

# CO<sub>2</sub>气保焊短路过渡过程的熔滴与熔池行为的仿真研究

## 摘 要

CO<sub>2</sub>气体保护焊（简称CO<sub>2</sub>气保焊）是成本低、变形小、抗油锈、效率高、易于实现自动化等特点的焊接方法，主要应用中、薄板和全位置焊接。短路过渡是CO<sub>2</sub>气保焊广泛采用的一种熔滴过渡形式，在细焊丝、小电流和低电压的条件下实现，飞溅大和焊缝成型差，因此，如何控制CO<sub>2</sub>气保焊的焊接接头质量是一个重要的研究课题。CO<sub>2</sub>气保焊焊接接头质量是由熔池行为所决定的，而短路过渡过程中的熔滴行为对熔池行为会产生重要影响，所以研究CO<sub>2</sub>气保焊短路过渡时焊接参数对熔滴与熔池行为的影响对控制焊接接头的质量有重要意义。围绕熔滴与熔池行为，本文主要从事的研究工作如下：

从CO<sub>2</sub>气保焊的特点和熔滴短路过渡的机理出发，通过对熔滴的行为规律进行深入研究，根据“质量—弹簧”理论分析了焊接参数对焊短路过渡过程熔滴行为的影响。借助MATLAB的数值分析平台，模拟了焊接电流对熔滴的尺寸形状及过渡频率的影响，并对熔滴上的主要作用力进行了分析。研究表明：电磁力、熔滴的重力、等离子流拉力随着电流的增大是逐渐增大的。在同一电流下，随时间增加熔滴持续长大，各力随时间的增加而增大，电磁力随时间以曲线形式增长，重力和等离子流拉力随时间的变化近似线性增加。熔滴长大的不同阶段，其受力大小不同。随着电流的增加，熔滴的位移逐渐变小，熔滴的平均质量下降，熔滴过渡频率增大。

在短路过渡CO<sub>2</sub>气保焊的实际焊接过程中，当前焊接温度场模拟采用的热源模型中往往忽略熔滴带入的热量对熔池温度场的分布会产生重要的影响。本文建立了适合于CO<sub>2</sub>气保焊的双椭球电弧热源与熔滴热源相叠加的一种新型复合热源模型；利用有限元软件ANSYS对低碳钢焊件的温度场动态演变规律进行了模拟和计算，并通过实验进行验证。研究结果表明，利用复合热源模型比单一的双椭球热源模型的模拟结果更接近于实验测试结果，验证了改进复合热源模型的准确性、有效性与实用性。

在上述研究基础上，结合CO<sub>2</sub>气保焊焊接工艺性能特点，用ANSYS软件研究焊接参数与熔池几何形状之间的关系，进行相应的焊接工艺实验，并且对模拟结果和实际测量值之间的误差进行了简单分析。本文的研究成果不仅揭示了CO<sub>2</sub>气保焊短路过渡过程的熔滴与熔池行为的演变规律，也为得到焊接工艺的制定提供理论依据。实验验证结果说明用ANSYS所建立的模型得到的计算结果基本合理可信。

关键词：CO<sub>2</sub>气保焊短路过渡；复合热源模型；动态演变；温度场；数值模拟

# Simulation of the Behavior of Droplet and Pool in the CO<sub>2</sub> Welding Short-circuit Transition Process

## Abstract

CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding is a welding method which is a low cost, little deformation, high efficiency and easy to automate, mainly used in the thin sheet and all position welding. Short-circuit transition is a transitional form of droplet which widely used in CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding, under the conditions of the thin wire, small current and low voltage. Because of bad weld forming and big splash, it is large extent to restrict its further promotion and application.

CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding quality is determined by the pool behavior, while in the process of short circuit transition, behavior of droplet will have a major impact on the pool behavior, so welding parameters of CO<sub>2</sub> gas shielded arc in the short transition is important to melting droplet and pool behavior, which is also important to the quality of welding joints.

From the characteristics of CO<sub>2</sub> gas shielded welding and the mechanism of the droplet short-circuit transition proceeding, droplet formation and the force conditions are analyzed according to "Quality-Spring" theory. Based on the MATLAB numerical analysis platform, we simulate the impact of welding current on droplet shape and size of the transition frequency, in the end, the main forces on the droplet are analyzed. Droplet transfer characteristics and control law play an important role in the stability of the welding process, welding quality and productivity. In another word, the welding parameters determine the form and features of droplet transfer, while the droplet transfer would affect the stability of welding parameters, so establishing the quantitative relationship between welding parameters and droplet transition are of great significance.

In the welding process the actual short-circuit transfer CO<sub>2</sub> gas shielded arc weld, the heat of the droplet will have a significant impact on temperature field distribution of the molten pool, which is always ignored in the current welding temperature simulation. In this thesis, the double-ellipsoid heat source model and the droplet heat source model are analyzed respectively, it also sets up a new composite heat source model based on the double-ellipsoid heat source and heat droplet for CO<sub>2</sub> arc welding. The temperature field of low carbon steel was calculated using ANSYS finite element software, which is verified by the experiments. Thermal cycling curves has been simulated and calculated. The results show that the combined heat source model is better than a single double-ellipsoid heat

source model, the simulation results are closer to experimental results. The accuracy, validity and practicability of the composite heat source model are verified.

Finally, based on the above conclusions and characteristics of CO<sub>2</sub> welding process, using ANSYS simulation method to study the relationship between pool geometry and welding parameters, which are verified by the corresponding welding experiment. The purpose is not only to reduce the cost of welding test, but also provide a theoretical basis for welding process. Comparing the experiment value and the conclusions under different welding parameters, the model results established by ANSYS and the actual results were well matched.

**Key words:** short-circuiting transfer of gas CO<sub>2</sub> shielded arc welding; a compound welding heat source model; dynamic variation; temperature field; numerical simulation

## 插图清单

图 1-1 CO <sub>2</sub> 气保焊系统结构示意图.....	1
图 2-1 “质量—弹簧”模型示意图.....	12
图 2-2 熔滴受力示意图及熔滴脱离示意图.....	12
图 2-3 熔池内沿焊缝纵向轴线.....	14
图 2-4 熔池结晶过程示意图.....	15
图 2-5 熔池形状示意图.....	16
图 2-6 Gauss 热源模型示意图.....	18
图 2-7 双椭球热源模型示意图.....	18
图 2-8 焊缝成形系数示意图.....	19
图 3-1 主程序的结构示意图.....	25
图 3-2 熔滴位移与时间的关系.....	29
图 3-3 电磁力与时间的关系.....	30
图 3-4 重力与时间的关系.....	30
图 3-5 等离子流拉力与时间的关系.....	31
图 4-1 模型的三维网格划分及截面示意图.....	34
图 4-2 材料性能参数随时间变化曲线.....	35
图 4-3 计算结果.....	38
图 4-4 焊缝横截面尺寸.....	38
图 4-5 温度场的动态演变过程.....	39
图 4-6 等温线分布以及热梯度的矢量分布图.....	40
图 4-7 焊件上不同点的焊接热循环图.....	40
图 4-8 不同方向上的温度分布曲线变化图.....	41
图 5-1 不同电流下焊缝正面温度分布图.....	43
图 5-2 不同电流下焊缝纵截面温度分布图.....	44
图 5-3 不同电压下焊缝正面温度分布图.....	46
图 5-4 不同电压下焊缝纵截面温度分布图.....	47
图 5-5 不同速度下焊缝正面温度分布图.....	48
图 5-6 不同速度下焊缝纵截面温度分布图.....	49
图 5-7 焊接电流 I 对熔池几何尺寸的影响.....	50
图 5-8 焊接电流变化对焊缝截面尺寸的影响.....	50
图 5-9 焊接电压 U 对熔池几何尺寸的影响.....	51
图 5-10 焊接电压变化对焊缝截面尺寸的影响.....	51
图 5-11 焊接速度 v 对熔池几何尺寸的影响.....	52
图 5-12 焊接速度变化对焊缝截面尺寸的影响.....	52

## 表 格 清 单

表 3-1 焊丝熔化常数 .....	23
表 3-2 所用到的参数.....	24
表 4-1 低碳钢随温度变化的材料性能参数表.....	35
表 4-2 熔池尺寸计算与实测结果.....	38

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标志和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签字：仝维维

签字日期：2010年4月16日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅或借阅。本人授权合肥工业大学可以将学位论文的全部或部分论文内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：仝维维

导师签名：胡一建

签字日期：2010年4月16日

签字日期：2010年4月16日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

## 致 谢

本文是在导师胡小建教授的悉心指导与关怀下完成的。导师严谨的治学态度、渊博的学识、敏锐的科学思维、大胆创新的科学精神以及无私奉献的高尚情操、乐观大度的生活态度令学生终生难忘。三年来，胡老师不仅在学业上给予作者极大的指导和教诲，而且在生活上给作者无微不至的关怀和帮助；除了传授科研治学的思路和方法，更注重教导为人处世的道德和原则。值此论文完成之际，谨向恩师致以最崇高的敬意和最诚挚的感谢。

同时，真诚地感谢在研究生阶段一直教诲和帮助我的李萌盛老师、徐道荣老师、王国平老师，从他们那里学到的知识和方法使我受益匪浅。对秦琳老师在实验中给予的耐心帮助也表示真诚地感谢。

感谢师兄李旭光和师姐钱学君、王丽婷，他们的指导使我在研究中少走了很多弯路。感谢实验室的同学吴治国、卜士瑞、师弟张磊、徐程龙、李雷震、王求，感谢同宿舍的姐妹肖志玲和王知，在共同奋斗的时间里，无论在学习上还是生活上都给予我很大的帮助。在论文的写作过程中，得到了许多同学的宝贵建议，在此一并致以诚挚的谢意。再次感谢所有关心、支持、帮助过我的良师益友。

我要特别感谢我的家人和范文宾给予我的全力支持和帮助，他们对我的爱和关心是我不断进取的动力。

最后，向在百忙中抽出时间对本文进行评审并提出宝贵意见的各位专家表示衷心地感谢！

作者：仝维维

2010年4月

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

CO<sub>2</sub>气保焊是利用 CO<sub>2</sub> 气体作为保护气的气体保护电弧焊，成本低、变形小、效率高、易于实现自动化等特点的焊接方法，主要应用中、薄板和全位置焊接。短路过渡是 CO<sub>2</sub> 气保焊广泛采用的熔滴过渡形式，一般在细焊丝、小电流和低电压的条件下实现，由于飞溅大和焊缝成型差在很大程度上使其进一步推广和应用受到了限制。

焊接电源的参数对焊接熔滴和熔池的影响很大，焊接过程稳定性的重要内容是熔滴过渡稳定性。熔滴过渡稳定性主要取决于焊接电流和焊接电压的过程控制。此前的有关仿真模型和实际焊接系统存在一定的差距，存在一定的局限性，需要作进一步探索研究工作，由 CO<sub>2</sub> 焊接“电源—电弧”系统自身的特点，如图 1-1 所示，稳定的焊接电源控制系统才会有稳定的焊接参数，而焊接参数的选择是否恰当是得到稳定的熔滴控制过程和优质焊接接头的前提。

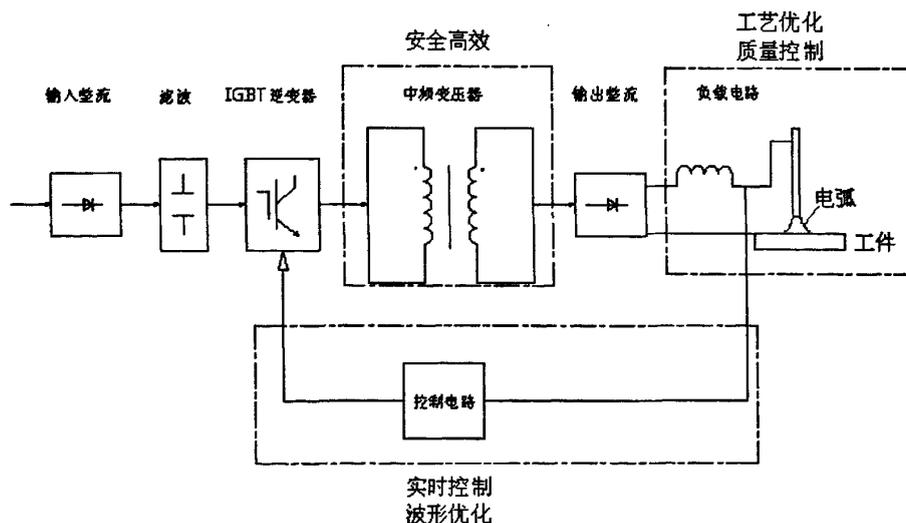


图 1-1 CO<sub>2</sub>气保焊系统结构示意图

文中主要是从焊接参数对熔滴与熔池行为的影响出发，进而会对焊接接头的质量产生影响。根据焊丝直径、焊接电流、电弧电压及电源的特点等焊接规范条件的不同，会出现许多复杂的焊接熔滴过渡形式，包括滴状过渡、短路过渡、搭桥过渡、颗粒过渡、喷射过渡等，我们知道良好的熔滴过渡是影响焊接稳定性以及焊接质量的重要因素，而可控稳定的熔滴过渡还是焊接自动化智能化的基础，对 CO<sub>2</sub> 气保焊而言，短路过渡以熔滴的过渡稳定获得了广泛应用。

在短路过渡的过程中，熔滴主要受到以下几个力的作用：重力、电磁力、表面张力、斑点压力、等离子力以及金属蒸发反作用力等，其中主要是重力、电磁收缩力等，这些力对于熔滴尺寸的大小和熔滴的形状有着重要的影响<sup>[1,2]</sup>。

CO<sub>2</sub>气保焊作为高效的焊接方法在工业生产中一直应用广泛，在焊接过程中，焊丝不断熔化形成熔滴过渡到熔池，这是一个向熔池传输能量、质量以及动量的过程，熔滴与焊接电弧热量的作用共同决定了熔池的几何尺寸，然而，短路过渡的CO<sub>2</sub>气保焊也有它自身的严重问题。以往通过试验测量进行定量分析，由于试验条件等限制，所得数据不够精确，大量的人力、物力和时间被消耗。这些问题可以通过求解某些特定的微分方程来进行计算，但是只有在作许多假设及简单的情况下才有可能求出。而我们都知，实际的焊接问题多种多样，边界条件复杂，要用解析方法来求解这类微分方程十分困难，在计算机、信息网络等技术飞快发展的今天，很多情况下都是采用数值模拟的方法。

计算机模拟对科学技术的影响及其深远，对于焊接领域已经应用在许多方面，对焊接技术起到了很大的促进作用。计算机仿真模拟的重要意义就在于它能解决实际的试验过程中耗费大量人力、物力、时间又很不经济的问题，并能通过参数分析的模拟来改善系统，对防止出现焊接缺陷，从经验走向科学，优化结构设计和工艺设计。用计算机软件模拟出这些焊接现象，就可以确定焊接过程中有关熔滴过渡过程和熔池随参数变化的一些趋势，降低设计周期，提高焊接产品的可靠性。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 CO<sub>2</sub>气保焊熔滴行为仿真的研究现状

随计算机技术和有限元技术的发展，关于熔滴的数值模拟也有了很大的发展。对于熔滴的研究，国内外的学者进行了大量的富有成效的工作，取得了丰硕的成果。用数值模拟的方式探索焊接熔滴的规律，为熔滴控制技术的发展和应打打下坚实的基础。

Haidar等建立了熔滴长大的模型，该模型考虑了重力、表面张力、电磁力以及保护气体流量等因素。采用该模型模拟并分析了氩气保护下熔滴由滴状向喷射过渡转变的机理<sup>[3,4]</sup>。Maruo等通过数值计算模拟了熔滴的短路过渡过程<sup>[5]</sup>。Jone等基于拍摄的熔滴图像建立了熔滴形状及其过渡的动态模型，从理论上分析了电磁力对熔滴形状及熔滴过渡的作用<sup>[6,7]</sup>。

清华大学的朱志明分析了短路过渡CO<sub>2</sub>焊接的熔滴成形过程和焊接电流波形对熔滴形状及短路过渡历程的影响规律，建立了波形控制短路过渡焊接的焊丝熔化模型，对熔滴尺寸控制进行了研究。由高速摄像获得的熔滴短路过渡图像可得熔滴与熔池短路前的形状对熔滴与熔池的短路、熔滴在熔池中的铺展及液桥缩颈形成的影响。用静力平衡模型研究了电磁力、表面张力、重力与熔滴

形状的关系，采用电流的精确控制实现对熔滴形状的控制。根据燃弧电流对熔滴形状影响规律，提出了采用前期大、后期小的燃弧电流控制原则，获得了好的短路过渡，过渡过程稳定，消除了瞬时短路以及由此导致的飞溅，改善了熔滴的短路过渡行为，短路过渡结束后，焊丝端部的残余液态金属具有良好的一致性<sup>[8,9]</sup>。

栗卓新等通过从药芯组成和焊接工艺两方面对自保护药芯焊丝熔滴过渡的影响进行了研究，对熔滴过渡的受力进行了分析，焊接工艺参数中电流电压对自保护药芯焊丝熔滴过渡形态、焊丝工艺性能、保护效果以及焊丝的力学性能均有影响，选择合适的焊接工艺参数对熔滴保护效果以及飞溅大小有重要影响<sup>[10]</sup>。

山东大学陈茂爱等建立了熔滴过渡的动态模拟模型，利用建立的模型模拟了熔滴的形成、长大及脱离过程，分析了电流对过渡熔滴尺寸及频率的影响，熔滴脱离时刻的速度场以及脱离后焊丝端部残留熔滴形状变化的计算结果与实验测得结果吻合比较好<sup>[11,12]</sup>。

上海工程技术大学的何建萍与上海交通大学的吴毅雄等建立的GMAW模型给出了短路过渡过程中有关物理量的内部联系，讨论了对短路过渡稳定性的影响。在熔滴增大时，熔滴所受轴向支撑作用由大变小，脱离作用不断增加，不足是模型中没考虑焊枪移动对短路液桥的拖动作用和燃弧期在焊丝端部的液态金属产生的惯性作用<sup>[13]</sup>。

### 1.2.2 CO<sub>2</sub> 气保焊熔池数值模拟的研究现状

为准确地预测温度场，前人做了很多的工作，先是 Fourier 创立了传热基本理论，后来被 Rosenthal 用在移动热源领域。Pavelic 等引进了分布热源的概念，后来 Andergon、Krutz、Friedman 将 Pavelic 的 Disc 模型与 Rosenthal 的模型结合起来得到了一个新的热源分布模型。雷卡林创立了焊接热场的解析法。以上的这些都是在下面假设基础上进行的：热源是集中在一个点、一条线或者一个面；材料在任何温度下都为固体不会发生相变；材料热物理性能不会随温度变化；焊件的几何尺寸是无限的。这些假设与焊接实际存在很大的差异，而焊接熔池的温度场主要是由热输入能量决定，热输入的多少与焊接规范参数、散热情况、气体流量的大小、辐射对流等因素有关，这些因素都是随时间变化的。如果这些参数有变话或者被忽略，对最终的结果都有很大影响。

早期的研究方法应用比较方便，但是由于固有的不合理假设，计算结果与实验结果相差比较大，用来进行焊接质量控制还有不足，只能作为定性依据。70年代以后，高速计算机的出现使焊接热过程的数值分析成为可能。

精确地计算焊接热过程是保证焊接质量和生产率的前提，这就要考虑熔池内的流体流场和熔池内的流体流动状态对焊接热过程的影响，不能简单的将其

作为纯粹的固体导热来处理，是焊接冶金分析、焊接应力分析和焊接过程进行计算机控制的前提。

近 20 年以来，数值模拟技术在焊接中应用领域的研究取得了长足的进步，但主要都是针对钨极氩弧焊。S. Kou 以假设熔池表面为不可变形的平面为前提条件分别建立三维和二维 TIG 焊接熔池流体流动及传热模型。Thompson M E 的模型在变形是预先给定的情况下，都没有考虑工件的熔透情况。武传松、曹振林建立了熔透情况下的 TIG 焊接熔池的流场与热场的数学模型。

关于焊接热过程的分析，Adams 和稻埂道夫等根据热传导微分方程，以大量的实验为数据从理论规律出发，经过整理、归纳和验证，最后建立了不同情况下的焊接传导公式。1966 年 Nickell 和 Wilson 首次把有限元法用于固体传热的分析计算。美国 Krutz 在 1976 年的博士论文里专门研究了焊接热循环，其中分析了非线性温度场，考虑了相变潜热和辐射、对流等散热边界条件。文献<sup>[14-16]</sup>还介绍了大量的温度场和热循环主要参数计算的理论和经验公式。这些公式在一定条件下能较好的与实验值吻合，但由于其假设太多、经验的局限性，适用面窄。

焊接数值计算所面临的最大困难就是应用起来极其繁琐、计算时间长、成本高。点热源计算公式将板厚假设成无限厚，线热源计算式则将板厚假设成无限薄。实际焊件的厚度都是有限的，只有少数情况可以认为在厚度方向为无限薄和无限厚。Rosenthal<sup>[17,18]</sup>提出了半无限大体点热源或线热源作用下准稳态温度场的解析数学模型。雷卡林<sup>[19]</sup>提出了类似的包括瞬态影响的解析模型。在文献<sup>[20]</sup>里探讨了三维瞬态焊接温度场的有限元模拟和提高求解精度的若干径，比如热源模型的选取、网格划分和时间步长的优化考虑，熔化潜热采用集中质量热容矩阵，克服阶越现象等。

在国内，80 年代初开始了焊接数值模拟方面的研究工作，近年来也取得了很大研究成果。西安交通大学唐慕尧等人在 1981 年编制了有限元分析程序，进行准稳态温度场的线性计算，其结果与实测值吻合。后来上海交通大学对非线性的热传导问题进行了有限元分析，建立了焊接温度场的计算模型，进行二维温度场的有限元分析。汪建华等人给出了对三维分布特点和提高计算精度的若干途径。焊接过程温度梯度很大，在空间域内，大的温度梯度导致严重的材料非线性，产生求解过程的收敛困难和不稳定性。

