





Y1914338

## 原创性声明

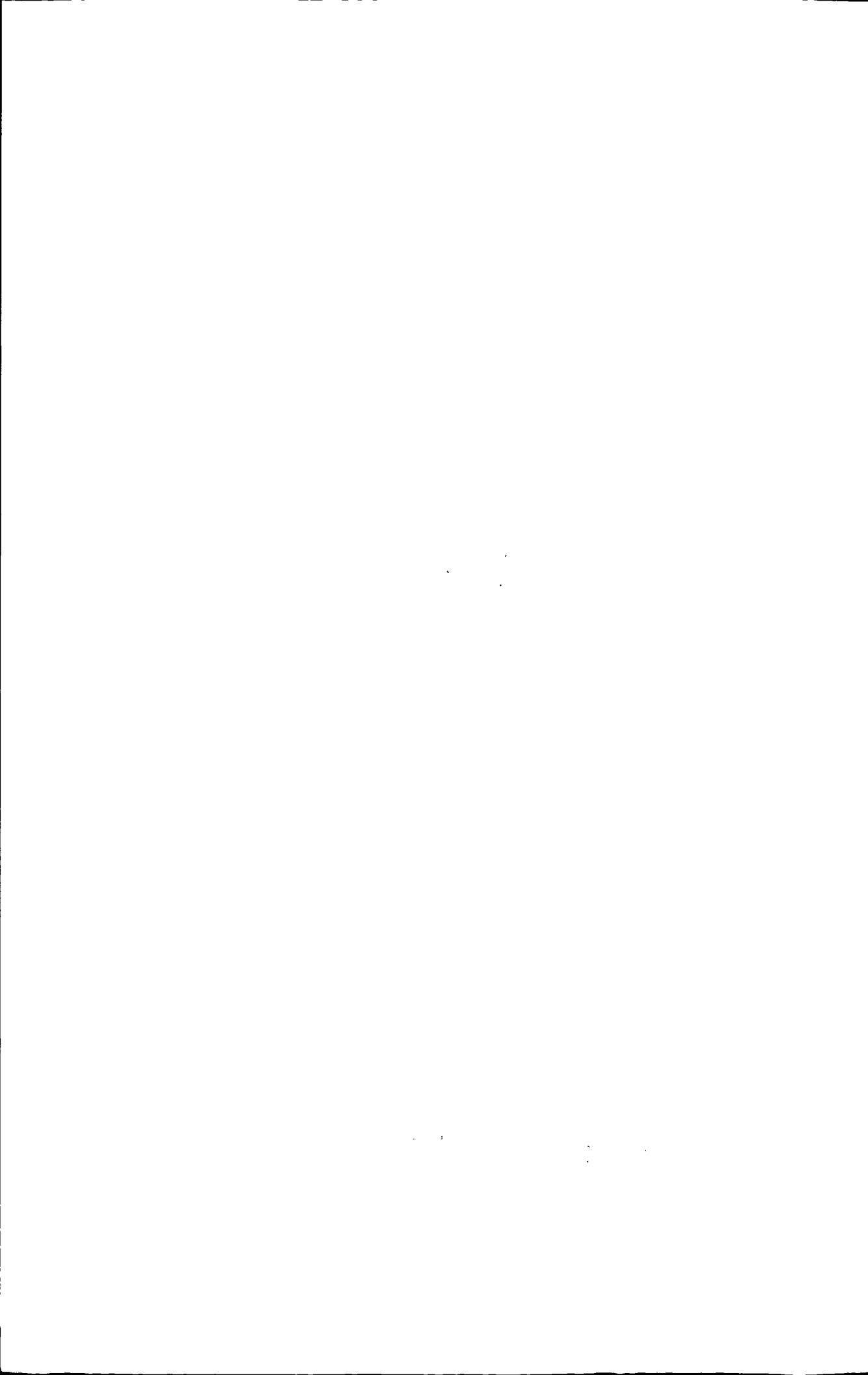
本人声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名: 邹艳明 日期: 2011 年 5 月 5 日

## 学位论文版权使用授权书

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文并根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名: 邹艳明 导师签名: 林润 日期: 2011 年 5 月 5 日



## 摘要

随着科技的发展,层状复合材料在国防军工装备领域的应用越来越广泛,使得对层状复合材料的研究也日益深入。目前国内还尚没有铜铁层状复合材料的报道。本文选用无氧铜与纯铁制备叠层复合材料,首次采用实验和数值模拟相结合的手段对 Cu/DT9/Cu 热轧复合进行了研究,在层状复合材料的研究和应用领域有一定创新意义。

首先对无氧铜 TU1 和纯铁 DT9 的高温力学性能进行检测,制定了铜铁复合的热轧工艺;并且分析了热轧退火后复合材料的性能以及厚度变化,分析了铜铁复合材料的复合机理;首次基于高性能计算平台,利用有限元软件 ABAQUS 对 Cu/DT9/Cu 的热轧复合过程进行了数值模拟,为复合材料的热轧工艺的优化提供了理论和实践依据。本研究取得主要结论有:

1. 制定了 Cu/DT9/Cu 热轧复合工艺,即轧制温度 850℃,压下率  $\geq 50\%$ ;采用三组坯料厚度配比,经热轧试验获得了复合良好的 Cu/DT9/Cu 叠层复合材料,其界面结合强度达 155MPa;退火后三组 Cu/DT9/Cu 复合材料的屈服强度约 170MPa,抗拉强度约 250MPa。

2. 热轧和冷轧过程中铜、铁层厚变化规律分析结果显示,铜层和铁层的变形率趋于一致;通过对最终复合材料的厚度测量,表明:原始厚度为 1.5/2/1.5 的 Cu/DT9/Cu 经过轧制后的复合材料,能满足最终产品厚比要求。

3. 界面分析结果表明, Cu/DT9/Cu 热轧复合的机理为:热轧时铜和铁的表面层破裂,形成真实物理接触;在高温高压条件下,两接触表面原子被激活,形成金属键而实现牢固结合。

4. 首次基于高性能计算平台,利用 ABAQUS 有限元软件,实现了 Cu/DT9/Cu 热轧复合的数值模拟,获得了轧制过程的温度变化和应力、应变的分布。结果显示:热轧过程中最大平均轧制压力约为 41.6MPa。通过数值模拟和实验数据的对比,两者热轧后的铜铁层厚比误差小于 7%,可以为厚度变化提供有效预测。

**关键字:** Cu/DT9/Cu, 层状复合材料, 高性能计算平台, 数值模拟, 结合强度, 复合机理, 层厚变化



## ABSTRACT

Layered composite materials are more and more extensively applied in military equipments of national defense science and technology with the development of technology, so the study of layered composite materials has become much more in-depth. For the laminated composite of copper and iron, no domestic report has been found. Oxygen-free copper TU1 and iron DT9 are selected to make the composite material in this research. The numerical simulation as well as the experimental study of hot rolling compound is carried out for the first time to the copper/steel /copper in domestic, it has obvious innovation significance for research and application of compound materials.

First, the high temperature mechanic performance of oxygen-free copper TU1 and iron DT9 are tested, and the rolling process for the compound of copper and iron is established. Second, hot rolling experiment is conducted and take analysis of the performance of composite materials and thickness change, and also the combination mechanism of the composite. Third, based on high-performance computing platform, using finite element software ABAQUS for the first time to simulate the hot rolling process of copper and iron with the reduction of 50%. It can provide a theoretical and practical basis for optimization of the hot rolling process of the composite materials. The main conclusions of this paper are:

(1) The hot rolling process of the compound of copper and iron is established, the temperature is about 850°C and the reduction is more than and equal 50%. After the hot rolling experiments of three different thicknesses of copper /iron/copper and get the laminated composites well bonded. The bond strength of composite materials is 155MPa, the yield stress of the composite is about 170MPa, and tensile strength is about 250MPa after annealing.

(2) Experimental analyzed of the thickness change of the hot rolling and cold rolling that the reduction of copper layer is consistent with iron layer. By measuring the thicknesses of the final composite material show that after rolling the original Cu/DT9/Cu which thickness is 1.5 / 2 / 1.5

can meet the thickness requirements of production.

(3) By analyzing the bonded interface, the combination mechanism of Cu/DT9/Cu can be summarized as: The surface layer of the copper and iron are broken to form a real physical contact when hot rolling, in the conditions of high temperature and pressure surface atoms are activated, so that metallic bonds are produced to achieve combination.

(4) Based on high-performance computing platform , using ABAQUS software for the first time to simulate the compound of copper and iron with three different thicknesses of the copper/iron/copper. The results show the temperature、stress and strain distribution and get the maximum average rolling pressure of rolling process is about 41.6MPa;The numerical simulation results compared with experimental data of the thickness ratio which is the copper to the iron after hot rolling, the error is less than 7%. It can provide well prediction of layer thickness.

**Key words:** Cu/DT9/Cu, layered composite materials, high-performance computing platform, numerical simulation, bond strength, combination mechanism, layer thickness change

## 目 录

摘要.....	I
ABSTRACT .....	II
第一章 文献综述 .....	1
1.1 金属层状复合材料介绍.....	1
1.2 金属层状复合材料的发展状况.....	1
1.3 金属层状复合材料复合方法和机理研究.....	4
1.3.1 复合方法.....	4
1.3.2 金属复合机理 .....	6
1.4 有限元基本理论及 ABAQUS 软件介绍 .....	8
1.4.1 有限元基本理论.....	8
1.4.2 ABAQUS 介绍 .....	9
1.5 有限元在金属轧制中的应用.....	13
1.6 无氧铜与 DT9 介绍 .....	15
1.6.1 无氧铜.....	15
1.6.2 DT9 介绍 .....	16
1.7 本文研究背景、主要内容.....	18
1.7.1 研究背景.....	18
1.7.2 主要内容.....	18
第二章 实验方法与过程 .....	20
2.1 原材料力学性能检测.....	20
2.1.1 退火处理.....	20
2.1.2 拉伸实验.....	20
2.2 热轧实验.....	21
2.2.1 热轧工艺的确定 .....	21
2.2.2 实验流程.....	22
2.2.3 备料.....	22
2.2.4 表面预处理 .....	23
2.2.5 轧制实验.....	23
2.2.6 后续冷轧实验 .....	24
2.3 复合材料的检测.....	24
2.3.1 力学性能检测 .....	24
2.3.2 金相实验.....	25
2.3.3 SEM 实验 .....	25
2.3.4 厚度变化测量 .....	26
第三章 实验结果分析 .....	27
3.1 原材料力学性能分析.....	27

3.1.1 无氧铜应力应变曲线 .....	27
3.1.2 DT9 纯铁应力应变曲线 .....	29
3.2 复合材料界面结合强度分析与讨论.....	30
3.2.1 界面结合强度分析 .....	30
3.2.2 界面结合强度影响因素分析 .....	31
3.3 复合材料界面结合机理分析.....	33
3.3.1 金相组织观察 .....	33
3.3.2 复合界面 SEM 观察 .....	34
3.3.3 剪切拉伸剥离面形貌 .....	35
3.4 复合材料强度分析.....	37
3.5 层厚变化规律分析.....	38
3.5.1 第一道次热轧层后厚变化 .....	39
3.5.2 后续冷轧层厚变化 .....	39
3.5.3 厚度变化的影响因素 .....	41
3.6 复合材料几何精度分析.....	41
3.7 本章小结.....	42
<b>第四章 热轧数值模拟 .....</b>	<b>43</b>
4.1 高性能计算平台 .....	43
4.2 热轧模拟.....	44
4.3 作业提交与计算 .....	46
4.4 结果分析.....	47
4.4.1 温度场分析 .....	47
4.4.2 应力场分析 .....	48
4.4.3 应变场分析 .....	49
4.4.4 轧制力及平均轧制压力分析 .....	51
4.4.5 厚度变化 .....	52
4.5 本章小结.....	54
<b>第五章 结 论 .....</b>	<b>55</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>56</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>59</b>
<b>攻读学位期间主要成果 .....</b>	<b>60</b>

## 第一章 文献综述

### 1.1 金属层状复合材料介绍

根据材料的复合特点,金属复合材料可以分为颗粒复合材料、纤维复合材料、层状复合材料三大类<sup>[1]</sup>。层状复合材料是金属复合材料中的应用广泛且很重要的一个种类,在国际标准化组织上是这样定义的:层状复合材料是由两种或者多种理化性质不同的物质复合在一起的一种多相固体材料<sup>[2]</sup>。层状复合材料中各组元材料保持各自的独立性,但其最终性能并不是各组元材料的简单叠加,而是有着十分重要的改善。科研人员经过合理选择、设计,可以组合多种不同的材料,可以让该材料拥有多种优异的性能来满足多种特殊的使用要求,如抗腐蚀、抗磨损、抗冲击及导电性、高导热性等。

最近这些年以来,随着科学技术水平的不断发展,尤其是高精尖技术的进步,对复合材料的性能以及品种提出了更苛刻的要求。要求复合材料性能优良、长寿命、安全可靠,具有更高的韧性、强度以及更小的比重,偶尔还要求复合材料具有很好的耐腐蚀性和耐热性,并且价格要低,能够节约稀有的贵金属资源<sup>[3]</sup>。在一种的金属材料上实现以上功能是十分困难,甚至实现不了。通过几种物理性能不同材料的复合,要实现以上要求并不那么困难。作为复合材料中的十分具有发展潜力的一种,金属层状复合材料,可以满足以下各种要求:

- (1) 性能互补,例如将高韧性材料和高硬度材料层状复合后制成性能相互补充的复合板;
- (2) 表面保护作用,用耐腐蚀、耐热、耐磨的材料作为复合板的表层可以起到保护作用;
- (3) 利用材料物理性能的差异性,例如利用导热和膨胀系数不同复合成的电子封装材料,利用热膨胀系数不同的材料制作热敏元件等;
- (4) 经济作用,廉价金属与稀有贵金属复合可以节约稀贵元素或贵金属。

### 1.2 金属层状复合材料的发展状况

任何材料的发展都会有一段历史,金属层状复合材料的使用就有十分悠久的历史。在很早的荷马史诗中就已经提到了有五层材料复合而成的 Achilles 盾。在公元前四世纪左右,希腊铁匠便把中碳钢与低碳钢复合。八到十世纪的时候,北欧海盗所使用的剑就是在坚硬的剑刃背后镶嵌塑性好、抗冲击的钢而制成的。六世纪,法国洛林梅罗文吉安剑,十五世纪时德国军队的盔甲,十六世纪的日本剑,都说明了欧亚工匠很早就有了了解与认识到金属复合材料优异性能。到 20 世纪初,人们已经知道用部分脱碳钢的绞合钢条经过锻焊加工成的双金属滑膛枪管比

