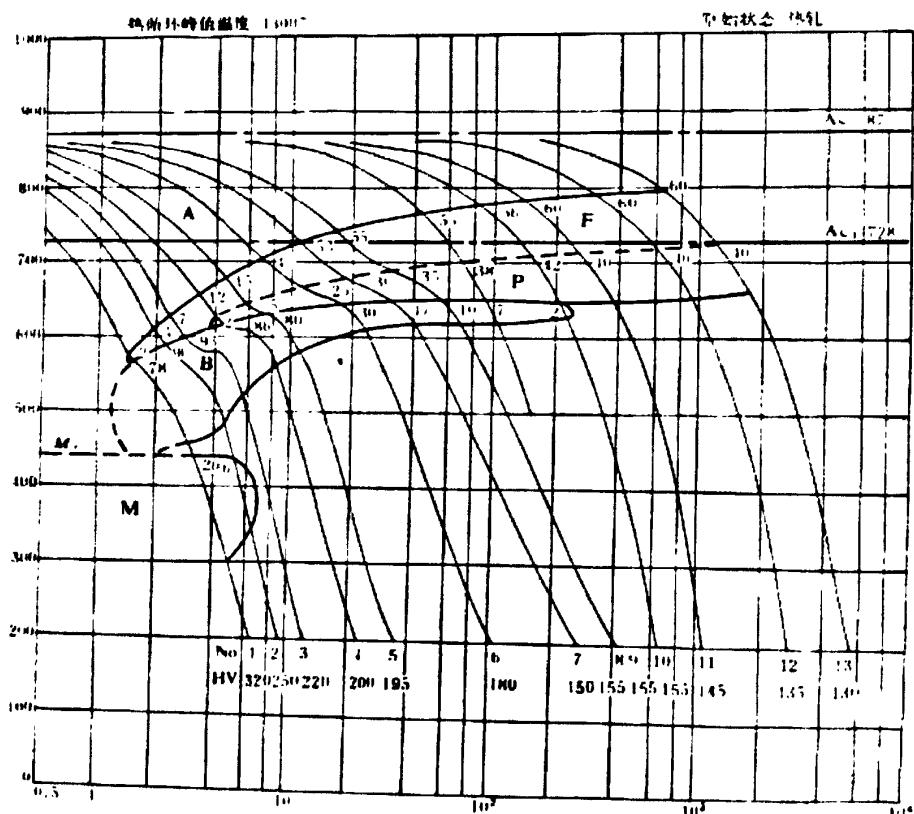
3.1 固态相变原理

3.1.1 低碳钢焊接 CCT 图

低碳钢 Q235 焊态组织根据冷却条件的不同,包括先共析铁素体 (PF)、针状铁素体 (AF)、珠光体 (P)、贝氏体 (B) 和少量马氏体 (M)。图 3-1 a)给出了焊缝固态相变后组织百分数和冷却速度的关系,图 3-1 b)是焊接 CCT 图^[14]。图中的 $t_{m'}$ 是马氏体转变结束的临界冷却时间; $t_{f'}$ 是开始出现铁素体的临界冷却时间; $t_{p'}$ 是开始出现珠光体的临界冷却时间; $t_{e'}$ 是贝氏体转变结束的临界冷却时间。



a) 焊缝固态相变后组织百分数和冷却速度的关系



b) 焊接 CCT 图

图 3-1 Q235 焊接 CCT 图及焊缝固态相变组织百分数

低碳钢焊缝含碳量低，固态相变后将得到铁素体加少量珠光体的结晶组织。铁素体一般都沿原奥氏体边界析出，它们晶粒粗大，把原先凝固组织的柱状晶轮廓保留下来。一部分铁素体还可能具有魏氏组织的形态。魏氏组织是指铁素体呈

网状在奥氏体晶界析出，或者沿一定的方向在奥氏体晶粒内析出，呈现长短不一的针状或片条状，可能直接插入珠光体晶粒内。在过热的晶粒粗大的焊缝中可能出现魏氏组织。确定成分的焊缝金属固态相变组织取决于焊缝金属的成分和过冷奥氏体连续冷却转变时的冷却速度。当冷却速度加快时，低碳钢焊缝的二次组织中还会出现一定量的贝氏体和马氏体^[32]。

3.1.2 固态相变的特点

焊缝金属凝固以后，随着冷却过程的继续，钢铁材料的焊缝金属将发生固态组织转变。最终的转变组织由焊缝的化学成分和冷却条件决定。焊缝在非平衡状态下发生凝固和固态相变，所以组织不会像母材那样均质，铸态的焊缝组织含氧量可达到数百 ppm，它会影响焊缝的性能，同时使 CCT 图左移影响固态相变。下面详细介绍依据化学成分和冷却条件的不同出现的四种典型相变组织的特征。

表 3-1 铁素体转变特征及金相组织形貌

铁素体类型	转变温度	形态	典型金相图 ^[32]
先共析铁素体 (PF)	770~680℃	呈细条状分布在奥氏体晶界，有时也呈块状	
侧板条铁素体 (FSP)	700~550℃	从晶界 PF 的侧面以板条状向晶内成长，如锯齿状	
针状铁素体 (AF)	500℃附近	针状分布在原奥氏体晶内，以质点 (氧化物弥散杂质) 为核	

1. 铁素体转变

由于焊缝含碳量较低, 低碳低合金钢固态相变后的组织大部分是沿晶界生长的先共析铁素体(Proeutectoid ferrite), 和晶内生长的针状铁素体(Acicular Ferrite)。焊缝常见组织是这种针状铁素体, 针越细小密集, 其冲击韧性愈好, 所以针状铁素体的数量对焊缝性能有重大影响。在不同焊接工艺条件下随着冷却速度的变化, 先共析铁素体和针状铁素体的形态和数量将改变。当高温停留时间加长缓慢冷却时, 在高温下奥氏体柱状晶界扩散相变产生大量的晶界铁素体。先共析铁素体少量时在奥氏体晶界呈薄而细的条状或不均匀的网状, 大量时呈块状。在仅低于先共析铁素体生成温度下, 从奥氏体晶界会生长出排列整齐的铁素体板条, 在焊后焊缝中经常会发现这种层状组分的组织, 被称为板条铁素体(Ferrite Side plate)。如果焊缝合金中存在一些细化晶粒的元素(如 Ti、B 等), 在奥氏体晶内还会形成细晶铁素体(Fine Grain Ferrite)。这几种铁素体转变特征及金相组织形貌如表 3-1 所示。

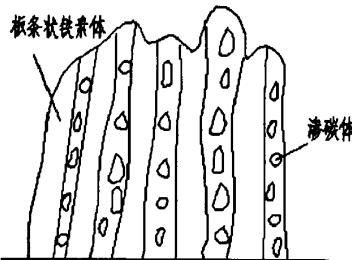
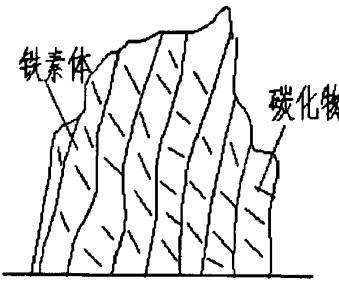
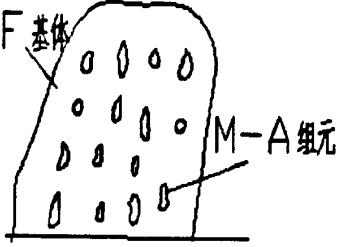
2. 珠光体转变

在非平衡的焊接条件下, 低合金钢焊缝固态转变很少能得到珠光体, 只有在预热、缓冷、焊后热处理等冷却条件下才存在少量珠光体组织。珠光体转变大约发生在 $Ar_1 \sim 550^{\circ}\text{C}$ 之间, 碳和铁原子都比较容易扩散, 是典型的扩散型相变。在焊接条件下, 会部分抑制珠光体转变而扩大铁素体和贝氏体转变, 如果含有细晶元素硼、钛等会完全抑制珠光体转变。由于焊缝一般含碳量较低, 连续冷却时将见到非平衡态的伪共析珠光体组织。珠光体是铁素体和渗碳体的层状混合物, 随着转变温度的降低, 层状结构变得更加薄而密, 需要在光学显微镜下放大 1000 倍以上才能观察到。根据细密程度的不同, 珠光体又分为层状珠光体(Lamellar Pearlite)、屈氏体(Tyusite) 及索氏体(Sorbite)。

3. 贝氏体转变

贝氏体(Bainite, 简称 B) 转变属于中温转变, 约在 $550^{\circ}\text{C} \sim Ms$, 此时碳元素可以扩散但是合金元素已不能扩散。在焊接非平衡条件下, 低合金钢焊缝贝氏体转变出现过渡组织, 机理很复杂。表 3-2 给出了三种典型贝氏体的转变特征及其组织形貌。

表 3-2 贝氏体转变特征及其组织形貌

贝氏体分类	转变温度	组织特征	组织示意图
上贝氏体 (Upper Bainite)	550℃~450℃	沿奥氏体晶界析出呈羽毛状，微观组织为平行的条状铁素体间分布着渗碳体	
贝氏体 (Lower Bainite)	450℃~Ms 之间	黑色针状，微观组织是针状铁素体和针状渗碳体机械混合，针与针之间呈一定的角度。	
粒状贝氏体 (Grain Bainite)	在上贝氏体温 度区	在块状铁素体上 M-A 组元 (富碳奥氏体岛转变成的富碳马氏体和残余奥氏体) 以粒状分布	

4. 马氏体转变

在快速冷却条件下，奥氏体过冷到 M_s 温度以下将发生马氏体转变。马氏体的形貌根据含碳量的不同发生变化。

(1) 板条马氏体(Lath Martensite) 在连续冷却条件下，低碳低合金焊缝中常在奥氏体晶粒内部出现细板条马氏体，马氏体板条之间有一定的交角。电镜观察发现马氏体板条内存在密度约为 $(3\sim9) \times 10^{11}$ 的位错，同时它含碳量很低，因此板条马氏体又称位错型低碳马氏体(Dislocation Low Carbon Martensite)。低碳马氏体有较高的强度良好的韧性，主要在低碳低合金钢焊缝中出现。