### 1.3 现状分析

焊接是涉及到电弧物理、传热冶金和力学等许多因素的复杂过程，要得到一个高质量的焊接接头就必须控制这些因素。目前由于实验条件的限制，通过实验手段来观察焊接熔池是非常困难的，计算机仿真的重要意义就在于它能解决实际耗费大量人力、物力、时间又很不经济的问题，通过参数分析的仿真来

改善系统。早期的仿真往往采用高级语言编程，随着仿真技术的发展，适用不同需要的仿真语言被研制出来，MATLAB 和 ANSYS 这两种软件被广泛应用在焊接仿真模拟领域。

无论是在  $\text{CO}_2$  气保焊熔滴行为的仿真还是熔池行为的仿真，许多学者在这些领域都做了很多努力，也取得了一定的成果，但是由于焊接过程很复杂，想要从数学上准确地对其描述非常困难。以熔池的定量的研究为例，现阶段的研究主要存在以下的问题：

1.焊接电弧、熔滴形成及过渡和熔池这三部分之间的作用决定了整个焊接过程的温度场分布，决定了焊接接头的性能。在现有模型中，多数没有同时考虑熔滴、电弧和熔池这三部分；有些论文中虽然有考虑，但对熔滴和熔池的假设不够接近实际情况；

2.在焊接的传热问题中，辐射、对流、传导这三种方式在模拟过程中没有很好体现；

3.很多材料的热物理性能只有室温时的数据，在高温特别是接近熔化时数据很少；

4.对含有微量元素研究的对象，可能会对焊接的传热过程产生明显的影响，在数值模拟过程中不可能完全体现；

5.在焊接过程中，热源分布形式和有效的加热半径与焊接方法及规范参数有关，目前还缺乏准确而系统的材料。

6.对于焊接电弧有效利用系数的准确选取各种资料数据差别也比较大。

对熔滴方面而言，熔滴受到电磁力、表面张力、等离子流力、重力、金属蒸发反作用力等多种力的作用，这些力的综合作用决定了熔滴的过渡行为。熔滴的形成、熔滴尺寸、熔滴过渡形式等影响焊接工艺性能，影响焊接电弧的稳定性、熔池形态、焊缝成形和焊接质量。熔滴形态和尺寸及过渡的均匀性影响焊接飞溅的大小，这不仅关系到焊缝和工件的表面状态，而且还因增加清理难度而降低生产效率。

对上述问题还需要进一步的摸索和研究，直到最终精确地模拟出焊接熔池、熔滴行为，从而有效地控制焊接质量，实现焊接自动化，推动焊接工业的大发展。从焊接电源参数出发来讨论其对熔滴及熔池行为的影响，这方面的研究还比较少，由于焊接“电源—电弧”系统自身的特点，此前的有关仿真模型和实际系统存在一定的差距，仿真模型应用存在一定的局限性，需要作进一步探索研究工作。

而本文就是以此为出发点，讨论了  $\text{CO}_2$  气保焊短路过渡的熔滴行为会影响到焊接过程中的飞溅以及焊缝的质量，因此只有通过计算机仿真对熔滴的行为规律进行深入分析，了解焊接参数对焊接短路过渡过程熔滴动态行为的影响，才能实现理想的  $\text{CO}_2$  气保焊短路过渡控制。进而用于指导焊接电源控制系统及

其控制参数优化，为焊接电源控制系统提供参数支持。

焊接的熔滴过渡很复杂，根据焊丝直径、焊接电流、电弧电压及电源的特点等焊接条件的不同，良好的熔滴过渡是影响焊接稳定性以及焊接质量的重要因素。可以控制且稳定的熔滴过渡还是焊接自动化、智能化的基础。但不是每一种过渡形式都适用于焊接生产，短路过渡以其特点获得了广泛应用。通过研究，我们对于短路过渡的熔滴受力和过程有了更加清晰的认识，本文第三章将通过对于熔滴短路过渡的研究和熔滴的受力分析建立基于“质量—弹簧”理论的数学模型来模拟熔滴的受力以及过渡行为。

#### 1.4 本课题的主要研究内容

随着计算机技术在焊接领域中的应用不断扩大，人们开始采用数值模拟方法并辅以少量试验验证来研究各种复杂的焊接问题，焊接数值模拟意义是对复杂的现象进行定量分析及预测，实现对复杂焊接现象的模拟，优化结构和工艺设计，减少试验工作量，提高焊接接头的质量。以助于认清焊接现象本质，弄清焊接现象规律。

本课题的研究内容主要包括 CO<sub>2</sub> 气保焊以下几个方面：

1.介绍了焊接熔滴短路过渡的过程及其控制方法，给出了在分析熔滴过渡时常用的一般理论，选用其中的“质量—弹簧”理论分析了熔滴过渡中的受力情况。研究了熔池成形过程中的相关问题及在研究焊接熔池模拟时数学模型的建立过程，为后面的 ANSYS 有限元计算提供了理论和计算基础。

2.深入地探讨了短路过渡焊接熔滴行为的受力分析和动态行为；在此基础上分析 CO<sub>2</sub> 气保焊短路过渡焊接熔滴行为的物理过程，然后在 MATLAB 建立了气体保护焊短路过渡焊接熔滴行为的模型，最后进行仿真；将所建立的仿真模型进行分析，得到输出电流对熔滴长大过程中的受力影响、输出电流和熔滴的位移之间的关系；焊接参数对熔滴行为的影响有了一定的了解。

3.通过对 ANSYS 的学习，熟悉 ANSYS 热分析基本原理，熟练掌握 ANSYS 热分析基本过程；建立了基于双椭球热源和熔滴热量分布的 CO<sub>2</sub> 气保焊的复合热源模型，利用该模型对低碳钢在焊接过程中的温度场分布进行了计算，并同实验测试结果进行比较，验证了复合热源模型的合理性；通过模拟得到焊接温度场的动态演变过程；利用所建立的复合热源模型研究了焊件上不同点的焊接热循环曲线、沿横向和深度方向的温度分布变化曲线。

4.改变不同的焊接参数，利用 ANSYS 有限元软件计算出不同条件下的模拟结果，通过分析，以确定熔池的形态；对模拟的结果进行实验的验证比较与分析，以期获得焊接熔池几何形状与工艺参数之间的关系，为焊接工艺的制定提

供理论依据，对控制焊接接头的质量具有重要意义。

## 第二章 熔滴与熔池理论基础

### 2.1 引言

熔滴过渡，是指焊丝端头的金属在电弧热作用下被加热熔化，形成熔滴，并在各种力的作用下，脱离焊丝过渡到熔池中去的现象。熔滴过渡的特点、规律及其控制，关系到焊接过程的稳定性，是提高焊接质量和生产效率的重要因素，也就是说焊接参数决定了熔滴过渡的形式及特点，而熔滴过渡反过来又会影响焊接参数的稳定性，因此建立熔滴过渡与焊接参数的定量关系具有重要意义。

对 CO<sub>2</sub> 气保焊的焊接熔池形态而言，与熔滴过渡和焊接参数有很大的关系，控制焊接熔池形态是保证焊接质量的关键技术。在焊接过程中始终伴随着电弧与熔池的交互作用，在焊接参数改变的情况下，随时间变化，熔滴在过渡过程中所受的力也会相应改变，导致熔滴形态（熔滴的尺寸，形状，过渡频率等）也会发生相应变化，这样对我们最终所得到的熔池形态会有一些的影响，因此寻求着两者之间的相互作用关系，对控制焊缝成形及焊接质量具有重要的理论意义和工程应用价值，先来研究与两者相关的理论基础就变得尤为重要。

### 2.2 熔滴短路过渡过程与受力的分析

熔滴过渡现象很复杂，受到多种因素的影响，如焊接条件、焊接方法、极性、焊丝材质、焊丝种类、焊丝半径、母材等。这些因素主要是通过改变熔滴过渡过程中的熔滴受力情况以及焊丝熔化速度等来影响熔滴的行为。只有通过熔滴过渡的种类和熔滴的受力分析，我们才能更加准确的建立模型。

#### 2.2.1 熔滴过渡分类

探索焊接中的熔滴过渡对于焊接熔池的形成和焊接质量之间的关系具有十分重要的意义。弧焊时，在焊条或焊丝端部形成的和向熔池过渡的液态金属滴称为熔滴。焊丝端头的金属在电弧热作用下被加热熔化形成熔滴，在各种力的作用下脱离焊丝进入熔池，称之为熔滴过渡。根据国际焊接学会的分类，熔滴过渡主要有自由过渡、短路过渡和混合过渡三种形式。

##### 1. 自由过渡

熔滴从焊丝端头脱落经电弧空间自由运动一段距离后落入熔池的过渡形式称为自由过渡，焊丝端头和熔池之间不发生直接接触。由于条件不同，熔滴的自由过渡又可分为滴状过渡、喷射过渡、爆炸过渡等形式。

A、焊接电流较小、电弧电压较高时，熔滴的直径大于焊丝直径，当熔滴的尺寸足够大时，主要依靠重力将熔滴缩短拉断，熔滴落入熔池，熔滴的这种过渡形式称为滴状过渡。

轴向滴状过渡是指在平焊时，电弧焊、富氩混合气体保护焊时，熔滴在脱离焊条前处于轴向位置，脱离焊条后沿焊条轴向落入熔池。非轴向滴状过渡是指多原子气氛中，阻碍熔滴过渡的力大于熔滴的重力，熔滴在脱离焊丝之前就偏离轴线，在脱离焊丝之后，熔滴一般不能沿焊丝轴向过渡，形成飞溅。

B、熔滴呈细小颗粒并以喷射状态快速通过电弧空间向熔池过渡的形式，称为喷射过渡，用氩气或富氩气体保护焊时会出现，喷射过渡可分为射滴过渡、射流过渡和旋转过渡等形式。

射滴过渡是指在某些条件下，形成的熔滴尺寸与焊丝直径相近，焊丝金属以较明显的分离形式和较高的速度沿焊丝轴向射向熔滴池的过渡形式，加速度大于重力加速度，焊接过程电弧稳定、焊缝成形好、熔滴尺寸适中及飞溅少。射流过渡是指在某些条件下，因电弧热和电弧力的作用，焊丝端头熔化的金属压成铅笔尖状，以细小的熔滴从液柱尖端高速轴向射入熔池的过渡形式。这些直径远小于焊丝直径的熔滴过渡，频率很高。

## 2.短路过渡

在较小电流和低电压时，焊条或焊丝端部的熔滴没有长成滴就与熔池短路接触，由于表面张力和电磁力的作用下使熔滴爆断，直接向熔池过渡的形式称为短路过渡。这种形式电弧稳定，飞溅小，熔滴的短路过渡频率可达 20~200 次/s。电弧焊中短路过渡应用最广泛，主要用于薄板及全位置焊接，电弧电压和焊接电流，对于一定的焊丝直径及焊接电流，必须匹配合适的电弧电压，才能获得稳定的短路过渡过程，此时的飞溅最少。

## 3.混合过渡

在一定条件下，熔滴过渡不是单一形式，而是自由过渡与短路过渡的混合形式，这就称为熔滴的混合过渡。如管状焊丝气体保护电弧焊及大电流 CO<sub>2</sub> 气保焊时，焊丝金属有时就是以混合过渡的形式向熔池过渡。

### 2.2.2 短路过渡的物理过程

电弧焊的熔滴过渡很复杂，根据焊丝直径、焊接电流、电弧电压及电源的特点等焊接条件的不同，可以出现多种复杂的过渡，比如大滴状过渡、短路过渡、排斥过渡、颗粒过渡、喷射过渡等。良好的熔滴过渡是影响焊接稳定性以及焊接质量的重要因素，稳定可控的熔滴过渡还是焊接自动化、智能化的基础。

短路过渡实现的过程如下，电弧的燃烧不是连续的，电弧引燃的初期，焊丝受到电弧的加热作用而渐渐熔化，在端部形成熔滴并逐步长大，电弧向未熔化的焊丝中传递的热量逐渐减少，焊丝熔化速度下降，而且焊丝仍然以一定的

速度送进，在熔滴积聚到某一尺寸的时候，由于过分靠近熔池而发生短路，这时电弧熄灭，电压急剧下降。熔滴短路在焊丝端头与熔池之间形成短路液柱，短路电流开始增大，在熔池金属表面张力和液柱中电流形成的电磁收缩力的作用下，使得液柱靠近焊丝端头的部位迅速产生缩颈小桥。当短路电流增加到一定数值时，在熔池金属和焊丝端部表面张力的拉伸共同作用，“小桥”迅速断开，此时电压很快恢复到电源的空载电压，由于断开的空间还有较高的温度，电弧又重新引燃，相当于接触引弧，而电流逐渐降低，向稳定值靠近，又重新开始上述过程。

在短路过渡的过程中，熔滴受到的力包括重力、电磁收缩力、表面张力、等离子吹送力以及金属蒸发反作用力等。其中重要的主要是重力、电磁收缩力以及表面张力。这些力对于熔滴尺寸的大小和熔滴形状有着重要的作用。

### 2.2.3 熔滴过渡一般理论

要得到准确的数值分析结果，首先是取决于所描述物理问题数学模型建立的准确性，而熔滴过渡数学模型是建立在熔滴过渡理论之上的，因此进行熔滴过渡模拟的基础是熔滴过渡理论<sup>[21]</sup>。

对熔滴过渡理论研究分为宏观和微观研究两大类，宏观是从力学、能量、热传递等角度对液态熔滴的研究，微观研究是液态金属中质点运动、流场分布等角度来研究<sup>[22]</sup>。目前描述熔滴过渡的理论主要包括静力平衡理论、不稳定收缩理论、能量最小原理、流体动力学理论及“质量—弹簧”理论等。

#### 1. 静力平衡理论

Amson J. C.等在 1962 年提出了 GMAW 熔滴过渡的静力平衡理论<sup>[23]</sup>，Lancaster J. F<sup>[24]</sup>进行了进一步论证。静力平衡理论基于作用在熔滴上力的平衡的基础上考虑，该理论的原理是熔滴在脱离焊丝前受到重力、等离子流力和电流流过液态熔滴所产生的电磁力的作用，当促使熔滴过渡的力（熔滴受到的电磁收缩力、重力、等离子流拉力）大于阻碍熔滴过渡的力（熔滴受到的表面张力）时，熔滴实现熔滴过渡<sup>[25]</sup>。Wazaink J.H 等<sup>[26]</sup>利用该理论计算不同电流时的熔滴尺寸，在小电流时计算结果与实验结果基本符合，但是当电流在滴状过渡向射流过渡电流区间以上时，计算值与实验测得数据之间存在较大误差。

静力学平衡理论将熔滴假设为球体，没有考虑熔滴的几何形状，而且电磁力是假设熔滴中的电流密度均匀的情况下得出的，只考虑轴向力对熔滴过渡的影响，没有考虑到电流的动态变化和径向收缩力对熔滴脱离的影响，所以其计算精度受到很大限制。

#### 2. 收缩不平衡理论

收缩不平衡理论是由 Rayleigh 液柱不平衡模型发展来的<sup>[27]</sup>。由于球体的表面比圆柱体具有更小的能量，圆柱形液体波动的频率和波长有一定的关系，当

圆柱状液态金属受到某一特定波长干扰时，表面发生波动，有分裂为若干个液滴的倾向。收缩不平衡理论在一定程度上解释了熔滴的体积随着电流不断增加而减小的一般趋势。

Allum C.J.<sup>[28]</sup>, Rhee S.<sup>[29]</sup>等通过收缩不平衡理论来研究熔滴过渡并计算了熔滴尺寸。将焊丝端部的液态金属假设成无限长的液柱，流过液柱的电流恒定，洛伦兹力和表面张力对实际熔滴几何形状的影响很难看到，其计算结果与实际的液态熔滴形状存在较大差异，所以收缩不平衡理论对熔滴的预测虽然取得了一定的成果，但也存在很大的局限性<sup>[29]</sup>。

### 3. 能量最小原理理论

任何系统总是向着能量最小的方向转变，对于熔滴而言，液面的变化趋势总是趋于能量最小状态，使包括电弧在内的整个熔滴过渡系统能量最小。Joo T.M 等<sup>[30]</sup>用能量最小原理理论研究了焊丝端部熔滴几何形状及体积。Chio S.K.<sup>[31]</sup>根据 Joo T.M 的思想分析了在重力、电磁力、表面张力和等离子流力作用下，熔滴所具备的机械能。杨世彦等以 Surface Evolver 软件作为有限元分析手段，从能量角度出发，根据电动力学和其他相关的理论基础，建立了适合该软件的射滴过渡能量模型<sup>[32]</sup>。以上计算所用到的模型均为静态模型，不能描述熔滴尺寸形状的变化规律，但这些变化和熔滴过渡的信息有关，对熔滴过渡进行动态模拟具有很大意义。

### 4. 流体动力学理论

Simpson S.W.等用流体动力学建立了 GMAW 熔滴过渡的动态模型，将悬挂的熔滴尺寸及形状看作电流和时间的函数，在考虑电磁力、重力、表面张力及等离子流力等的影响的前提下，较准确地计算出熔滴在各时刻的形状及尺寸<sup>[33]</sup>。Haidar 等利用流体动力学理论建立了 GMAW 熔滴长大的二维时变模型，建立了滴状过渡及射流过渡的动态模型，应用 VOF 法实现了对熔滴过渡进行了模拟<sup>[34]</sup>。Fan H.G 等将焊丝、电弧和熔池作为整体建立数学模型，研究了熔滴的形成与分离过程、熔滴在电弧空间的行为、熔滴对熔池动态冲击的影响及焊缝成形，为了解熔滴过渡过程中熔滴、电弧和熔池动态交互影响提供了可能<sup>[35]</sup>。该理论的不足是模型复杂，计算时间比较长。

### 5. “质量—弹簧”理论

“质量—弹簧”模型示意图如图 2-1 所示，焊丝端部熔滴的振荡属于非线性振荡，在送丝速度不变时，近似认为熔滴的质量随时间线性增加，而弹性系数在熔滴振荡的过程中渐渐变小。当熔滴振荡到某一位置时，如果质量会突然减小，就标志着达到临界位移，我们假想的弹簧会断裂，标志着熔滴脱离。

该理论由 Shaw 等<sup>[36]</sup>提出，最开始用在水龙头中缓慢流出水滴的模拟，Watkins A.D.<sup>[37]</sup>用该理论计算出熔滴的尺寸和过渡频率，模拟结果与实测值基本符合，但没有得到滴状过渡和射流过渡情况下熔滴的位移及振荡速度等对熔

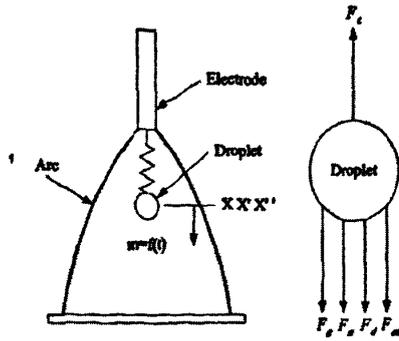


图 2-1 “质量—弹簧”模型示意图

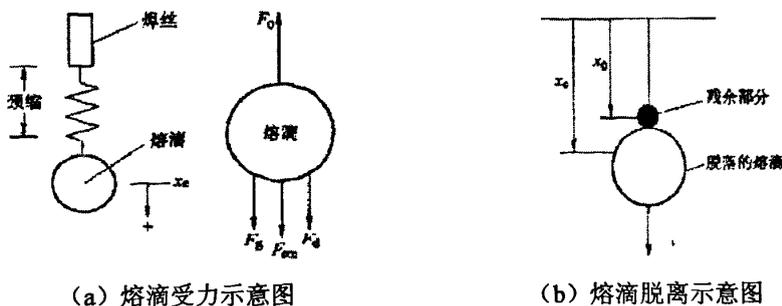
滴过渡行为的影响。李世凯利用该理论模型建立 GMAW 焊接熔滴过渡的动态模型，分别对连续和脉冲电流下的熔滴过渡进行动态模拟，分析熔滴的长大和脱离过程，定性讨论熔滴在长大和脱离过程中的振荡速度以及熔滴受力等对熔滴过渡行为的影响<sup>[38]</sup>。

目前，“质量—弹簧”<sup>[39]</sup>理论来模拟熔滴过渡的动态的过程已经成为了研究热点。考虑熔滴受力是一个动态平衡，用阻尼系数恒定、质量及弹簧系数均变化的线性二阶“质量—弹簧”系统来模拟熔滴长大过程，本文第三章也是采用“质量—弹簧”理论。

#### 2.2.4 熔滴过渡中的受力分析

焊丝端部的熔滴主要受到重力、电磁力、等离子流拉力及表面张力的作用。考虑熔滴受力是一个动态平衡，如果将焊丝端部的熔滴看作有阻尼作用的“质量—弹簧”<sup>[39]</sup>系统，表面张力可以等效为弹簧力。建立熔滴受力的动态模型如图 2-2<sup>[39]</sup>所示。

熔滴受到的外部作用力  $F_0$  可表示  $F_0 = F_g + F_{em} + F_d$ <sup>[39]</sup>， $F_g$  是熔滴受到的重力， $F_{em}$  是电磁力， $F_d$  是等离子流拉力。



(a) 熔滴受力示意图

(b) 熔滴脱离示意图

图 2-2 熔滴受力示意图及熔滴脱离示意图

### 1.重力

$$F_g = mg = 4/3\pi r_D^3 \rho g^{[40]} \quad (2-1)$$

式中： $m$ 为熔滴质量； $g$ 为重力加速度； $r_D$ 为熔滴半径； $\rho$ 为液态熔滴的密度。

### 2.电磁力

电磁力是通过熔滴的电流与其自身磁场相互作用的结果，电流通过熔滴，导体截面是变化的，将产生电磁力的轴向分力，方向由小截面指向大截面，电磁力的计算可用下式表示： $F=J*B$ ，式中， $J$ 为电流密度， $B$ 为磁场强度。在熔滴的长大和脱离过程中，电磁力对熔滴过渡的影响可按不同部位来分析，电磁力的径向分力作为脱离力可忽略，这样作用在熔滴上的轴向分力可假设为<sup>[40]</sup>：

$$F_{em} = \int_V (J \times B) \sin \varphi dV \quad (2-2)$$

式中， $\varphi$ 为作用力矢量与轴线间的夹角，进行积分可以得到：

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left[ \frac{R \sin \theta}{r} - \frac{1}{4} \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \left( \frac{2}{1 + \cos \theta} \right) \right] \quad (2-3)$$