均质枪管更好用。

随着社会的进步发展，二十世纪以来，金属层状复合材料的研究就已经十分广泛了，其材料的种类以及复合方法也得到了很大的发展，很多国家在复合材料方面展开了大量的理论和生产的研究工作，主要集中在航天航空和电子封装领域。在 20 世纪 80 年代，美国德州仪器公司成功研制出了一种新型的电子封装复合材料 Cu/Invar/Cu(CIC)，这种电子封装材料由三层复合而成，中间层是 Invar 合金，上下表面是无氧铜板，经过轧制复合制备的。因为 CIC 复合材料不仅具有铜的高导热和导电性能，而且也具有 Invar 合金的低膨胀系数性能，还可以通过调整 Invar 和 Cu 的比例，得到多种不同的导热和导电性能和膨胀系数的复合材料，能够很好的满足电子封装材料的性能要求，成为当时国外电子封装材料中最热门的研究课题。德国的 IXYS 公司已经将 CIC 用在固态继电器中做功率模块的过桥，美国军方已经将其使用在 F-15 型战斗机的电子设备上<sup>[4]</sup>。

在电子封装材料发展方面，美国和日本显示出很大的优势，成为封装材料的主要的生产基地。美国的 Climax Specialty Metals 公司和 AMAX 公司采用热轧复合的方法，成功制备出了 Cu/Mo/Cu 即 CMC 复合材料，且申请了专利技术，已经在 B2 隐形轰炸机的电子设备中得到使用。CMC 的结构和 CIC 都是三层复合结构，但强度参数、硬度指标、电导率和热导率比 CIC 都高了很多，原因是：由于 CMC 复合材料的中间层是铝板，其强度、导热、导电性能都要比 Invar 合金的高。采用在线连续轧制复合技术，美国的 Polese、Elcon 和 Polymetallurgical 等公司可以制备多种规格的局部包覆或者全部包覆的封装复合材料，与 W/Cu、Mo/Cu 等粉末冶金方法所制备的电子封装材料相比，轧制复合制备方法可以提高平面复合型材料的生产效率，可以降低生产成本，而且还可以生产大尺寸规格的封装材料，因此平面复合型电子封装材料促进了电子信息业的发展，并且容易产生规模效益。Polymetallurgical 公司是生产包覆型复合材料的引航员，该公司研究开发出多种产品，可以实现 Ni/Cu、Ag/Cu、Au/Ni、CMC 和 CIC 等局部或者全面复合型封装材料的大规模生产，并且性能优异，尺寸能够精确控制。日本也是生产电子封装材料的先驱者，在生产研究领域内享有很高的盛誉，A.L.M.T 公司成功研发制备了许多种类的电子封装材料，例如 W/Cu、Mo/Cu、CMC。并且该公司还可以生产 Cu/PCM/Cu 平面复合型封装材料，首先将 Mo/Cu 轧制复合成带材后，再将其两边轧制复合上铜。Mo/Cu 复合材料中铜是呈现网状分布，大大提高了材料厚度方向和平面方向的连通能力，因为铜有很强的导热导电能力，制备得到的产品与 CMC 相比，厚度方向和平面方向的导电导热性能要更好。

金属层状复合材料在国内的发展比较慢，虽然我国在古代也对金属复合材料进行过一些研究，但规模化工业化生产还是在新中国成立之后，尤其是到改革开

放后才全面发展起来的，与发达国家相比较有比较大的差距，主要的研究单位有西北有色研究院、东北大学、上海钢铁研究院、首都钢铁研究所、中南大学等。国内关于金属层状电子封装材料的研究，开展得比较迟。电子部 15 所的马慧君<sup>[5]</sup>等人首次成功制备了 0.15mm 厚的 17/66/17 的 CIC 层状复合材料，该复合材料采用的是表面电镀法制备。主要用于电路印刷板。CIC 的应用提高了印刷板的性能，可以对印刷板的 CTE（热膨胀系数）进行控制，使其与芯片相匹配；印刷板的导热性能得到大大提高，印刷板线路的工作稳定性也得到提高；该材料具有良好电磁屏蔽效果，可以有效防止外来电磁干扰。制备的印刷电路板主要用于国

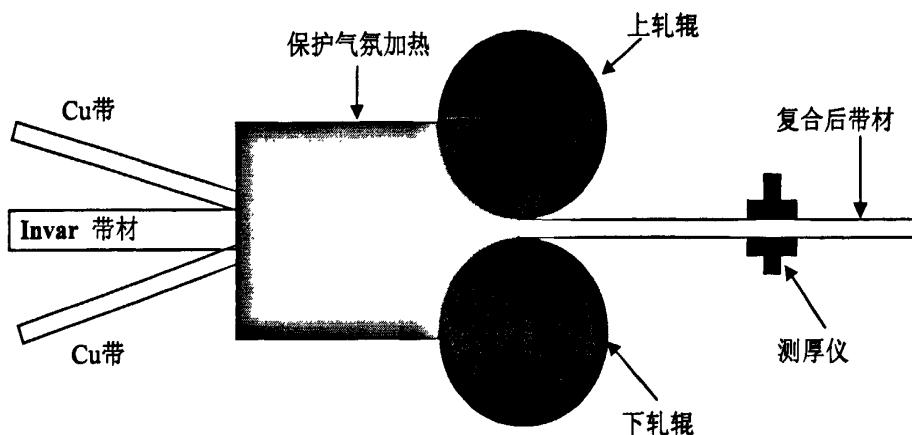


图 1-1 可控气氛热轧复合过程

产计算机，促进了我国的计算机信息技术的发展。国内的生产厂家通过技术和设备的引进，也开展了这方面的生产。广东的佛山精密合金有限公司从美国引进了复合金属生产线和技术，该技术在 90 年代具有国际先进水平，成功研发生产了几大系列的复合金属产品，其中就包括了金属层状封装材料。该公司通过引进的可控气氛热轧复合技术，在保证了结合强度以及尺寸精度控制方面，相比一般热轧和冷轧复合方法要好，其生产过程见图 1-1，其复合的原理是：一卷 Invar 与两卷铜材料同时在可控气氛室内进行加热，当达到材料再结晶温度以上，在大压下率轧制条件下铜和 Invar 界面产生牢固的原子键而实现结合。该公司所生产的

表 1-1 CMC 电子封装材料性能<sup>[6]</sup>

Cu/Mo/Cu (Weight rate)	Density g/cm <sup>3</sup>	CTE 10 <sup>-6</sup> /K	In-plane TC W/m·K	Through Thickness TC W/m·K
1 : 4 : 1	9.75	6.0	220	125
1 : 3 : 1	9.66	6.8	244	130
1 : 2 : 1	9.54	7.8	260	142
1 : 1 : 1	9.32	8.8	305	160

CIC 材料，已经有国内部分厂家投入使用，反映良好。北京先进材料有限公司也是一个专门生产各种封装材料的企业，产品也比较全面，该公司也可以规模化生产电子封装材料和多种封装成品部件，产品出口行销往欧美国家，其中电子封装材料 CMC 的性能如表 1-1 所示<sup>[6]</sup>。

中南大学对电子封装层状复合材料也进行了很多的研究，中南大学的杨扬教授等人验证了爆炸复合方法制备 CMC 电子封装材料的可行性，对爆炸复合 CMC 封装材料界面的结合机制进行了详细的研究<sup>[7]</sup>。王志法教授等对 Cu/Mo/Cu 热轧复合工艺进行了研究<sup>[4,6]</sup>，探讨了复合材料的表面处理对剪切强度的影响，退火温度对复合板的热导率、剪切强度的影响，以及复合材料的复合机理等。中南大学升华微电子材料有限公司，专业生产 W/Cu、Mo/Cu、Cu/Mo/Cu、Cu/Mo70Cu/Cu 的高性能电子封装材料，公司凭借先进的材料制备技术、完备的材料检测设备及现代化的科学管理制度，同时依托中南大学雄厚的技术开发实力，在电子封装材料领域处于国内领先地位，其技术成果处于国际先进水平，产品销往国内很多电子产品公司，已经得到很好的发展，摆脱了对国外产品进口的依赖。

最近几年以来，在社会经济不断发展的同时，资源和能源的遭到了过度开发与消耗，很多矿产资源逐渐枯竭，使用节能环保的复合材料逐渐成为社会的发展潮流，新型复合材料的研究和制备成为材料科学领域的一个非常重要发展方向。

### 1.3 金属层状复合材料复合方法和机理研究

#### 1.3.1 复合方法

金属层状复合材料的生产制备工艺比较复杂，而复合工艺是生产的中心环节。以下介绍了金属层状复合材料的复合技术及其发展趋势。

##### (1) 轧制复合

在 20 世纪 30 年代，作为制备金属层状复合材料的一种工艺，轧制复合引起了一些研究者的注意，轧制复合可以分热轧和冷轧。热轧复合最早开始出现在 20 世纪 40 年代，热轧复合是首先将基材和覆材金属先装配在一起，为了防止在加热和轧制过程中界面氧化，预先在周边进行焊接密封处理。常常采用对称组合，预防两种金属因变形量不同引起轧件的弯曲。装配组合后的坯料加热后，在轧机大压下量轧制使基材和覆材牢固地结合在一起。对于那些比较难于实现直接复合的金属对，可以在中间层加入低熔点的金属箔，在高温下利用瞬间液相法可以实现复合而获得满意的界面结合强度。

在 20 世纪 50 年代初期，美国首先成功实现了冷轧复合技术，提出了表面处理、轧制复合、退火强化为主要过程的生产工艺，开始了冷轧复合应用的新阶段。冷轧是在较大的轧制压力作用下，使材料的相互接触的界面达到原子间的距

离时形成结合点，经过随后的扩散退火热处理形成结合面而实现金属结合。很多材料都可以通过冷轧实现复合，并且冷轧复合的产品尺寸精确；由于冷轧方法不需要加温装置，而且该方法容易实现批量生产，近年来获得较大的发展，成为现在应用最广泛的复合技术之一。但是该方法实现复合的临界变形量大，对轧制设备的吨位要求高，因此有效降低轧制压力，尽可能发挥设备潜力具有十分重要的意义。

#### (2) 爆炸复合

爆炸复合法即利用爆炸瞬间产生的高温高压，使不同的材料结合到一起的一种加工工艺。主要特点是：爆炸所产生的高温高压，使相互接触表面的金属融化并通过扩散使难复合的金属结合到一起；容易实现多层复合且复合界面呈波纹状，结合强度高；适于小批量多品种生产，不适于大批量生产。爆炸复合法的主要优点有：材料组合的适应性强，且不改变材料的成分和状态；复合材料的界面结合强度比较高；不需要成套的复杂设备，实现生产的灵活性大；由于爆炸复合具有自清洁效果，所以不需要额外的表面处理。缺点是：爆炸所产生的冲击波和声响给环境及人们心理带来了污染和刺激；而且爆炸复合制备的复合材料板型很难控制，并且不适于连续生产。

#### (3) 爆炸—轧制复合法

爆炸—轧制复合法是先通过爆炸复合，再通过热轧或者冷轧将坯料加工到所需厚度尺寸的一种工艺。由于爆炸复合材料的界面结合强度很高，能实现后续多次压力加工而不会出现分层。这种方法弥补了爆炸复合材料在形状、尺寸上的一些限制，可生产复杂尺寸的复合材料。爆炸工艺参数的选取对爆炸—轧制复合法很重要，不然会对后续轧制带来的一些问题，例如元素的相互扩散、脆性化合物的破裂等。

#### (4) 扩散焊接法

该方法作为一种常用的复合加工工艺，能实现对同种或者不同种材料的复合。当温度加热到基材熔点的 0.5~0.7 倍时，不使基材出现变形的时候进行加压，使覆材与基材紧密接触，使界面原子相互扩散而实现结合。实现扩散焊接有很多种方法，如无助剂异扩散和自扩散法、过渡液相法、利用助剂和相变超塑性等方法。对于一些难以焊接的合金，扩散焊接法特别适合，尤其是铸造高温合金。扩散焊接方法的缺点是界面结合强度不高，而且对生产设备的要求较高，但可以可获得与基体一致的接头性能，而且接头残余应力较小，不会有宏观的变形。

#### (5) 铸造复合法

铸造复合是将一种固相与另一种液相在铸模内进行组合，等到凝固后形成复合材料的工艺方法。该方法的主要特点是：自动化程度高、可连续化生产、生

产成本低，并且应用范围大等。铸造复合法可分为双流铸造法和包覆铸造成形法。双流铸造法即双浇法，是同时对两种液态金属进行铸造，利用不同材料的熔点差异，首先将低熔点材料浇注在特殊的模腔内，然后将模内的隔板提升，再把高熔点材料浇注在隔板提升后的空腔里面，等到凝固后便得到复合的双金属坯料。包覆铸造成形法即熔合法，是对已有芯材的一种包覆工艺，该方法主要用于轧制法难以实现复合，而且两种熔点相差特别大的材料。利用该方法的缺点是：产品的低熔点材料表面易形成微小的缩孔，必须经过表面处理后才能进行后续的再加工，所以会造成制造成本比较高且生产效率低。

#### （6）复合新技术

随着科学技术手段的不断提高，在提高材料性能和降低成本、保护稀有金属等因素的促使下，产生了许多的新型复合技术，如：自蔓延高温合成焊接技术、电磁成型复合、超声波焊接技术、激光熔覆技术、喷射沉积复合技术、反向凝固复合技术、液—固相轧制复合法等。在这些新型复合技术中有传统的技术，如轧制、铸造、爆炸等在复合方面的运用，也有新的科技手段，如激光熔覆技术、电磁成型复合、超声波焊接技术等在复合方面的运用。随着科学技术的进一步发展，对材料性能和成本的要求会日益严格，金属层状材料复合技术必将得到不断的发展，新的科技手段在复合方面将会有更加广阔的应用前景<sup>[8,9]</sup>。

### 1.3.2 金属复合机理

长期以来人们对金属复合机理做了大量的研究探索，但到现在为止，仍有许多机理没有被人们所揭示和理解。随着研究的深入，研究者们提出了许多不同的结合机理，这些理论研究不仅促进了复合材料理论的发展，也为生产工艺的制定提供理论指导；相反，通过不断改进生产工艺，又促进了复合机理的日益完善。下文将对金属固相复合的一些理论进行阐述<sup>[10]</sup>。

#### （1）再结晶理论

基于金属在塑性变形量很大时再结晶温度会下降的事实，Join.M.Parks 在 1953 年提出了再结晶理论。该理论认为金属在复合时主要过程是相互接触区域的再结晶过程。可以这样解释：两种金属一起大变形的时候，由于变形热效应出现局部升温，导致接触边界的晶格原子进行重新排列，形成了同时属于两种金属的晶体，从而实现了两种金属的接触面的结合。再结晶理论可以解释在热处理过程中的复合材料组织变化行为，但是无法解释有些低温复合现象<sup>[11]</sup>。