(2) 片状马氏体(Plate Martensite) 焊缝中含碳量 $C \geq 0.4\%$ 时将会出现片状马氏体，其形貌特征是：马氏体片不互相平行，初始形成贯穿整个奥氏体晶粒的粗大马氏体，这些大晶粒将阻碍以后形成的马氏体片，所以会出现大小不等存在晶向差异的马氏体片。电镜观察表明，片状马氏体内存在许多细小平行的孪晶带，同时其含碳量较高，故片状马氏体又称孪晶型高碳马氏体 (Twins High Carbon

Martensite)。它的性能硬而脆, 所以焊缝中不希望出现这种组织, 通过降低焊缝的含碳量或采用奥氏体焊条来控制板条马氏体形成, 一般只有在预热温度不够时含碳较高的焊接热影响区才会出现李晶马氏体。

3.2 点焊熔核组织预测

研究焊缝的组织变化以及组织变化对性能的影响, 提高焊接接头的质量, 一直是焊接工作者的一个重要研究课题。电阻点焊作为材料加工的一种方法, 在汽车、航空航天、电子等领域广泛应用。提高点焊质量, 降低生产成本是大家关注的一个问题。点焊接头由于在工件之间的接触表面生成, 具有不可见性, 对其质量研究需要破坏性试验, 成本较高。焊接接头的质量取决于其微观组织结构, 如果能对点焊焊点的微观组织进行预测, 将降低前期试验设计阶段的时间和成本, 提高点焊的质量。本章的主要目的是在点焊温度场模拟计算的基础上, 对点焊熔核组织进行预测, 为提高点焊质量提供指导。

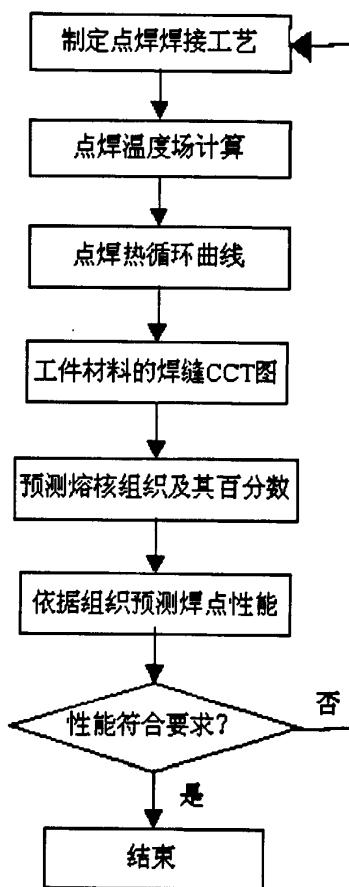


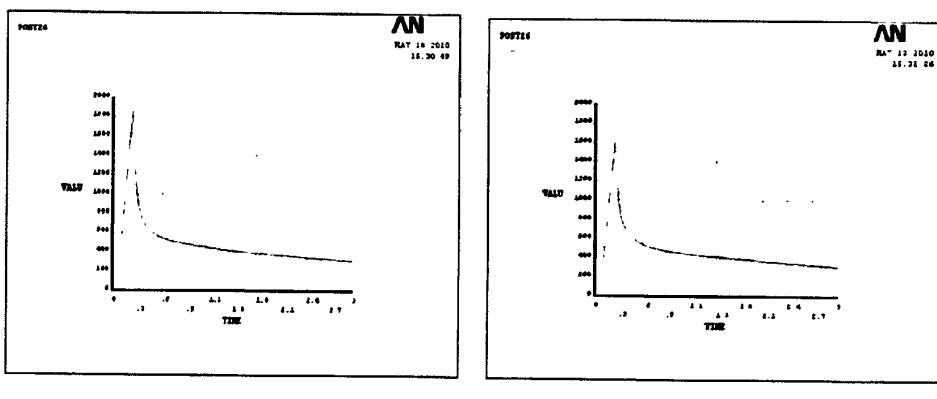
图 3-2 点焊熔核组织预测程序框图

3.2.1 组织预测方法

点焊熔核微观组织主要跟化学成分、冷却速度等因素有关, 本文组织预测方法是依据点焊温度场计算结果, 得到熔核冷却速度, 再与焊接 CCT 图进行比较, 得到熔核中各种组织的百分数, 从而推测焊点的性能。如果熔核微观组织明显的不符合焊缝性能的要求, 需要重新制定点焊焊接工艺。本方法的具体程序设计框图如图 3-2 所示。

3.2.2 组织预测方法的应用

本文依据上述方法对 1mm 厚的低碳钢 Q235 的点焊熔核组织进行了预测。点焊工艺参数为: 电流 6.8KA, 通电时间 240ms, 压力 1600N。应用第二章中点焊温度场模型计算出热循环曲线, 工件接触面上, 距离熔核中心 0.9mm、1.8mm 处的热循环曲线如图 3-3 所示:



a) 距熔核中心 0.9mm

b) 距离熔核中心 1.8mm

图 3-3 点焊熔核处热循环曲线

钢材的碳当量是决定点焊熔核淬硬倾向的主要因素, 碳当量越高, 钢材淬硬倾向越大。焊接时熔核的冷却速度是决定组织性能的另一个主要参数^[33]。现有文献已经提供了不少计算冷却时间 $t_{8/5}$ 的公式或图解方法, 但由于这些公式或方法都是针对一定的材料在一定的试验方法和焊接条件下建立的, 因而在应用上存在着局限性^[34]。本文所建模型能比较可靠的计算点焊工艺参数条件下的冷却速度, 从而比较可靠的预测点焊熔核的组织、性能。点焊熔核冷却速度很快, 用 t_{100} 来衡量过冷奥氏体的冷却速度。从焊接热循环曲线中得到 t_{100} 为 2.65s, 依据图 3-1 a) 焊缝组织百分数和冷却速度关系得出: 贝氏体占 87%, 铁素体占 3%, 马氏体占 10%。

3.3 点焊熔核组织预测的实验验证

为了验证低碳钢点焊熔核组织预测的准确性，本文进行了电阻点焊实验，通过观察熔核的金相组织来判断组织预测结果。

实验材料为 1mm 厚的 Q235 钢板，采用天津大学点焊试验室的 220kw 直流逆变电阻点焊机进行焊接，点焊工艺参数为：电流 6.8KA，通电时间 240ms，压力 1600N。工件焊完之后进行切割、打磨、抛光，再用 4% 的硝酸酒精腐蚀 60s，在光学显微镜下观察点焊接头的微观组织。

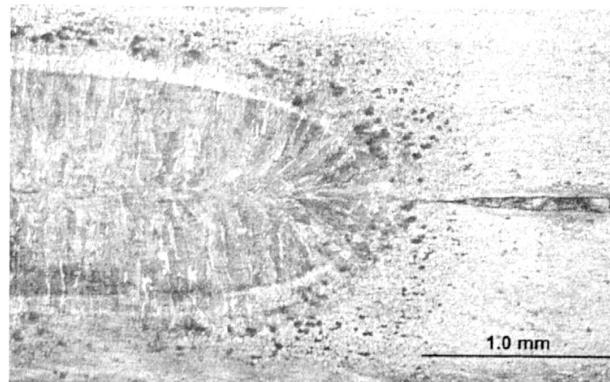
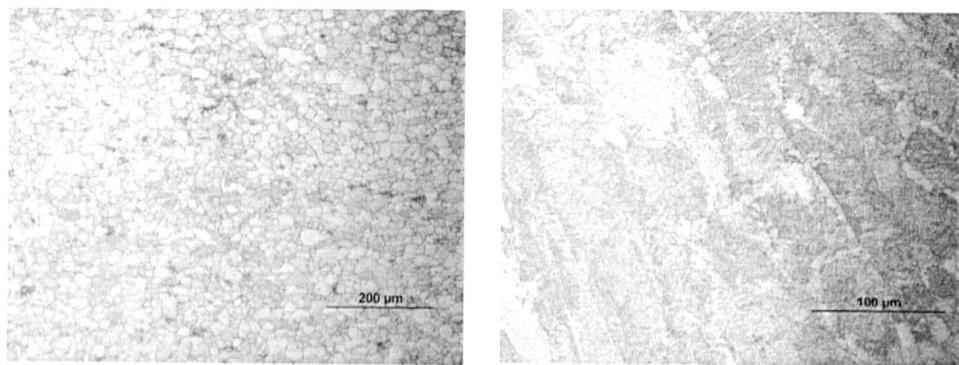


图 3-4 点焊熔核组织形貌

点焊焊点横截面的组织形貌如图 3-4 所示，从图中可以看出熔核区保留着铸态组织形貌，在熔合线附近联生结晶形核后，晶粒最易生长方向沿着散热最快的方向（或温度梯度最大的方向）的晶粒优先成长，一直长到熔核的中心形成粗大的柱状晶体。奥氏体固态相变后的二次组织保留其形貌。在点焊熔核和母材之间是塑性区，晶粒发生了再结晶长大明显细化，它对焊点的强度和塑性有重要影响。



a) 母材金相组织

b) 点焊熔核金相组织

图 3-5 点焊熔核组织

图 3-5 a) 是放大 200 倍后的母材金相组织, 3-5 b) 是放大 500 倍后的熔核金相组织。从图中可以看出母材是规则的铁素体加少量珠光体; 点焊熔核二次组织主要是羽毛状的上贝氏体加少量晶界先共析铁素体和马氏体, 通过划线测量组织比例, 贝氏体的含量大约是 90%, 铁素体含量大约是 6%, 马氏体含量大约是 4%, 与预测结果基本吻合, 说明本章点焊熔核组织预测方法是可行的。

3.4 本章小结

(1) 介绍了焊接接头固态相变的特点, 根据冷却条件的变化, 焊接接头固态相变过程中可能出现铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体。给出的低碳钢 Q235 焊接 CCT 图进一步证实了固态相变的特点。

(2) 提出了预测点焊熔核组织的方法: 首先计算点焊温度场, 根据点焊热循环曲线得到熔核冷却速度, 结合焊接连续冷却组织转变图 (CCT 图), 得到电阻点焊熔核中各种组织的百分数, 为进一步推测焊点的性能提供指导。

(3) 根据上述方法, 对碳钢 Q235 点焊熔核组织进行了预测, 当点焊工艺参数为: 电流 6.8KA, 通电时间 240ms, 压力 1600N, 根据冷却速度从 CCT 图上得出点焊熔核主要是贝氏体、少量的铁素体和马氏体。然后通过实验证明了点焊熔核组织预测的准确性。