式中， $I$ 是焊接电流， $\mu_0$ 是自由空间的磁导率， $R$ 为熔滴半径， $r$ 为焊丝半径， $\theta$ 为电弧半锥角。为简化模型，我们在计算的过程中将电弧半锥角取为 $75^\circ$ 。

### 3.表面张力

在半径为 $R$ 的熔滴悬垂于焊丝端部的情况下，表面张力是在焊丝端部保持熔滴的主要作用力： $F_s = 2\pi r_w \gamma^{[40]}$ ，式中： $F_s$ 为表面张力， $r_w$ 为焊丝半径， $\gamma$ 为表面张力系数。

### 4.等离子流拉力

等离子流拉力从电弧的力学特点来说，自由电弧的外部呈圆锥形，上面的压力大于下面，形成压力差，造成从焊丝端部向工件的气体流动，可认为浸入运动流体中的球体受到的拉力，在流速均匀的流体里，表示为 $F_d = C_d A_p (\rho_f v_f^2 / 2)^{[40]}$ 。式中， $C_d$ 为等离子流力系数， $A_p$ 为等离子流力作用面积， $\rho_f$ 和  $v_f$ 分别为电弧空间气体的密度和流速， $A_p$ 可以表示为： $A_p = \pi(r_D^2 - r_w^2)$ ， $r_w$ 为焊丝半径。

### 5.其它作用力

一般认为燃弧期熔滴上所受的力有金属蒸发反力、斑点压力、等离子流拉力、表面张力、电磁力和重力。其中前面两个力在刚燃弧阶段，小滴半径小于焊丝半径情况下对小滴形态变化影响很低，数据也比较难以测得，可以忽略。所以，影响熔滴成型的主要因素是重力、电磁作用力和表面张力，这些力的非平衡关系引起小滴向完整焊丝端面进行扩展，最终形成熔滴。

## 2.3 焊接熔池成形及其数学模型

低碳钢材料熔池金属过热程度较低，温度值比较接近于熔点温度。熔焊时，在热源的作用下焊丝熔化，同时被焊金属也发生局部熔化。母材上由熔化的焊丝金属与局部熔化的母材所组成的具有一定几何形状的液体金属叫做熔池。

### 2.3.1 熔池的形成

#### 1. 熔池的形成过程

焊缝的成形一般要经历加热、熔化、化学冶金、凝固和固态相变等复杂过程，其中熔化和凝固必不可少。在电弧作用下，焊件上的温度分布是不均匀的，电弧作用中心的温度最高，随着电弧作用远离，温度逐渐降低（见图2-3）。电弧正下方的母材的温度超过熔点，必然会熔化，并且加热填充材料形成熔滴，

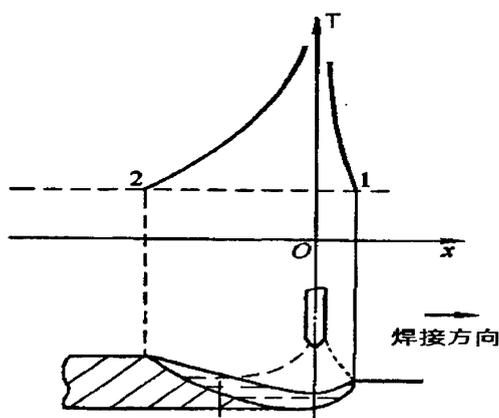


图 2-3 熔池内沿焊缝纵向轴线

向母材过渡，这两部分金属混合在一起共同形成了具有一定几何形状的焊接熔池。焊接电弧是沿着焊件接缝不断移动的，因此熔池也是不断移动的。在熔池移动的过程中，熔池中电弧正下方的金属在电弧作用下到熔池底部，并在电弧力、表面张力和重力等的共同作用下使熔池保持一定尺寸。

熔池内各点温度是不断变化的，熔池内不同的点距电弧中心的距离不相同，温度分布也不均匀的。离电弧作用中心越近，温度越高；离电弧作用中心越远，温度越低。熔池凝固是一个结晶过程，首先在熔池内形成晶核，然后晶体长大，直到全部凝固成焊缝。沿熔池的纵向看，前部的固体母材金属处于急剧升温阶段，不断被电弧熔化成为液体金属；尾部的液体金属离电弧热源，温度降低，不断凝固形成焊缝。焊缝是由熔池凝固而成的，熔池的形状将决定焊缝的形状。

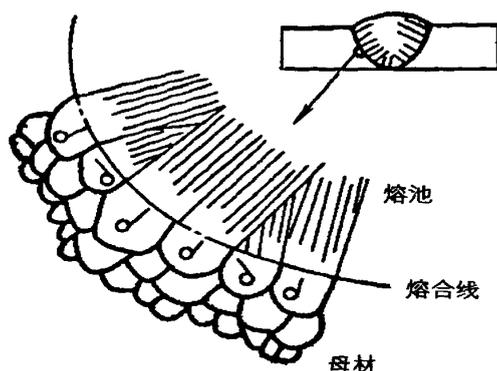


图 2-4 熔池结晶过程示意图

## 2. 熔池的形状和尺寸

熔池的形成需要一定的时间，这段时间叫过渡期。经过过渡期后，就进入准稳态时期，这时熔池的形状、尺寸和质量不再发生变化，只取决于焊接工艺条件和母材的种类，并随焊接热源作同步运动。在电弧焊的条件下，准稳态时期的熔池形状类似于不标准的半椭球，其轮廓为温度近似等于母材熔点的等温面。

表述熔池的尺寸参数包括熔长 $L$ 、熔宽 $B$ 和熔深 $H$ 。熔池的宽度 $B$ 和深度 $H$ 是沿焊接方向不断变化的。熔池的长度 $L$ 可以近似计算为： $L=P_2UI$ ； $P_2$ 取决于焊接方法和焊接电流。

熔池内的温度分布是不均匀的，在熔池的前部，输入的热量大于散失的热量，随热源的移动，母材不断熔化。处于电弧下面的熔池表面温度最高，熔池后部的温度逐渐下降，输入的热量小于散失的热量，所以不断发生金属凝固。

熔池的平均温度主要取决于母材的性质和散热的条件。对低碳钢来说，熔池的平均温度约为 $1770\pm 100^\circ\text{C}$ 。

从理论上计算熔池的上表面积很困难，因为在各种力的作用下，熔池上表面呈现很复杂的形状。熔池的上表面积取决于焊接方法和焊接工艺参数，一般为 $1-4\text{cm}^2$ 。

焊接熔池的特征参数有熔池前部长度 $l_1$ 、熔池尾部长度 $l_2$ 、熔池长度 $l(=l_1+l_2)$ 、熔池宽度 $B$ 、熔池深度 $H$ 等。

通过计算得到 $l_1$ 和 $l_2$ 的表达式为：

$$l_1 = \frac{a}{v} \left( \ln \frac{P}{2\pi\lambda T_m} - \ln l_1 \right) \approx \frac{a}{v} \ln \frac{P}{2\pi\lambda T_m}$$

$$l_2 = \frac{P}{2\pi\lambda T_m}$$

式中 $T_m$ 是被焊接材料的熔化温度。

从上式可以看成，熔池前部长度 $l_1$ 随焊件热输入功率的增加而增加；熔池前部长度 $l_1$ 与焊接速度成反比。熔池尾部的长度与 $P$ 成正比，与焊接速度 $v$ 无关。当 $v$ 较大时， $l_1$ 很小，此时熔池长度 $l$ 于熔池尾部的长度 $l_2$ 近似相等。

此外，上式还表明，熔池宽度和熔池深度与 $\sqrt{P}$ 成正比关系，与 $\sqrt{v}$ 成反比关系。在热源功率 $P$ 等其他参数一定的情况下，随热源移动速度 $v$ 的增加，熔池体积减小，熔池长度变化不大，熔池宽度 $B$ 减小；在热源移动速度等其他参数一定的情况下，随着热源功率 $P$ 的增加，熔池体积、熔池长度、熔池宽度 $B$ 均增加。

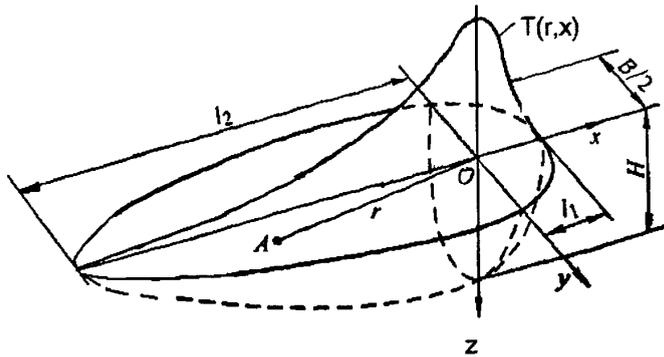


图 2-5 熔池形状示意图

### 3.熔池的存在时间

熔池在液态存在的最大时间取决于熔池的长度 $L$ 和焊接速度 $v$ ，

$$t_{\max} = \frac{L}{v} \quad (2-4)$$

按照熔池质量确定的熔池平均存在时间为

$$t_{cp} = \frac{m_p}{\rho v A_w} \quad (2-5)$$

式中  $m_p$ —熔池的质量； $\rho$ —熔池液态金属的密度； $A_w$ —焊缝的横截面积。

#### 2.3.2 熔池形状的类型及影响因素

在电弧热作用下，母材的熔化形态主要是由母材的热物理参数、母材的形状、焊接速度等因素决定，除此之外，同时还与电弧对母材的热输入量及电弧燃烧形态有关。

根据移动点热源热传导理论公式进行计算，对充分大厚板表面焊接时，形

成的焊缝断面形状为半圆形的。然而实际根据焊接条件(如弧长、电流、电压)、焊丝直径、熔滴过渡形态等不同而有显著变化,得到的焊缝断面形状是复杂多变的。

一般,熔池形状有三种主要形式:单纯熔化型、中心熔化型、周边熔化型。

单纯熔化型形状接近半圆形。在这种条件下,熔池中熔化金属的对流程度高,热量可以通过固体焊件金属和熔池界面流出,这样就产生了热传导型熔化。焊条电弧焊以及TIG焊,在气体保护熔化极焊接中,当采用的小热输入量的短路过渡这种熔化形式比较常见。本文第四、五章所得到的熔池就属于这种熔化形式。

周边熔化型是指电弧正下方进入的热量通过熔化金属的对流被逐渐传送到周边,熔池内金属向外流动,中心的熔化比周边区少,形成了周边区域熔化。这种情况一般出现在电弧较长或焊速较慢时。

中心熔化型是与周围区域比较而言的,电弧正下方熔化程度很高。熔化形式主要发生在细直径焊丝的大电流焊接的情况下。

### 2.3.3 焊接熔池模型的数学描述

描述熔池的瞬态行为,就需要对不同时刻焊接熔池中动态过程进行数值模拟。焊接开始,电弧把热量传至焊件,焊件温度升高,局部熔化形成熔池。由于电弧热输入的作用,熔池迅速长大。熔池内对流是传热的主要形式;在熔池外的固体区域,传热以热传导方式为主。随着电弧运动,电弧下方的焊件上的温度分布稳定,熔池形状也相对稳定并不再长大,并以与电弧相同的运动速度沿焊接方向移动,这是一个三维瞬态的流体流动和传热的问题。

#### 1. 直角坐标系下的控制方程

根据热传导理论,在某一确定的初始条件下,母材的传热过程可以用热传导微分方程以及反映母材和周围环境交互作用的边界条件来描述。在直角坐标系中,温度  $T(x, y, z, t)$  作为空间坐标  $(x, y, z)$  与时间  $t$  的函数。对  $CO_2$  焊接的流场和热场进行分析时,主要考虑了两部分:一是电弧作用在焊件表面的量,二是熔滴进入熔池后所带来的热量。焊丝不断熔化形成熔滴并过渡到熔池,这是一个向熔池传输能量、质量以及动量的过程,和焊接电弧热量共同的作用决定了焊接熔池的几何形状,其任一点所满足能量守恒方程微分方程为:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + H + Q(x, y, z, t) + S(x, y, z, t) \quad (2-6)$$

式中,  $T$  为温度(单位: K);  $t$  为时间(单位: s);  $k$  为材料的导热系数(单位:  $W / m \cdot K^{-1}$ );  $C$  为材料的比热容(单位:  $J / kg \cdot K^{-1}$ );  $\rho$  为材料的密度(单位:  $kg / m^3$ );  $Q$  为热源热流密度(单位:  $W / m^3$ );  $S$  为熔滴进入熔池后所带来的热量;

H为相变潜热。

## 2. 求解条件

求解导热问题就是对导热微分方程式的求解。首先把求解区域离散化，也就是把求解区域划分成有限个多边形单元，在每个单元上选择某些节点，以节点温度作为基点处的温度。这样整个求解区域就由有限个离散单元代替，整个求解域上连续的温度函数 $T(x, y, z, t)$ ，也将由有限个单元的温度插值函数所代替。于是把在整个区域上连续分布的温度的函数问题转化为求解单元温度的问题，再给出某些特定求解条件，如初始条件和边界条件等，这样就能够完整地描述一个具体的导热问题。

1). 模拟计算的边界条件设定如下：在 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 8\text{mm}$ 的低碳钢板上进行堆焊，热源沿板的中间匀速移动。热源作用面积为 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ ，板的初始温度为 $20^\circ\text{C}$ 。

2).  $z$ 方向轴对称面为绝热面  $\partial T / \partial z = 0; \mu = 0; \partial T / \partial z = 0$

3). 工件上表面的热损失为对流

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = h_c(T - T_a)$$

式中： $h_c$ 为对流系数； $T_a$ 为环境温度。

4). 作用于工件上表面的热流密度主要有以下2种形式：

### A. Gauss热源模型

焊接加热斑点上的热流密度分布采用Eagar和Tsai的高斯数学模型<sup>[41]</sup>，其分布函数见式(2-7)与图2-7：

$$q(r) = \frac{3}{\pi R^2} \eta UI \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (2-7)$$

式中： $R$ 为电弧有效加热半径， $r$ 为焊件上任意点至电弧加热斑点中心的距离， $\eta$ 为焊接热效率， $U$ 为电弧电压； $I$ 为焊接电流。

### B. 双椭球热源模型

Goldak提出的双椭球形热源模型<sup>[42]</sup>考虑到热源移动对热流分布的影响，将热源前（前半部分）、后方（后半部分）的热流密度分布函数分别用式(2-8)与式(2-9)表示：

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q_f}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c_1^2}\right)} \quad (2-8)$$

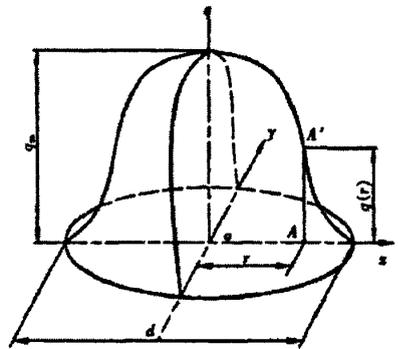


图 2-6 Gauss 热源模型示意图

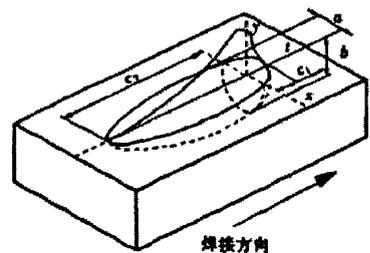


图 2-7 双椭球热源模型图

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q_f}{abc2\pi\sqrt{\kappa}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c^2}\right)} \quad (2-9)$$

式中 $f_x, f_y$ 是热流密度分布系数。 $Q$ 为热源有效功率(W);  $q(x, y, z, t)$ 为工件表面热流分布(W/m<sup>2</sup>) ;  $a, b, c$ 为热流分布特征参数。

针对特定的焊接过程的特点, 本文提出了一种适合CO<sub>2</sub>气保焊焊接工艺的热流密度分布模型, 在第四章会具体讲述。

#### 5).初始条件

以起弧时刻作为初始时刻, 则有 $T=T_0$ , 式中 $T_0$ 为环境温度, 一般取值为20℃。

### 2.4 焊接工艺参数对熔池尺寸的影响

焊接工艺参数主要是指焊接电流、焊接电压以及焊接速度。在一定的焊接条件下, 研究各个参数对熔池的影响, 要先使另外两个参数值不变, 观察我们要探讨的那个参数值单独变化时对熔池尺寸的影响。

熔焊时, 在单道焊缝横截面上焊缝宽度( $B$ )与焊缝计算厚度( $H$ )的比值( $\phi=B/H$ )称为焊缝成形系数。焊缝成形系数小, 会形成窄而深的焊缝, 由于区域偏析在焊缝中心会聚集较多的杂质, 焊缝的抗热裂纹性能差, 所以形成系数不能太小。如自动埋弧焊时焊缝的成形系数要大于1.3, 即焊缝的宽度至少为焊缝计算厚度的1.3倍。

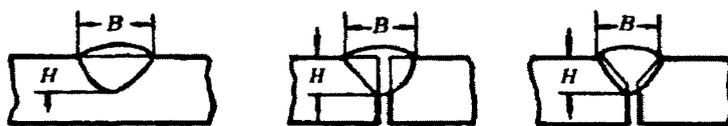


图2-8 焊缝成形系数示意图

随着焊接电流的增大, 在焊接电压和速度不变的情况下, 熔深呈线性增大, 而熔宽略有增大, 焊缝成形系数则由于熔深增大而减少。

当焊接电流和焊接速度不变时, 电弧电压对焊缝成形影响十分明显, 熔宽随着电弧电压的增加而增大, 熔深略有减小, 熔宽增加的幅度更为明显, 所以电弧电压是影响焊缝熔宽的主要因素。

焊接电压和焊接电流固定不变时, 随着焊接速度的增大, 熔宽略有减小, 熔深呈线性减小。随着焊接速度增大, 母材的熔化速度减慢, 有利于熔池液体金属在电弧力作用下向尾部流动, 使熔深增加。随电弧前进, 其作用主要在这个焊接熔池上而不是母材上, 这就产生了比较宽的焊道。

### 2.5 本章小节

1.介绍了焊接熔滴短路过渡的过程及其控制方法, 给出了在分析熔滴过渡时常用的一般理论, 选用其中的“质量—弹簧”理论分析了熔滴过渡中的受力情况。

2.研究了熔池成形过程中的相关问题及在研究焊接熔池模拟时数学模型的建立过程，分析了焊接工艺参数对熔池尺寸的影响，为后面的 ANSYS 有限元计算提供了理论和计算基础。

## 第三章 基于 MATLAB 的 CO<sub>2</sub> 气保焊熔滴行为的数值分析

### 3.1 引言

CO<sub>2</sub> 气保焊是一种重要的熔化焊接方法，广泛应用于低碳钢等黑色金属材料的焊接，适用于薄板焊接及全位置焊接，而且抗锈低氢，高效节能。短路过渡是 CO<sub>2</sub> 气保焊广泛采用的一种熔滴过渡形式，飞溅大，焊缝成型差极大地限制了它的进一步推广和应用。因此过渡熔滴的大小、形状、过渡频率决定着电弧的稳定性，对焊接操作性和焊缝的品质构成影响。

如果熔滴过渡的大小不一致，熔滴过渡中电弧长度变化增大，电弧就会变得不稳定，熔滴过渡不顺畅，焊丝前端和熔池的熔化金属产生的飞溅就会变得很严重。CO<sub>2</sub> 气保焊短路过渡的熔滴行为会影响到焊接过程中的飞溅以及焊缝的质量，因此只有通过计算机仿真对熔滴的行为规律进行深入分析，了解焊接参数对焊短路过渡过程熔滴动态行为的影响，才能实现理想的 CO<sub>2</sub> 气保焊短路过渡控制。通过“质量—弹簧”理论，对焊接的熔滴过渡进行认真的研究，用 MATLAB 软件数值分析的方法在四阶 R-K 法求解微分方程的基础上，来获得 CO<sub>2</sub> 气保焊熔滴过渡的规律，从而为工程应用打下坚实的理论基础。

### 3.2 基于“质量—弹簧”理论的数学模型的建立

短路过渡是小电流、低电弧电压时，弧长较短，焊丝端部和母材在电弧热的作用下熔化形成熔滴，随着焊丝不断地送进，熔滴未长成大滴就与熔池发生接触而短路，形成液桥，电弧熄灭，随之在表面张力和电弧力的作用下，液桥发生颈缩一直到爆断，金属熔滴过渡到熔池中去。熔滴脱落后电弧会重新引燃，新的熔滴又开始形成，燃弧和短路周期性地交替进行，熔滴短路过渡过程就形成了。

熔滴成形是短路过渡液桥破断之后，焊丝端部的残余焊丝熔液由小滴状形态发展到完整包裹焊丝端头形成熔滴形态的过程。根据“质量—弹簧”理论，把处于焊丝端部的熔滴当作一个“质量—弹簧”系统，弹簧一端连着焊丝，而另一端接着金属熔滴，整个示意图如图 2-2。为使计算和分析过程简化，模型的建立主要基于以下假设：熔滴的物性参数在整个过程中不变，在垂直于焊丝方向的速度可以忽略；系统以焊丝为轴线对称，而且焊丝具有恒定的熔化速度。基于上面假设，熔滴的长大和脱离过程用“质量—弹簧”系统表示如下：

$$m_D(d^2x/dt^2)+kx+b(dx/dt)=F_T \quad (3-1)$$

$$dm_D/dt=V_M \quad (3-2)$$

式中， $m_D$  为熔滴质量； $b$  代表阻尼系数，熔滴受到的阻尼力为： $f_b = b(dx/dt)$ ； $x$  代表熔滴的弹性位移； $t$  是时间； $V_M$  表示常量，意味熔滴的质量随时间线性