#### （2）金属键理论

M.S.Burton 通过研究金属复合于 1954 年提出了金属键理论。该理论认为，只有使两种金属原子距离足够近以致产生金属键才能实现金属结合。原子引力存在于任何一个固相金属体内的原子之间，不论是同种金属原子还是不同种金属原

子之间，都有这种原子吸引力作用。随着两种金属原子不断靠近时，吸引力也逐渐增加，当间距达到大约两倍正常原子间距时，这种引力达到最大值，当继续靠近时，吸引力又将逐渐减小，当距离约为正常原子间距时，原子吸引力变为零。此时原予以平衡间距稳定排列，两种金属接触面原子的最外层自由电子成为共同拥有的自由电子，形成了金属键而结合在一起。该理论认为这种复合机理存在于所有的复合技术中。金属键理论普遍被人们接受，但是不适用解释低温复合领域中的问题<sup>[12]</sup>。

#### （3）能量理论

该理论于 1958 年由 A.N. 谢苗诺夫提出。能量理论认为，当两金属表面相互接触的时候，就算原子之间到达了晶格参数级别的间距，如果原子仍然不能达到实现结合所需的最低能量，是不能实现金属结合的。该理论认为只有当原子获得足够的能量而被激活，然后当接触到一定距离后才可能形成金属键，才实现金属之间的结合。但是该理论的缺点是不能解释加工硬化，因为加工硬化会使金属原子的能量得到增加，但并不能推进金属间的结合，相反还削弱了金属间的结合能力<sup>[13]</sup>。

#### （4）扩散理论

在七十年代，H.O. 卡扎柯夫根据金属学原理首次提出了扩散理论。该理论认为在金属复合的加工过程中，由于变形热效应使接触区温度得到升高，导致金属原子能量增加而受到激活，两种金属接触界面附近的原子相互扩散，形成一层很薄的过渡层，从而实现两种金属之间的复合。两种原子的相互扩散增加了原子间产生相互作用的机会，促进金属之间的结合。该理论也有缺陷，它没有考虑到接触表面的激活和相互扩散对接触界面实现结合的影响<sup>[14]</sup>。

#### （5）位错理论

位错理论认为两种接触的金属在一起变形的时候，位错迁移到接触表面形成了高度只有原子间距的微小台阶，使接触表面的氧化膜破裂，增加了双金属接触表面的粗糙度，导致接触表面产生的塑性变形比内部金属要大得多，这个过程说明双金属实现复合的过程就是接触区金属的塑性流动。该理论也存在缺陷，在没塑性变形条件下的双金属复合，例如采用铸造法的双金属复合，该理论就无法解释<sup>[15]</sup>。

#### （6）薄膜理论

薄膜理论认为金属表面的状态决定了它们是否能实现结合，该理论主要适合解释异种金属轧制复合。该理论认为金属接触表面的氧化膜是实现结合的主要障碍，表面氧化膜越硬越薄，在变形的时候就越容易破裂，暴露出新鲜表面，金属间越容易实现结合。复合材料的界面结合强度与接触表面裂纹的数量和大小直接

相关，只有清除接触表面的氧化膜，在复合工艺过程中使接触表面的原子接近到一定距离，使原子间吸引力才发生作用，进而实现金属的结合<sup>[14]</sup>。

### (7) 三阶段理论

这个理论认为只要是在高温加压条件下的金属复合都包含三个阶段的过程。第一阶段：物理接触的形成，也就是依靠大的塑性变形，双金属中的原子在接触面上相互接近到一定的距离，以引起物理作用或者产生弱化学作用。第二阶段：化学作用阶段，随着双金属接触表面原子的继续接近，接触表面原子受到激活而形成化学键，实现了双金属的结合。第三阶段：扩散阶段，在完成物理接触和实现初步的弱结合后，双金属接触面的原子通过接触面相互扩散形成过渡层，以提高双金属的界面结合强度<sup>[15]</sup>。

上面所述的各种复合机理理论从不同角度揭示了金属实现结合的规律，这些理论并不相互矛盾，而是相互补充。可以说，目前仍在对双金属固相复合机理进行更深的探索和认识。

## 1.4 有限元基本理论及 ABAQUS 软件介绍

### 1.4.1 有限元基本理论

在科学技术的计算方法中，对于许多物理和力学问题，人们已经建立了它们数学模型的基本方程（如：偏微分方程或者常微分方程）和对应的求解条件。解析方法只能求出方程性质比较简单且几何形状规则问题的精确解，但对于大多数问题，由于方程具有非线性特征，或者求解域几何形状比较复杂，解析方法不能求解到答案。解决这样复杂问题，通常有两种办法：一是简化模型，引入一些假设，建立数学模型，将方程和边界条件化为能够求解的状态，这样才得到问题的简化答案。但是这种办法只有在一定的情况下是有效的，因为模型经过一些简化会使误差很大，甚至得到错误的答案。近三十多年来，通过人们的研究，发展了另一种求解办法—数值解法。随着计算机的快速发展和普及，数值求解法成为现代解决科学技术问题的重要方法，数值解法中最重要的方法—有限单元法成为当今工程问题分析中应用最多的数值求解方法。由于有限元法的精确性和普适性，得到各种工程研究领域的高度重视。随着计算机软件和硬件的更新换代，有限元法已经成为 CAD/CAM 的重要组成部分。在材料加工领域利用有限元方法进行模拟仿真，能直观的虚拟展示加工过程，能获得工艺过程中的各种状态变量，可以为制定和优化加工工艺、预测产品质量、缩短产品开发周期提供科学依据。

有限单元法的基本思想是把连续体离散为单元的集合体。将分析对象离散为网格，这些网格就是所说的单元，网格间的交点称为节点。所以，网格中的节点数是有限的，单元也是有限的，所以称为有限单元法。有限元法分析的思路和步

骤是：

(1) 物体离散化，是将分析对象（如：工程结构件）离散为单元组成的模型。根据求解问题的特点、变形的需要以及计算精度来选择单元性质和数目。通常，单元越细小计算结果越精确，即越真实描述实际变形，但计算时间和损耗会越大。合理的建立计算模型，达到既节省计算时间又能保证计算精度是工程分析人员所要具备的技能。

### (2) 单元特性分析

首先是求解模式的选择。在有限单元法中，有三种求解模式：力法、位移法和混合法。位移法易于实现计算机编程，所以在有限单元计算软件中应用最广泛。采用位移求解模式时，分析对象离散化后，用节点位移来描述位移、应变和应力等，此时可以对单元中位移的分布用逼近函数来描述。一般情况下，有限元法中将位移用坐标变量的函数来表示，这种函数也叫位移函数。

其次分析单元的力学特性。根据弹性力学中物理方程和几何方程来建立位移和力的关系矩阵，从而推导出单元刚度矩阵，这是单元分析中的关键步骤。

最后计算等效节点力，对于实际的连续体，力是从单元的公共边界传递到另一个单元中去的，这种作用在单元边界上的集中力、表面力和体力都需要等效地移到节点上去，也就是用等效的节点力来代替所有作用在单元上的力。

(3) 组集总刚度方程，是利用结构的边界条件和平衡条件把各个单元重新组合在一起，形成总体的刚度方程：

$$\mathbf{K}\mathbf{q}=\mathbf{f} \quad \text{公式 (1-1)}$$

式中  $\mathbf{K}$  是整体结构的刚度矩阵， $\mathbf{q}$  是节点位移矩阵， $\mathbf{f}$  是载荷矩阵。

(4) 求解节点位移方程，通过求解方程(1-1)得出位移，然后根据位移计算出应变和应力。可以根据刚度矩阵的不同特点来选择不同的求解方法。通过上面几个步骤析可以得知，有限元法思想是一分一合，分是为了进行离散实体，合则是为了组装总刚度方程进行综合分析<sup>[16]</sup>。

## 1.4.2 ABAQUS 介绍

ABAQUS 是达索公司的核心主打产品，被认为是功能最强大的非线性数值计算软件之一，能够分析复杂的结构力学、固体力学问题，尤其是能够求解非常复杂、非常庞大的非线性问题。该软件不仅能分析单一构件的力学问题和多物理场耦合问题，而且还能研究和分析系统级的复杂问题。ABAQUS 独特的系统级分析计算能力，是其他的分析软件是无法比拟的。由于 ABAQUS 突出的分析能力以及模拟复杂问题的求解精度，使得 ABAQUS 在各国的研究开发和生产设计中十分广泛的应用，ABAQUS 还在一些高精尖产品分析中呈现出至关重要的作用<sup>[17]</sup>。

### 1.4.2.1 ABAQUS 的主要模块

ABAQUS 有两个主要的求解模块：ABAQUS/Standard 与 ABAQUS/Explicit。还有一个支持求解器的图形用户界面（GUI）环境，也称之为机交互前后处理模块 ABAQUS/CAE。ABAQUS 针对某些特殊专业问题还提供了专用模块来丰富他的功能。

#### （1）ABAQUS/CAE

该模块是 ABAQUS 的一个交互式图形界面环境，在该模块中能够十分有效地创建和编辑所需参数，并且能监控和诊断求解计算过程。软件开发者将几何建模、计算分析、工作管理以及结果后处理集成到一个集中的、方便快捷的 ABAQUS/CAE 模块中，使初学者很容易通过自学上手，而且还提高了老用户的工作效率。ABAQUS/CAE 是一个十分全面的有限元建模交互平台，将各种功能集中在一起模块化，并且还可以自定义工具箱；使用户界面环境具有一致性、直观性和互动性；同时对 ABAQUS 求解器可以提供很好的支持，用户常常要用到的一些的 ABAQUS 求解器的基本概念，例如接触和摩擦、分析步、材料、截面特性和幅值曲线等，在用户界面环境中能非常直观的进行操作；除此之外，还可以以方便的监测和管理求解过程，再加上完整的结果后处理可视化功能，使用户能够便捷地生成、交流和解释分析结果；使用 GUI 工具包和 Python 脚本语言，还可以实现批处理各种任务和流程以及自定义的菜单对话框等。

#### （2）ABAQUS/Standard

这个是 ABAQUS 的一个通用分析模块，能够求解广泛的线性和非线性领域的问题，包括固体力学、热、电磁、声以及复杂的非线性和多物理场耦合分析等。该模块提供的动态载荷平衡的稀疏矩阵并行求解方法，可以用于各种类型的分析求解，并且能够最多实现 16 个处理器的并行计算。ABAQUS/Standard 模块还有并行的 Lanczos 特征值求解方法，在大规模复杂问题中可以实现快速地求解多阶特征值，成为分析线性动力学的一个重要方法，包括谐波响应、瞬态响应、地震响应谱分析以及随机响应。该模块还提供了一个复特征值求解器，能够提取带阻尼的对称系统或者非对称系统的复特征值。

#### （3）ABAQUS/Explicit

该模块主要是用于显式动态分析，非常适合于分析准静态问题和非线性动力学问题，尤其适合模拟瞬时的、短暂的动态问题，例如爆炸、跌落和冲击等。另外对于处理高度非线性接触条件的准静态问题也十分有效，例如模拟材料成型过程，如高温金属轧制、板金冲压和缓慢挤压过程等。ABAQUS/Explicit 能实现基于分解求解域的并行计算；并且可以使用子模型技术；在分析大变形问题时，为了避免网格的严重畸变，保证求解的顺利进行下去，还可以使用 ALE 自适应网

格技术。

#### 1.4.2.2 ABAQUS/Explicit 求解器计算方法

ABAQUS/Explicit 是一个显式求解器，采用了中心差分法在时间域上对运动方程进行显式积分，主要过程是：使用上一个增量步的平衡方程来计算出下一增量步的变量状态。显式求解方法中，在每一个增量步的开始时刻  $t$  中心差分算子就已经满足动态平衡方程，求解计算出  $t$  时刻的加速度，然后再把速度的结果推进到  $t + \Delta t/2$  时刻，再把位移的结果推进到  $t + \Delta t$  时刻。增量步开始时的速度、位移和加速度决定了每个增量步结束时的状态。不论是在线性分析，还是非线性分析计算中，一个稳定的增量步决定了 ABAQUS/Explicit 的求解，该增量步与载荷的种类和持续时间长短没有关系。ABAQUS/Explicit 求解的增量步十分小，但增量步的总数比较大，由于在求解计算过程中不需要组装总体刚度矩阵，也不需要对总体平衡方程进行求解，每个增量步的计算时间要远远小于隐式计算方法，所以 ABAQUS/Explicit 能够高效地模拟高度复杂的非线性问题<sup>[18]</sup>。

#### 1.4.2.3 ABAQUS 接触算法

接触是一种非常复杂的非线性边界条件，与接触面的法向应力和接触表面的界面状态等因素紧密相关，接触与摩擦机理一直是理论研究的难点。当两个物体表面靠近发生接触的时候，在接触面之间就会产生相互作用力，通常这个力可以分解为法向力和切向力，在模拟分析中就必须考虑这两个力对摩擦以及相对滑动的影响<sup>[17]</sup>。

##### 1) 摩擦模型

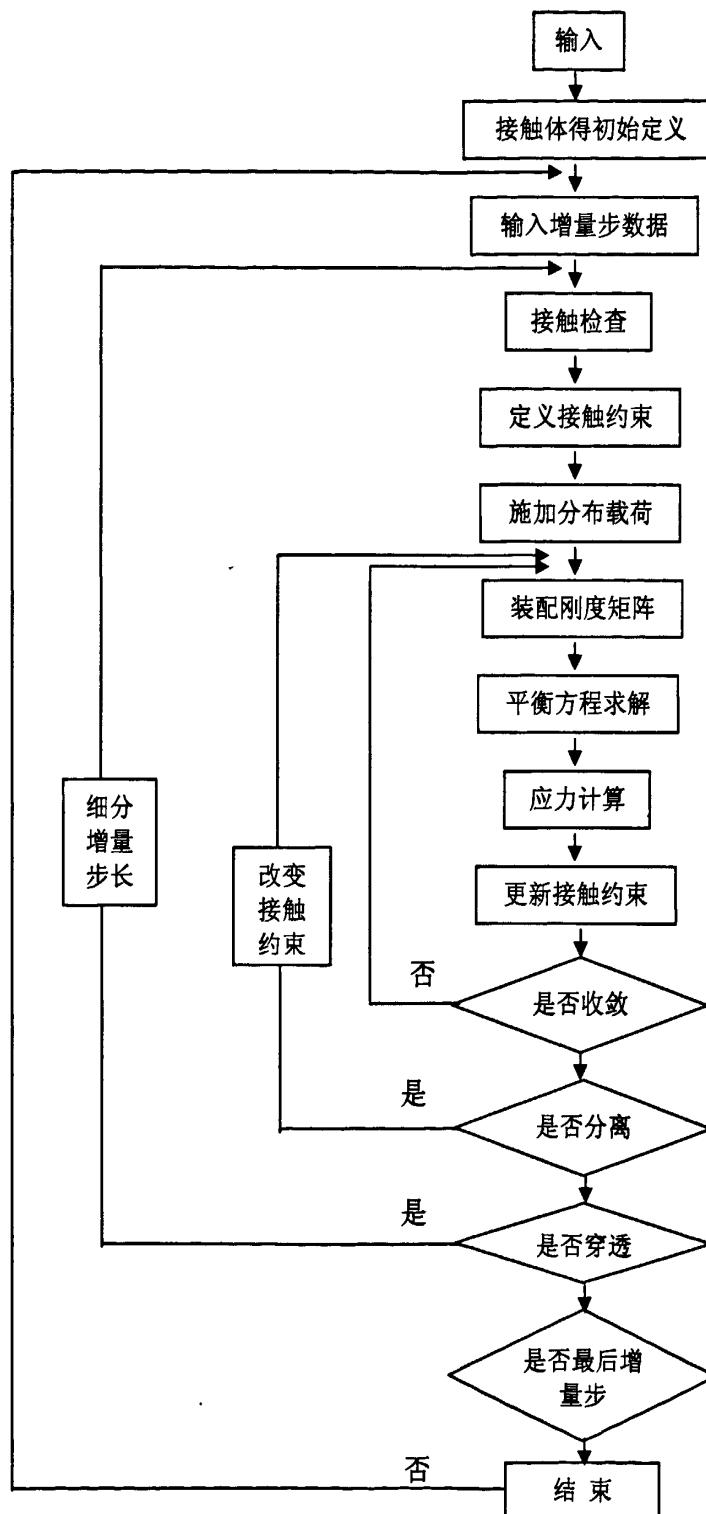
在有限元数值计算分析中，为了更好的模拟摩擦边界，发展了多种接触摩擦模型，经常使用的摩擦模型有以下几种：罚函数摩擦模型、库伦摩擦模型、动力学摩擦模型以及 Lagrange 摩擦模型等。