第四章 基于元胞自动机的点焊熔核微观形貌研究

元胞自动机是一种理想的物理系统模型，通过元胞之间简单的相互作用模拟动态系统的演化，可以用来处理整体上高度复杂的离散过程和现象。CA 方法在流体动力学、晶体的再结晶和形核生长等方面广泛应用。本章首先介绍了元胞自动机，然后建立模型计算微观组织形貌。微观组织模拟需要基于一定的数学物理基础，本章给出了微观组织形核和生长的数学公式以及在模型中的具体处理方法。最后通过建立的元胞自动机模型研究了点焊熔核的微观形貌，并且通过实验进行验证。

4.1 元胞自动机方法

元胞自动机 (Cellular Automata, 以下简称 CA)，是一种在时间和空间离散，只取有限物理变量的理想化的物理系统模型。它可以计算复杂的物理系统在空间一时间上的演化规律。CA 方法最初是由美国著名数学家、计算机创始人 Von Neumann 和 Ulam 提出的替代生物机体的一种可能的理想计算模型，这种简单的模型是将方形平面划分成网格，其中每一个格点代表一个基元，在事先设定的转变规则下，用平面里实格或空格的变动来代表基元的演化^[35]。

1970 年一个叫 J.H.Conway 的剑桥大学学生用 CA 法编写了“生命”游戏程序，在《科学美国人》的数学游戏专栏发表后引起了人们的兴趣和关注。这个游戏包括一个二维矩形，矩阵里每个方格居住着一个活着的或死了的细胞。细胞在每一时间步的生死取决于相邻邻居的状态。随着游戏的进行，矩形里杂乱无序的细胞会逐渐演化出各种精致、有形的图案。80 年代 S. Wolfram 进一步系统阐述和拓展了 CA 的基本性质，此后 CA 方法在流体动力学、晶体的再结晶和形核生长、城市交通问题等很多学科中得到了广泛的应用。从 80 年代开始 Packard、Rappaz、Lee 和 Brown 等人先后开始用 CA 方法对金属凝固中的结晶组织进行模拟研究，随后涌现出大量材料组织演变模型，包括凝固、共晶生长、树枝晶枝晶生长、再结晶、晶粒长大等过程^[36-38]。

CA 法的基本思想是：在一个元胞自动机模型里，体系在空间上被划分成有限个元胞，在时间上也离散化为一定大小的时间步，每一元胞设定有限个分立的状态。每一个元胞依据演变规则在每一时间步里转变状态，这种转变是在体系所有元胞中同步进行。一个元胞的状态受其邻胞状态的影响，同时也会对邻胞状态

产生影响，一定范围内的元胞相互作用、相互影响。因此可以通过简单离散的元胞分析复杂体系，这是很有用的思想方法^[39]。

4.1.1 元胞自动机的特点

CA法可以看作一种描述在时间和空间上离散的复杂系统的算法，它依据一定原理设计转变规则，作用在空间里规则的元胞网格上。CA法可以看作一种动力系统，分布在规则网格上的元胞取有限个状态值，依据相同的转变规则局部作用进行更新。通过元胞之间简单的相互作用模拟动态系统的演化，可以用来处理整体上高度复杂的离散过程和现象。元胞自动机具有三个典型特点：

(1) 离散性 元胞自动机的离散性表现在空间、时间和元胞状态值上。这一特征使它在总体表现宏观物理系统时极大地简化了计算和处理过程；

(2) 演变规则的一致性 对于离散化的元胞自动机系统，所有元胞依照演变规则同时进行模拟计算，演变规则是通用的；

(3) 相互作用的局部性 每一时间步元胞的状态由邻居的状态值决定，对于具体的元胞相互作用是局部的。正是因为元胞自动机能够利用简单的、局部规则和离散的方法描述复杂的、全局的、连续系统，使它在科学的研究的许多领域产生了巨大的影响。

4.1.2 元胞自动机的构成

元胞自动机模型的基本要素包括：元胞空间、元胞、邻居、状态变量和转变规则等^[36]，模型中各个要素的相互关系如图4-1所示。

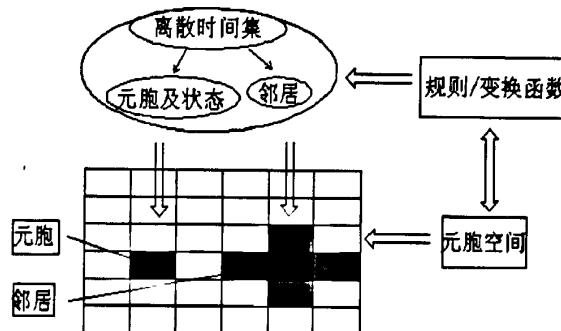


图4-1 CA各个要素的相互关系

1. 元胞空间 元胞空间是元胞自动机计算区域的总和，它可以是一维空间，二维、三维乃至多维空间。一般情况下，应用比较多的是二维和三维元胞空间，

因为它与实际情况的联系更紧密。

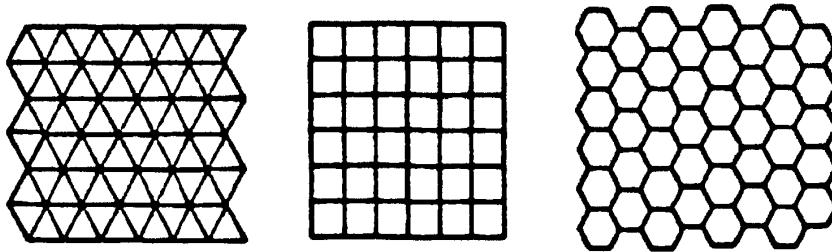
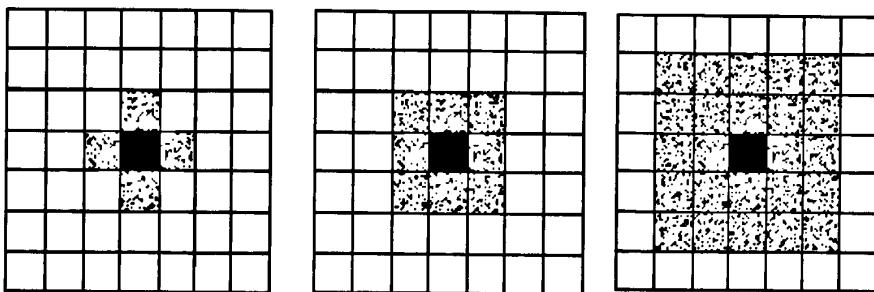


图4-2 二维空间常用的CA元胞类型

2. 元胞 元胞是构成CA的基本单元，一般情况下元胞形状规则，是元胞空间离散后的基本单元，具有有限个状态，同时每个元胞都有自己特属的“邻居”，也就是与自己具有特定位置关系的元胞。根据几何形状的特点，二维元胞空间里经常使用三角形网格，正方形网格和六边形网格作为元胞，如图4-2所示。

3. 邻居 邻居是指在设计演变规则时，制定的对元胞状态有影响的元胞。元胞自动机演化规则是局部的，通过邻居的状态值决定元胞的更新。因此，邻居的具体定义方法十分重要，原则上只要所有元胞具有相同的邻居分布，无需限制邻居的范围。但是，实际应用时演变规则的复杂程度跟元胞的邻居数量呈指数关系，如果邻居范围太大就会使得演变规则太复杂不能应用，所以常见的是使用近邻的几个元胞作为邻居。不同的作者对邻居定义不同，主要有图4-3所示的三种类型邻居：冯-诺依曼(Von. Neumann)型；摩尔(Moore)型；扩展的摩尔(Moore)型。



冯-诺依曼(Von. Neumann)型 摩尔(Moore)型 扩展的摩尔(Moore)型

图4-3 CA的邻居类型

4. 转变规则 转变规则是CA的核心部分。转变规则对每一个元胞是相同的，并且同时应用在整个元胞空间。但是在特殊位置上，演变规则是需要变化对待的，例如二维元胞空间四周边界上的元胞，它们部分近邻邻居不存在，此时如果转变

规则不变化会出现错误不能计算，所有需要给特殊位置的元胞做出标记，在使用转变规则时能够识别出差异。转变规则的变化对计算结果影响很大，不同的邻居在相同的转变规则下结果也不同，因此需要根据实际意义规定转变规则。

5. 状态变量 对于不同的系统，需要考虑的影响因素不同，状态变量也不同。比如用元胞自动机模拟铝合金铸件的凝固过程，此时需要考虑的状态变量有液相金属温度、元胞的状态值（液态、固态、或者凝固的界面）、过冷度、晶粒结晶取向等。

4.2 微观组织模拟的数学物理基础

结晶过程包括形核和长大两部分，宏观上形核和长大两个过程互相重叠，最终组织是形核和生长共同作用的结果。液相中满足一定尺寸的质点才能形核，晶粒形核后液相原子不断向上堆砌，界面推进长大。晶体的生长受界面前沿的温度、界面结构和溶质引起的成分过冷等因素影响。下面将详细讨论形核和生长过程中的一些数学物理模型。

4.2.1 形核模型

焊接接头凝固时主要通过外来质点或衬底优先非均质形核，这些形核的质点或衬底可能是人工添加的合金元素，也可能是液相原有的。在微观组织的模拟过程中，现在常用的有瞬时形核和连续形核模型。瞬时形核模型计算时间短，在结晶区窄的合金中使用。该模型虽然可以计算凝固过程中的固相率，但不能解释形核密度、冷却速度等对结晶晶粒大小形态的影响，不利于准确预测晶粒度。

基于瞬时形核模型的局限性，Rappaz等人提出了高斯分布的连续形核 (continuous nucleation) 模型^[40]，如图4-4所示。该模型假设形核现象发生在液相中不同的位置上，用连续的分布函数来描述形核密度，如式4-1所示：

$$\frac{dN}{d(\Delta T)} = \frac{N_{\max}}{\sqrt{2\pi\Delta T_\sigma}} \exp\left[-\frac{(\Delta T - \Delta T_{\max})^2}{2(\Delta T_\sigma)^2}\right] \quad (4-1)$$