增加；k 弹簧系数，弹簧的弹性力为： $f_k=kx$ ； $F_t$  为熔滴受到的外部作用力。

近似认为熔滴的质量  $m_D$  随时间呈线性增加趋势，弹性系数在熔滴振荡过程中逐渐减小。在整体模型中，熔滴在振荡至某一位置时质量突然减小，标志着达到临界位移，假想的“弹簧”断裂，则我们分析熔滴脱离。

随时间的不断前进，熔滴的长大和脱离这两个过程一直是连续发生，如果  $M_c$  表示熔滴达到位移的临界质量，熔滴的脱离质量为  $\Delta M$ 。熔滴的脱离质量可通过下式来表示：

$$\Delta M=l_1 M_c V_e \quad (3-3)$$

式 (3-3) 中， $l_1$  是待定系数， $V_e$  是焊丝的尾端熔滴的临界振荡速度，考虑了熔滴的振荡速度和临界质量的影响，这样所得计算结果更加趋于实际情况，所以在我们的仿真中采用式(3-3)。

在所建立的数学模型中， $x_c$  表示系统质量中心点的临界位移，熔滴脱落后，残留熔滴的初始位移有以下的公式表示：

$$x_0=x_c-R_d \Delta M/M_c \quad (3-4)$$

式中  $R_d=[3 \Delta M/(4\pi\rho)]^{1/3}$ ， $\rho$  是熔滴的密度； $R_d$  是熔滴的半径。

### 3.3 数学模型的求解与参数计算

#### 3.3.1 关键参数的处理

熔滴不但是金属过渡的载体，而且影响燃弧期和短路过程稳定性的非常重要的因素。如果熔滴尺寸过大，就会降低燃弧过程的稳定性；而熔滴尺寸过小时不能形成正常的短路过渡过程，同时还将破坏焊接过程的稳定。

我们采用四阶 R-K 法进行计算，对微分方程的求解，该方法计算结果具有四阶精度，计算精度较高，结果准确。R-K 是对龙格-库塔方法的简称，它常用于对微分方程的求解，四阶 R-K 法求解的中心思想是在连续的区间内预测  $n(n>1)$  个点处的斜率，再将它们加权平均作为函数在该区间的平均斜率的近似值。

对式(3-1)以及式 (3-2) 的二阶线性微分方程的求解，可以看成是由一阶常微分方程的演化得到的，并将微分方程转化为一阶常微分方程，再进行求解。对微分方程的推导过程如下：

根据公式： $m_D d^2x/dt^2+kx+bdx/dt=Ft$

假定  $y_1(t)=x(t)$

$dy_1/dt=y_2$

因此  $dy_2/dt=d^2y_1/dt^2=d^2x/dt^2$

可得  $dy_1/dt=y_2$

$dy_2/dt=[Ft-bdy_1/dt-ky_1(t)]/m_D(t)$

再利用四阶 R-K 法，推导以后就可得到该公式的求解：

$$y_1^{k+1}=y_1^k+\Delta t[K_{11}+2K_{12}+2K_{13}+K_{14}]/6$$

$$y_{2k+1} = y_{2k} + \Delta t [K_{21} + 2K_{22} + 2K_{23} + K_{24}] / 6$$

$$K_{11} = y_{2k}$$

$$K_{21} = f(t_k, y_{1k}, y_{2k})$$

$$K_{12} = y_{2k} + \Delta t K_{21} / t$$

$$K_{22} = f(t_k + \Delta t / 2, y_{1k} + \Delta t K_{11} / 2, y_{2k} + \Delta t K_{21} / 2)$$

$$K_{13} = y_{2k} + \Delta t K_{22} / 2$$

$$K_{23} = f(t_k + \Delta t / 2, y_{1k} + \Delta t K_{12} / 2, y_{2k} + \Delta t K_{22} / 2)$$

$$K_{14} = y_{2k} + \Delta t K_{23}$$

$$K_{24} = f(t_k + \Delta t, y_{1k} + \Delta t K_{13}, y_{2k} + \Delta t K_{23})$$

经过设定初始条件、时间步长，式中用  $\Delta t$  来表示时间步长，选定后，用上面的推到公式对熔滴的长大和脱离进行模拟。要对微分方程进行求解，我们采取的是 MATLAB 软件编程采用四阶 R-K 法。计算过程中，对一些关键参数的处理如下所示：

### 1. 熔滴质量

上面我们说过熔滴质量随时间而线性增加，与焊丝的熔化速度  $S_m$  成正比，但是焊丝的熔化速度与采用的焊接电流和伸出长度有关。计算中，可以将熔滴的质量变化视为焊接电流与焊丝干伸长的函数： $dm/dt = \rho A_p S_m$ 。式中， $\rho$  表示焊丝密度； $S_m$  为焊丝的熔化速度； $A_p$  是焊丝的横截面积。

焊丝的熔化速度可以表示为： $S_m = I\Gamma_1 + I^2\Gamma_2Le$ 。 $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$  分别为电弧和焦耳热所对应的焊丝熔化常数， $I$  是焊接电流， $Le$  为伸出长度。当焊丝的熔化速度恒定，焊丝伸出长度和电流不变时，则  $dm_p/dt = \rho A_p S_m = V_m$ ，计算采用焊丝的熔化常数如表 3-1 所示<sup>[25]</sup>。

表 3-1 焊丝的熔化常数

Le/mm	$\Gamma_1$ /[mm/(A.s)]	$\Gamma_2$ /[1/(A <sup>2</sup> .s)]
26	0.1347	$1.413 \times 10^{-5}$
36	0.1342	$1.4266 \times 10^{-5}$

### 2. 弹性系数

弹性系数  $k$  选择的准确与否决定着模型预测结果的可行性，是熔滴计算过程中重要的物性参数。到现在为止还没有关于弹性系数的准确描述和数据。通过大量的实验结果和理论预测，表明在熔滴的长大和脱离时，弹性系数  $k$  会随着熔滴质量的增加而线性减少。

实验结果和理论还表明，如果熔滴的弹性系数变化不大，在同一电流下，通过一系列参数优化，弹性系数可以被当做常数。

### 3. 临界位移

在建立的模型中，分析临界位移随电流的变化。达到临界位移，标志着熔滴到达脱离阶段，对应的半径是熔滴的脱离半径。

### 4. 阻尼系数

目前还没有相关的准确数据来定义阻尼系数。在模型的计算过程中，阻尼系数小，进行合理假设时可从熔滴的物性参数值出发。结合有关实验结果，确定阻尼系数的大小。在本模型中，我们将阻尼系数取定值。

### 5. 初始位移

设在熔滴脱离的过程中，系统的质量中心点的临界位移为  $x_c$ 。脱离前的达到临界位移的熔滴的临界质量是  $M_c$ ，脱离的熔滴质量为  $\Delta M$ 。熔滴脱离后的残留熔滴的初始位移由以下公式得出： $x_0 = x_c - R_d \Delta M / M_c$ ，式中， $\rho$  是熔滴的密度， $R_d$  是熔滴的半径。

### 6. 材料的热物理性能参数

材料的热物理性能参数选取会影响到计算结果的可行性与准确性。从实际的焊接过程出发，模型用到的参数取值见下表 3-2<sup>[25]</sup>。

表 3-2 所用到的参数

物理性质	符号	参数值
自由空间磁导率/(H/m)	$\mu_m$	$1.256 \times 10^{-6}$
气流密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\rho_f$	0.06
重力加速度/( $\text{m}/\text{s}^2$ )	$g$	9.8
等离子流拉力系数	$C_d$	0.44
焊丝密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\rho$	7800
表面张力系数/(N/m)	$\gamma$	1.22
阻尼系数/( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ )	$b$	0.0028
气体流速/(m/s)	$v_f$	100
电弧半锥角/( $^\circ$ )	$\theta_d$	75

#### 3.3.2 MATLAB 数值求解

在计算过程中，首先要根据研究的材料确定材料的物性参数，对熔滴进行受力分析，确定熔滴的初始条件，包括初始位移和初始速度以及熔滴的临界失稳条件。计算时熔滴的质量随时间增加而线性增大，熔滴的弹性位移也在增大。当熔滴的弹性位移到达临界位移时，熔滴受力平衡，熔滴的质量突然减小，熔滴收缩形成过渡。然后计算过渡后残余熔滴的位移作为下一次熔滴长大的初始

条件。依次往复，程序的计算结构框图如图 3-1 所示。

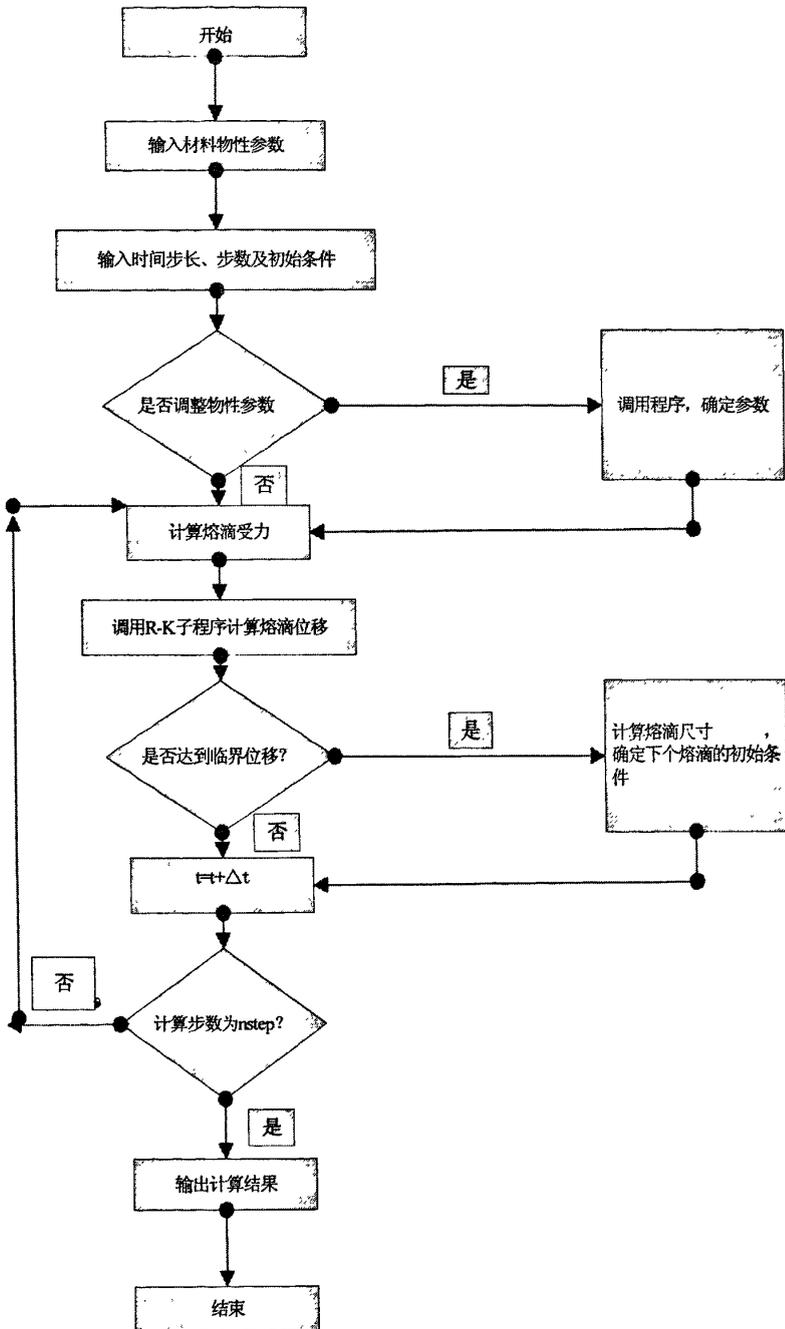


图 3-1 主程序的结构示意图

计算过程中的主要程序如下：

1. 主程序 1

```

function [m,f]=funfcn(t,y1,y2)
p=7800;
g=9.807;
Um=1.256e-6;
a=pi*5/6;
Rw=8e-4;
ρf=0.06;
vf=100;
Cd=0.44;
I=150;
k=2.2;
b=0.0028;
m0=0.0005;
k1=1.347e-4;k2=1.413e-5;Le=2.6e-2;
m=m0+p*pi*Rw^2*(k1*I+k2*Le*I^2).*t;
Rd=(3*m/(4*pi*p)).^(1/3);
Ap=pi*(Rd.^2-Rw.^2);
Fg=m*g;
Fem=((Um.*I.^2)/(4*pi))* (log(Rd*sin(a)/Rw)-1/4-1/(1-cos(a))+2*log(2/(1+cos(a))))/((1-cos
(a)).^2));
Fd=Cd*Ap*Pρf*Vf.^2/2;
Ft=Fg+Fem+Fd;
f=(Ft-b*y2-k*y1)./m;

```

## 2.主程序 2

```

function [k,T,Y1,Y2,p]=RK4(t0,tf,h)
t=t0;
p=7800;
y1=0;
y2=0;
n=fix((tf-t0)/h);
l3=0.25;
k=1;
Y1(k)=y1;
Y2(k)=y2;
TH=2;
for k=2:n

```

```

t=t0+(k-TH)*h;
K11=y2;
[m1,K21]=feval(@funfcn,t,y1,y2);
K12=y2+h*K21/2;
t1=t+h/2;t2=t+h/2;t3=t+h;
y11=y1+h*K11/2;y21=y2+h*K21/2;
[m2,K22]=feval(@funfcn,t1,y11,y21);K13=y2+h*K22/2;
y12=y1+h*K12/2;y22=y2+h*K22/2;
[m3,K23]=feval(@funfcn,t2,y12,y22);K14=y2+h*K23;
y13=y1+h*K13;y23=y2+h*K23;
[m4,K24]=feval(@funfcn,t3,y13,y23);
if y1<0.002
y1=y1+h*(K11+2*K12+2*K13+K14)/6;
y2=y2+h*(K21+2*K22+2*K23+K24)/6;
else
TH=k;
y1=0.0020-((3*13*m4*y2)/(4*pi*p))^(1/3)*13*y2;
y2=0.001;
end
T(k)=t0+(k-1)*h;
Y1(k)=y1;
Y2(k)=y2;
end
Y1
plot(T,Y1,'r');
grid;
xlabel('自变量T/s'),ylabel('因变量x/m')
legend('焊接电流I=200A时,位移随时间的变化')
3.程序 1: 电磁力随时间的变化
p=7800;g=9.807;Um=1.256e-6;a=pi*5/6;
Rw=2e-3;Pf=0.06;Vf=100;Cd=0.44;mo=5e-4;I=X;k=2.2;b=0.0028;
k1=1.347e-4;k2=1.413e-5;Le=2.6e-2;q=128;t=zeros(q,1);t=0:0.01:1;
m=m0+p*pi*Rw^2*(k1*I+k2*Le*I^2).*t;
Rd=(3*m/(4*pi*p)).^(1/3);
Fem=Um.*I.^2./(4*pi).*(log(Rd.*sin(a)/Rw)-1/4-1/(1-cos(a))+2*log(2/(1+cos(a)))/(1-cos(a)
).^2);

```

```
plot(t,Fem);grid,xlabel('自变量t/s'),ylabel('变量Fem/N')
legend('焊接电流I=XA时,电磁力随时间的变化')
```

#### 4.程序 2：重力随时间的变化

```
p=7800;g=9.807;Um=1.256e-6;a=pi*5/6;
Rw=2e-3;Pr=0.06;Vf=100;Cd=0.44;m0=5e-4;I=X;
k1=1.347e-4;k2=1.413e-5;Le=2.6e-2;p=128;t=zeros(p,1);t=0:0.1:1;
m=m0+p*pi*Rw.^2*(k1*I+k2*Le*I.^2)*t;
Fg=m*g;
plot(t,Fg);grid; xlabel('自变量t/s'),ylabel('变量Fg/N')
legend('焊接电流I=XA时,重力随时间的变化')
```

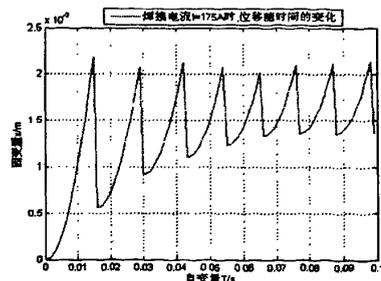
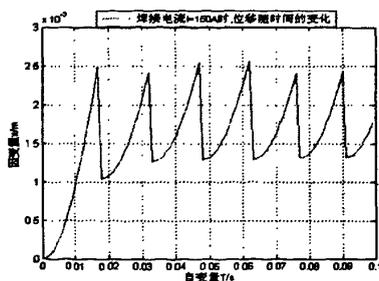
#### 5.程序 3：等离子流拉力随时间的变化

```
p=7800;g=9.807;Um=1.256e-6;a=pi*5/6;
Rw=2e-3;Pr=0.06;Vf=100;Cd=0.44;m0=5e-4;I=X;
k1=1.347e-4;k2=1.413e-5;Le=2.6e-2;p=128;t=zeros(p,1);t=0:0.01:1;
m=m0+p*pi*Rw.^2*(k1*I+k2*Le*I.^2)*t;
Rd=(3*m/(4*pi*p)).^(1/3);
Ap=pi*(Rd.^2-Rw.^2);
Fd=Cd*Ap*Pr*Vf.^2/2;
plot(t,Fd);grid,xlabel('自变量t/s'),ylabel('变量Fd/N')
legend('焊接电流I=XA时,等离子流拉力随时间的变化')
```

### 3.4 结果分析

#### 3.4.1 焊接电流对熔滴位移与时间的关系的影响

利用 MATLAB 数值分析软件进行编程编程，采用四阶 R-K 法进行计算，可得到如下结果：



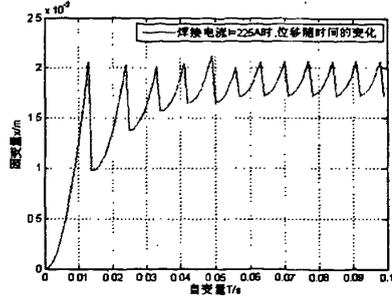
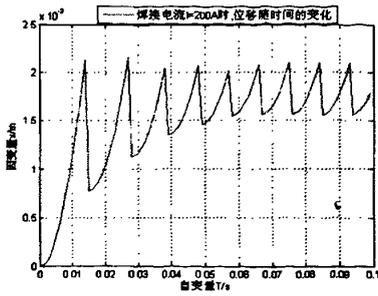


图 3-2 熔滴位移与时间的关系

从上图结果可知，随着电流的增加，熔滴的位移逐渐变小，熔滴的平均质量下降，这主要是因为当焊接电流增大时，焊接电弧温度增高很多，在其作用下熔滴的细化程度急剧增加，从另一个角度来说，焊丝的熔化速度随电流的增大而增加，单个熔滴的平均质量会随之减小，熔滴过渡频率增大。

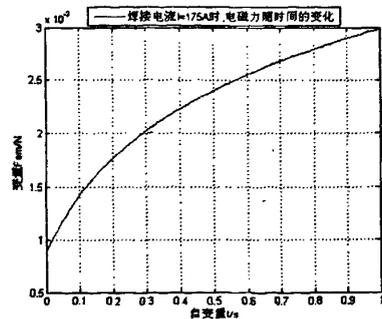
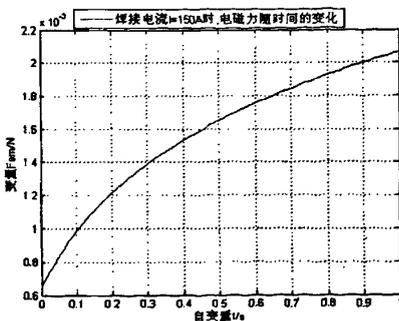
根据物理本质，熔滴尺寸是焊接中热和力共同作用的结果，力对熔滴的形状和过渡起主要作用，表现在焊接规范参数对熔滴尺寸变化的短时瞬态特征；热决定焊丝熔化及其端部的液态金属熔滴量，主要反映焊接规范参数对熔滴尺寸影响的长时间累积的作用。力和热从两大方面影响着熔滴的尺寸，各自具备不同的物理特点，从而决定了各自对熔滴尺寸具有不同的作用，这两者之间的具体联系以及影响还需要做进一步的研究。

### 3.4.2 熔滴连续长大时焊接电流对熔滴受力影响

经第二章分析可知，熔滴所受重力、电磁力和表面张力、等离子流拉力等是影响熔滴形成的主要因素，力决定了熔滴的形状和过渡，所以我们把对焊接参数对熔滴短路过渡行为的影响，就转化为对焊接参数形成熔滴的主要作用力的研究。以下是从焊接电流为例来说明焊接参数在变化的过程中对主要力的变化有重要影响：

#### 1. 电磁力

当焊接电流依次取 150A、175A、200A、225A 时，电磁力与时间的变化关系如下：



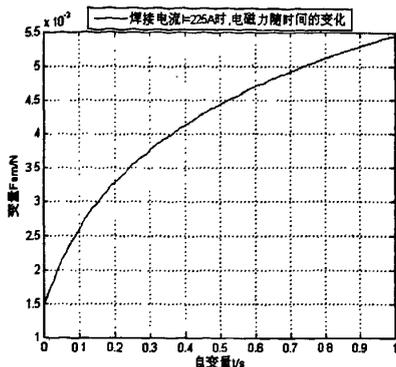
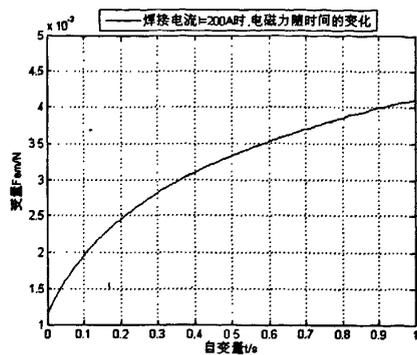