##### 2) ABAQUS/Explicit 的接触算法

ABAQUS/Explicit 的接触算法主要包括接触对算法和通用接触算法，根据其数学描述可分为接触表面权重法、约束增强法、跟踪搜索法和滑移公式。

##### 3) ABAQUS 接触算法的基本流程

相对于其他软件，在保证求解收敛性以及接触结果精度中，ABAQUS 软件在模拟接触问题时有一定的优势，其计算的整个过程包括：(1) 接触体的定义；(2) 接触探测；(3) 接触约束的施加；(4) 摩擦模拟；(5) 修改接触约束；(6) 约束变化的检查；(7) 判断是否分离和穿透；(8) 热-力耦合的接触传热等。其流程图如图 1-2 所示。

图 1-2 接触算法流程图<sup>[17]</sup>

## 1.5 有限元在金属轧制中的应用

很多学者对轧制过程进行了许多的理论研究工作，也提出了各种理论和方法<sup>[19]</sup>。由于金属轧制工艺过程是板料实现大变形的过程，是以多重非线性的复杂过程：包括几何非线性、材料非线性和边界条件的高度非线性，使得变形机理特别复杂，不能用简单的数学方程式来描述，研究者们长期以来只能采取条件假设、模型简化，并根据经验数据、实验、模型和图解等，将不能实现精确求解的实际工程问题转变为能实现求解的数学力学方程式，通过求解方程组得到一些重要的工艺参数，如温度、应力应变等<sup>[20]</sup>，所以产生了各种不同适用范围和不同近似程度的数值求解方法。在塑性加工求解方法中，常用的数值求解和解析法有：边界元法、有限差分法、有限元法、滑移线场法、初等解析法、能量法等。

金属轧制过程是一个复杂的多重非线性问题，具体有以下特征：(1) 物理非线性。当材料发生屈服后进入塑性变形状态时，材料的本构关系已经不再是线性变化，不再有一一对应关系。在非比例加载的大变形过程中，要用塑性增量理论来描述，且应变增量不仅和应力增量相关，还和应变过程有关；(2) 几何非线性。金属轧制过程一般是大位移、大应变过程，此时用于描述材料本构方程的线性微分方程不能成立，对于研究大变形问题，必须消除刚体转动和刚体位移，也就是说要用有限变形理论来描述应变—位移关系；(3) 边界条件非线性。在轧制变形的过程中，板料和轧辊的接触面积以及位置都在不断发生变化，而这种变化与相对运动以及轧制力相关，形成了未知可变的边界条件。除此之外，接触摩擦力的分布和大小也很难预知，所以力的边界条件也是未知的。

在计算机技术的迅速发展的前提下，为数值分析的广泛使用提供了多种手段，使利用有限元方法对板带轧制进行理论研究分析进入了一个新的阶段。在研究金属塑性成型工艺中，有限元法、有限差分法等方法的成功应用，消除了许多解析求解中的假设，使模拟更加接近真实的仿真，对研究金属轧制变形规律，虚拟仿真金属成形过程开辟了新的道路。60年代末，弹塑性有限元法首先由 Marcal 和山田嘉昭<sup>[21]</sup>等人提出来，弹塑性矩阵由屈服准则的微分形式和法向流动法则推导出，经过显式处理后迅速发展起来的。弹塑性有限元法成为当今研究分析金属弹塑性加载和卸荷问题比较方便有效的方法。该方法可以把材料弹性变形、塑性流动、加工硬化等金属变形的各个阶段的理论综合描述，还考虑了金属内部质点因为受大位移影响所产生的应变非线性等，成为了理论上较为完善的科学计算分析方法。弹塑性有限元法广泛地用于求解各种力学问题，许多人用弹塑性有限元方法在板带轧制方面进行了很多研究工作。刘才博士<sup>[22-23]</sup>于 1985 年将大变形弹塑性有限元方法应用在求解三维板坯轧制变形过程中，合理地处理了平辊约束、摩擦等复杂边界条件，得到了应力位移场、速度场的不同时刻的空间分布，并对

不同宽厚比 ( $W/H=1\sim 3$ ) 的金属宽展变形做了详细的研究。杜风山<sup>[24-25]</sup>分析了宽厚比约为 10 的薄板轧制模拟过程，并且首次使用了界面摩擦层概念来描述金属和轧辊间的摩擦问题。W.Schwenzeifer<sup>[26]</sup>用等人采用弹塑性有限元法对 900℃ 的板坯进行了钢性辊高温轧制的数值仿真。P.Gratacos 等人采用弹塑性有限元法分析轧辊的弹性变形，同时模拟计算了轧辊接触弧上的应力和变形，还分析了轧机的最小压下厚度，但没有对轧件的三维变形作进一步的研究分析。Z.Y.Jiang<sup>[27]</sup>等人采用刚塑性有限元分析了不同摩擦系数和网格划分对求解收敛性的影响。Jiang Zhengyi<sup>[28]</sup>等人采用刚塑性有限元法对有局部变形的轧制过程板带进行了分析，分析了局部变形不同高度对轧制力的影响。A.Alsamhan<sup>[29]</sup>等人利用有限元方法对冷轧板带进行了分析，该论文还利用了网格重划分技术，减少了计算时间和提高了收敛性。R.Boman<sup>[30]</sup>等人采用任意拉格朗日欧拉方法对三维的冷着过程进行了分析，相比拉格朗日方法，该文章更加真实地反映了工具与坯料之间的接触；并且采用了修正的等参迭代光顺处理器来减少计算时间。近年来，面对复杂的工艺，为了尽量接近现实条件，很多学者做了轧制方面的弹塑性热力耦合分析<sup>[31-33]</sup>，在分析热轧过程有着更清晰地理论依据。

随着复合轧制的出现，有限元方法也在这方面得到广泛应用。国内采用有限元分析复合轧制过程比较早的有上海交大的王立东<sup>[34]</sup>，对铜铝复合轧制进行了研究；昆明理工大学的贺艳苓<sup>[35]</sup>，对双金属复合带材轧制过程的有限元数值模拟进行了研究；中南工业大学的刘浪飞<sup>[36]</sup>应用 DEFORM2D 对精密合金层状复合材料轧制变性规律进行了研究，探讨了层厚比变化规律以及残余应力进行相关分析；朱旭霞对不锈钢/铝合金/不锈钢多层材料热轧复合进行了研究<sup>[37]</sup>，应用有限元方法模拟了轧制过程和冲压过程；张志臣<sup>[38]</sup>等人应用 ANSYS 软件对铝/钢、铜/钢进行了弹塑性有限元分析，对轧制过程三维金属流动规律和轧制力等参数进行了研究；侯英武<sup>[16]</sup>用 ANSYS 对不锈钢复合板冷轧过程有限元模拟，分析了不锈钢复合板轧制过程中的边部裂纹的开裂现象，并对此做出了定量分析；黄亮<sup>[39]</sup>采用 MARC 对不锈钢复合板热轧复合仿真及参数分析，获得了热轧复合的最小相对压下量条件；吴成<sup>[10]</sup>应用 MARC 软件对 Q235/304 不锈钢复合板热轧有限元模拟研究；Zone-Ching Lin, Tang-Guo Huang<sup>[40,41]</sup>采用三维弹塑性有限元法对铜铝复合轧制进行了模拟分析；H. Danesh Manesh, A. Karimi Taheri<sup>[42]</sup>采用有限差分法研究了双金属在轧制过程的变性行为以及界面结合强度的分析，等等。有限元方法在复合轧制过程中的应用对研究复合轧制过程在理论上有很大的帮助，并且对生产实际有一定的指导作用。

## 1.6 无氧铜与 DT9 介绍

### 1.6.1 无氧铜

无氧铜是含氧量极少的纯铜，具有纯度高、导热、导电性高的特点，无氢病或者说氢脆。含磷量极低的无氧铜，加热生成致密氧化膜、不剥落，与玻璃的封结性好，加工性能、焊接性、耐蚀性、耐寒性均好。

根据含氧量和杂质含量，无氧铜可以分为 TU1 和 TU2 两种。TU1 无氧铜纯度高达 99.97%，氧含量不大于 0.003%，杂质总含量不大于 0.03%；TU2 无氧铜纯度达到 99.95%，氧含量不大于 0.003%，杂质总含量不大于 0.05%。各国牌号对比：

表 1-2 无氧铜各国牌号

国别	中国	俄罗斯	美国	英国	日本	ISO
牌号	TU1	M006	C10100(OFE)	C103	C1011	—
	TU2	M06	C10200(OF)	C110	C1020	CuOF

TU1 无氧铜由于具有较高的纯度而电导率比 TU2 更高，且其氧含量和高温易挥发的杂质元素含量极低，在电子电器领域中具有特定的用途。

TU1 无氧铜主要用来制造真空电子器件。典型的用途是制造各种高频波导管、粒子加速器的腔体、电子射线管、X 射线管、微波仪表中的高频发射源、真空开关管和真空减压器等元件。特别是适用于制造用电子束焊接方法连接的元器件。目前我国的无氧铜使用比较多的是 TU1，使用这种材料来制造各种功率的金属陶瓷发射管、玻璃发射管、高频加热振荡管、行波管、速调管以及真空开关管、真空继电器、真空接触器、真空电容器和真空断路器等<sup>[43]</sup>。

#### (1) 化学成分

无氧铜 TU1 不含氧也不含任何脱氧剂残留物的纯铜，但实际上还是含有非常微量氧和一些杂质。按标准规定，氧的含量不大于 0.03%，杂质总含量不大于 0.05%，铜的纯度大于 99.95%，其化学成分如下表：

表 1-3 无氧铜化学元素成分<sup>[44]</sup> (wt%)

牌号	Cu+Ag	P	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	Zn	O	总和
TU1	99.97	0.002	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.003	0.002	0.004	0.003	0.002	0.03

#### (2) 其他物理性能

无氧铜的密度  $\rho=8.94\text{g/cm}^3$ ，熔化开始温度即液相点为 1082.5°C，热导率为  $\lambda=391\text{W/(M}\cdot\text{C)}$ ，比热容为  $c=385.2\text{J/(Kg}\cdot\text{C)}$ ，电导率为  $g=101.4\%\text{IACS}$  (700°C

退火 30min 后测定), 电阻率  $\rho=0.0171\mu\Omega\cdot m$ , 无氧铜为逆磁性, 室温质量磁化率为  $X=-0.085\times10^{-6}m^3/Kg$ 。无氧铜的线膨胀系数见表 1-4:

表 1-4 线膨胀系数<sup>[45]</sup>

$\theta/^\circ C$	20~100	20~200	20~300
$\alpha/10^{-6}\cdot{}^\circ C^{-1}$	16.92	17.28	17.60

### (3) 工艺性能<sup>[44]</sup>

1) 熔炼与铸造工艺。无氧铜主要使用工频有芯感应电炉熔炼。为保证无氧铜的质量, 要做到精料密封, 即: 原料选用表面无结瘤、无锈的电解铜, 并剪去四边, 熔炼时必须注意减少气体的来源, 并使用经煅烧处理的木炭覆盖, 也可添加微量的磷做脱氧剂, 采用煤气或者氮气保护, 或者在烟灰覆盖下的半连续铸造工艺浇注铸锭。

2) 成形性能。无氧铜的冷热加工性能均极好, 可以拉伸、压延、挤压、弯曲、缠绕、冲压、旋压、旋锻、可锻性极好, 比锻造黄铜高 65%。退火温度为 375~650℃, 热加工温度在 750~875℃, 锻造温度达 1150~1180℃。

3) 焊接性能。宜进行熔焊、钎焊、气体保护焊, 其氧燃料气焊的性能良好, 但不宜进行电阻对接焊。

## 1.6.2 DT9 介绍

纯铁 DT9, 它是一种低碳低硫低磷、含铁量在 99.95%以上的优质铁, 是一种高真空气密性纯铁。

### (1) 主要特征<sup>[46]</sup>:

1) 电磁纯铁系列钢质均为镇静钢, 又采用了精练, 所以内部组织致密, 均匀, 优良, 无低倍缺陷、无发纹、夹杂物很低、气体含量很少。成品含碳量≤0.004%, 这为用户简化和缩短零件退火工艺创造了可靠条件。

2) 用 DT9 做的元件在高真空条件下元件不放气、不漏气、密封性很好。

3) DT9 的电磁性能优良、均匀、稳定。矫顽力低, 导磁率高, 饱和磁感高, 磁性稳定又无磁时效。

4) 热加工性能好、无红脆区、可保证在各种热加工条件下使用。

### (2) 主要用途

DT9 由于具有以上优良的特性, 它已成为现代电信、电控、电真空技术等行业不可或缺的重要材料之一。主要用在长寿命、高可靠、小体积的电真空器件中作磁极靴、轭铁、磁屏蔽、管壳材料。例如: 电磁继电器, 铁芯用纯铁, 软磁纯铁, 磁屏蔽用纯铁带, 航空仪器仪表, 军工纯铁, 电子元器件用纯铁薄板, 电磁阀, 磁选机用纯铁, 电子管用纯铁, 等等<sup>[46]</sup>。