式中 ΔT_{\max} 是形核所需最大过冷度 (K)；

ΔT_σ 是标准方差过冷度 (K)；

N_{\max} 是最大形核密度 (m^{-3})。

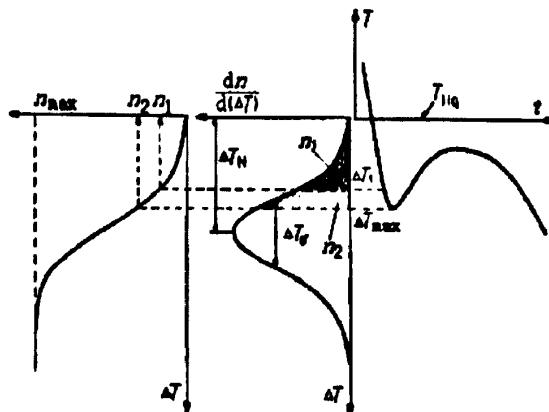


图4-4 连续形核模型

上述 ΔT_{\max} ， ΔT_c ， N_{\max} 均需实验测得。该模型假设晶核是瞬时出现的，形核密度和过冷度是正态分布的关系，随 ΔT 的增加 $dN/d(\Delta T)$ 迅速地非线性增大再迅速地非线性减小，当过冷度等于最大形核过冷度 ΔT_{\max} 时，形核密度达到最大值 N_{\max} ，晶核密度的变化趋势是慢—快—慢。

4.2.2 枝晶生长动力学模型

形核后紧接着就会发生生长过程，枝晶合金的凝固生长情况比较复杂，因为树枝状晶的晶粒形状复杂不能简化为球体处理；枝晶生长受动力学过冷影响，还受成分过冷控制；需要考虑是否发生柱状晶向等轴晶的转变 (CET)。

晶体的生长与界面前沿的结构、温度条件和合金本身的性质有关，凝固过程中枝晶前沿过冷度 ΔT 组成是：

$$\Delta T = \Delta T_c + \Delta T_i + \Delta T_r + \Delta T_k \quad (4-2)$$

其中 ΔT_c 、 ΔT_i 、 ΔT_k 和 ΔT_r 分别为成分过冷度、热过冷度、动力学过冷度和曲率过冷度。

由于杂质存在，界面凝固温度下降 $\Delta T = -mC_0$ ，是成分过冷度 (constitutional undercooling)，式中 m 是液相线的近似斜率。由于液相中温度的热传导，使液相温度低于凝固点温度称为热过冷度。由曲率引起的弯曲界面温度与平直界面上的凝固温度之偏差 $\Delta T = T_i - T_M$ 称为毛细过冷度 (capillary undercooling)。对于固性指状曲面，曲面平均曲率 $\kappa < 0$ ，毛细过冷度 $\Delta T < 0$ 。根据推广后的 Gibbs-Thomson 条件^[41]，界面凝固温度变为：

$$T_l = T_L = T_S = T_M (1 + 2\kappa \frac{\gamma}{\Delta H}) + mC - \mu_{-1} V_l \quad (4-3)$$

目前应用比较广泛的枝晶生长动力学可用KGT模型来处理。该模型认为枝晶尖端半径 R 和生长速率 v 受以下两式的控制:

$$\Omega = Iv(Pe_t) = Pe_t \exp(Pe_t) E_t(Pe_t) = \frac{c_t - c_0}{c_t(1 - k)} \quad (4-4)$$

$$R_t = \lambda_{MS} = 2\pi \left(\frac{\Gamma}{mG_c \xi_c(Pe_t) - G} \right)^{1/2} \quad (4-5)$$

式中: 溶质 Pe'clet 数为 $Pe_t = R_t v_t / (2D_t)$; $Iv(Pe_t)$ 为 Ivantsov 函数; G_c 为枝晶尖端溶质梯度; G 为枝晶前沿液相中的温度梯度; $\xi_c(Pe_t)$ 为 Pe'clet 数的函数, 在低的生长速度时等于1。

Rappaz 和 Kurz 基于 KGT 模型, 研究了枝晶尖端动力学, 给出了枝晶尖端生长速度 v 与过冷度 ΔT 之间简化的关系为

$$V = \alpha \Delta T^2 + \beta \Delta T^3 \quad (4-6)$$

式中的 α, β 为增长系数。

4.2.3 组织形貌的影响因素

观察焊缝断面, 会发现焊缝中主要是柱状晶和少量等轴晶的晶体形貌。如果对这些晶体在显微电镜下进行微观分析, 会发现柱状晶和等轴晶具有不同的亚晶形态。每个柱状晶的结晶形态包括平面晶、胞晶和树枝状晶等, 而等轴晶内大都呈现树枝晶。组织形貌的不同, 取决于金属的散热条件和温度梯度的不同。

1. 温度梯度对结晶形貌的影响

(1) 正温度梯度 液相温度高于固相温度时, 随着到界面距离的增加液相温度升高, 这时液相金属中具有正的温度梯度。这种情况在纯金属焊缝凝固时很常见。因为液态金属的温度高, 结晶过冷度很小, 所以晶体在液态金属内部生长很慢, 得到平滑的晶界 (所谓平面晶), 如图 4-5 a) 所示。

(2) 负温度梯度 如果随着到界面距离的增加液相温度逐渐降低, 这时具有负的温度梯度即 $G < 0$ 。因为液态金属内的温度低于界面, 过冷度大, 晶体在液态金属中生长速度很快, 形成带有分枝的树枝状晶, 如图 4-5 b) 所示。

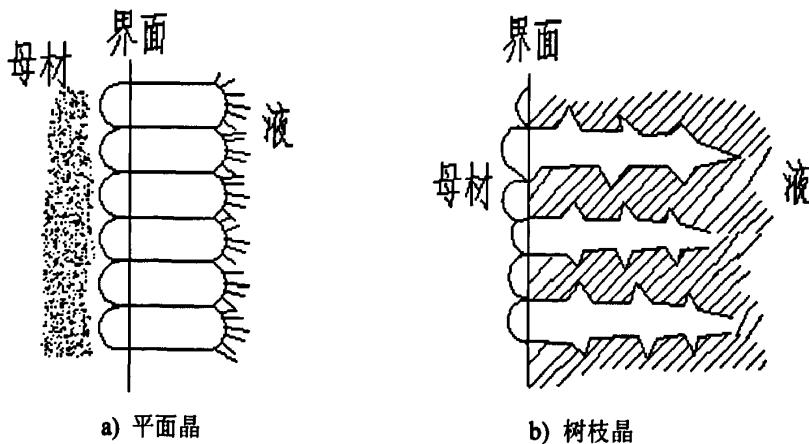
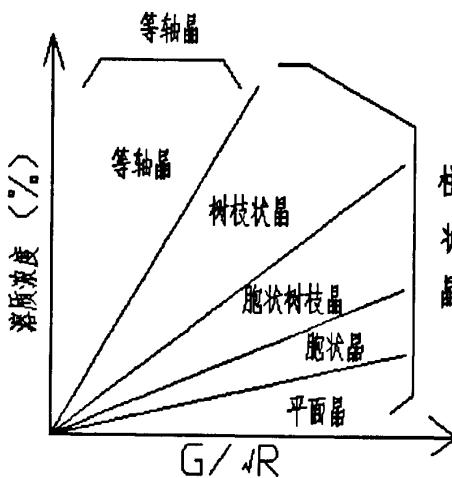


图 4-5 温度梯度对结晶形貌的影响

2. 成分过冷度对结晶形貌的影响

固溶体合金的结晶特点是在一定的温度范围内异分结晶，即结晶生成固相和液相的成分不同。因此合金凝固时，除了由于热传导引起的过冷之外（温度过冷），还存在界面处成分起伏引起的过冷（称为成分过冷）。所以合金结晶时在热过冷小的情况下也可能出现树枝状晶^[14]。

根据实验 W. F. Savage 等人认为，结晶形貌与合金中溶质的浓度 C_0 、晶粒生长速度 R 和温度梯度 G 有关。这些因素对结晶形貌的影响如图 4-6 所示。简单来说，当合金中溶质浓度提高让成分过冷增加，或晶粒生长速度 R 很大时，结晶形貌由平面晶向胞状晶、胞状树枝晶、树枝晶以及等轴晶转变。当合金中溶质浓度 C_0 和结晶速度 R 一定时，结晶形貌随着温度梯度的增加由等轴晶、树枝晶逐步向平面晶演变。

图 4-6 C_0 、 R 、 G 对结晶形貌的影响

(1) 树枝状结晶形貌 当成分过冷较大时, 在晶体内部很长的主干将向四周伸出二次横枝, 此时的二次横枝有足够的生长空间和生长过冷条件, 将会得到形貌明显的树枝状晶, 如图 4-7 所示。

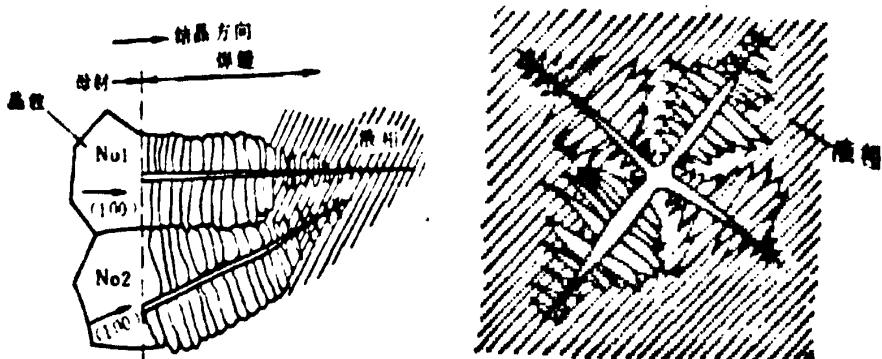


图 4-7 树枝状结晶形貌

图 4-8 等轴晶结晶形貌

(2) 等轴结晶形貌 如果液相中的温度梯度相对较小, 而成分过冷区域很宽, 在结晶前沿除了树枝状结晶形貌还会形成新的晶核, 即发生了柱状晶向等轴晶的转变 (CET), 这些新晶粒的四周不受阻碍, 满足过冷生长条件会自由生长成等轴晶, 如图 4-8 所示。

4.3 点焊熔核微观组织形貌模拟方法

点焊熔核的凝固是一个非常复杂的过程, 包括了许多的传质现象, 如热量、质量和能量等, 晶体生长过程中受各种因素的影响, 如过冷度, 冷却速度等^[42]。由于目前对焊缝凝固组织的研究还处尝试阶段, 因此为简化分析, 在模拟过程中作了以下假设:

- (1) 由于点焊熔核是一个液态金属凝固的过程, 而热影响区是晶粒再结晶长大的过程, 因此本文只考虑了熔核区的微观组织模拟;
- (2) 微观组织模拟是在二维元胞自动机基础上进行的;
- (3) 微观组织的模拟需要考虑的热力学、动力学参数比较多, 本文由于时间有限, 一些参数自己没能通过实验获得, 主要是借鉴文献中的现有实验数据和相关材料性能参数。

4.3.1 建立统一的宏观/微观模型

现有的对焊接过程数值模拟研究都集中在宏观模型上, 依据能量守恒等连续

方程来计算温度场，再在耦合场的基础上分析热应力、相变等。由于微观组织模拟计算量很大，考虑到计算机资源的限制，宏观模型有很大的局限。然而，形核和生长过程的微观模拟不能脱离宏观的温度场或热流场，所以在宏观模型的某一区域进行微观组织模拟计算。

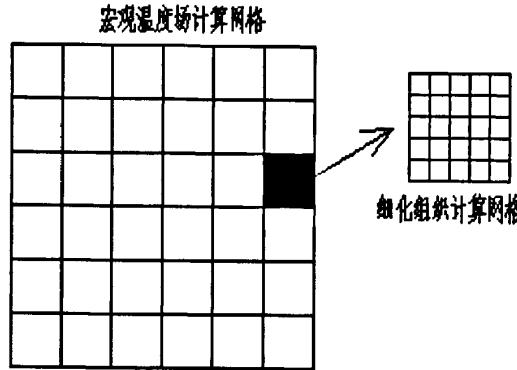


图 4-9 熔核区微观组织模拟网格模型

本文在宏观温度场模拟的基础上再细化网格进行微观组织模拟计算，计算模型如图 4-9 所示。因此在选定研究区域后（本文是点焊的熔核部位），在宏观温度场计算的基础上，细分网格，用于元胞自动机微观组织形貌的模拟。在细化网格时需要保证每个单元是尺寸相同的正方形，与二维元胞自动机元胞单元吻合，方便整个元胞空间的处理。

4.3.2 点焊熔核区晶体的形核

本研究采用连续形核模型（如上节所述），假设晶核数与过冷度保持连续的依赖关系。在某一过冷度 ΔT 时所形成的晶粒密度 $n(\Delta T)$ 可由形核分布曲线的积分求得：

$$\delta n = n[\Delta T + \delta(\Delta T)] - n(\Delta T) = \int_{\Delta T}^{\Delta T + \delta(\Delta T)} \frac{dn}{d(\Delta T')} d(\Delta T') \quad (4-7)$$

晶粒密度 δn 乘以熔体体积 V 可由得到每一时间步内，新形核的晶粒数 δN ，这些新形核的晶核在整个元胞空间内随机分布，其形核概率为：

$$p = \delta n * V_{CA} = \frac{\delta N}{N_{CA}} \quad (4-8)$$

式中 N_{CA} 为网格单元数， V_{CA} 为网格单元的体积。

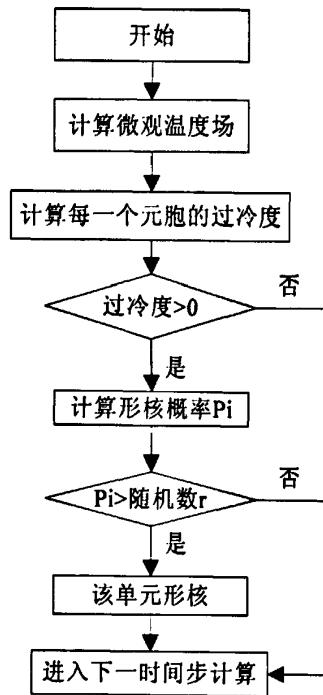
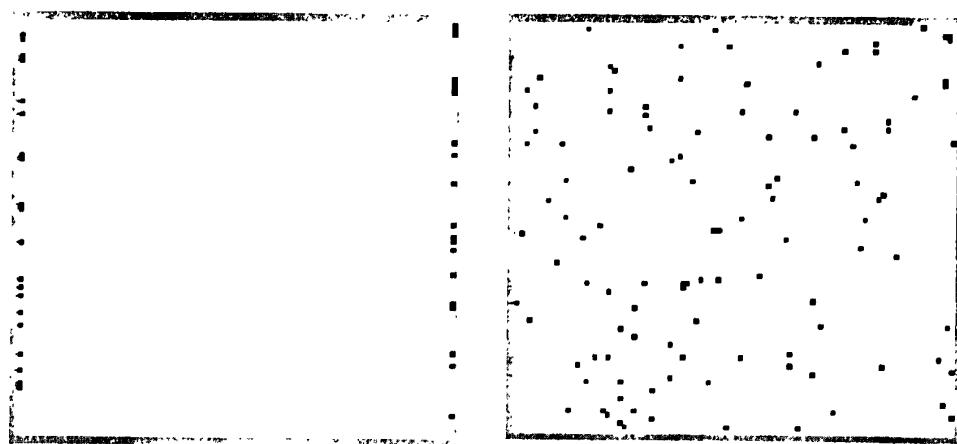


图 4-10 晶体形核的流程图

每一步长 δt , 赋予每一个元胞一个随机数 r ($0 < r < 1$)。扫描所有的 CA 单元, 如果单元为液态, 计算其形核概率 P_i 并与随机数 r 比较, 如果 $P_i > r$ 此单元就能形核凝固, 单元的状态由液态转变为固态, 并用不同的正整数标记形核方向 (有文献指出 48 个类别的正整数能代表跟实际情况基本吻合的晶粒结构)。在二维情况下, 枝晶的生长存在四个可能的 $<10>$ 方向, 形核后的单元等几率地具有上述四种结晶取向。模拟晶体形核的具体流程如图 4-10 所示。



a) 四周元胞随机形核

b) 内部元胞随机形核

图 4-11 晶体形核模拟图

依据上述晶体形核的计算公式和形核程序框图, 用 MATLAB 语言编程模拟微观组织的形核过程。图 4-11 a) 是在元胞自动机的边界, 模拟在点焊熔核半熔化的熔合区附近的异质形核过程。图 4-11 b) 是在元胞自动机的内部, 模拟当成分过冷时在点焊熔核内部等轴晶的形核。

4.3.3 点焊熔核区晶体的生长

CA 单元形核后会按一定的规律生长。计算在固 / 液界面上液态元胞的温度及各组元的溶质含量后, 依据下述条件判定它们是否能够转化为固态:

- (1) 液态元胞近邻有固态元胞;
- (2) 液态元胞的平衡温度要低于凝固温度, 这个凝固温度由平衡溶质浓度在合金相图上对应的液相线上的温度确定;
- (3) 取一随机数 r ($0 < r < 1$), 如果它小于近邻固态元胞在该方向的捕获概率, 这个液态元胞转化为固态, 同时向近邻的液态元胞析出溶质, 并释放结晶潜热;
- (4) 对于固态元胞, 要计算其捕获近邻液态元胞使之固化的概率以及向近邻液态元胞的生长速率。

模型中, 假设固态元胞不能再转化为液态元胞, 而且溶质只能从固化元胞析出到近邻。晶体生长的具体模拟流程如图 4-12 所示:

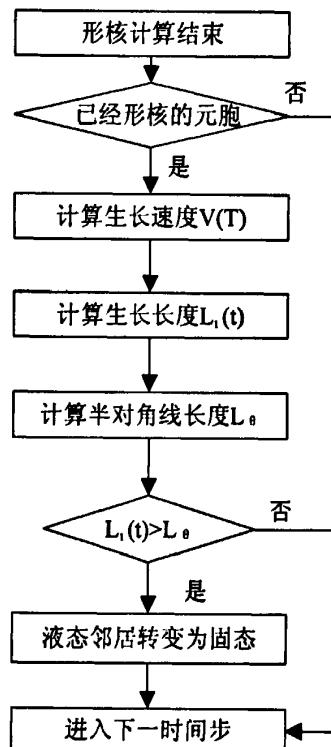


图 4-12 晶体生长的流程图

当晶粒生长时,晶核捕获周围液态节点使它变成固态,生长时捕获的元胞与晶核保持相同的生长取向。在数值计算上,本文引用Rappaz的处理方法^[36]。如图4-13所示:

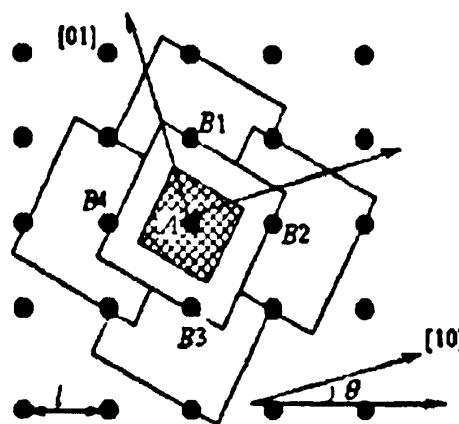


图4-13 CA单元生长示意图

如图所示, A是网格单元的一个形核结点,它在某一时刻 t_A 形核,晶粒的最易生长方向与x轴成 θ (可随机选取为 $-45^\circ < \theta < 45^\circ$)。在 t_B 时刻,晶粒的半径(图中阴影四边形的半对角线长 $L(t)$)等于枝晶尖端长大速度在整个时间段的积分,即:

$$L_i(t) = \int_0^{\delta t} v_i dt \quad (4-9)$$

式中 $i=0,1,2,3$ 分别表示 E, S, W, N 四个近邻元胞方向;

v_i 表示晶粒的生长速率。

在 t_B 时刻, A结点形核长大接触到四个相邻单元B1,B2,B3,B4。这时晶粒半对角线长 $L(t_B)$ 等于 $L_i = L_0 [\cos(\theta) + \sin(\theta)]$, L_0 是元胞的网格间距。CA模型规定此时单元B1~B4凝固,其生长方向是与原始结点A相同的整数。这样晶核就通过不断捕获周围的液态单元继续长大,在下一时刻捕获C的八个结点,依次类推。