图 3-3 电磁力与时间的关系

## 2. 等离子流拉力

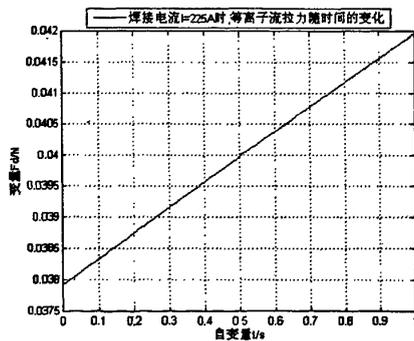
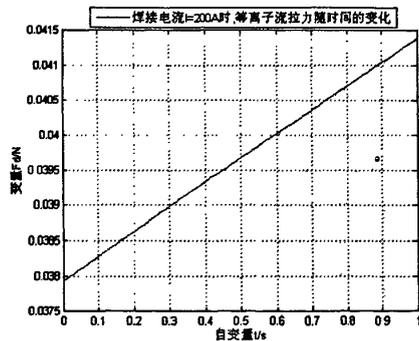
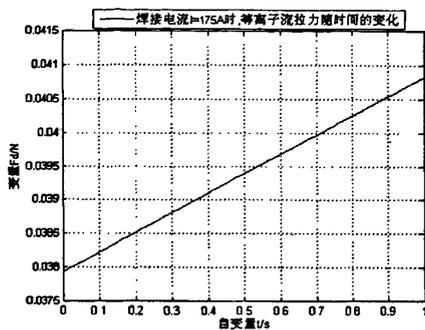
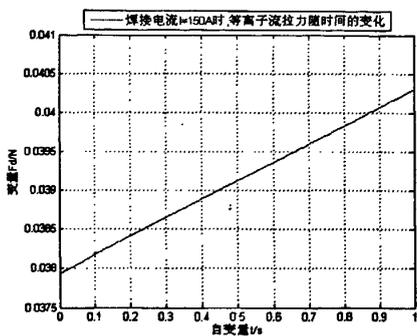
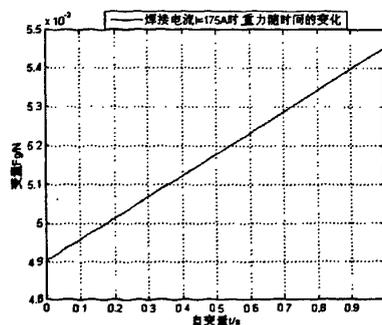
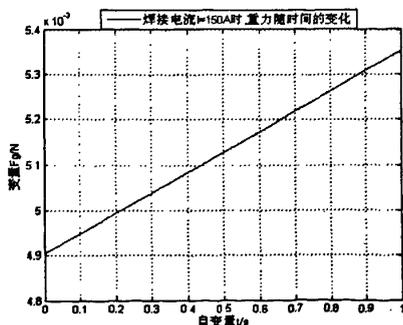


图 3-4 等离子流拉力与时间的关系

## 3. 重力



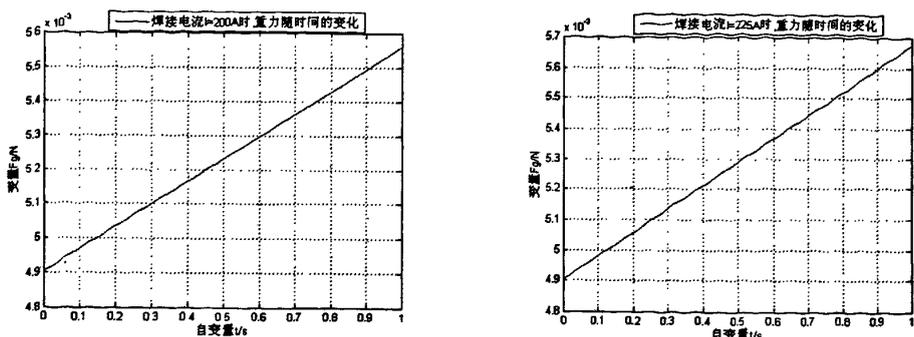


图 3-5 重力与时间的关系

在没有考虑熔滴脱离的情况下，从图 3-3、图 3-4、图 3-5 我们可以得到如下的模拟结果：

1. 电磁力、熔滴的重力、等离子流拉力随着电流的增大是逐渐增大的。

2. 在同一电流下，随时间增加熔滴持续长大，电磁力、等离子流拉力、重力随时间的增加而增大，电磁力随时间以曲线形式增长，重力和等离子流拉力随时间的变化近似线性增加。

3. 熔滴长大的不同阶段，其受力不同。

上面的讨论是在没有熔滴脱离的情况下得到的，从结果可知，熔滴在长大过程中受到的力与焊接参数之间有着必然的联系有很大关系，力熔滴的形状和过渡起着决定作用，所以对短路过渡焊接熔滴尺寸的控制，就要从焊接工艺入手，寻找熔滴尺寸控制的新方法，合理制定焊接电弧工艺，有效地对熔池质量进行进一步控制。

### 3.5 本章小结

1. 本章通过“质量—弹簧”理论深入地探讨了 CO<sub>2</sub> 气保焊短路过渡焊接熔滴行为的受力分析和动态行为，用 MATLAB 软件数值分析的方法在四阶 R-K 法求解微分方程的基础上，进行仿真求解。

2. 从模拟结果得到如下结论：电磁力、熔滴的重力、等离子流拉力随着电流的增大是逐渐增大的。在同一电流下，随时间增加熔滴持续长大，电磁力、等离子流拉力、重力随时间的增加而增大，电磁力随时间以曲线形式增长，重力和等离子流拉力随时间的变化近似线性增加。熔滴长大的不同阶段，其受力不同。随着电流的增加，熔滴的位移逐渐变小，熔滴的平均质量下降，熔滴过渡频率增大。

## 第四章 CO<sub>2</sub>气保焊短路过渡焊接熔池形态成形过程的模拟

### 4.1 引言

焊接作为现代制造业必不可少的工艺，在材料加工领域一直发挥着极其重要的作用，焊接产品的质量受到很大重视。焊接是一个涉及到电弧物理、传热、冶金和力学等诸多因素的复杂过程，因此要得到高质量的焊接接头必须控制这些因素。对焊接熔池成形过程的相关问题进行处理，是保证焊接质量的关键技术，焊接过程中施加的局部的、依从于时间的、集中热输入形成对空间梯度很大的不均匀温度场，这是引起焊接残余应力和焊接变形的根源。

CO<sub>2</sub>气保焊熔池的温度分布是在焊接电弧热源和熔滴热源的作用下形成的。这是一个向熔池传输能量，质量以及动量的过程，与焊接电弧热量的共同作用决定了焊接熔池的几何形状。当前模拟熔池的温度分布时只考虑焊接电弧热源的作用，而且采用的热源模型是单一的高斯热源模型或者是双椭球热源模型。单一的高斯热源属于面热源，在焊接温度场计算时可模拟焊接温度场，但未考虑电弧挺度对熔池的影响，多用于TIG焊接模拟<sup>[43,44]</sup>，采用双椭球热源的方法可以得到较为准确的三维温度场分布，而对熔滴过渡过程中熔滴的热量和冲击作用却缺少深入研究<sup>[45]</sup>，因此可以说没有考虑熔滴热源对熔池温度分布的模拟计算只是一种近似的结果。本文在建立新的复合热源模型时，考虑了熔滴和熔池之间影响：一是电弧作用于焊件表面的热流，二是熔滴进入熔池后所带来的热量。分别研究了CO<sub>2</sub>气保焊接的双椭球电弧热源模型以及将熔滴作为电弧之外的第二个作用热源模型，建立了适合于CO<sub>2</sub>气保焊的双椭球电弧热源与熔滴热源相叠加的一种新型复合热源模型。

以往对焊接温度场的分析都是通过试验的方法测量并采集数据，进行定量分析。受试验条件等方面的限制，所得数据的精确度并不高，而且浪费大量的人力、物力和时间。在十分简单的情况下这些问题可以通过求解某些特定的微分方程组来进行计算，同时还要作很多简化才有可能求得这些方程解析解。但是实际的焊接问题多种多样，边界条件十分复杂，用解析方法来求解这类微分方程是十分困难的。在高速电子计算机发展的今天，大多采用数值模拟的方法。计算机模拟虽然是一门新兴的学科，但在焊接学科中的应用已经深入到了许多领域，对焊接技术的提高起到了很大的促进作用。计算机模拟的重要意义就在于它能解决实际的试验过程中耗费大量时间和很不经济的问题，并能通过参数分析的模拟来改善系统，对防止出现焊接缺陷都具有十分重要的意义。这样就可以通过计算机系统来确定焊接各种结构和材料的最佳设计、最佳工艺方法和最佳焊接参数。

## 4.2 数学模型的建立

### 4.2.1 三维温度场的控制方程

由于焊接过程是高度集中热源的作用过程，其温度场极其不均匀、不稳定，而焊接熔池中局部最高温度可达金属的汽化温度。因此，焊接的热传导是一个典型的不稳定热传导问题，根据热传导理论，温度  $T(x, y, z, t)$  作为空间坐标  $(x, y, z)$  与时间  $t$  的函数，其任一点所满足能量守恒方程微分方程为<sup>[46]</sup>：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + H + Q(x, y, z, t) + S(x, y, z, t) \quad (4-1)$$

式 (4-1) 中， $T$  为温度，单位为  $K$ ； $t$  为时间，单位为  $s$ ； $k$  为材料的导热系数，单位是  $W / m \cdot K^{-1}$ ； $c$  为材料的比热容，单位是  $J / kg \cdot K^{-1}$ ； $\rho$  为材料的密度，单位为  $kg / m^3$ ； $Q$  为热源热流密度，单位是  $W / m^3$ ； $S$  为熔滴进入熔池后所带来的热量； $H$  为相变潜热。

### 4.2.2 边界条件

在焊接过程中，由于焊缝及附近区域温度加热的极不均匀性，焊件的边界和周围环境存在强烈的温差，所以焊接边界的对流和辐射就必须考虑在内。在数值模拟中，熔池中的对流现象一般采用人为提高导热系数来处理，本文亦采用该方法，即超过熔点  $1450^{\circ}C$  的区域采用导热系数为  $105W/(m \cdot ^{\circ}C)$ 。为了简化整个计算过程用一个总的换热系数来表示<sup>[47]</sup>： $q = \alpha(T - T_0)$ ，式中： $\alpha$  为总的换热系数； $T_0$  为初始的环境温度，为  $20^{\circ}C$ 。

### 4.2.3 相变潜热

在 ANSYS 中焓是指单位体积的焓值 ( $J/m^3$ )，焊接过程中焊件上的不同位置相当于经历了一次加热和冷却的热循环，在 ANSYS 中考虑相变潜热，就要定义焊接材料在相变前、后材料随温度变化的密度和比热，ANSYS 热分析模块将可以根据这些值以热焓值的变化形式自动计算，可表示为<sup>[47]</sup>：

$$H_{(T)} = \int_0^T \rho c(T) dT \quad (4-2)$$

其中， $H$  为热焓， $\rho$ 、 $C$ 、 $T$  分别为密度、比热和绝对温度。

## 4.3 有限元模型的建立

### 4.3.1 定义单元类型

ANSYS 大型分析软件中，单元按功能分为结构单元、热单元、电磁单元、耦合场单元、流体单元等几类。ANSYS 单元库中有 100 多种不同的单元类型，每个单元类型有一个唯一的编号和一个标示单元类别的前缀。单元类型决定了每个单元的节点

数目和分布、节点的自由度和单元形函数。本课题主要模拟焊接过程的温度场分布，选用 SOLID70 三维热实体单元。

#### 4.3.2 建立几何模型

建模时把模型分为三个部分，即焊缝区、过渡区和远离焊缝区，见图 4-1。本文为了保证计算的准确性而同时又尽可能减少计算量，模型尺寸为 100 mm×100 mm×8 mm。

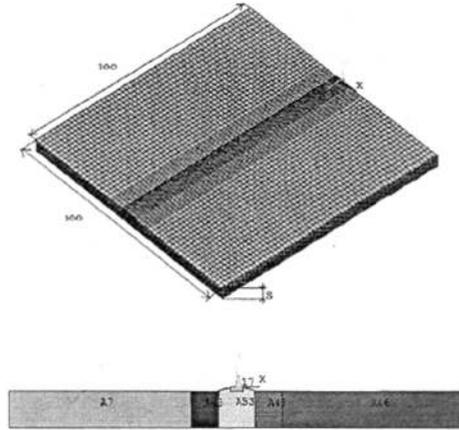


图 4-1 模型的三维网格划分及截面示意图

#### 4.3.3 网格的划分

由于焊接过程加热的急剧不均匀性，所以焊缝处温度梯度变化很大，因此划分时一般采用不均匀的网格，在焊缝及其附近的部分用加密的网格，在远离焊缝的区域，温度分布梯度变化相对较小，这时可以划分均匀且相对稀疏的单元网格。网格划分越细，计算精度越高，但花费的时间越长；划分越粗，计算精度也越低，花费时间越短。网格的划分细到一定程度之后，计算精度的变化较小。总的要求就是在保证精度的前提下尽可能地减少网格数目，为得到良好的焊接温度场，焊缝处的单元最好是低于 2mm<sup>[48]</sup>。

本课题为了保证计算精度、节省计算时间，划分网格时采用非均匀网格划分方式，在焊缝及附近的部分用加密的网格，在远离焊缝的区域，温度分布梯度变化相对较小，可采用相对稀疏的网格。网格划分结果如图 4-1 所示，所建模型沿 z、x、y 轴的三维尺寸依次为 100mm、100mm、8mm。

#### 4.3.4 材料参数的定义

在焊接过程的数值模拟中，材料热物理参数选取的准确与否是计算结果准确的前提，在本课题中，对流系数取为 15W/m<sup>2</sup>·℃，涉及的其他材料物理性能参数见表 4-1。

表 4-1 低碳钢随温度变化的材料性能参数表

温度 T(°C)	20	200	400	600	800	1000	1300	1482	2227
密度(Kg/m <sup>3</sup> )	7820	7740	7710	7650	7620	7580	7500	7200	7200
比热(J/Kg·°C)	460	491.7	557.8	667.1	1108	626.4	637.9	645.5	645.5
导热系数 (W/m·°C)	50	51.1	44.4	39.4	31.8	26.4	29.7	105	105

焊接过程中的热传导问题是一个复杂的非线性问题，金属材料的物理性能如热导率、比热容、密度也会随温度的变化而不断发生变化。各参数随时间的变化规律如图4-2所示。

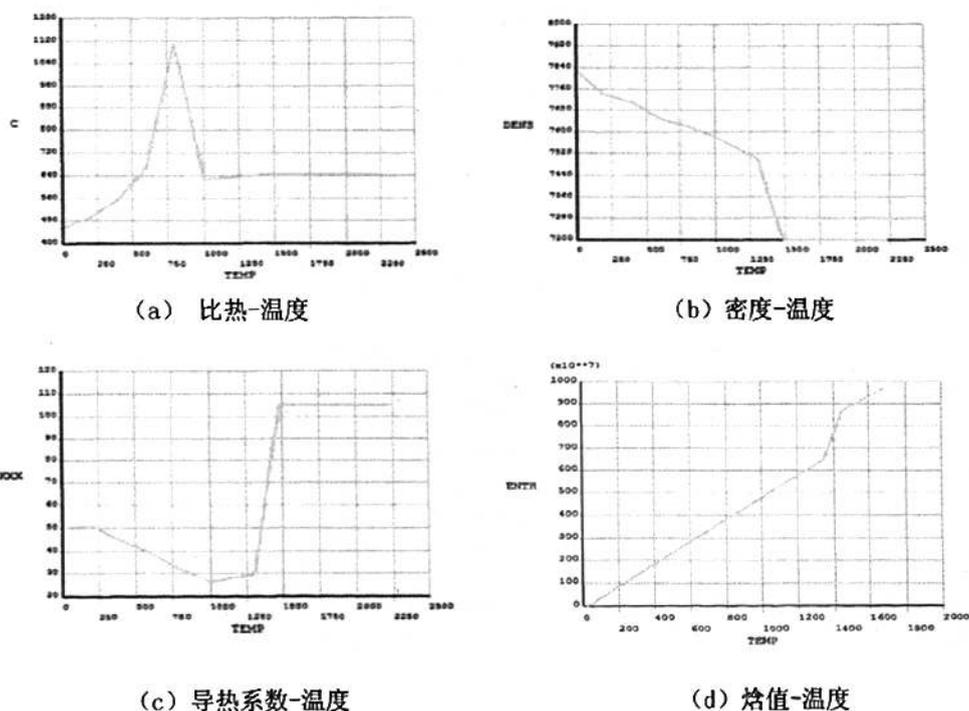


图4-2 材料性能参数随时间变化曲线

## 4.4 载荷施加

### 4.4.1 焊接热源的处理

#### 1. 电弧作用于焊件表面的热流

在焊接温度场的数值模拟研究中，选用符合实际焊接过程的热源模型十分关键，对于短路过渡的 CO<sub>2</sub> 平板堆焊实际焊接过程而言，双椭球形热源模型<sup>[42]</sup>能够更加接近，把热源前、后方的热流密度整合后的双椭球热源模型的公式可表达为：

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}Qf}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c^2}\right)} \quad (4-3)$$

其中:Q 为热源有效功率单位是 W, 一般情况下,  $Q = \eta UI$ ,  $\eta$  为电弧的热效率, 在本文中取 75%; U 为电弧电压; I 为焊接电流;  $q(x,y,z,t)$  为工件热流分布单位  $W/m^2$ ; a、b、c 为热流分布特征参数, 分别取为 4mm、5mm、6mm。

## 2. 熔滴进入熔池后所带来的热量

### 1). 熔滴热输入模型

焊接电弧在工件上的热量分布及熔滴热焓量在熔池内的分布建立的合理与否成为热过程数值模拟的重要问题, 就应用最为广泛的电弧焊而言, 传统意义上的焊接热源是电弧, 例如根据电弧热流分布特点建立的双椭球体热源模式, 而从焊接数值模拟意义上来说, 电弧、熔滴都是可以作为热源来处理<sup>[49]</sup>。

把熔滴带入熔池的热量处理为特定区域的均匀热源, 由于过渡时熔滴具有较大的动量, 进入熔池后一直到达熔池底部, 此过程时间极短, 如果熔滴从熔池表面到熔池底部时过热度不降低, 即熔滴一旦进入熔池便在特定区域内均匀分布。

孙俊生在其论文里指出, 由于熔滴的冲击作用, 在熔池内部形成一个锥体, 熔滴在过渡时带进的热量就分布在这个锥体内, 在这里把流动熔池的表面变形考虑在内, 增大了计算量; Lancaster 把熔滴传给熔池的热量看成分布在熔池中一定体积的圆柱内, 其半径与熔滴的直径一致, 该模型无需计算流场, 较简单<sup>[50,51]</sup>。结合这两者, 本文中认为, 熔滴落入熔池时, 由于熔滴的能量作用会在熔池中形成一个坑洞, 假设该坑洞对熔池的能量为体热源(图 4-1), 主要集中在焊丝正下方的区域内, 长 1mm, 宽度 3mm, 最大高度 1mm。把过热熔滴带入熔池的热量视为这个区域的均匀体热源, 和作用在工件表面的双椭球热源叠加, 形成把熔滴作为电弧之外的第二个作用热源而建立的复合型热源模型。

### 2). 熔滴热源温度场的计算模型

熔化焊丝形成熔滴, 整个过程需要热量, 单位时间内熔滴带入熔池的热量为:

$$S_w = \pi r^2 v \rho c (T_1 - T_2) \quad (4-4)$$

式中,  $S_w$  是单位时间内熔滴带入熔池热焓(W),  $r$  为焊丝半径(m),  $v$  为送丝速度(m/s),  $\rho$  为焊丝密度( $kg/m^3$ ),  $c$  为焊丝比热容  $J/(kg \cdot K)$ ;  $T_1$  为熔滴平均温度(K), 取值  $2400^\circ C$ <sup>[52]</sup>;  $T_2$  为熔池的平均温度(K), 取值  $1600^\circ C$ <sup>[52]</sup>。认为熔滴带入热量均匀分布在指定区域内, 则均匀体热源能量密度  $s$  为:  $s = S_w/(abc)$ , 计算得出熔滴热源在该区域熔滴热焓密度 38513180160, 在这个区域内,  $k$  的取值为 1, 表明热源集中程度高, 将熔滴作为电弧之外的第二个作用热源而建立

的热源模型如下：

$$S(r) = s * \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + (z - vt)^2}{(0.001)^2}\right) \quad (4-5)$$

### 3.焊接过程中的热源解析模型

经过上面的分析，焊接过程中的温度场主要由电弧传热和熔滴热焓传热的双重作用而成，所以进行温度场分析时应将双椭球热源和熔滴热焓热源的温度场进行叠加。从而整个焊接过程的热源解析模型为：

$$Q1(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Qf}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c^2}\right)} + s * \exp\left(\frac{x^2 + y^2 + (z - vt)^2}{(0.001)^2}\right) \quad (4-6)$$

#### 4.4.2 生热率和对流的加载

在ANSYS中可以单元模型上施加载荷，载荷分为五种：温度、热流率、对流、热流密度和生热率。生热率作为体载荷施加于单元上，是单位体积的热流率。本课题的生热率是在熔池区上加载热源公式，并且以体的形式加载。

焊接过程中，焊件表面与周围环境存在热量交换，包括对流和辐射。不同区域对流系数应该不同，但本课题考虑到过渡区和远离焊缝区虽然存在温差，但散热并不剧烈，为计算方便，把辐射、对流都用对流系数这一参数来表示。在模拟计算中，对流系数取为15 W/m<sup>2</sup>·°C，以对流边界条件作为面载荷施加在平板模型的过渡区和远离焊缝区外表面，计算与周围流体环境的热交换。课题研究的热分析中环境温度设置为20°C。