### (3) 化学成分

DT9 采用了真空感应和电渣重熔双重冶炼工艺，真空感应冶炼首先就把炉料中  $H_2$ 、 $N_2$ 、 $O_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$  等大量杂质气体脱掉，然后将钢锭打成电极棒进行电渣重熔，去除了 80~90% 非金属夹杂物(主要是 P, S)，同时由于电渣重熔钢锭是在水冷结晶器内强制冷凝，其结晶组织致密，一般不会出现缩孔、疏松、裂纹。这样，不仅可获得较好的真空性能，而且电磁性能和机械性能亦有所提高和改善。电工纯铁所含杂质成分控制(山西泰钢不锈钢股份有限公司提供)：

表 1-5 DT9 纯铁的化学成分 (wt%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Al
DT9	0.003	0.01	0.09	0.008	0.005	0.05

### (4) 其他物理性能

DT9 纯铁的密度为  $7.78g/cm^3$ ，热导率为  $\lambda=76.2W/(M\cdot^\circ C)$ ，比热容为  $c=440J/(Kg\cdot^\circ C)$ ，电阻率  $\rho=0.0153\mu\Omega\cdot m$ ，磁导率为  $\mu=1.6mH/m$ ，DT9 的线膨胀系数见表 1-6：

表 1-6 DT9 的线膨胀系数<sup>[46]</sup>

$\theta/^\circ C$	100	300	500	700
$\alpha \times 10^{-6} \cdot ^\circ C^{-1}$	12.7	13.46	14.151	14.98

### (5) 加工性能

纯铁 DT9 的冷、热加工性能都好。冷加工如车、墩、冲、弯、拉……等；热加工，如在锻、轧过程中，红脆敏感性小，无红脆区，可保证在较大的温度范围内进行加工，表面质量好，尺寸精度高，具有良好的焊接和电镀性能。可提供超精度冷轧板，如板厚 $\leq 105mm$ ，厚度公差可保证 $\leq 0.03mm$ ；板厚 $>1.5mm$ ，厚度公差可保证 $\leq 0.05mm$ 。

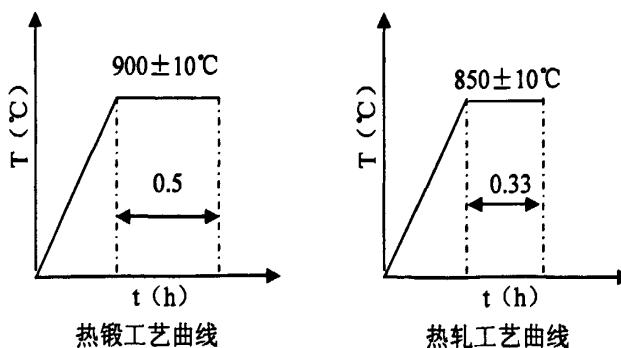


图 1-3 DT9 热加工工艺曲线

DT9 材料锻造性能良好，改锻不会发生开裂，锻造工艺：总加热时间不大于 2h，开锻温度 $\leq 900^\circ C$ ，终锻温度 $\geq 850^\circ C$ 。热轧工艺：总加热时间不大于 1h，开轧温度 $\leq 850^\circ C$ ，终轧温度 $\geq 700^\circ C$ 。DT9 零件进行高温性能处理或者是进行高

温钎焊，采用氢气保护或真空炉都行，对其真空性能不会产生不良影响。

## 1.7 本文研究背景、主要内容

### 1.7.1 研究背景

金属层状复合材料在国防科技领域武器装备的应用也日益广泛，各种装备性能的提高对材料的要求也越来越高，为节约资源和能源，产品轻量化、性能的提升，急需科研工作者开发研究出种类更多、性能更优和成本更低的新材料来满足生产发展和使用的要求。目前研究的复合材料在材料性能组合以及优化利用方面也打破传统的认识，结构和功能一体化材料成为深入发展的潜在优势。所以说，现阶段开发研制新型金属层状复合材料具有十分急迫的现实意义。

本课题来源于一项军品协作配套项目，本项目着重对无氧铜/纯铁/无氧铜即Cu/DT9/Cu叠层材料的轧制复合工艺进行研究，并且借助有限元模拟软件对工艺过程进行仿真，制备出性能优良、符合产品尺寸（厚度为0.18mm，层厚比为5/8/5）的Cu/DT9/Cu叠层复合材料。Cu/DT9/Cu叠层复合材料，作为一种新开发的复合材料，综合了无氧铜和纯铁的性能。无氧铜具有良好电导率、磁导率，高导热性、以及良好的焊接性能；DT9纯铁具有导磁率高，密封性能好以及很好的刚度和强度。这种复合材料主要将应用在微电子、航天航空、武器装备方面，针对其特殊用途而表现出综合的服役性能。

有限元数值模拟技术是目前最有前途，应用最广泛且最方便的工艺仿真技术之一，在产品的优化设计、缩短产品开发周期、降低产品的成本、预测产品质量缺陷等方面起到重要的作用。通过有限元软件对轧制变形的分析，我们更加直观的认识到有限元法的灵活方便与模拟可靠性，能够直观地解析各种轧制变形的状态变量，成为分析轧制变形问题的不错手段。因此，本文拟以弹塑性有限元理论，用ABAQUS/Explicit显式分析对Cu/DT9/Cu叠层热轧过程进行数值模拟，研究叠层金属在热轧复合过程的应力、应变变化规律，以及金属层厚的变化规律，对指导生产及优化工艺是非常有意义的。

### 1.7.2 主要内容

由于Cu/DT9/Cu复合材料的轧制生产工艺在国内尚未见到任何报道，因此，有必要开展相关基础应用研究。本文通过实验和数值模拟相结合，以探索出一种合适的Cu/DT9/Cu叠层复合材料的制备方法。主要研究内容有：

1.无氧铜、DT9纯铁的力学性能检测。通过一系列实验获得原材料的室温和高温条件下的流变曲线，为确定热轧工艺提供参考，同时也为数值模拟提供真实有效的材料参数。

2.热轧工艺确定和实验以及复合材料力学性能检测。通过热轧实验制备

Cu/DT9/Cu复合材料；退火后复合材料的结合强度分析及结合强度影响因素的讨论；热轧退火后复合材料强度检测。

3.复合材料复合机理、厚度变化分析等。通过进行金相观察和SEM扫描分析，对复合好的叠层复合材料进行复合机理分析；并且对热轧后以及后续冷轧后的复合材料进行层厚变化规律进行测量并且分析；最后对复合材料界面的表面平整度及层间平行度分析。

4.热轧数值模拟及结果分析。根据热轧工艺，基于高性能计算平台采用ABAQUS软件对原始厚度不同的三组Cu/DT9/Cu材料进行热轧数值模拟，观察热轧过程的应力应变、温度的变化，以及轧制力和厚度的变化，并且与实验结果进行厚度变化的对比分析。

## 第二章 实验方法与过程

### 2.1 原材料力学性能检测

为了更好的了解无氧铜和纯铁 DT9 的材料属性，在退火前后，通过对原材料的进行室温拉伸以及高温拉伸试验，获得了无氧铜和 DT9 在室温与高温状态下的工程应力应变曲线，以及数值模拟所需要的一些强度参数。

#### 2.1.1 退火处理

在进行拉伸实验之前对需要退火的试样进行了退火处理。

(1) 无氧铜退火实验：无氧铜 TU1 的退火工艺为：加热到 450℃保温 1h，然后随炉缓冷，整个过程在氩气保护氛围中进行。

(2) DT9 退火实验：将试样加热到 800℃，然后以小于 50℃/h 的速度使其从 800℃升温到 900℃，并在 900℃保温 4h，然后又以小于 50℃/h 的速度使其降温至 700℃，继续随炉冷却到低于 500℃之后取出。整个过程在氩气保护氛围中进行。其热处理工艺曲线如下图所示。采用该退火工艺的主要目的是使其得到良好的电磁学性能。

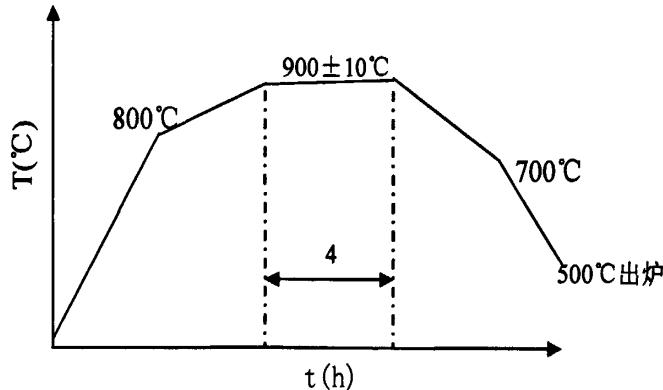


图 2-1 纯铁热处理工艺曲线

#### 2.1.2 拉伸实验

首先，在室温条件下对退火前后的无氧铜和 DT9 进行拉伸试验，试样形状如图 2-2，

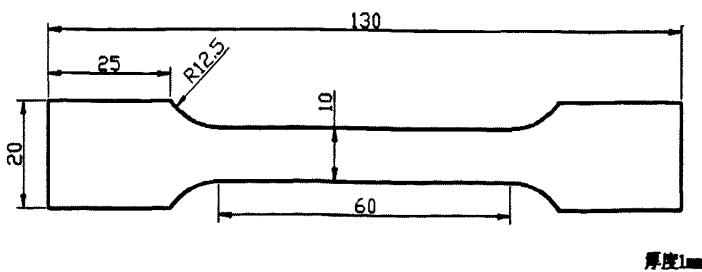


图 2-2 拉伸试样

其次，分别对无氧铜和 DT9 进行了不同高温下的拉伸实验。无氧铜在 715℃、

780℃、850℃进行了拉伸试验；DT9 在 700℃、770℃、850℃进行了高温拉伸实验。

## 2.2 热轧实验

### 2.2.1 热轧工艺的确定

由于冷轧相对于热轧，实现很好复合的临界变形量要大，在轧制过程中坯料容易出现开裂；而且冷轧所需要的轧制力比较大，对金属表面的要求更高，不容易实现结合或者结合强度不高，所以一般来说，采用热轧方法制备金属层状复合材料。采用热轧法生产复合板，首先要将待复合的表面进行合适的处理，以达洁净、活化的目的。如果两种金属组分的热轧温度相差不大，可以采用铆接或焊接的方法进行复板和基板的组坯，这样既防止了金属板在加热的时候发生变形，又免去了轧制喂料时重新组坯的麻烦。如果两种金属组分的热轧温度相差较大，最好先经过充分的试验，在热等强温度下或者接近这个温度进行轧制。

#### (1) 热轧温度的确定

通过对 TU1、DT9 的高温力学性能的认识，以及热加工性能的了解，由于在 850℃左右无氧铜 TU1 和纯铁 DT9 的屈服强度相差最小，而且在两种材料的热加工范围内，根据等强度原则和原材料的热加工性能以及热加工温度范围，我们确定热轧温度为 850℃。

#### (2) 压下率的确定

用轧制复合方法生产复合板时，轧制变形量对于复合板的结合具有极其重要的作用。轧制变形量过低则难以实现复合，轧制变形量过大，则塑性较低的复合层容易破裂而导致复合失效。而且轧制变形量对复合板的结合性能和后续深加工性能也有重要影响。

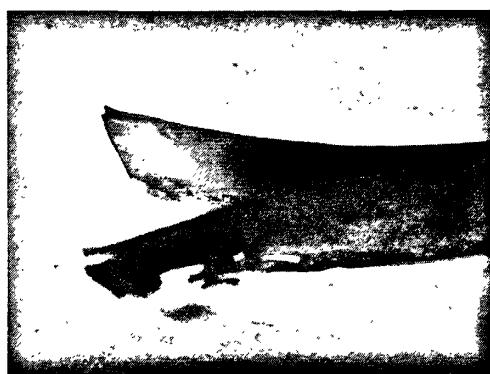


图 2-3 后续轧制后出现分层

在前期的探索过程中，采用了压下率为 30%、40% 热轧实验，虽然都能实现复合，但结合强度不高，而且在后续的轧制过程中，复合材料容易出现分层现象，如图 2-3 所示。随着压下量的增加，结合强度会增强，所以本文采用 50% 的大压

下量进行热轧复合实验，以达到更高的结合强度。

由于高温大压下量的热轧复合，变形速率的影响不是很显著，采用轧机常用速度。根据上述分析，本文确定了 Cu/DT9/Cu 轧制复合的热轧工艺为：轧制温度为 850℃，采用气氛保护加热，保温 0.5h，加热时间不超过 1h；采用大压下率为 50%。

### 2.2.2 实验流程

根据确定的热轧工艺，制定了具体的轧制复合工艺实验流程如图：

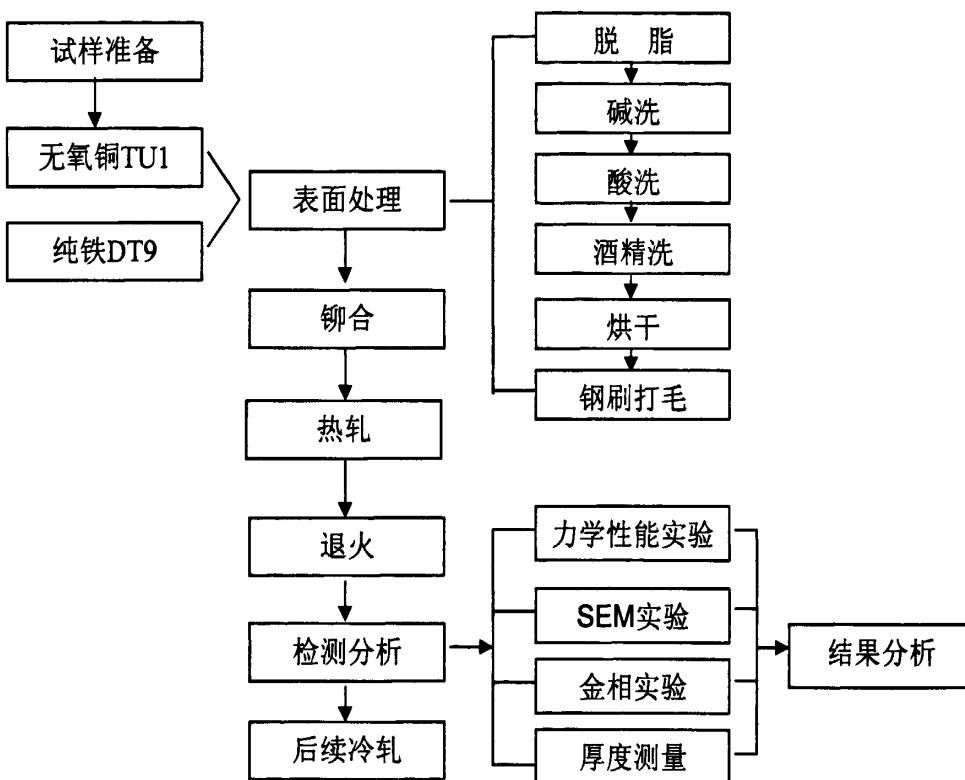


图 2-4 轧制复合工艺实验流程图

### 2.2.3 备料

(1) 剪板：选用厚度为两毫米的 TU1 无氧铜板及 DT9 工业纯铁板，依据原材料尺寸合理分配原则，首先对铜板减薄到实验需要的厚度；依据实验分组方法，用剪板机分别将铜板及铁板分别裁剪到如下尺寸：