根据上述的晶粒生长计算公式和程序设计框图,利用MATLAB语言编程计算了晶核的生长情况。图4-14 a) 是模拟的柱状晶生长,可以看见晶核是沿着散热最快的方向向熔核内部生长,主干生长很快,横向由于过冷度小生长缓慢。图4-14 b) 是模拟的等轴晶生长,可以看出在熔核内部,晶核在成分过冷的控制下向四周均匀生长,在不相互碰撞的前提下生长出等轴晶。

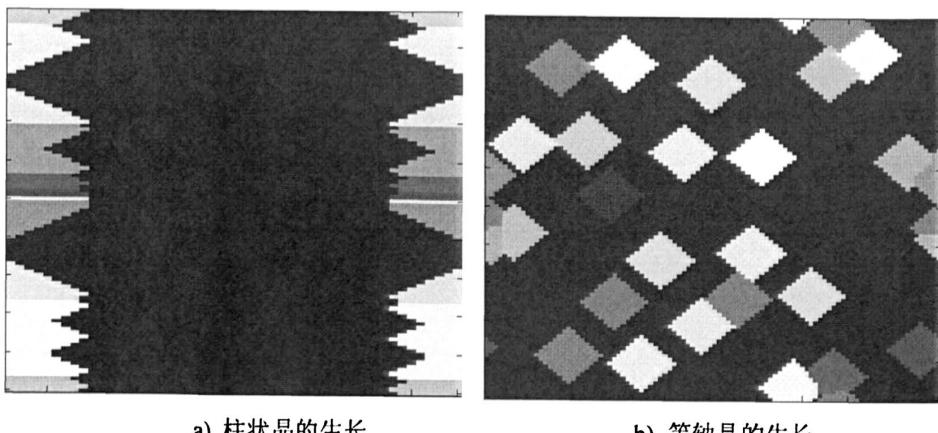


图4-14 晶体生长模拟图

4.3.4 模拟结果后处理模块

随着计算机技术的发展，软件都向使用方便，界面友好的方向发展。微观组织模拟结果为了达到上述目的，将复杂的计算结果利用图形实时显示出来，使计算结果更加直观。根据晶粒形核和生长的过程，用不同的颜色表示不同的晶粒，从而可以根据元胞单元的多少来预计晶粒的大小，分清不同晶粒的边界和晶粒度。图 4-15 给出了在相同的初始温度下，给定冷却速度下的晶粒形核和生长的模拟结果。

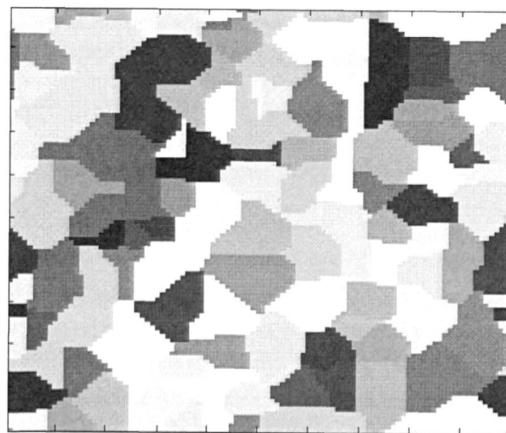


图 4-15 等轴晶 CA 模拟结果显示

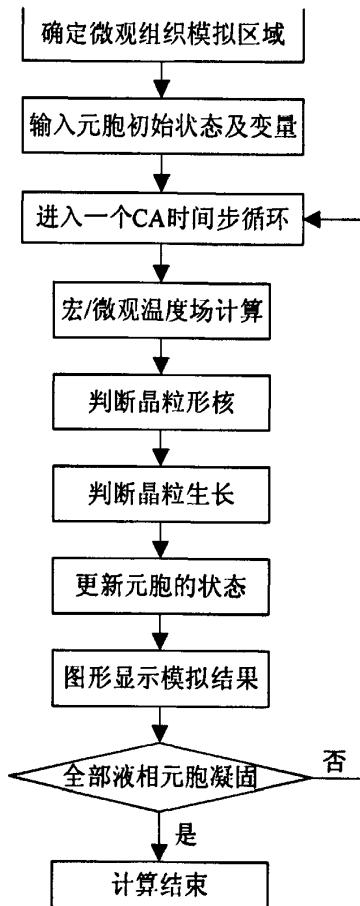


图 4-16 点焊熔核微观组织模拟程序框图

综上所述，将晶粒的形核、生长以及计算结果的显示三部分结合起来，得到整个点焊熔核微观组织形貌模拟的程序框图，如图 4-16 所示。

4.4 点焊熔核微观组织模拟结果及分析

本文模拟程序是用 MATLAB 语言编写的。美国 The MathWorks 公司推出的 MATLAB 语言是国际科学界应用和影响最广泛的三大计算机数学语言之一。MATLAB 提供了一个完善的程序设计语言环境，该语言在形式上与 C 语言相似，但它的编程效率比 C 语言高得多，因为用 MATLAB 语言编程，不需要事先定义变量，不需要考虑数据类型，系统会自动把所有的数据统一处理成动态变化的矩阵。

根据元胞自动机的定义，本文依据以下规则建立 CA 模型：(1) 整个研究区域被分成规则的元胞网格；(2) 每一个元胞具有确定数目的邻居；(3) 每一个元胞的特征由一些变量表示，例如：温度、晶粒生长方向、状态数等；(4) 在每一

时间步中，元胞变量及状态的改变由演化规则决定。本模型在计算中选取 Von Neumann 的近邻定义，即只考虑元胞与四个最近邻单元之间的相互作用。每个元胞的特征由元胞的生长方向（取 0-48，其中 0 表示液态，1-48 表示晶粒的结晶取向）、状态数（取 1 表示固态，0 表示液态）、温度值、生长状态值确定。

本文程序设计是依据宏微观模型来计算温度场，但是由于时间有限，为了完成整个框架计算，本文简化计算给整个区域一个相同的初始温度，让元胞在给定的冷却速率下凝固。每一个元胞初始状态数为 0，代表液相状态。在当前模型中， $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的计算区域被划分为 100×100 的正方形网格，即每个元胞的边长为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。将该二维元胞自动机模型应用到点焊熔核凝固过程中。

4.4.1 柱状晶的点焊熔核微观组织模拟结果

研究点焊熔核的性能，首先需要了解合金中各组元相互作用形成了哪些相，然后研究这些相的形态、大小、数量和分布情况。上一章主要研究了点焊熔核凝固后的组织，下面将要研究点焊熔核中的组织形态、大小和分布情况。

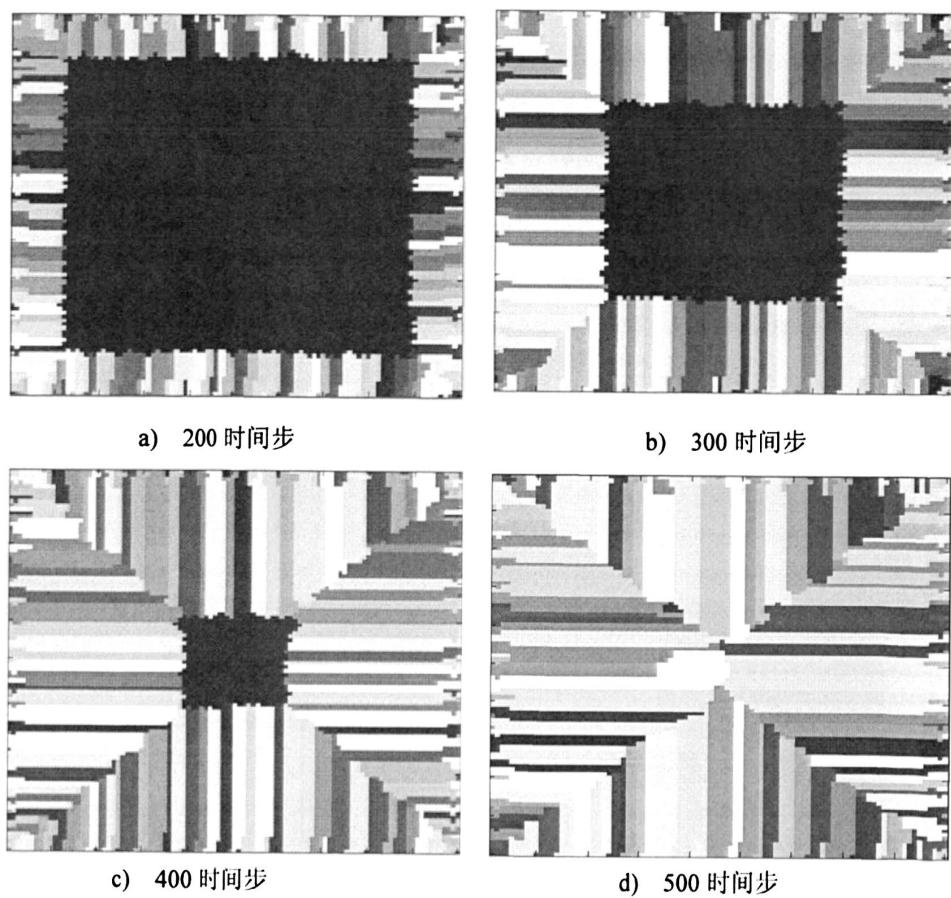


图 4-17 柱状晶微观组织模拟结果

在规范的点焊工艺下,不同材料由于自身化学成分,材料物理性能参数的不同会出现不同的组织形态。纯金属(如钛、镍等)和结晶温度区间比较窄的合金(如钛合金、钢、合金钢等)的熔核组织一般情况下全是柱状组织。而铝合金的薄板点焊时,由于材料导热系数大散热快,熔核组织是“柱状+等轴”组织。本文分别研究上述两种组织形态。图 4-17 是柱状晶的微观组织模拟结果。