#### 4.4.3 求解方法

有限元模型建好后，ANSYS中载荷的施加在SOLUTION求解器中进行的。进入求解器，首先应该定义分析类型和分析选项，一般情况下会使用New Analysis，表明进入一个新的有限元分析。在本课题里，根据情况将三维温度场的分析类型选为瞬态分析。对于计算结果的存储在默认情况下是只存储最后一个子步的计算结果，为后面数据读取方便，最好将每个载荷子步的计算结果都存入结果文件中。加载热源和初始条件之后，进入求解控制器，确定总时间，并将处理结果调整为每个时间子步的结果都记录。在加载完成后，设置好必要的选项后就可以进行求解。

### 4.5 计算结果与讨论

#### 4.5.1 复合热源解析模型的合理性验证

采用CO<sub>2</sub>气保焊，焊件厚度为8mm，所用到的焊接参数为：焊接电压25V，

焊接电流 170A，焊接速度 5.5mm/s，图 4-3(a, b)分别显示了达到准稳态后双椭球热源模型和复合解析热源模型温度场计算结果，由此可以得到模拟焊缝横截面的尺寸。

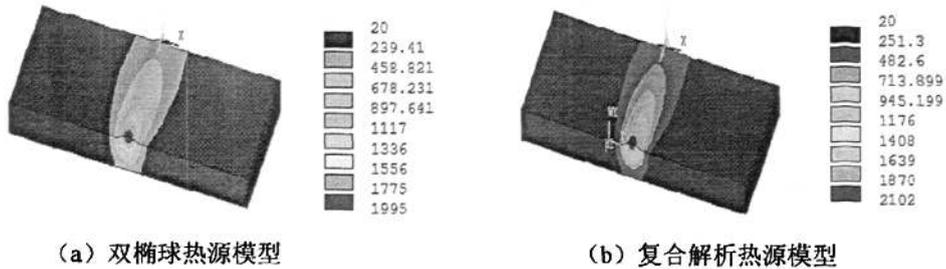


图 4-3 计算结果

如上图所示，先与单纯的双椭球模型计算结果比较，然后再通过试验进行验证，结果说明了所建立的复合解析热源模型的合理性。焊丝材料 H08Mn2Si，焊丝直径 1.2 mm，焊丝伸出长度大约为 15mm，气体流量为 15L/min，采用与模拟相同的焊接参数，焊完后，取一段沿焊缝截面切开，进行打磨、抛光和腐蚀，用数码相机拍到实际焊缝横截面的熔池形态，如图 4-4(c)。从图中可以看出采用 ANSYS 有限元软件所得的结果图形与实验结果基本吻合。

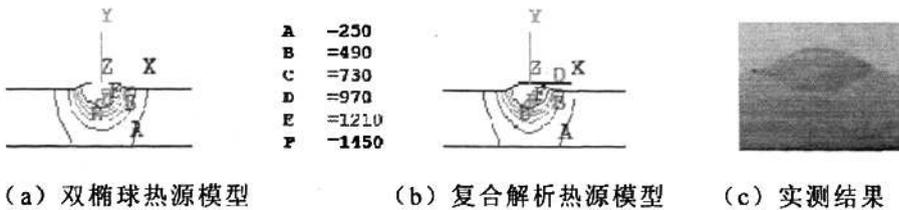


图 4-4 焊缝横截面尺寸

从表 4-2 可知，由于在模拟过程中电磁力、重力和表面张力等的作用也没有施加，没有全面考虑到动量和质量边界处理问题，从模型建立到网格划分以及处理过程中所采取的一些简化措施，导致两种模型下计算得到的熔深与熔宽均小于实验测量值，这些都是成为和实际结果存在误差的原因，另一方面，我们也可以看出，采用复合模型由于考虑了熔滴过渡带入的热量对整个熔池形态的影响，其结果与实际过程更为接近，这就说明了我们所建立的热源复合模型合理可靠。

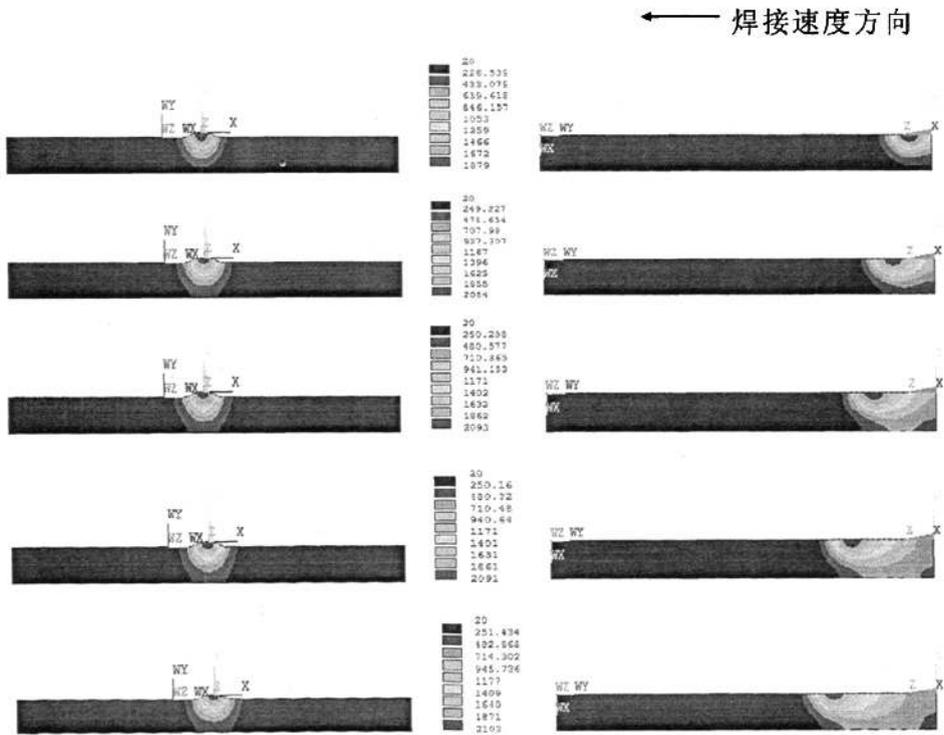
表 4-2 熔池尺寸计算与实测结果

	双椭球	复合模型	实验结果
熔深	2.4mm	2.62mm	2.78mm
熔宽	6.6mm	6.93mm	7.6mm

#### 4.5.2 温度场的动态演变过程与温度梯度

在上述的工艺条件下,采用复合热源解析模型,对焊接熔池温度场的产生、发展直到宏观准稳态的动态过程进行了数值模拟。

从图 4-5 低碳钢工件横截面与纵截面温度场的动态变化过程可知,在熔池刚开始形成时,等温线集中在电弧中心,随着时间的增加等温线开始向外扩张,并随电弧一起向前移动。由于工件向周围环境散发的热量小于电弧传给焊件的热量,这样工件内部的热量增多,温度升高。等温线沿着焊接方向逐渐变长,高温区域慢慢变深,在宽度方向上也略有增加,电弧后方等温线比前方的等温线疏散,这是由于电弧对前方工件有一个预热的的作用,增加了加热时间,温度梯度变大导致的。在 4-5s 时,温度场的形状几乎没有改变,这也就是说焊接过程从引弧到进入宏观稳态一般需要 5s 的时间,同时也符合实际的焊接中的规律。



(a) 1s 到 5s 横截面的变化过程 (b) 1s 到 5s 纵截面的变化过程

图 4-5 温度场的动态演变过程

图 4-6 显示了 8s 焊件上表面的等温线分布以及热梯度的矢量分布图。焊接过程中,焊缝区比周围区域的急剧加热速度快,出现了局部熔化,焊缝两侧分布基本对称,存在很大程度的热扩散和热散失,热梯度大,而热源前后差别较大,这样就会产生热应力和残余应力,以此为理论,在实际生产中就应该采取一定的措施进行改进,减小残余应力,也是模拟工作的对实践的指导意义所在。

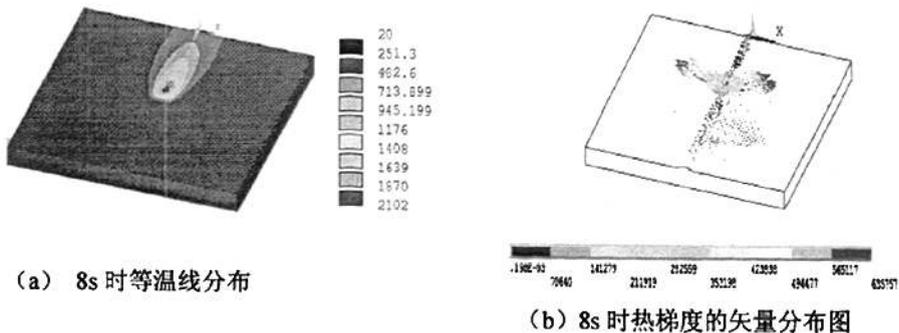
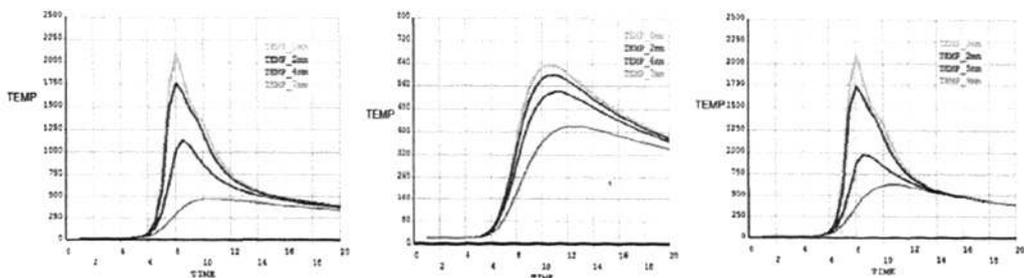


图 4-6 等温线分布以及热梯度的矢量分布图

### 4.5.3 焊接热循环

在焊接热源作用下，焊件上某点的温度随时间变化的过程称为该点的焊接热循环。温度场分布不均匀，当热源向该点靠近时，该点的温度随之升高，直达到最大值；随着热源的离开，温度又逐渐降低，整个过程可以用一条曲线来表示，如下图所示。分别取焊件上下表面距离焊缝中心 0、2、4、7mm 的点，如图 4-7(a, b)可知，不同的点所经历的热循环也不相同，距焊缝越近，加热速度越大，达到的最高温度越高，冷却速度也越大；离焊缝越远的点，加热速度变小，峰值温度也降低，各点的加热速度都比冷却速度要大的多。靠近焊缝处温度随时间的下降速度要高于远离焊缝的温度。上表面各点的温度要明显高于下表面。焊接接头热影响区的金属是在经历了一个特殊的热处理过程，其组织和性能都与母材不同，从而对焊件金属的组织 and 性能产生强烈的影响。图(c)是焊缝中心处从上表面到下表面同一直线的四个点的热循环曲线图，符合上述的规律。

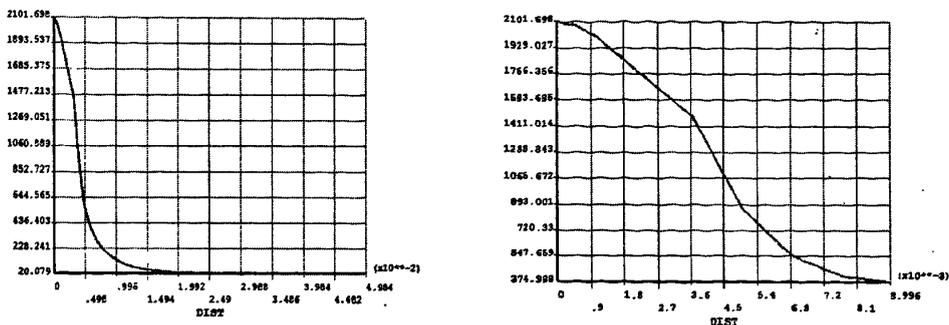


(a) 焊件上表面距离焊缝 0、2、4、7mm 的点 (b) 焊件下表面距离焊缝 0、2、4、7mm 的点 (c) 焊缝中心处从上表面到下表面同一直线的四个点

图 4-7 焊件上不同点的焊接热循环图

为进一步研究焊减小焊接裂纹和提高接头强度与性能，靠随焊件上某点随时间的变化曲线的焊接热循环图远远不够。图 4-8 是热源沿焊件移动到 8s 时焊缝中心处沿横向和深度方向的温度分布曲线，在同一时间下的不同点的温度分

布曲线和焊接热循环图两者结合我们就可以得到温度场在焊件内部的分布规律，对控制焊接接头热影响区金属的组织 and 焊缝的使用性能都有重要作用。



(a) 沿横向温度分布曲线变化图      (b) 沿深度方向上的温度分布曲线变化图  
图 4-8 不同方向上的温度分布曲线变化图

#### 4.6 本章小节

- 1).建立了基于双椭球热源和熔滴热量分布的复合热源模型，用该模型对低碳钢在焊接过程中的温度场分布进行了计算，经实验验证，数据比较吻合，说明复合热源模型的可靠性。研究表明，用复合热源模型计算熔池温度场比双椭球热源模型的结果更具准确性，可用于 CO<sub>2</sub> 气保焊焊接温度场计算。
- 2).通过模拟得到焊接温度场的动态演变过程，分析了在焊接过程到达准稳态的时间，并对热源前、后方等温线的疏密和热梯度做了解释。
- 3).通过复合热源模型得到了焊件上不同点的焊接热循环曲线、沿横向和深度方向的温度分布变化曲线，确定焊件内部的温度分布规律。

## 第五章 焊接参数对熔池形态的影响分析及实验验证

### 5.1 引言

随着现代制造业的不断发展，焊接产品的质量受到很大重视。控制焊接熔池形态是保证焊接质量的关键技术，准确获得焊接熔池几何形状与焊接工艺参数之间的关系非常重要。焊接热过程是一个在各种工艺参数共同作用下，焊接材料的物理和力学性能发生剧烈变化的过程，对于这样的复杂过程，必须采用数值模拟的方法才能有效地描述，而焊接工艺参数的选取将直接影响焊接熔池的几何尺寸。焊接接头最重要的尺寸是熔深  $H$ ，它直接影响到接头承载能力，另一个重要尺寸是焊缝宽度  $B$ 。 $B$  与  $H$  之比构成的焊缝成形系数影响到熔池中的气体逸出的难易、熔池的结晶方向以及焊缝中心偏析严重程度等。

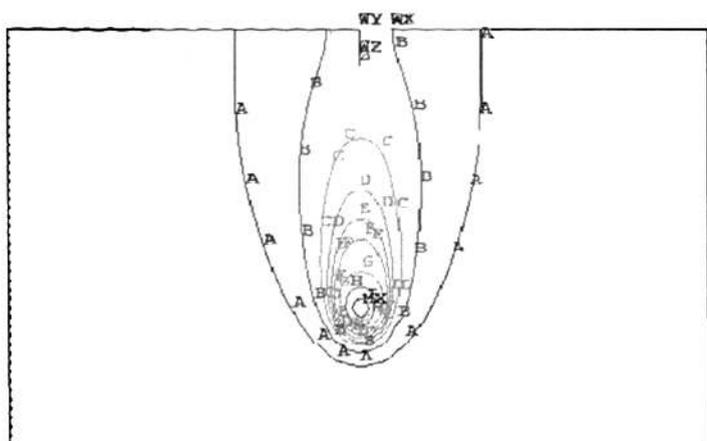
单位长度焊缝上的热量输入是影响焊接温度场分布及焊接熔池尺寸和形状的重要参数，即焊接线能量，和电弧功率成正比，焊接速度成反比。所以把焊接的规范参数焊接电流、电弧电压和焊接速度视为焊缝成形的关键因素。采用金属熔点的等温线作为熔池的边缘计算焊接温度场分布，就可得到焊接熔池的几何形状。

上一章介绍了焊接熔池的求解过程，对热源及有限元求解过程中的关键问题进行了处理，验证了我们所提出的复合热源模型的合理性。本章在其基础上，结合  $\text{CO}_2$  焊接工艺性能特点，用 ANSYS 数值模拟的方法研究熔池几何形状与焊接工艺参数之间的关系，并进行相应的焊接工艺实验，不仅可以降低焊接试验成本，也为焊接工艺的制定提供理论依据。

### 5.2 不同焊接参数对熔池形态的影响

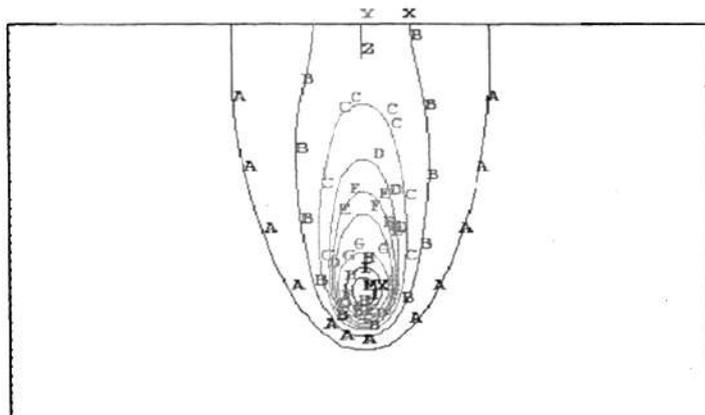
#### 5.2.1 焊接电流对熔池尺寸的影响

保持焊接电压和焊接速度不变的情况下，改变焊接电流，模拟不同的电流对熔池形态的影响。本课题中，焊接电压  $U$  取为 25V，焊接速度取为 5.5mm/s，焊接电流分别取为 170A、190A、210A，下图分别为 8.5s 时焊接热过程达到稳定后焊缝的正面及纵截面的温度分布图。



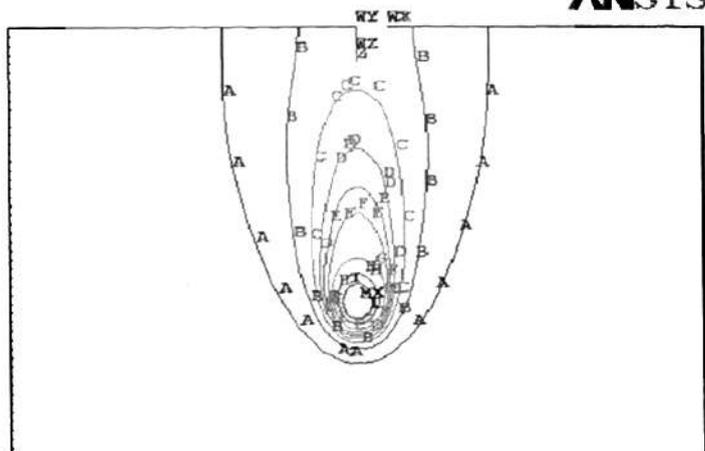
MAR 15 2010  
 16:12:06  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =16  
 TIME=8.564  
 TEMP (AVG)  
 RSYS=0  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 SMN =20  
 SMX =2106  
 A =135.895  
 B =367.684  
 C =599.474  
 D =831.263  
 E =1063  
 F =1295  
 G =1527  
 H =1758  
 I =1990

(a) I=170A



MAR 15 2010  
 10:42:14  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =16  
 TIME=8.5  
 TEMP (AVG)  
 RSYS=0  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 SMN =20  
 SMX =2258  
 A =135  
 B =366.875  
 C =598.75  
 D =830.625  
 E =1062  
 F =1294  
 G =1526  
 H =1758  
 I =1990

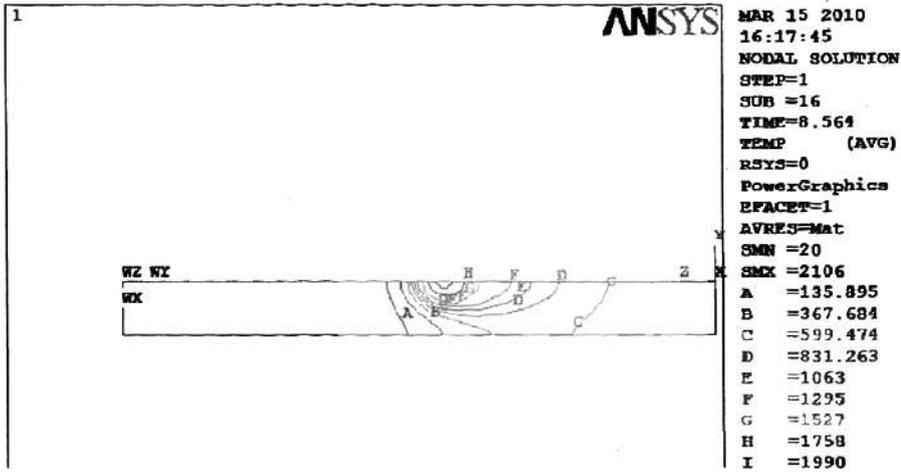
(b) I=190A



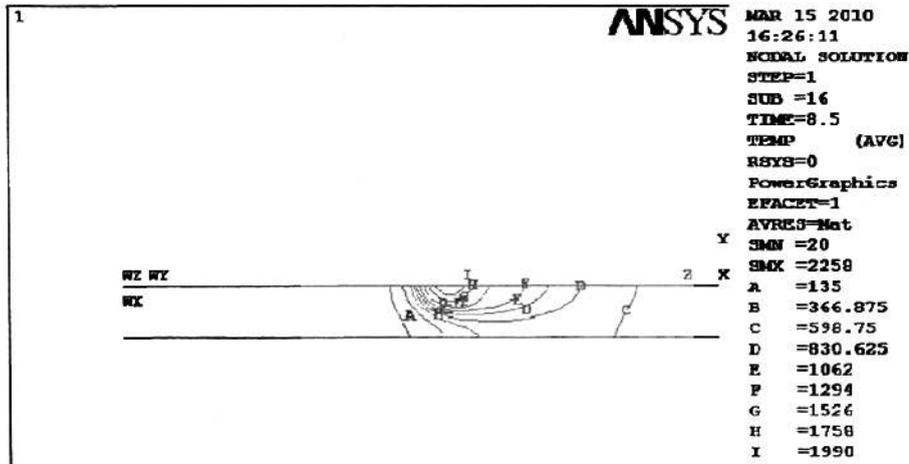
MAR 15 2010  
 16:31:40  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =16  
 TIME=8.593  
 TEMP (AVG)  
 RSYS=0  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 SMN =20  
 SMX =2399  
 A =135  
 B =366.875  
 C =598.75  
 D =830.625  
 E =1062  
 F =1294  
 G =1526  
 H =1758  
 I =1990