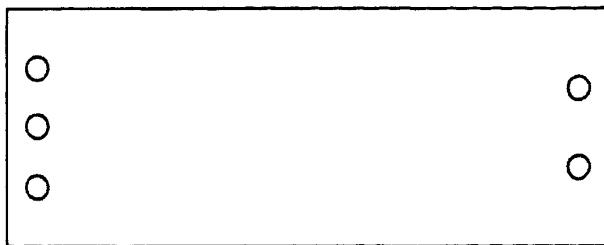
第一组： 铜板 100×30×1mm      第二组： 铜板 100×30×1.5mm

          铁板 100×30×2mm      铁板 100×30×2mm

第三组： 铜板 100×30×2mm

          铁板 100×30×2mm

(2) 钻孔：将无氧铜板及纯铁板按 Cu/Fe/Cu 的顺序叠好后，分别对其头尾进行钻孔，以便于下一步的铆合。钻孔后试样如下图所示。



2-5 试样形貌

(3) 表面清洗：配制浓度为  $10\% \text{NaOH} + 10\% \text{Na}_2\text{CO}_3$  碱溶液，用脱脂棉蘸取碱液对金属表面进行去污处理，以洗净金属表面的油污。然后再用酒精对其表面进行擦拭，以防止在下一步的退火过程中油污渗入金属造成污染。

(4) 预备热处理工艺：我们对钻完孔后的试样进行轧制前的均匀化退火工艺，从而使轧制时的金属材料具有更加良好的塑性。

#### 2.2.4 表面预处理

(1) 除去氧化层：依次用 240 号、400 号、600、800 号的水磨砂纸对退火后的金属进行打磨，以除去金属再退火过程中表面形成的氧化膜。

(2) 超声波清洗：用超声波清洗仪对粘附在试样表面的细小微粒进行清除。

(3) 表面酸碱洗：配置好浓度为  $15\% \text{HCl} + 10\% \text{HNO}_3$  溶液和浓度为  $10\% \text{NaOH} + 10\% \text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液。先用塑料镊子夹好脱脂棉，蘸取碱液对金属表面进行擦拭，将其表面的油污除去，再用酸液将金属表面残余的氧化物及杂质除去，最后再用冷水对金属表面进行冲洗。

(4) 脱脂处理：用无水乙醇对金属表面进行脱脂处理，以进一步除去金属表面的一些脂溶性杂质及油污。

(5) 表面打毛处理：先吹风机将金属表面的酒精吹干，然后用钢刷将铜铁两金属的结合面刷毛，在增大铜板与铁板之间的接触面积的同时，也增大了铜板与铁板之间的摩擦，使复合板在后续的大变形量轧制过程中更容易咬合。最后再用吹风机吹去铜板与铁板表面被刷下的金属粉末。

(6) 叠合穿孔：将处理好后的无氧铜板与纯铁片按 Cu/Fe/Cu 的顺序叠好后，用铜丝对其头尾进行穿孔，以防止在后续的大变形量轧制中铜板与铁板之间产生错动而导致轧制的不均匀甚至无法顺利进行。穿孔完成后，用铁锤将板的头尾敲扁，以便于后续轧制过程的顺利咬入。

#### 2.2.5 轧制实验

为了尽可能的让 Cu/DT9/Cu 叠片复合上，采用大变形量的热轧对 Cu/Fe/Cu

层合板进行轧制复合。

(1) 加热升温：在氢气保护氛围下，将 Cu/Fe/Cu 层合板，加热到 850℃，对其保温时间约为 0.5h，加热+保温总时间约为 2h。

(2) 大变形热轧：在保温 0.5h 后，用火钳取出试样后，立即对其进行轧制，以避免金属在高温时遇到空气而产生表面氧化。在轧辊没有加热的情况下进行轧制，轧制压下率设定为 50%。轧机主要参数如下：

表 2-1 轧机基本参数

轧机型号	最大轧制力	工作辊直径	轧制速度	辊面宽度
S815E2	1250KN	350mm	0.435m/s	450mm

(3) 退火：在热轧复合后的 Cu/DT9/Cu 复合材料进行了退火，退火工艺是：将轧制后的试样氩气保护氛围下加热到 450℃ 保温 30min，再加热到 600℃ 保温 60min，之后使其随炉冷却到室温取出。

## 2.2.6 后续冷轧实验

为了得到最后的产品样品，对热轧后退火后的轧件进行了多道次的冷精轧实验，以达到产品所需的尺寸。

## 2.3 复合材料的检测

### 2.3.1 力学性能检测

(1) 剪切试验：剪切试样的制备：参照 GB6396-1995，分别将已制备好的热轧 Cu/Fe/Cu 层状复合材料加工至如图 2-6 所示尺寸，用作剪切力学性能测试样，在万能拉伸试验机上对复合件进行拉伸试验，以剪切强度来表征其界面结合强度。

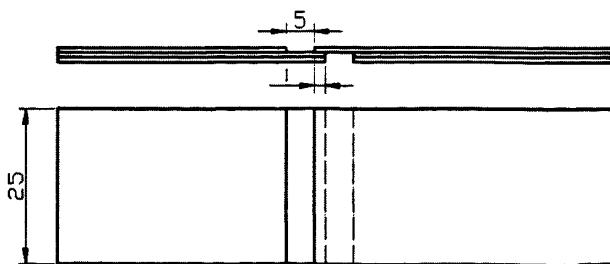


图 2-6 剪切拉伸试样

### (2) 复合材料拉伸试验

拉伸试样的制备：参照 GB6397-86，并根据我们轧后样品的实际尺寸情况，分别将已制备好的热轧 Cu/Fe/Cu 层状复合材料采用线切割至如图 2-7 所示尺寸，在万能拉伸试验机上对复合件进行拉伸试验，以测试该复合材料的抗拉强度。

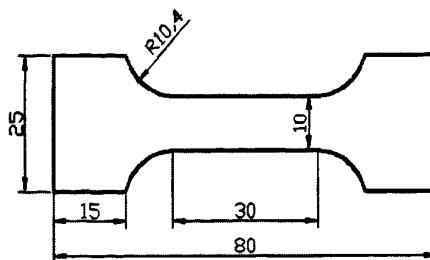


图 2-7 复合材料拉伸试样

### 2.3.2 金相实验

(1) 水磨砂纸打磨：先在复合材料取一小块样品，然后在普通金相砂纸对试样截面打磨的过程中，由于摩擦而产生的热量极易导致界面处铜和铁的氧化，故在此我们选用水磨砂纸对其截面进行打磨，以便于摩擦产生热量的散发。依次用 400、600、800、1000、1200、1500 以及 2000 号的水磨砂纸对试样截面进行打磨，在磨样时要保持样品截面的水平，不要把样品截面磨成斜面，以免对后续工作产生不利影响。

(2) 抛光：在进行过各个型号的砂纸打磨后，当目测到样品截面没有划痕并有反光效果时，则可以进行抛光。抛光时需要把握好抛光的力道，以免抛出新的划痕。必要时采用金刚石研磨膏研磨剂，以助于抛光过程的顺利进行。

(3) 化学腐蚀：配置好浓度为 30% $\text{HNO}_3$  的溶液。用镊子夹取脱脂棉，蘸取配置好的腐蚀液对样品截面进行擦蚀，同时观察其表面颜色的变化。当样品表面略显灰暗时，再过 2-3s 用水进行冲洗，然后再用酒精对其表面进行擦拭，最后快速用吹风机吹干，即制得用于金相显微观察的试样。

(4) 金相显微镜观察：用金相显微镜对试样截面进行观察，以分析 Cu、Fe 层状界面结合处的组织及形貌。

### 2.3.3 SEM 实验

在进行 SEM 观察之前，选取一小块复合材料进行制样，然后进行砂纸打磨及抛光，其过程如下：

(1) 水磨砂纸打磨：依次用 400、600、800、1000、1200、1500 以及 2000 号的水磨砂纸对试样截面进行打磨，在磨样时要保持样品截面的水平，避免把样品截面磨成斜面。在经各道次砂纸打磨的过程中，应保持磨样方向的一致，以免使样品表面产生各个不同方向的划痕。

(2) 抛光：在进行过各个型号的砂纸打磨后，当目测到样品截面没有划痕并有反光效果时，则可以进行抛光。抛光时分别采用型号 1.5、1.0、0.5 的金刚石研磨膏，同时把握好抛光的力道，以免抛出新的划痕。

(3) 扫描电镜分析：用扫描电镜对试样截面的铜铁界面进行观察，以分析 Cu、Fe 层状界面结合处的形貌；本实验还观察了剪切拉伸试验后，剪切剥离面的形貌，进一步了解其界面的结合机制。

#### 2.3.4 厚度变化测量

为了研究热轧过程中各层厚度的变化规律，对每次轧制后的复合材料的层厚进行测量，由于复合材料比较薄，必须借助显微镜观察后再进行测量，得出各层的数据。

## 第三章 实验结果分析

### 3.1 原材料力学性能分析

#### 3.1.1 无氧铜应力应变曲线

(1) 通过对原材料无氧铜进行室温拉伸试验, 获得了无氧铜在室温下的工程应力应变曲线, 以及一些强度参数, 可以为数值模拟提供材料性能曲线。

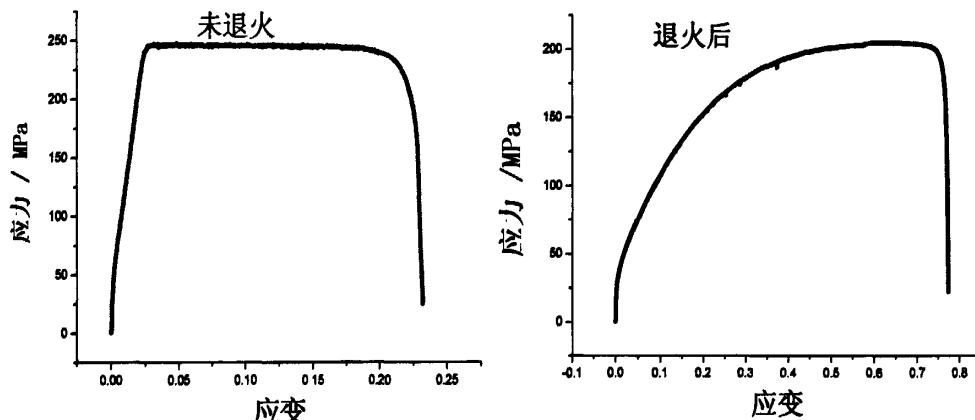


图 3-1 无氧铜退火前后应力应变曲线

表 3-1 退火前后的强度

	弹性模量(GPa)	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)
退火前	117.2	195	250
退火后	26.3	72.5	208

根据实验的数据, 可知无氧铜在退火前的屈服应力为 195MPa, 抗拉强度为 250MPa 左右; 退火后的屈服应力为 72.5MPa, 抗拉强度为 208MPa 左右。从这些数据可以了解无氧铜在硬态 (Y) 和软态 (M) 下的力学表现。

(2) 按照实验要求, 在高温拉伸试验机上进行了高温拉伸实验, 由于无氧铜极易氧化, 为了减少氧化的影响, 进行了气体保护加热, 得到了无氧铜在不同温度下的工程应力应变曲线, 如图 3-2:

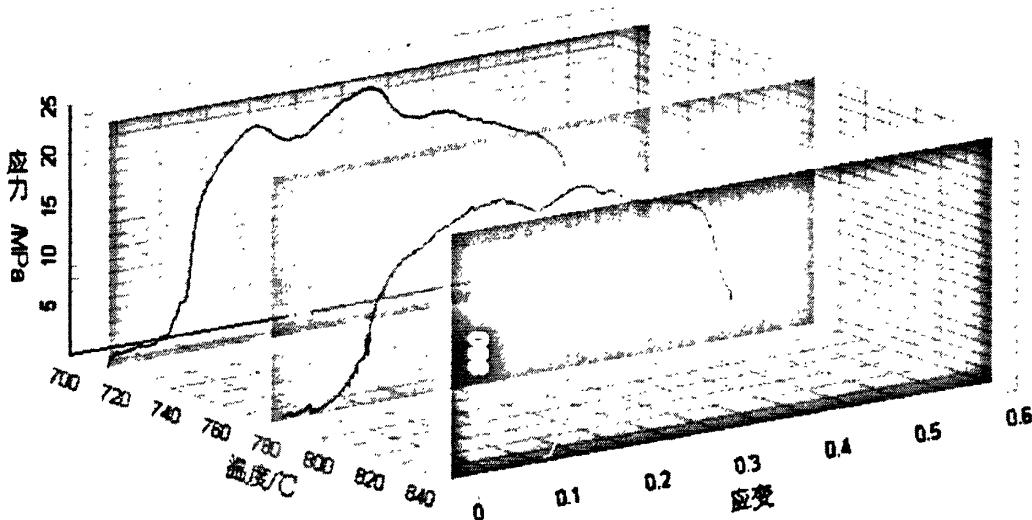


图 3-2 高温应力应变曲线

由高温拉伸曲线看出，在 $715^{\circ}\text{C}$ 的时候，应变比较小时，出现了加工硬化，当硬化达到一定程度的时候，又开始出现了软化显现，曲线出现了两个峰值，这可能是由于在拉伸过程中加工硬化与软化交替作用的结果。

无氧铜为中等层错能的金属，由于他的回复过程比较慢，在 $715^{\circ}\text{C}$ 时的拉伸过程中，动态回复未能同步抵消加工过程中的位错的增殖积累，即出现加工硬化现象，流变应力增加，在某一临界形变条件下，会发生动态再结晶。在再结晶时，大量的位错被再结晶核心的大角度截面推移而消除，当这样的软化过程占主导地位时，流变应力下降，应力应变曲线出现峰值。由于在再结晶形核和长大的同时材料继续形变，再结晶形成新的晶粒也经受形变，即硬化因素又重新增加。当新晶粒内形变达到一定程度后，又可能开始第二轮再结晶。在这样复杂的硬化和软化的叠加情况下，所以应力应变曲线就出现了两个峰值。

当温度 $780^{\circ}\text{C}$ 的时候，出现第一个峰值后，由于硬化效果和软化效果都比较弱，应力应变曲线出现了两个小峰；当温度达到 $850^{\circ}\text{C}$ 的时候，当第一轮再结晶未完成时就开始第二轮再结晶，所以在应力应变曲线出现第一个峰后，材料始终保持部分再结晶状态，应力应变曲线就平滑了。