图 4-17 只是熔核区的微观组织,模拟结果的边框是从熔合线开始的。图中的蓝色部位是指液态区,不同的颜色代表不同的晶粒。如图 4-17 a)所示,液态的熔核在点焊电流停止后温度降低,当温度降低到形核所需要的过冷度后,液态金属就在处于半熔化状态的熔合线上异质形核结晶。本文模型采用了连续形核模型,即晶粒的数目和过冷度保持一定的关系。由于点焊熔核是通过电极和母材金属散热,对于导热性差或用硬规范进行点焊时,加热集中而散热作用弱,熔核中的温度梯度很大。熔核线附近的最佳形核点被晶核占满后,基本上就不容易形成新的晶核了。从图 4-17 b)可以看出晶粒的竞争生长现象。不同的晶粒具有不同的位向,模型中用不同的颜色表示。一般体心立方金属的枝晶择优长大方向总是沿着 $<1\ 0\ 0>$ 晶体位向。在二维元胞自动机模型中存在四个可能的 $<1\ 0>$ 方向,在点焊熔合线附近形核的晶粒虽说等几率的具有上述四种结晶取向,但是由于上下位向已经被其它晶粒占据,同时只有在散热最快的方向上晶粒才能长大。只有那些最易生长方向和散热最快方向一致的晶粒才能优先得到生长。有些晶核的取向由于不利于成长,与最快散热方向不一致,这些晶粒就不能继续生长。图 4-17 c)中那些最有利长大的晶粒,沿着温度梯度方向不断长大,形成粗大的柱状晶;图 4-17 d)可以看见柱状晶一直长到了熔核的中心,相互碰撞后停止生长,此时整个熔核都是液态,凝固过程结束。

4.4.2 “柱状+等轴”的点焊熔核微观组织模拟结果

对于铝合金,由于金属导电导热性好,点焊熔核是“柱状+等轴”组织,它的微观组织模拟结果如图 4-18 所示,图中的蓝色是液相区,不同的颜色代表不同的晶粒。

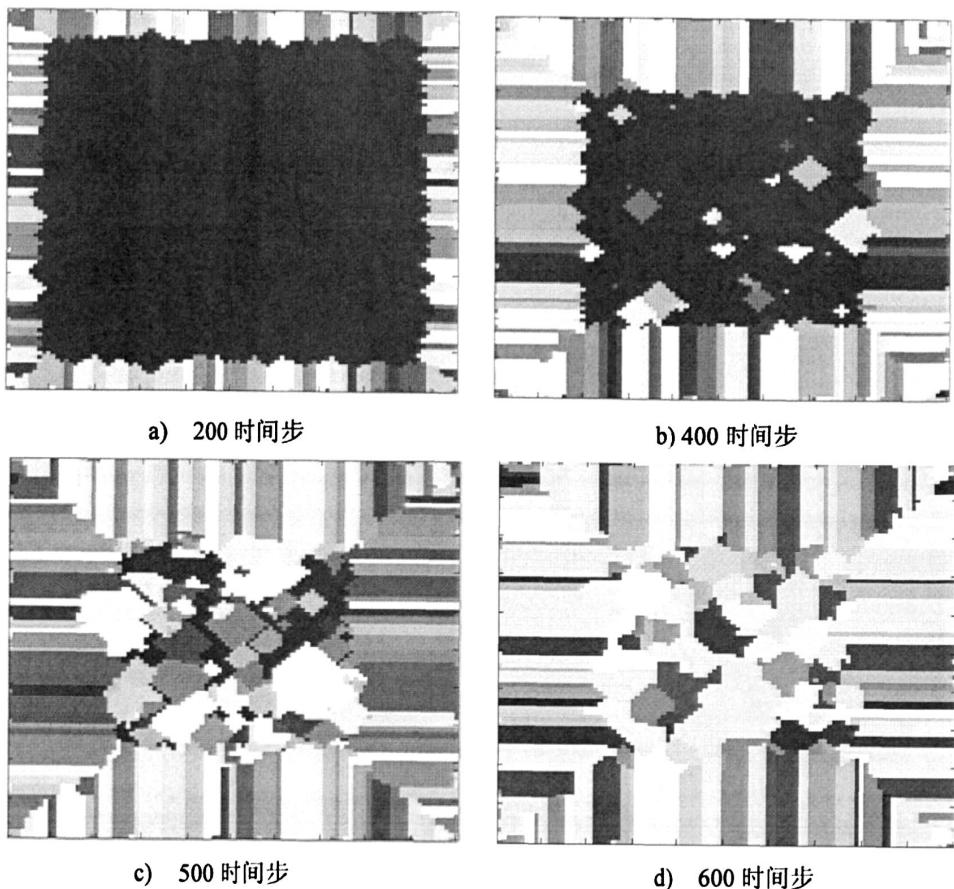


图 4-18 “柱状+等轴”微观组织模拟结果

根据凝固原理,熔核的凝固组织形态由溶质浓度 C_0 、晶粒长大速度 R 和液相中的温度梯度 G 决定。由于母材和铜电极的极冷作用,在熔合线附近具有很大的温度梯度,尽管铝合金的结晶区间较宽,熔核仍然在半熔化的晶粒表面异质形核结晶,以柱状晶方式推进,如图 4-18 a)所示。随着液态熔核的温度降低,柱状晶慢慢生长,同时热量传递并且析出结晶潜热,这样熔核中液态金属的温度梯度明显减小,使得结晶前沿成分过冷显著增加。如图 4-18 b)所示,此时熔核中心满足了形核过冷度的要求,在熔核的中心区域将形核,这些新形成的晶核周围都是液态,散热没有方向性,所以晶核在液相中可以自由生长,在各个方向的长大速度基本相等形成了等轴晶。从图 4-18 c)可以看出,当晶粒生长速度和温度梯度基本不变时,随着合金中溶质浓度的提高成分过冷增大,结晶形态将从柱状晶转变为等轴晶,即发生 CET 转变。此时温度梯度小,柱状晶的生长受到限制,熔核内部形成的等轴晶将长大。图 4-18 d)是熔核凝固结束时的形态,熔核内部大量的等轴晶核以树枝晶形态长大,彼此碰撞后将停止生长,同时也会与柱状晶相

遇，互相阻碍停止生长，最终得到“柱状+等轴”的微观组织。

4.4.3 模拟结果的验证

为了验证元胞自动机模型计算结果的准确性，本文进行了点焊实验观察熔核的金相组织。金相实验验证方法是通过金相手段与计算结果进行对照来验证计算结果的准确性。本文对低碳钢 Q235 和铝合金 5754 进行了点焊实验来观察点焊熔核微观组织的形貌。

在天津大学 220KW 直流逆变电阻点焊机上焊接了 1mm 厚的 Q235 钢板，点焊工艺参数为：焊接电流 8.6KA，焊接时间 240ms，电极压力 1600N。焊完之后经过切割、在 400#~1500# 的砂纸上打磨、抛光腐蚀后观察金相。图 4-19 是放大 100 倍后的点焊熔核组织，可以看出点焊熔核都是粗大的柱状晶，与微观组织模拟基本吻合。

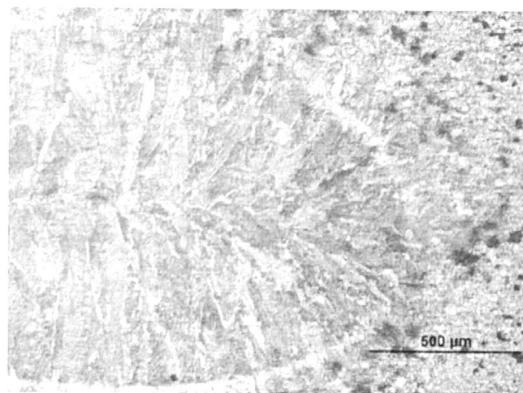


图 4-19 低碳钢点焊熔核金相组织

低碳钢点焊时采用硬的焊接规范，同时材料的结晶温度区间窄，在母材和电极的强迫冷却作用下，焊点中的温度梯度很大而内部散热慢。随着温度的降低，点焊熔核液相金属依附在熔合线半熔化状态的晶粒上异质形核结晶。紧跟着在温度梯度的作用下，那些最优生长方向和散热最快方向相同的位向有利的晶粒迅速长大，一直长大熔核的中心线为止，所以得到晶粒粗大的铸态的微观组织，与元胞自动机模拟的熔核区域微观组织性质相同，从而证明了本文微观组织模拟模型的实用性和可行性。

在 220KW 直流逆变电阻点焊机上焊接了 1mm 厚的防锈铝系列合金 5754，点焊焊接工艺为：点焊电流 16KA，点焊时间 200ms，点焊压力 1200N，电极端面直径 6mm。跟上述情况相同，焊完之后经过切割、打磨、抛光和混合酸溶液腐蚀后在光学显微镜下观察微观组织。图 4-20 是放大了 500 倍后的 5754 铝合金

点焊熔核区域金相组织。从图中可以看出铝合金点焊熔核是“柱状+等轴”的组织形貌。

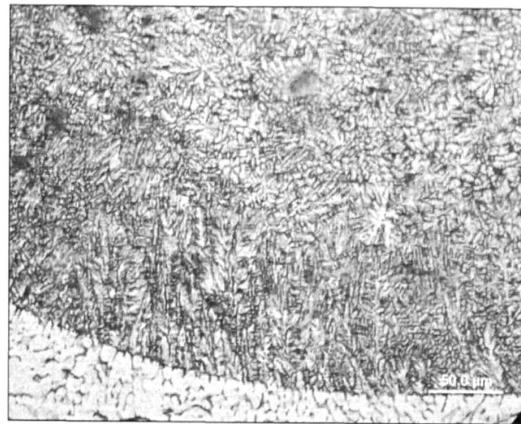


图 4-20 铝合金点焊熔核金相组织

铝合金材料散热快同时材料的结晶温度区间宽，所以熔核区液态金属在温度降低后，开始因为大的温度梯度而异质形核并以柱状晶形式生长，但是随着合金溶质的传递和温度梯度的降低，成分过冷过冷增加，在液态金属中出现等轴晶晶核，它们不受散热情况影响并且生长不受阻碍，得到了各个方向都均与生长的等轴晶。铝合金的金相组织与本文微观组织模拟结果基本吻合，证明了本文基于元胞自动机的微观组织模拟模型的正确性和实用性。

4.5 本章小结

(1) 介绍了元胞自动机方法，它是一种时间、空间离散，具有有限状态变量的动力系统。给出了元胞自动机的构成以及它的特点：离散性、演变规则的一致性和相互作用的局部性。

(2) 介绍了微观组织模拟的数学物理基础，结晶过程包括形核和长大两个过程。目前常用连续形核模型处理形核过程。枝晶的生长受热过冷和成分过冷控制，需要考虑柱状晶向等轴晶转变 (CET)。文中根据 Rappaz 和 Kurz 的 KGT 模型，得到了枝晶尖端生长速度 V 与过冷度 ΔT 之间简化的关系。