(c) I=210A

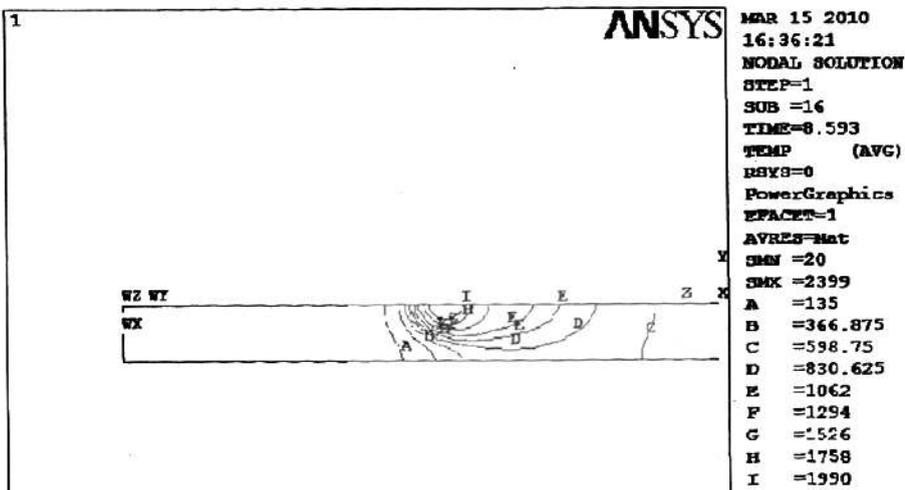
图 5-1 不同电流下焊缝正面温度分布图



(a) I=170A



(b) I=190A



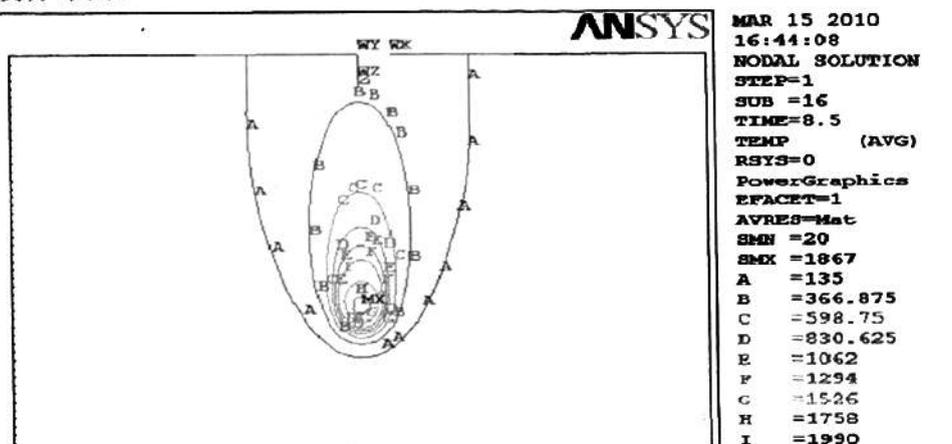
(c) I=210A

图 5-2 不同电流下焊缝纵截面温度分布图

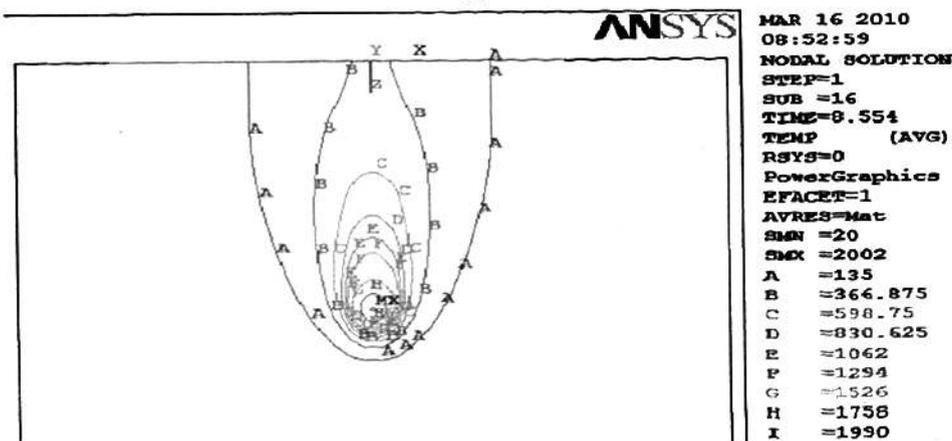
图 5-1 是不同焊接电流作用时工件正面的温度场分布，可以看出，随着焊接电流的增大，电弧后部的温度梯度变得越来越小，高温区域的宽度和长度都有增大。原因是随焊接电流的增加，焊接线能量增加，受热源加热的工件上各点的热输入也不断增加，所以整个焊件上的温度都升高，温度场的分布必然有所增加。从图 5-2 不同焊接电流下工件纵截面温度分布可以看出，随着焊接电流的增加，等温线逐渐变大，焊接熔池的截面也发生变化。熔深  $H$  随着电流的增大而增大，熔宽  $B$  也随着电流的增大而增大。

### 5.2.2 焊接电压对熔池尺寸的影响

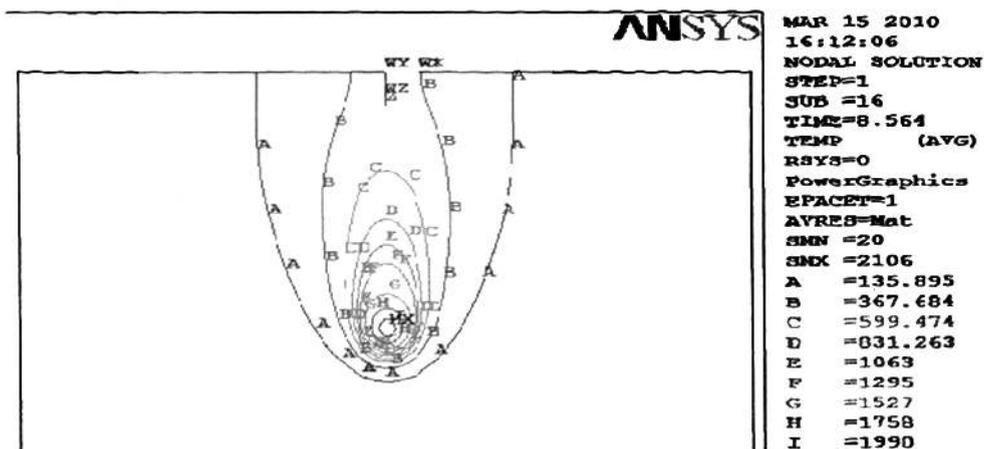
保持焊接电流和焊接速度不变的情况下，改变焊接电压，模拟不同的电压对熔池形态的影响。本课题中，焊接电流  $I$  取为 170A，焊接速度取为 5.5mm/s，焊接电压分别取为 20V、23V、25V，模拟中加载的热源为上一章所得到的复合热源模型，下图分别为 8.5s 时焊接热过程达到稳定后焊缝的正面及纵截面的温度分布图。



(a)  $U=20V$

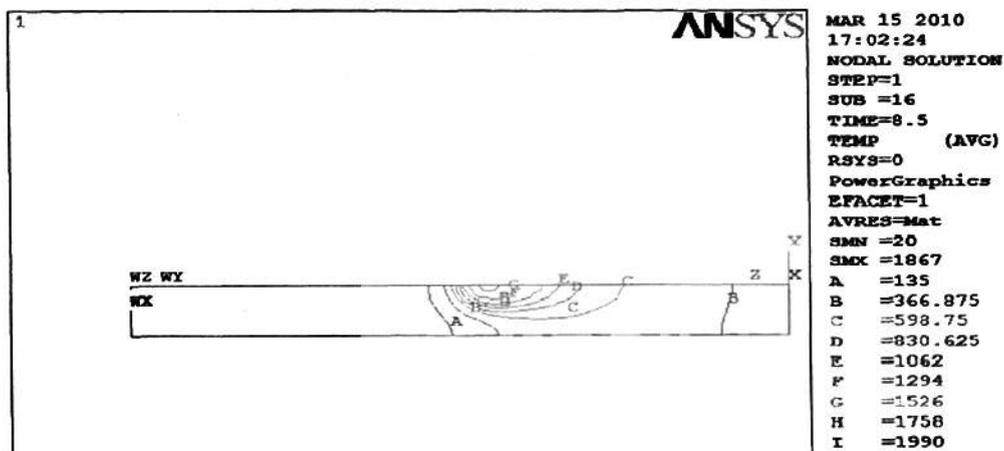


(b)  $U=23V$

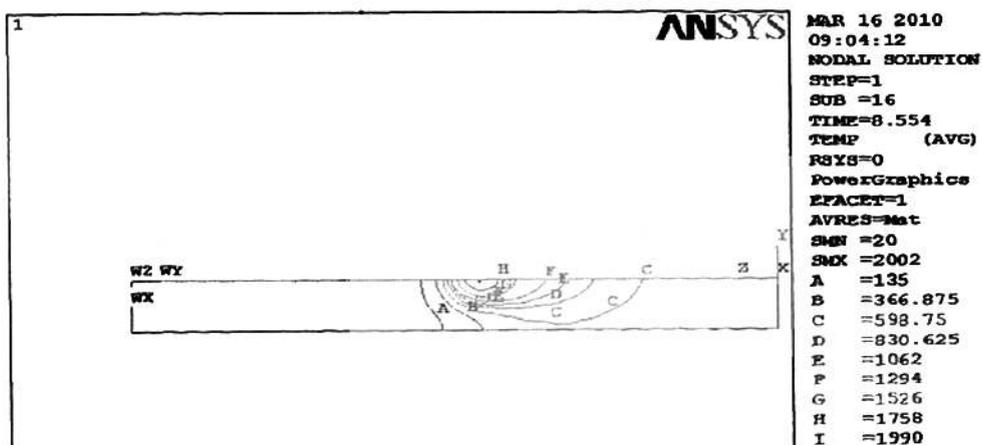


(c) U=25V

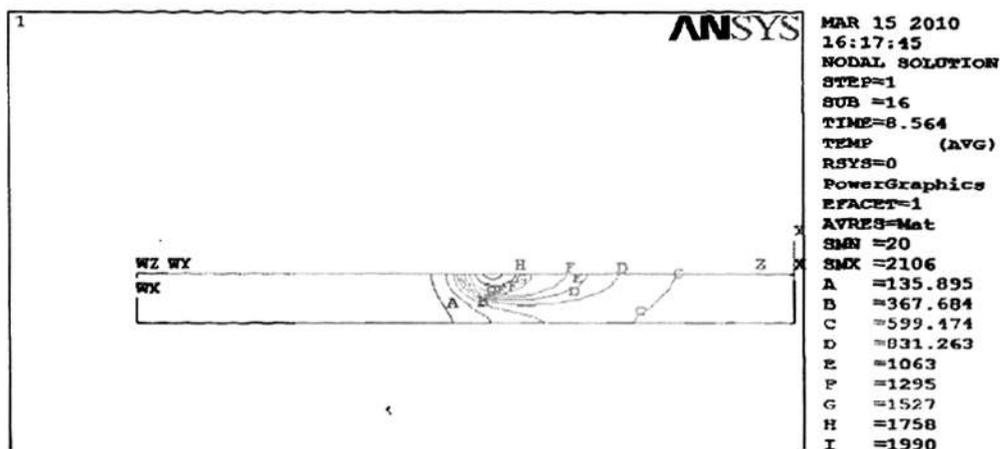
图 5-3 不同电压下焊缝正面温度分布图



(a)U=20V



(b)U=23V



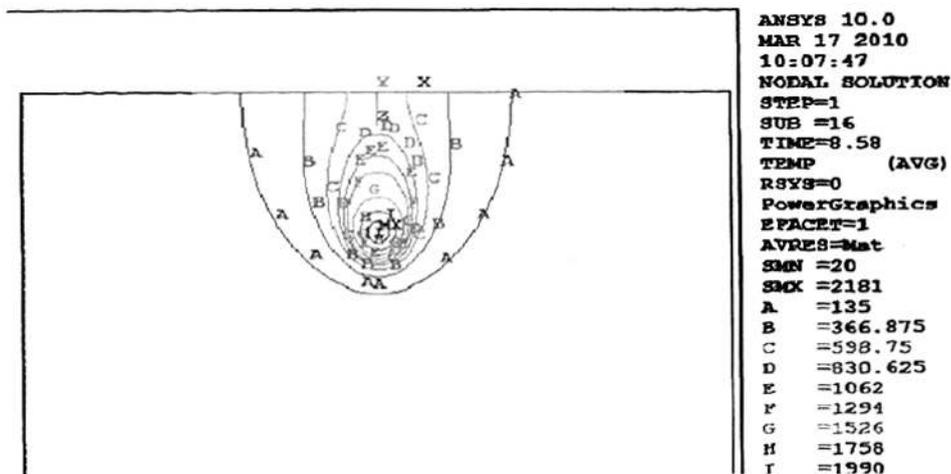
(c)  $U=25V$

图 5-4 不同电压下焊缝纵截面温度分布图

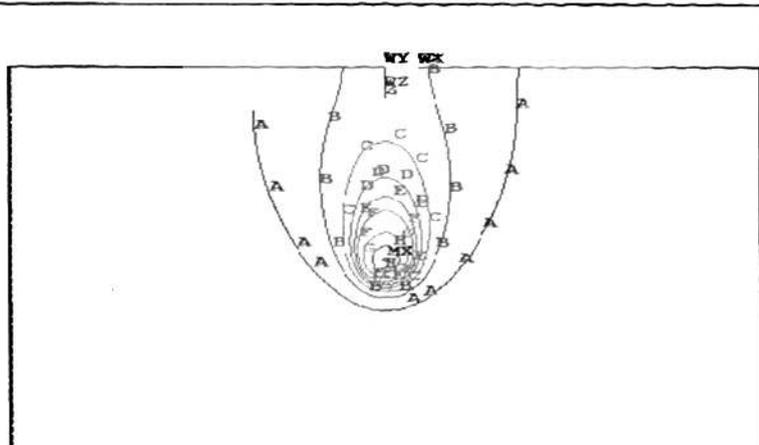
从以上焊件的正面和纵截面的温度分布图可知，为了保证模拟结果的可比较性，不同焊接电压时，焊接热过程达到稳态后，电流和焊速保持不变，随着焊接电压的逐渐增大，焊接熔池的截面发生变化，等温线逐渐变大，截面上的最高温度随焊接电压的增大而升高。这和焊接热输入随电压增加有很大关系，熔池的熔宽  $B$  也随着电压的增大而增大。

### 5.2.3 焊接速度对熔池尺寸的影响

在保持焊接电压和焊接电流不变，改变焊接速度，模拟不同的焊接速度对熔池形态的影响。本课题中，焊接电压  $U$  取为  $21V$ ，焊接电流取为  $170A$ ，焊接速度分别取为  $3mm/s$ 、 $4.5mm/s$ 、 $5.5mm/s$ ，模拟中加载的热源为复合热源模型，下图分别为  $8.5s$  时焊接热过程达到稳定后焊缝的正面及纵截面的温度分布图。

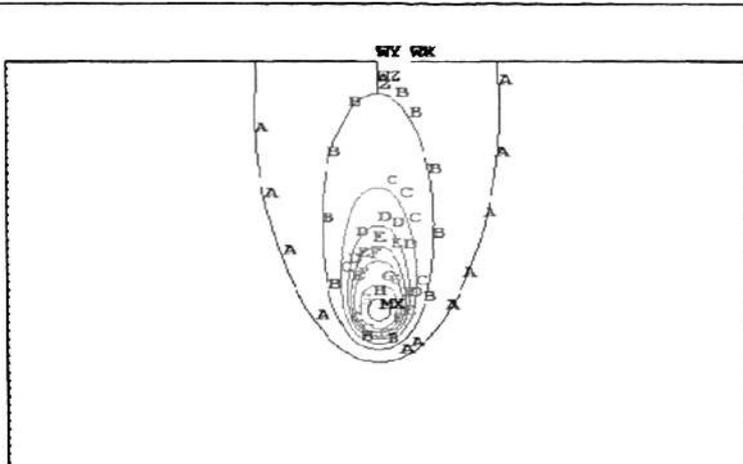


(a)  $V=3mm/s$



ANSYS 10.0  
 MAR 17 2010  
 10:15:22  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =16  
 TIME=8.5  
 TEMP (AVG)  
 RSYS=0  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 SMN =20  
 SMX =1999  
 A =135  
 B =366.875  
 C =598.75  
 D =830.625  
 E =1062  
 F =1294  
 G =1526  
 H =1758  
 I =1990

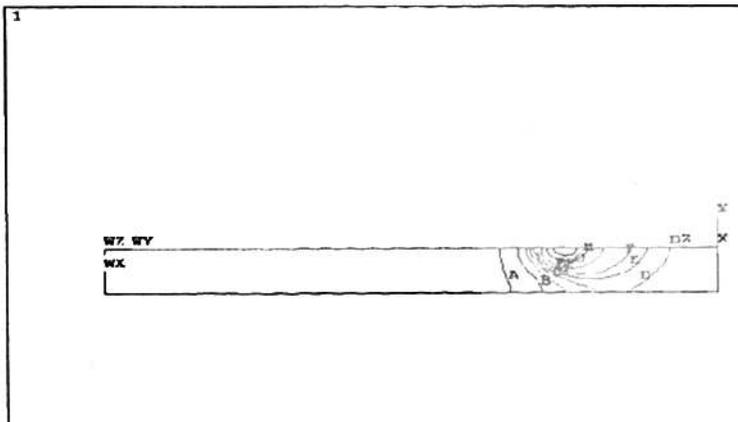
(b)  $V=4.5\text{mm/s}$



ANSYS 10.0  
 MAR 17 2010  
 10:34:05  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =16  
 TIME=8.5  
 TEMP (AVG)  
 RSYS=0  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 SMN =20  
 SMX =1911  
 A =135  
 B =366.875  
 C =598.75  
 D =830.625  
 E =1062  
 F =1294  
 G =1526  
 H =1758  
 I =1990

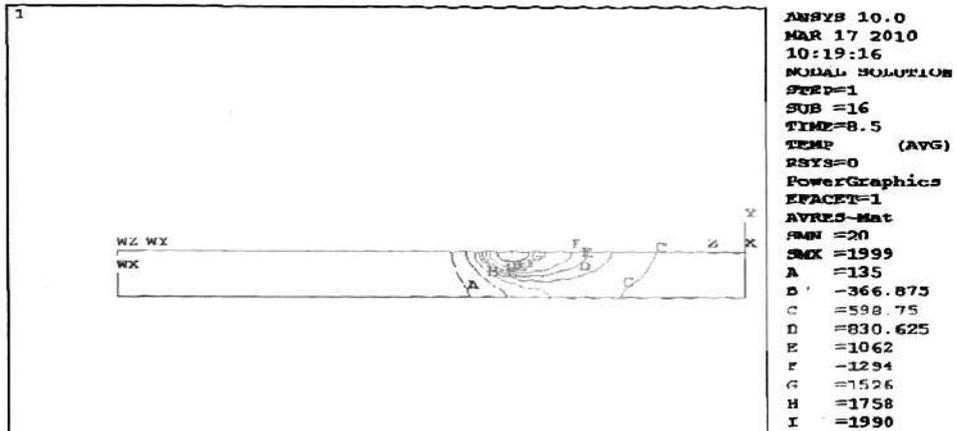
(c)  $V=5.5\text{ mm/s}$

图 5-5 不同速度下焊缝正面温度分布图

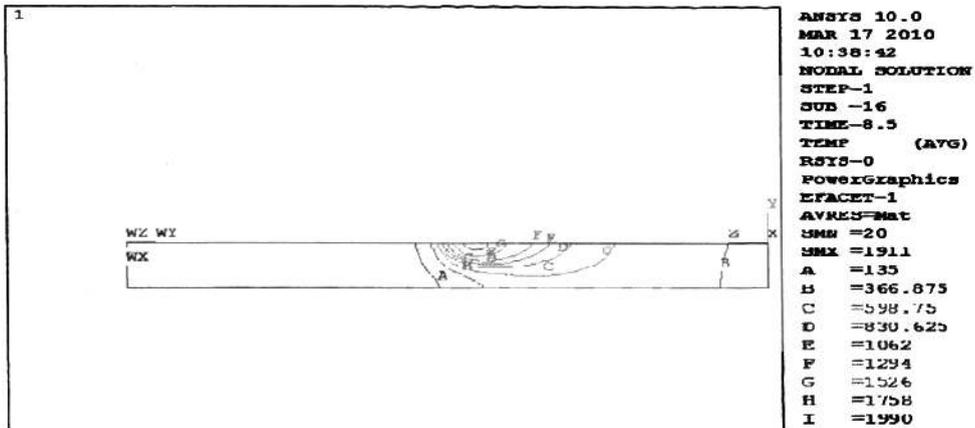


ANSYS 10.0  
 MAR 17 2010  
 10:10:15  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =16  
 TIME=8.58  
 TEMP (AVG)  
 RSYS=0  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 SMN =20  
 SMX =2181  
 A =135  
 B =366.875  
 C =598.75  
 D =830.625  
 E =1062  
 F =1294  
 G =1526  
 H =1758  
 I =1990