从实验得到的应力应变曲线，经过了数据处理，得到了无氧铜的强度参数如表 3-2 所示。

表 3-2 TU1 高温强度参数

	弹性模量(GPa)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
$715^{\circ}\text{C}$	0.87	14.0	23.4
$780^{\circ}\text{C}$	0.51	12.5	18.3
$850^{\circ}\text{C}$	0.24	7.61	13.8

由以上结果可知：在高温下，无氧铜的屈服强度、抗拉强度都比较低，在这

个温度范围内，材料的塑性较好，加工性能比较好，可以为制定加工工艺提供参考。

### 3.1.2 DT9 纯铁应力应变曲线

通过室温下以及高温下的拉伸实验，得到材料在不同温度的工程应力应变曲线，得到相关参数。

在室温下，退火前后的 DT9 纯铁的应力应变曲线图 3-3；DT9 纯铁在不同高温的工程应力应变曲线如图 3-4：

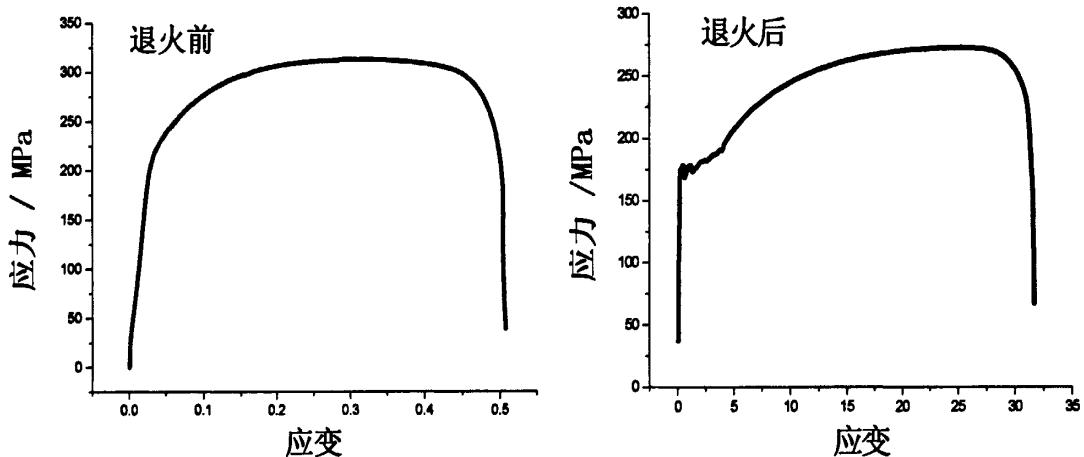


图 3-3 DT9 退火前后应力应变曲线

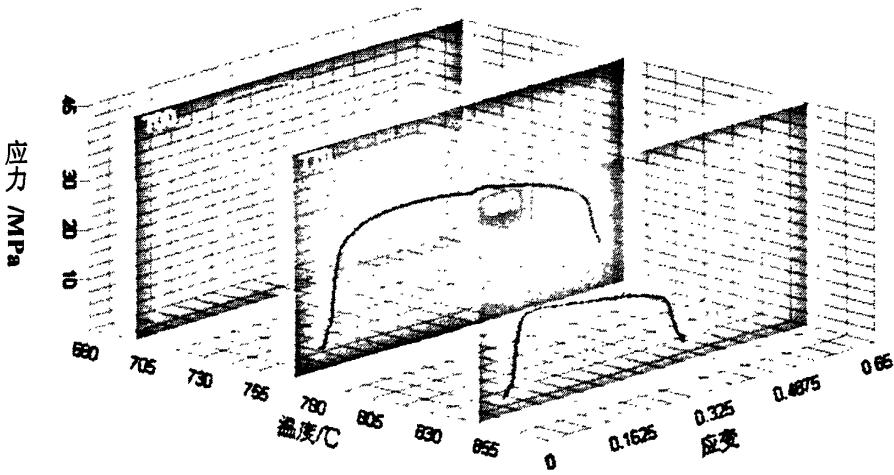


图 3-4 DT9 高温应力应变曲线

从图 3-4 可知随着温度的升高，DT9 纯铁的屈服强度和抗拉强度减小，延伸

率也降低。通过室温和高温的力学性能曲线，得到了一下强度数据，如表 3-3。

表 3-3 DT9 不同温度的强度参数

	弹性模量(GPa)	屈服强度(MPa)	抗拉强度 (MPa)
退火前	200	210	315
退火后	162	175	267
700°C	6.2	28.6	43.2
770°C	4.1	24.05	28.5
850°C	1.8	12.1	19.3

## 3.2 复合材料界面结合强度分析与讨论

### 3.2.1 界面结合强度分析

金属复合材料的热轧制备是个很复杂的过程，其中的众多工艺参数对结合强度都有影响。本论文中，采用剪切拉伸的方式测量复合板的剪切性能，然后计算单位面积上的剪切强度，以此表示复合板的结合强度。

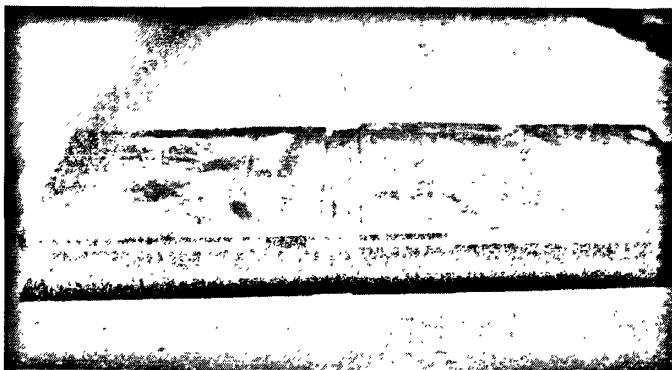
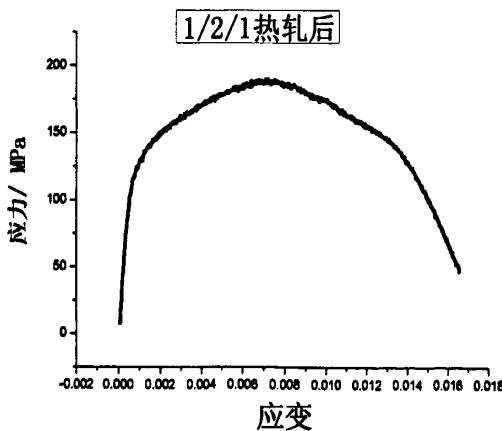


图 3-5 剪切试样实物图

通过剪切拉伸试验，得到了三组厚度不同的 Cu/DT9/Cu 复合材料的剪切拉伸工程应力应变曲线，如图 3-6。



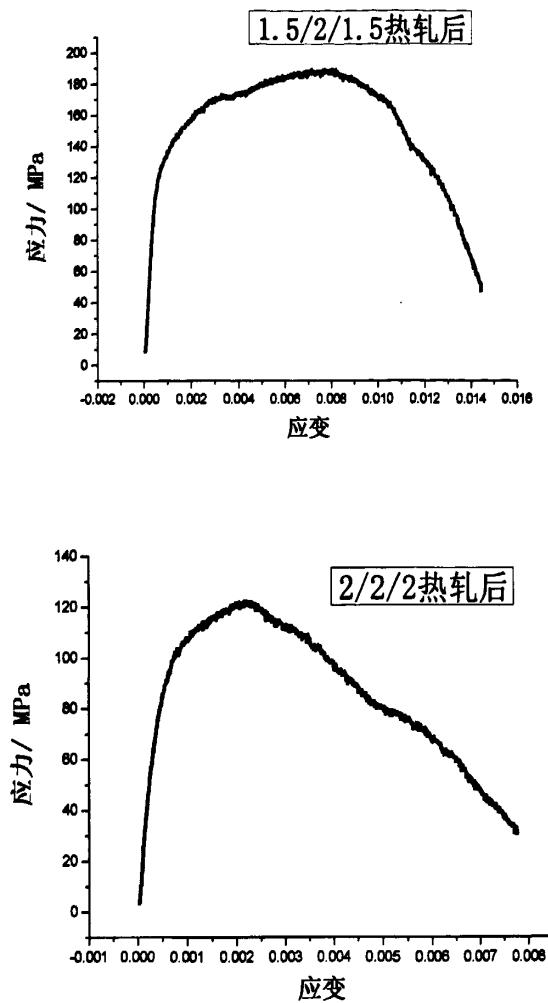


图 3-6 剪切拉伸应力应变曲线

通过实验获得了一下实验数据：

表 3-4 剪切实验数据

试样	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
1/2/1	150.8	181.5
1.5/2/1.5	158.	186.1
2/2/2	92.7	126.4

通过上面的数据可以看出，前面两组数据相差不大，第三组数据有点偏差（可能是由于试样加工的影响），但总体来说屈服应力要比退火态的无氧铜的剪切强度（约为 83.7 MPa）要高，表明复合材料已经实现很好的复合。

### 3.2.2 界面结合强度影响因素分析

在轧制复合工艺中，影响结合强度的因素很多，下面分析影响结合强度的一些主要因素，为后续优化工艺提供理论指导。

#### (1) 清洗方法对结合强度的影响

实际情况下金属表面状态是十分复杂的，暴露在大气中通常会形成一层表面

氧化层以及存在有机物或者无机物、吸附水汽等污染物质。在轧制复合的大变形过程中，表面膜就会跟随无氧铜和纯铁一起流动，阻碍铜铁接触面的结合，导致轧件在出轧辊后出现分层现象，或者降低界面结合强度。因此在进行轧制复合前，必须对金属表面进行处理，除去表面膜。

#### （2）打磨方式对结合强度的影响

不同的打磨方式，对结合强度也会产生不同影响。经过打磨后的表面越粗糙，复合材料的界面结合强度就越高，这个可以用薄膜理论来解释。该理论认为，金属间结合强度的大小只取决于金属的表面状态，只有清除掉金属接触表面上的氧化膜和污染物，变形过程中金属接触表面相互接触的时候，当间距达到原子间力的作用范围的时候，两种原子形成金属键，才能实现复合。硬而脆的氧化膜在金属变形过程中挤压破碎，暴露出里面的清洁新鲜金属层，接触表面越不规则越粗糙，其表面的氧化膜破碎程度就越厉害，能够实现金属键结合的地方就更多，相对来说界面结合强度会越高。

#### （3）热轧温度对结合强度的影响

轧制温度是影响界面结合强度的一个重要因素，不仅对轧后的结合强度有影响，同时也对退火后的结合强度有影响。随着轧制温度的升高，金属表面氧化的趋势将变严重，从而使金属表面之间的物理接触面积减少，导致降低了复合材料的界面结合强度。另一方面，轧制温度的升高也将促使金属材料的回复和再结晶导致金属软化，轧制过程中接触表面的塑性变形增加，氧化膜破坏更严重而提高了界面结合强度。所以有必要采用气氛保护加热，可以解决温度升高时加重表面氧化而降低结合强度的问题。

#### （4）压下率与结合强度的关系

压下率对界面结合强度也有重要的影响。当总变形量的增加时，复合材料的结合强度将提高。这个观点也可以从薄膜理论中得到解释。在双金属接触变形过程中，接触表面新鲜金属的结合是实现结合的主要方式，当接触表面新鲜金属暴露越多时，新鲜金属接触面积越大，接触结合点便越多，所以结合强度会越高。其主要原因是：压下率增加的时候，双层金属表面硬化层表面产生的裂口会越多越长，接触表面的新鲜金属暴露越多，相互接触面积越大，接触结合得越充分，所以结合强度就会越高。

#### （5）退火温度与结合强度的关系

选择适合的退火温度，对结合强度有很重要的意义。在退火过程中，有可能会出现两个提高结合性能的现象。第一个现象是：在高温下异类金属原子通过结合界面相互扩散进入对方基体，而且诱导晶界的迁移，在结合面附近的原子形成金属键有更多的机会。第二个现象是：金属基体再结晶的发生，使一些原子晶

格重新排列，晶界发生迁移，晶体缺陷分布状况发生明显变化，原子运动会导致在结合面附近形成更多的共有晶界或者重合点阵，结合面由原来的物理结合状态向冶金结合状态过度。本文退火温度在无氧铜的再结晶温度范围内，如果退火温度进一步升高，会导致界面处得晶粒粗化，因而，结合强度会下降。

### 3.3 复合材料界面结合机理分析

金属固相复合材料的复合机理十分复杂，长期以来许多研究学者为此做了很多的探索研究，但到现在为止，还有许多复合机理没有被揭示和了解，还没有形成全面、系统的理论。在理论的发展进步中，许多学者从不同角度提出了不同的结合机理，主要理论有金属键理论、再结晶理论、薄膜理论、能量学说、扩散理论等，这些理论促进了复合材料的发展。

本文采用光学显微镜对 Cu/DT9/Cu 复合板的结合界面进行了观察，采用扫描电镜(SEM)对复合板剪切拉伸后的表面形貌进行观察，以及界面元素的扩散情况进行了分析。据此，对 Cu/DT9/Cu 轧制复合板的复合机理进行了分析探讨。通过分析界面结合机理，可以更好的指导轧制工艺，并且采取有效手段提高复合材料的结合强度。

#### 3.3.1 金相组织观察

通过对热轧复合制备了 Cu/DT9/Cu 复合材料，在经过退火后对复合材料进行了金相组织观察，得到铜铁界面的金相图 3-7。

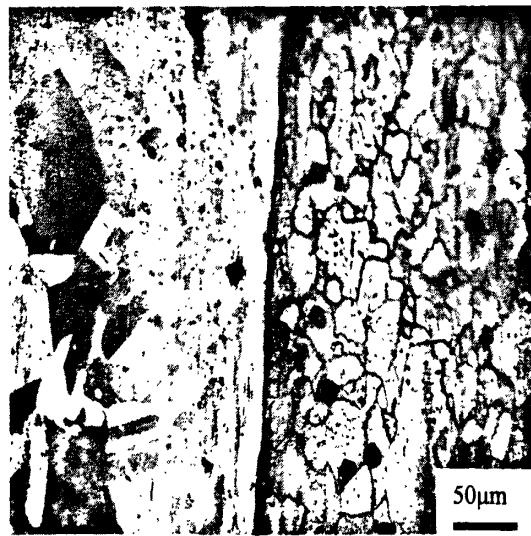


图 3-7 铜铁复合界面金相图

图 3-7 为热轧复合材料界面结合处的沿轧制方向的金相照片。从照片中可以得知，左边铜层的金相组织为  $\alpha$  单相组织，在退火后晶粒比较大，由于无氧铜 TU1 的再结晶温度为  $550^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ ，经过退火后，发生了再结晶导致晶粒变大。从右边的铁层可以看到，主要组织为铁素体加三次渗碳体，界面附近的晶粒比较