(3) 本文提出了基于元胞自动机的模拟点焊熔核微观组织的模型。晶粒的形核是使用连续形核方法，考虑了温度梯度和成分过冷对形核和晶粒生长的影响，晶核通过捕获四周的液态元胞生长。为了界面友好，将复杂的计算结果利用图形实时显示出来，用不同的颜色表示不同的晶粒使计算结果更加直观。

(4) 在 MATLAB 编程的基础上，计算了点焊熔核两种典型的微观组织形态，

即柱状晶和“柱状+等轴”组织。然后通过实验得到了低碳钢和铝合金点焊熔核的金相组织，分别是粗大的柱状晶和“柱状+等轴”晶，与模拟的微观组织基本吻合，证明了利用元胞自动机模拟点焊熔核微观组织的可行性。

第五章 结论与展望

结论：

本文主要针对点焊熔核组织进行了预测及基于元胞自动机模型对熔核微观组织形貌进行了模拟。进过理论计算和实验验证得到了一下几点结论。

(1) 本文建立了点焊温度场有限元计算模型，该模型考虑了焦耳热源和对流边界条件，以及材料热物理性能参数，例如比热、导热系数、电阻率、接触电阻等随温度的变化。基于 ANSYS 的热电单元计算了电阻点焊温度场。根据计算结果分析了电阻点焊加热的特点：点焊时在两焊件的贴合面处产生集中加热；而且点焊加热不均匀，焊点附件各处的温度变化很大。给出了点焊热循环曲线，为预测点焊组织提供了基础。

(2) 提出了预测点焊熔核组织的方法：首先计算点焊温度场，根据点焊热循环曲线得到熔核冷却速度，结合焊接连续冷却组织转变图 (CCT 图)，得到电阻点焊熔核中各种组织的百分数，为进一步推测焊点的性能提供指导。根据该方法，对低碳钢 Q235 点焊熔核组织进行了预测，得出点焊熔核主要是贝氏体、少量的铁素体和马氏体。然后通过实验证了组织预测的准确性。

(3) 本文提出了基于元胞自动机的模拟点焊熔核微观组织的模型，该模型在宏观温度场计算的基础上通过细化网格进行微观组织模拟计算。晶粒采用连续形核公式异质形核，考虑了温度梯度和成分过冷对形核和晶粒生长的影响，晶核通过捕获四周的液态元胞生长。为了使计算结果更加直观，将复杂的计算结果利用图形实时显示出来，用不同的颜色表示不同的晶粒。

(4) 通过 MATLAB 语言编程，计算了点焊熔核两种典型的微观组织形态：柱状晶和“柱状+等轴”组织。通过点焊实验得到低碳钢和铝合金熔核组织分别是粗大的柱状晶和“柱状+等轴”晶，与模拟的微观组织基本吻合，证明了利用元胞自动机模拟点焊熔核微观组织的可行性。

展望：

本文对点焊熔核组织进行了预测和模拟，但是由于研究时间有限还有很多不足，预计将来可以在以下几个方面进一步完善：

(1) 本文对点焊熔核组织的预测主要是基于焊接冷却速度和现有的焊接 CCT 图，为了提高预测的准确度需要更加吻合实际的点焊温度场，同时最好建

立点焊熔核的连续冷却组织转变曲线数据库。

(2) 元胞自动机是研究复杂体系的理想模型,但在计算微观组织时需要一定的数学物理基础,所以有必要优化计算参数和计算规则,向进一步提高数值模拟的准确性努力。

参考文献

[1] 赵熹华. 压力焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

[2] 袁少波, 童彦刚. 点焊技术在汽车工业中的应用[J]. 电焊机, 2005, 35(2): 26-30.

[3] Y CHO. Experimental study of nugget formation in resistance spot welding[J]. Welding Journal, 2003, 83(8): 195-201.

[4] X Sun. Modeling of projection welding process using couple finite element analyses[J]. Welding Journal, 2000, 79(9):244-251.

[5] M Hao, et al. Developments in characterization of resistance spot welding of aluminum[J]. Welding Journal, 1996, 75(1): 1-8.

[6] K S Yeung, P Thornton. Transient thermal analysis of spot welding electrodes[J]. Welding Journal, 1999, 78(1): 1-6.

[7] Jamil A Khan, et al. Numerical thermal model of resistance spot welding in Aluminum[J]. Journal of thermo-physics and heat transfer, 2000, 14(1): 88-95.

[8] 罗震. 铝合金电阻点焊过程质量检测及控制方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.

[9] 马迎兵. 电极压力对熔核质量影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.

[10] 罗保发. 电阻点焊组织预测和质量控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.

[11] 叶茂. 基于有限元的电阻点焊形核全过程的反问题研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.

[12] 杨黎峰, 赵熹华, 曹海鹏. 铝合金点焊熔核流场及热场的有限元分析[J]. 焊接学报, 2004, 25(6): 4-7.

[13] 李静. 低碳钢薄板电阻点焊温度场和应力场的数值模拟[D]. 河北: 燕山大学, 2008.

[14] 机械电子工业部哈尔滨焊接研究所编. 国产低合金钢焊接CCT图册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

[15] 陆皓, 汪建华. 焊接接头冷却组织计算机模拟的研究动态[J]. 焊接, 1998(7): 5-9.

[16] 张初冬. 焊接过程瞬态组织预示的计算机模拟[J]. 焊接学报, 1992, 13(2): 121-126.

[17] 李志勇. 基于CCT图的焊接组织和性能预测软件[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2008, 29(5): 449-452.

[18] 王后孝, 魏艳红. 基于串热源及CCT图的GMAW焊接热影响区组织和硬度预测[J]. 金属学报, 2005, 41(8): 839-846.

[19] 王力群. 焊接接头微观组织模拟方法研究进展[J]. 电焊机, 2003, 33(9): 5-9.

[20] Ohnaka I. Calculation of Solidification of Casting by Matrix Method [J]. Trans. Iron Steel Inst, Japan, 1977: 410-418.

[21] 温俊芹, 刘新田, 莫春立, 等. 焊接热影响区晶粒长大过程的微观组织模拟[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 48-51.

[22] 黄安国, 余圣甫, 李志远. 焊缝金属凝固组织元胞自动机模拟[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 45-49.

[23] M.RAPPAZ and Ch-A.GANDIN. A Coupled Finite Element-Cellular Automation Model for the Prediction of Dendrite Grain Structures in Solidification[J]. Acta metal mater, 1994, 42(7): 2233-2246.

[24] 焦宪友, 关小军. 基于元胞自动机法的晶粒长大模拟[J]. 山东大学学报, 2005, 35(6): 24-28.

[25] 丁雨田, 袁训锋, 胡勇. 过冷金属熔体中枝晶生长的相场法模拟[J]. 热加工工艺, 2007, 36(22): 40-44.

[26] Ramirez, Beckermann, Karma A, et al. Phase-field modeling of binary alloy solidification with coupled heat and solute diffusion [J]. Physical Review, 2004, E69: 1-16.

[27] 李殿中, 苏仕方, 徐雪华, 等. 镍基合金叶片凝固过程微观组织模拟及工艺优化研究[J]. 铸造, 1997(8): 1-7.

[28] 张林, 王元明. Ni基耐热合金凝固过程的元胞自动机方法模拟[J]. 金属学报, 2001, 37(8): 882-888.

[29] 丁恒敏. 铸造合金的微观组织模拟[D]. 湖北: 华中科技大学, 2005.

[30] B. R. 亚罗舍维奇等著, 王雪芬译. 电接触强化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.

[31] 鹿安理. 焊接过程仿真领域的若干关键问题及其初步研究[J]. 中国机械工程, 2002, 11(1): 33-37.

[32] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[33] 吕德林, 李砚珠. 焊接金相分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.

- [34] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2001.
- [35] 焦宪友. 基于元胞自动机法的材料晶粒长大和再结晶模拟[D]. 山东: 山东大学, 2006.
- [36] M.RAPPAZ and Ch.-A.GANDIN. PROBABILISTIC MODELLING OF MICRO- STRUCTRE FORMATION IN SOLIDIFICATION PROCESSES[J]. *Acta metall.*, 1993, 41(2): 345-360.
- [37] M.F.ZHU,J.M.KIM and C.P.HONG. Modeling of Globular and Dendritic Structure Evolution in Solidification of an Al-7mass%Si Alloy[J]. *ISIJ International*, 2001, 41(9): 992-998.
- [38] 邓章铭, 周浪. 元胞自动机模型方法及其在材料组织结构模拟中的应用[J]. *材料科学与工程*, 2000, 18(3): 123-129.
- [39] 郭洪民, 刘旭波, 杨湘杰. 元胞自动机方法模拟微观组织演变的建模框架[J]. *材料工程*, 2003(8): 23-28.
- [40] 柳百成, 荆涛. 铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [41] 徐鉴君. 凝固过程动力学与交界面稳定性理论引导[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [42] 李强, 李殿中, 钱百年. 凝固过程中枝晶组织形貌演变模拟进展[J]. *材料导报*, 2004, 18(4): 4-7.

发表论文和参加科研情况说明

发表的论文：

- [1] 葛凤, 罗震, 唐新新等. 铝合金点焊组织分布的模拟[C]. 第十四次全国焊接学术会议, 2009.
- [2] 葛凤, 罗震, 刘颖. 元胞自动机方法及其在组织模拟中的应用的研究进展[C]. 全国计算机辅助焊接工程学术研讨会论文集, 2009, 168~172.

参与的科研项目：

- [1] 国家自然科学基金——基于电磁辐射场的电阻点焊熔核成像理论与关键技术研究 (50975197)
- [2] 天津市应用基础及前沿技术研究计划——电阻点焊熔核演化成像应用基础理论和关键技术研究 (D9JCZDJC24000)

致 谢

本论文的工作是在我的导师罗震教授的悉心指导下完成的，罗教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢两年来罗老师对我的关心和指导。

焊接专业的很多老师指导我们完成了实验室的科研工作，在学习上和生活上都给予了我很大的关心和帮助，对我的科研工作和论文都提出了许多的宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间，王蕤师姐、熬三三师兄、步贤政师兄给予了指导、帮助和鼓舞；韩利哲、赵楠、刘建、周琳舒、李洋在我遇到困难的时候给予帮助和指导，在此向他们表达我的感激之情。

最后，非常感谢我的家人和朋友，他们的理解和支持是我坚持不懈努力的动力和源泉，使我能够在学校专心完成我的学业。