(a)  $V=3\text{mm/s}$



(b)  $V=4.5\text{mm/s}$



(c)  $V=5.5\text{mm/s}$

图 5-6 不同速度下焊缝纵截面温度分布图

焊接速度增加，在相同的时间内，相同大小的热输入作用在工件上的面积增加，即被电弧所加热的焊件面积增加，导致电弧中心线上各点的平均热输入量减少。随着焊接速度的增加，在电弧运动方向，工件上被加热的点增多，从而等温线变得细长。随着焊接速度的逐渐增大，焊接熔池的截面也发生变化。熔池的熔深  $H$  随着焊速的增大而减小，熔池的熔宽  $B$  也随着焊速的增大而减小。这主要是由于在单位时间的热输入不变的情况下，焊接速度的增加使得电弧与焊件每一部分的作用时间变短，工件上每点的焊接热输入量减少，所以熔宽和熔深变小。

### 5.3 实验验证和对比分析

文中所建立的适合  $\text{CO}_2$  焊接的熔池数值模拟过程是否和实际的焊接情况相符合，用 ANSYS 软件所计算的温度场结果是否准确可靠，都需要采用实际的焊接工艺实验进行验证，这样可以优化模拟过程，为焊接工艺的制定提供依据。

### 5.3.1 实验测试方法

本节通过比较计算值测量焊缝的几何尺寸来验证模拟结果。焊接完成之后，取一段沿焊缝截面切开，进行打磨、抛光，最后腐蚀，制成宏观金相试样，利用游标卡尺来测定其几何参数，对于模拟值取 1450℃ 等温线作为熔池边界进行计算，将实验数据和模拟结果导入至 Origin 软件中进行数据处理，可以得到具有一定变化规律的曲线，并且用数码相机拍到实际焊缝横截面的熔池形态图。

实验条件如下

工件材料：Q235 低碳钢，厚度为 8mm

焊丝材料：H08Mn2Si，直径 1.2 mm，焊丝伸出长度大约为 15mm

气体流量：15L/min

焊枪距工件表面距离：18mm

采用与模拟相同的焊接参数

焊接电流：170 A、190 A、210A

焊接电压：20 V、23 V、25V

焊接速度：3mm/s、4.5mm/s、5.5mm/s

### 5.3.2 实验测试结果和模拟结果对比分析

焊接电流增大时，保持焊接电压  $U$  取为 25V，焊接速度取为 5.5mm/s 不变，焊接电流分别取为 170A、190A、210A，将实验数据和模拟结果导入至 Origin 软件中进行数据处理，可以得到图 5-7 曲线。

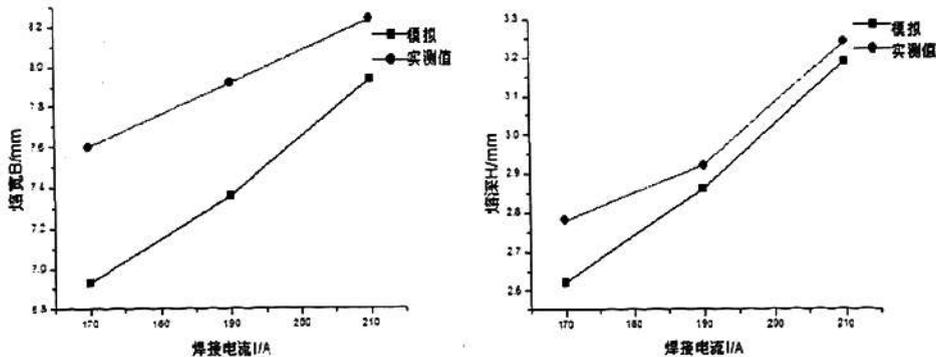


图 5-7 焊接电流  $I$  对熔池几何尺寸的影响（左为熔宽，右为熔深）



图 5-8 焊接电流变化对焊缝截面尺寸的影响（从左至右依次  $I$  为 170、190、210A）

随着焊接电流的逐渐增大，焊接熔池的截面发生变化。熔深  $H$  随着电流的

增大而增大，熔宽也随着电流的增大而增大。电流增加，焊接热输入增加，电弧加热工件上各点的线能量增加，工件温度整体升高，温度分布区域变大。对实测值而言，焊接电流增大，工件上电弧力的热输出大，热源的位置有下移趋势，电弧潜入工件的深度增大，导致熔深增大；弧柱直径增大，电弧斑点移动范围受限制，因此熔宽增加的比较少。熔深与熔宽比实验测量值小，这主要是因为模拟计算过程对质量和动量边界处理考虑不全面，电磁力、重力和表面张力等的作用在建模时也没有考虑，模型建立、网格划分以及处理过程中所采取的一些简化措施等都是导致与实际结果产生误差的原因。

在保持焊接电流和焊接速度不变的情况下，改变焊接电压，模拟不同的电压对熔池形态的影响。本课题中，焊接电流  $I$  取为 170A，焊接速度取为 5.5mm/s，焊接电压分别取为 20V、23V、25V，模拟中加载的热源为上一章所得到的复合热源模型。

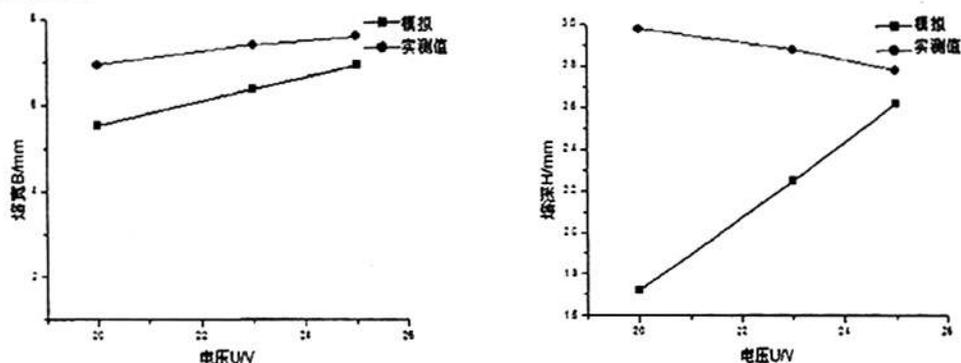


图 5-9 焊接电压  $U$  对熔池几何尺寸的影响 (左为熔宽, 右为熔深)



图 5-10 焊接电压变化对焊缝截面尺寸的影响 (从左至右依次  $U$  为 20、23、25V)

电流和速度不变时，熔深和熔宽都随着焊接电压的增大而增大。而在实际焊接条件下测得的焊缝截面尺寸中，熔池的熔宽是增大的，而熔深却是略有减小。这主要是因为，我们在模拟的过程中，没有考虑到焊接电弧的有效半径扩大问题。实际情况是，随着焊接电压的增大，焊接电弧的有效半径增大，焊接电弧覆盖的区域增大，热量的单位面积输入量变小，虽然焊接热总的输入量随着焊接电压的增大有所增大，电弧向周围空间的辐射与对流损失会随着电压的提高而增多，在熔宽显著增大的情况下，熔深还是略微减小的。

在保持焊接电压和焊接电流不变的情况下，改变焊接速度，模拟不同的焊接速度对熔池形态的影响。本课题中，焊接电压  $U$  取为 21V，焊接电流取为 170A，焊接速度分别取为 3mm/s、4.5mm/s、5.5mm/s，模拟中加载的热源为上

一部分所得到的复合热源模型。

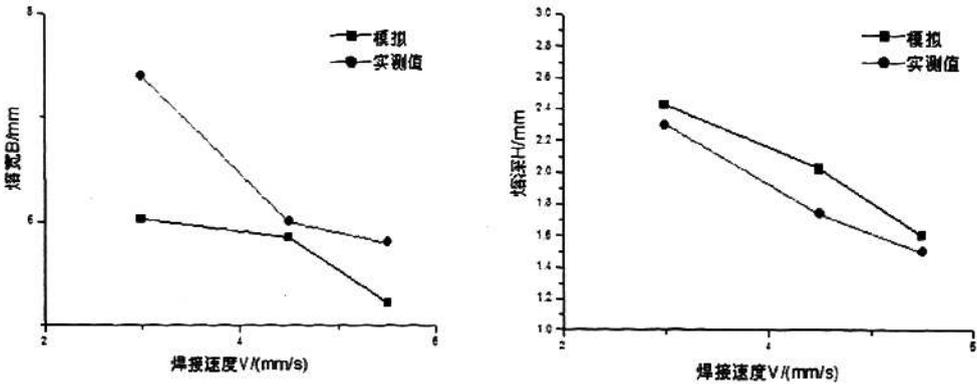


图 5-11 焊接速度  $v$  对熔池几何尺寸的影响 (左为熔宽, 右为熔深)



图 5-12 焊接速度变化对焊缝截面尺寸的影响 (从左至右依次  $v$  为 3、4.5、5.5mm/s)

从结果可知, 随着焊接速度的逐渐增大, 焊接熔池的截面发生变化。熔池的熔深  $H$  随着焊速的增大而减小, 熔池的熔宽也随着焊速的增大而减小, 这是因为在单位时间内, 热输入并不改变, 焊接速度增加时, 焊接热源与焊件每一部分之间作用时间变短, 就相当于工件上每点的焊接热输入量减少, 所以熔池的熔宽和熔深变小。由图 5-12 可知, 熔宽的计算值有小于工艺测量值的趋势, 主要是由于模型的动量和质量边界问题考虑的不是很充足, 重力的作用也没有施加所致。熔深的模拟值大于测量值的趋势主要由于本文所建立的模型其热源分布比较集中, 还有参数在高温下的数据还有待进一步获得, 模型中的网格也是提前划分好。

#### 5.4 本章小节

1. 上一章利用 ANSYS 有限元软件求解焊接熔池形态成型过程的基础上, 对不同焊接规范参数的温度场进行了计算, 取得不同参数条件下的熔深熔宽值。
2. 利用焊接实验对数值计算的结果进行验证, 建立了不同的工艺参数与熔宽和熔深之间的关系。结果说明 ANSYS 所建立的模型得到的计算结果基本可行。
3. 对模拟结果和实际测量值之间存在的误差进行了分析。

## 第六章 结论及创新点

论文基于 CO<sub>2</sub> 气保焊短路过渡的特点建立了适合研究 CO<sub>2</sub> 气保焊的熔滴和熔池行为的数学模型，通过相关模拟分析得出以下结论：

1. 给出了在分析熔滴过渡时常用的一般理论，选用其中的“质量—弹簧”理论分析了熔滴过渡中的受力情况。研究了熔池成形过程中的相关问题及在研究焊接熔池模拟时数学模型的建立过程，为后面的 ANSYS 有限元计算提供了理论和计算基础。

2. 深入地探讨了 CO<sub>2</sub> 气保焊短路过渡熔滴行为的受力分析及短路过渡的物理过程，然后利用 MATLAB 选用常微分方程四阶 R-K 的求解方法，建立了 CO<sub>2</sub> 气保焊短路过渡焊接熔滴行为的模型，最后进行仿真，这就对焊接参数对熔滴行为的影响有了一定的了解。结果表明：随着电流的增大，电磁力、熔滴的重力、等离子流拉力是逐渐增大的。当熔滴持续增加时，电磁力是呈曲线增长，而重力和等离子流拉力呈近似线性增加。随着电流的增加熔滴的位移是逐渐变小的，熔滴的平均质量下降，熔滴的过渡频率增大。

3. 通过 ANSYS 软件，建立了基于双椭球热源和熔滴热量分布的 CO<sub>2</sub> 气保焊的复合热源模型，利用该模型对低碳钢在焊接过程中的温度场分布进行了计算，并同实验测试结果进行比较，验证了复合热源模型的合理性；得到焊接温度场的动态演变过程，在分析焊接过程到达准稳态的时间的基础上，对热源前、后方等温线的疏密程度不同和热梯度的差异做了解释；分析了焊件上不同点的焊接热循环以及在焊缝沿横向和深度方向的温度分布变化曲线，得到了焊件表面及内部的温度分布规律。

4. 改变不同的焊接参数，利用 ANSYS 有限元软件计算出不同条件下的模拟结果，通过分析，建立了不同的工艺参数与熔宽和熔深之间的关系，以确定熔池的形态。对模拟的结果进行实验的验证比较与分析，结果表明，计算值与测量值符合得较好，说明所建立的模型是合理的，所采用的软件是可靠的，并分析了计算值与实测值存在误差的原因，以期获得焊接熔池几何形状与工艺参数之间的关系，为焊接工艺的制定提供理论依据。

CO<sub>2</sub> 气保焊焊接头质量是由熔池行为所决定的，而短路过渡过程中的熔滴行为对熔池行为会产生重要影响，所以研究 CO<sub>2</sub> 气保焊短路过渡时焊接参数对熔滴与熔池行为的影响对控制焊接接头的质量有重要意义。因此，如何控制 CO<sub>2</sub> 气保焊的焊接接头质量是一个重要的研究课题，也是进一步研究的具有挑战性的问题。

本文的创新点:

1.在  $\text{CO}_2$  气保焊短路过渡熔滴行为的“质量-弹簧”模型基础上,采用常微分方程四阶 R-K 的求解方法在 MATLAB 的数值运算平台进行了计算仿真,得到焊接参数对熔滴行为受力的影响。

2.建立了基于双椭球热源和熔滴热量分布的  $\text{CO}_2$  气保焊的复合热源模型,该模型在考虑熔滴影响的情况下对焊接过程中的温度场的形态分布进行了计算,得到了焊接温度场的动态演变过程和焊件内部的温度分布规律。

3.建立了在焊接工艺参数变化时热过程达到稳定后的温度变化规律,得到了工艺参数与熔宽和熔深之间的关系,以确定熔池的几何形态,进而得到焊接参数对熔池行为的影响。

## 参考文献

- [1] Jonsson P G, Szekely J, Choo R T C, et al. Mathematical models of transport phenomena associated with arc welding processes: a survey [J]. Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, 1994, 2 (5) : 995 - 1016.
- [2] 王方, 候文考, 胡仕新. 熔化极气体保护焊仿真系统 [J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 35-39.
- [3] Haidar J, Lowke J. Predictions of Metal Droplet Formation in Arc Welding [J]. J. of Phys. D: Applied Phys, 1996, 29: 2951-2960.
- [4] Haidar J, Lowke J. Effect of CO<sub>2</sub> Shielding Gas on Metal Droplet Formation in Arc Welding [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(5): 931-936
- [5] Maruo H. Bridging Transfer Phenomena of Conductive Pendent Drop [R]. IIW Doc. XII-1347-94. Beijing: 29-39
- [6] Jones L A, Eager T W, Lang J H. Magnetic Forces Acting on Molten Drops in Gas Metal Arc Welding [J]. J. of Phys. D: Applied Phys, 1998, 31: 93-106
- [7] Jones L A, Eager T W, Lang J H. A Dynamic Model of Drops Detaching from a Gas Metal Arc Welding [J]. J. of Phys. D: Applied Phys, 1998, 31: 107-123
- [8] 朱志明, 吴文楷, 陈强. 短路过渡 CO<sub>2</sub> 焊接熔滴尺寸控制 [J]. 焊接学报, 2007, 28(04): 01-04
- [9] 朱志明, 吴文楷, 陈强. 短路过渡 CO<sub>2</sub> 焊接短路历程分析与控制 [J]. 中国机械工程, 2005, 16(21): 1970-1973
- [10] 栗卓新, 皇甫平, 陈邦固, 金立鸿. 自保护药芯焊丝熔滴过渡的控制 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(7): 108-112
- [11] 陈茂爱, 武传松, 廉荣. GMAW 焊接熔滴过渡动态过程的数值分析 [J]. 金属学报, 2004, 40(11): 1277-1232
- [12] 武传松, 陈茂爱, 李士凯. GMAW 焊接熔滴长大和脱离动态过程的数学分析 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 76-81
- [13] 何建萍, 华学明, 吴毅雄, 焦馥杰. GMAW 短路过渡动态模型的建立 [J]. 焊接学报, 2006, 27(9): 77-80
- [14] 张文钺. 金属熔焊原理及工艺(上册) [M]. 北京: 机械工业出版社 [M], 1980: 5-55
- [15] [德] D. 拉达伊. 焊接热效应 [M]. 机械工业出版社. 1997: 21~121
- [16] 谭险峰, 张华. 焊接工艺参数对温度场影响的试验与数值模拟研究 [J]. 中国机械工程, 2005 34(1): 641~644
- [17] 武传松. 焊接熔池流体流动及传热过程的计算机数值模拟 [D]. 哈尔滨工业大学博士论文, 1987

- [18] 武传松, 吴林, 陈定华. MIG 定点焊射流过渡时的熔池传热模型[J]. 焊接学报, 1991, 12(3): 189-194
- [19] Tsao, K.c and Wu, CS. Fluid flow and heat transfer in GMA weld pools[J]. Welding Journal, 1988, 67 (3): 70 -75
- [20] 曹振宁, 武传松, 吴林. 熔滴冲击下 MIG 焊接熔池的计算机模拟[J]. 金属学报, 1994, 30(10):532-542
- [21] 李世凯. 脉冲 GMAW 焊接熔滴过渡主动控制模式的数值分析[D]. 山东大学硕士学位论文, 2004.
- [22] 何建萍. 短路过渡 GMAW 动态过程建模及系统动态过程的研究[D]. 上海交通大学工学博士学位论文, 2005
- [23] Amson J. C., An analysis of the gas shielded consumable metal arc welding system[J]. Welding Journal, 1962, 41(4)-, 232-249.
- [24] Lancaster J. F. The physics of welding, 2nd ed[M]. New York: Pergamon, 1986.
- [25] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 机械工业出版社. 2008. 1(1)
- [26] Waszink J. H., Grnat L. H. J. Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal [J]. Welding Journal, 1983, 62 (4): 108-116.
- [27] Lancaster L F. The Physics of Welding [M]. Oxford: Pergamon Press, 1984
- [28] Allum C. J. Metal transfer in arc welding as a varicose instability: part 1-Varicose instability in a current carrying liquid cylinder with surface charge [J]. JP h y D :Appl.Ph ys, 1985, 18(3):1431-1446
- [29] Rhee S., Kannatary A. E. J. Analysis of arc pressure effect on metal transfer in gas metal arc welding[J]. JPhyD :Appl.Ph ys, 1991, 24 (8):5068-5075
- [30] Joo T.M., Yoo C.D., Lee T.S. Effects of welding conditions on molten drop geometry in arc welding[J]. Welding Journal, 1996, 75 (4):62-67.
- [31] Choi S .K, Kang H .L, Chong D.Y, etal. Analysis of Metal Transfer Through Equilibrium Shape of Pendent Drop in GMAW[J]. Quarterly Journal of Japan Welding Society, 1996, 14(2), 243-247.
- [32] 杨世彦. MIG/MAG 焊附加机械力射滴过渡控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998
- [33] Simpson S.W., Pei Y Z. Formation of molten droplets at a consumable anode in an electric welding arc[J]. J PhyD: Appl.Phys, 1995, 28 :1594-1600.
- [34] Haidar J., Lowke J. Prediction of metal droplet formation in arc welding[J]. J.P hys.D:Appl. Phys, 1996, 29 (6):2951-2960
- [35] Fan H.G., Kovacevic R. A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool[J]. J.Phys.D: Appl.Phys. 2004, 37:2531-2544.

- [36] Robert Shaw. The dripping faucet as a model chaotic system[J].The Science Frontier Express, Aerial Press, Inc.,1984
- [37] Watkins A. D., Smart H. D., Johnson J. A.A dynamic of droplet growth and Detachment in GMAW, 3rd international conference on trends in welding research,Gatlinburg[J].Tennessee:1992, June 1 -5
- [38] 李世凯.脉冲 GMAW 焊接熔滴过渡主动控制模式的数值分析[D].山东大学硕士学位论文, 2004.
- [39] Kiyono K, Fuchikami N. Dripping faucet dynamics by an improved mass-spring model [J].J.Phys.Soc.Jpn.,1999,68(10):3259-3270
- [40] Lancaster J F. The physics of welding [M]. Oxford: Pergamon Press,1984.
- [41] Eager T .W .and Tsai N .S, Temperature fields produced by traveling distributed heat sources [J]. Welding Journal, 1983, 62 (12) : 346~355.
- [42] Statnikov E S,Muktepavel V O,Troufiakov V J, et al. Comparison of ultrasonic impact treatment and other fatigue life improvement methods[J].Welding in the World ,2002 ,46(3/ 4) :20~32.
- [43] 管建军.高斯热源模型中单元尺寸与精度关系[J].辽宁石油化工大学学报.2009,3
- [44] 陈玉喜, 朱锦洪, 石红信, 丁高剑.基于 ANSYS 的铝合金薄板焊接温度场三维有限元模拟[J].金属铸锻焊技术.2009.5
- [45] 罗怡, 刘金合, 叶宏等. AZ61 镁合金真空电子束焊接温度场数值模拟[J].焊接学报.2009.3
- [46] Frewin M R,Scott D A. Finite element model of pulsed laser welding[J]. Welding Research Supplement,1999,78(1) :15-22.
- [47] 胡红军, 杨明波, 张丁非.ANSYS 10.0 材料工程有限元分析实例教程[M].北京: 电子工业出版社, 2008.4
- [48]汪建华.焊接数值模拟技术及其应用.上海:上海交通大学出版社[M].2003
- [49] Carmingnani C, Mares R, Toselli G. Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a single pass butt welded thick steel plate [ J ]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999,179(3):197-214.
- [50]孙俊生, 武传松, 高进强.熔滴热焓量分布模式对熔池流场的影响[J].金属学报, 1999,35(9):964-970.
- [51] Kumar Subodh, Bhaduri S C. Three-Dimensional finite element modeling of gas metal-arc welding[J]. Metallurgical and materials transactions, 1994, 25B:435-441.
- [52] 刘习文, 王国荣, 肖心远.基于 ANSYS 的熔化极弧焊温度场三维数值模拟[J].热加工工艺, 2008,37(5):85-89.

## 攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 仝维维, 胡小建, 刘松. CO<sub>2</sub> 气体保护焊熔滴过渡控制的数值模拟[J]. 现代焊接 2010, (3): 16 -20
- [2] 仝维维, 刘松, 石文超, 胡小建. 基于复合热源模型的 CO<sub>2</sub> 气体保护焊接的温度场模拟[J]. 热加工工艺, 已录用