小，中间部分的晶粒沿着轧制方向有点变扁；由于 DT9 的退火温度在 900℃左右，退火温度没有达到铁的再结晶温度，晶粒没有长大。在铜铁的界面处，铜层与铁层之间并没有明显的过渡层，而且界面不是很清晰，这有可能是由于界面存在氧化物，腐蚀后，界面变成了黑色。

### 3.3.2 复合界面 SEM 观察

为了分析 Cu/DT9/Cu 复合材料界面复合机理，通过扫描电镜显微分析，得到了复合材料铜铁界面处不同倍数的背散射扫描照片，如图 3-8。

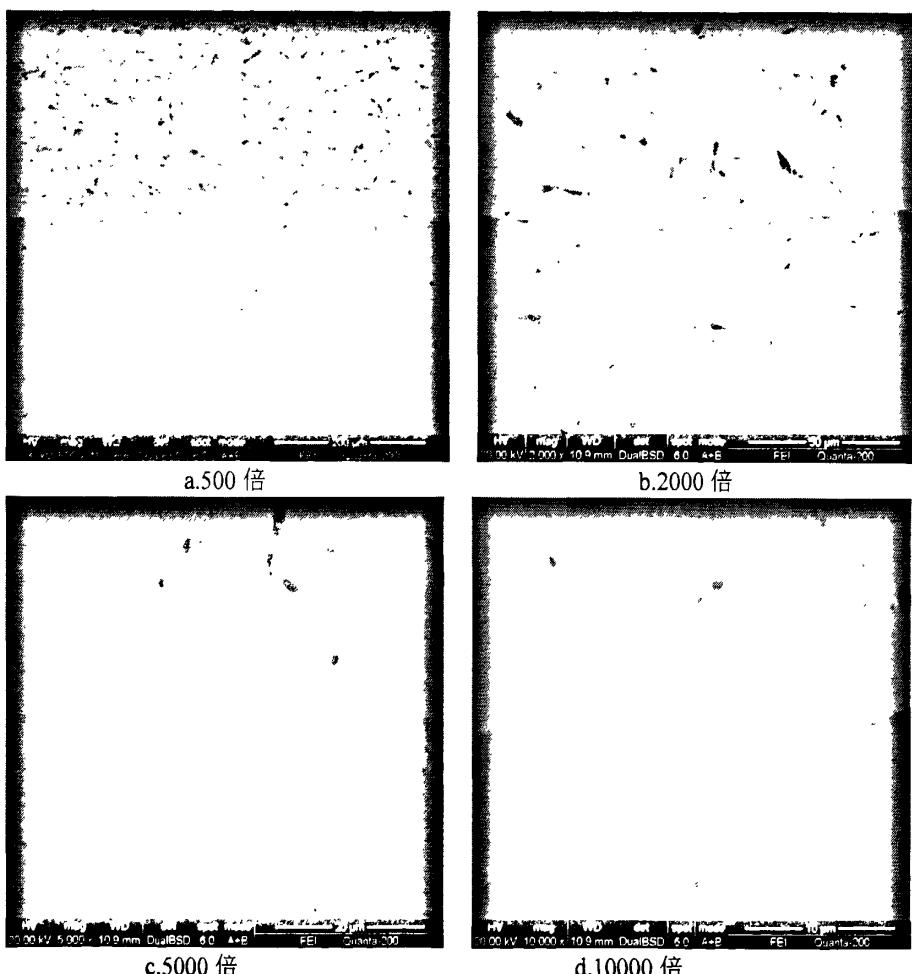


图 3-8 铜铁复合界面 SEM 形貌 上面是铜层，下面是铁层

根据前期大量的实验和查阅资料，本文认为，在铜铁的轧制复合过程中复合机理基本符合三阶段理论，即铜铁复合过程是由铜铁表面的物理接触阶段、接触表面的结合阶段、扩散阶段组成。

#### (1) 物理接触阶段

在通常情况下，金属表面经过钢刷打毛或者化学清洗后将迅速被吸附膜、氧化膜所覆盖，只有除掉这层表面膜，才能形成真实的物理表面接触。现在

采用的各种表面处理手段，主要是人为地在金属表面形成硬而脆的表面层，表面膜的存在阻碍了金属结合，在轧制变形过程中表面层发生挤压破碎，异种金属相互接触、结合，达到金属的实际物理接触。图 3-8 所示即热轧后复合板铜铁界面不同倍数的行貌。当倍数小的时候，如图 3-8a，复合界面还是比较平直的，随着倍数的放大，如图 3-8b 和图 3-8c，可以发现复合界面凹凸不平，可以看到有铁层与铜层有相互嵌插，形成了犬牙状，发生了相互结合。此阶段对应的是薄膜理论。

### (2) 接触表面结合阶段

在热轧刚开始的时候，铜铁发生实际物理接触后，所产生的结合力还比较小，还不能实现表面原子间的牢固结合。随着轧制的进行，接触表面原子的能量达到一定程度而被激活，使原来的弱化学键断裂，接触表面原子间的电子产生相互作用，最后形成牢固的金属键。此阶段对应的是金属键理论。

### (3) 扩散阶段

图 3-9 所示为退火后铜铁复合界面的能谱分析。从能谱图上可以看到，左边是铜层（绿线），右边为铁层（蓝线），但铜层和铁层之间没有出现明显的过渡层，也就是说，退火后铜层和铁层之间没有明显的扩散。通过对含氧量的能谱扫描（红线），可以得知，铜铁复合界面含有一定成分的氧，这可能是界面氧化的结果。由于复合结合面上存在氧化，而氧化层在退火过程中将阻碍结合面附近的金属原子的相互扩散，所以没有出现铜铁的过渡层，说明在退火过程中，铜铁原子没有发生扩散。退火只是提供结合面原子实现相互扩散的动能，使缺陷消失，导致内应力得到松弛和塑性得到恢复，提高材料的加工性能。

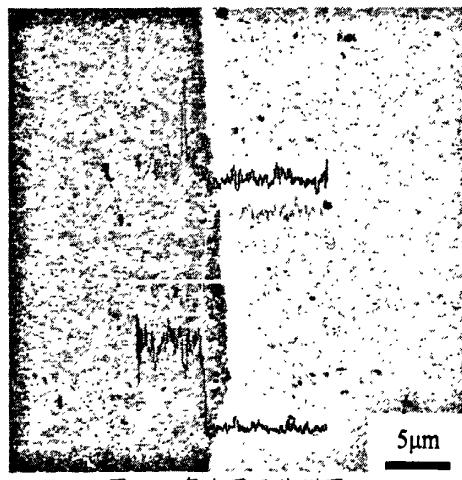
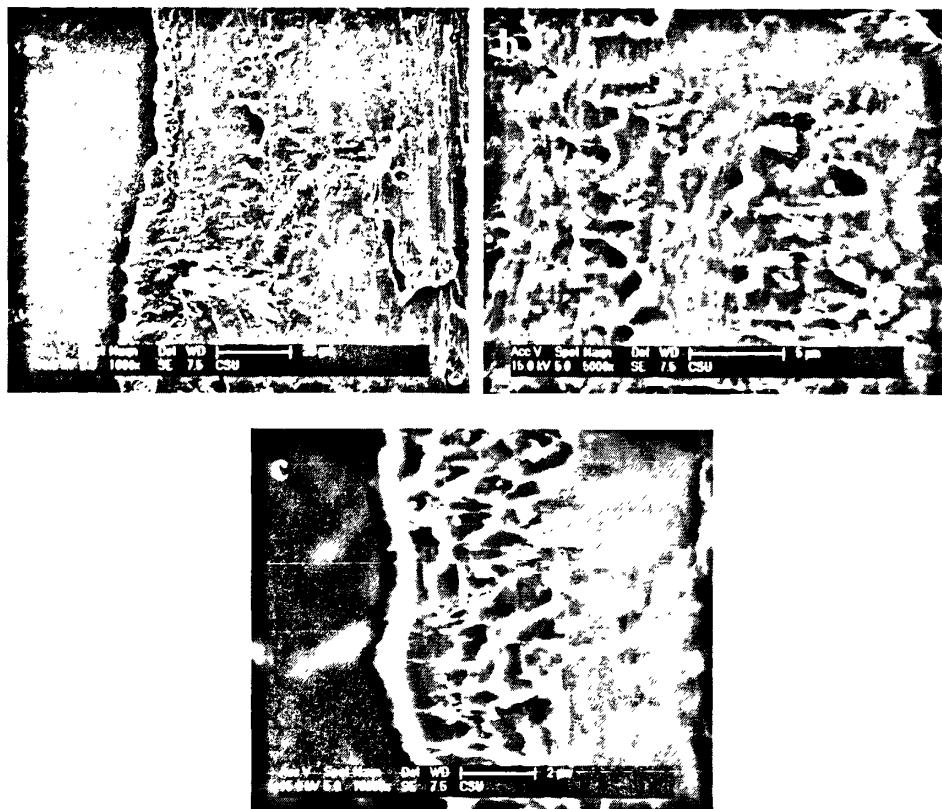


图 3-9 复合界面能谱图

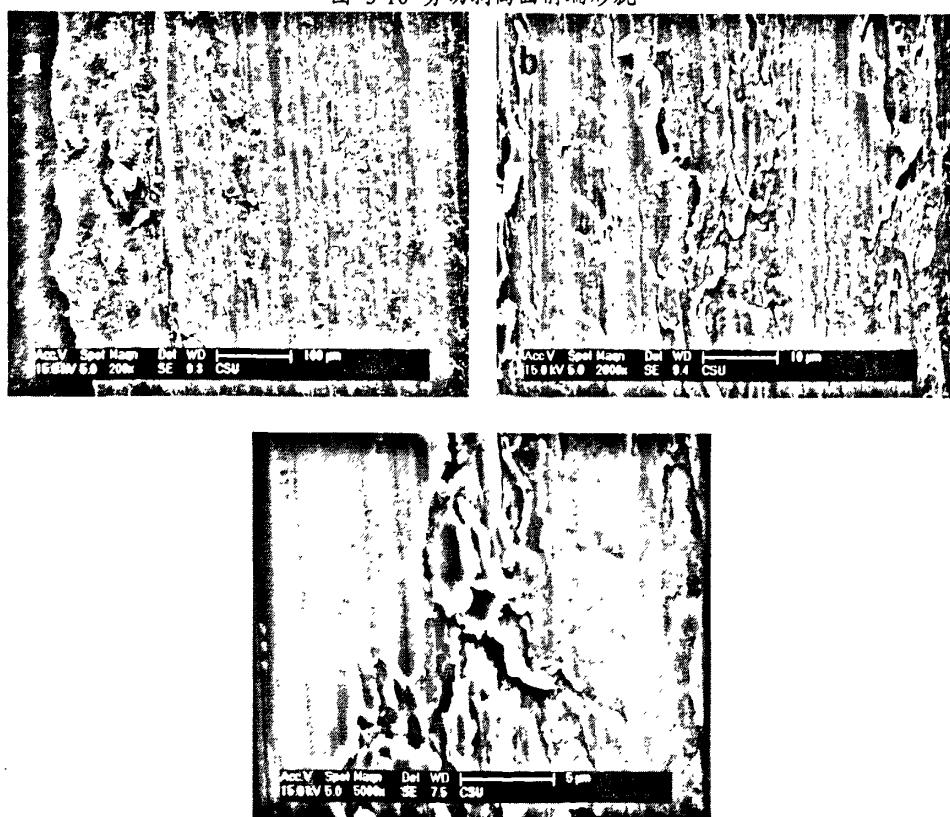
### 3.3.3 剪切拉伸剥离面形貌

通过剪切拉伸后的剥离面形貌也可以对复合材料结合机理进行分析讨论，经过扫描后得到了铜层剥离面的前端和后端的形貌图，如图：



a、b、c 分别为 1000、5000、10000 倍

图 3-10 剪切剥离面前端形貌



a、b、c 分别为 1000、5000、10000 倍

图 3-11 剪切剥离面后端形貌

从图 3-10 不同倍数的图片可以看出，前端有明显的撕扯痕迹，表面还有微孔，这是由于铜铁界面打毛后，在轧制过程中相互嵌插，这也可以由薄膜理论得到解释。因为轧制前的表面清刷处理使铜铁的接触表面都有一层薄的硬化层，铜的硬化层在轧制时与铜基体的关联遭到破坏，硬化层的塑性差，不能与基体一道变形，当铜层发生延伸变形时，硬化层产生破碎。而此时铜和铁两种金属在大压力下，由于铜较软而铁较硬，且铜在轧制过程中发生很大的延伸，铁被压入铜表面的裂缝中，致使剥离后的铜面有些铁粒的凹坑。从图 3-11 中不同倍数图片可以看到，剥离面后端有明显的纵向划痕，说明在拉伸剪切的过程中，铜层和铁层之间发生了纵向滑移。由薄膜理论可知，铜铁复合界面有相互嵌插而结合，在滑移的过程中产生了表面的断层。

从实验结果和上述的分析过程，Cu/DT9/Cu 复合的机理可概述为：在热轧时铜铁的表面层破裂，形成真实物理接触，在高温高压的影响下，表两原子被激活，而使新鲜质点间产生金属键结合。

### 3.4 复合材料强度分析

通过三组厚度不一样的复合材料退火后的拉伸实验，拉伸后的试样实物图如图 3-12 所示，同时到了三组复合材料的力学性能曲线，如图 3-13：

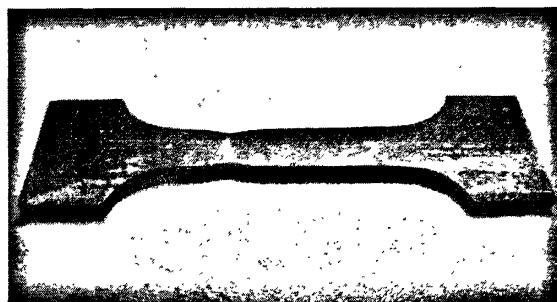
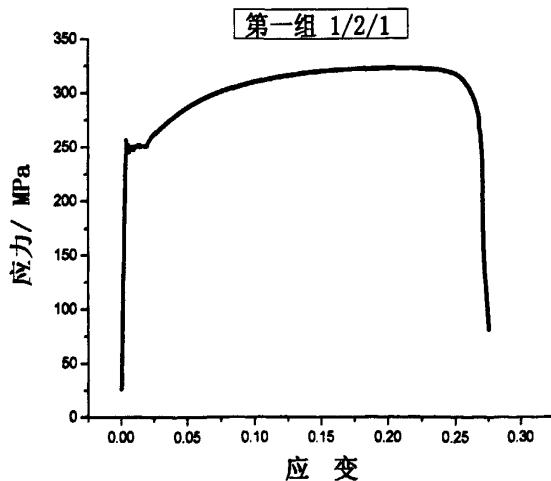


图 3-12 复合材料拉伸后实物



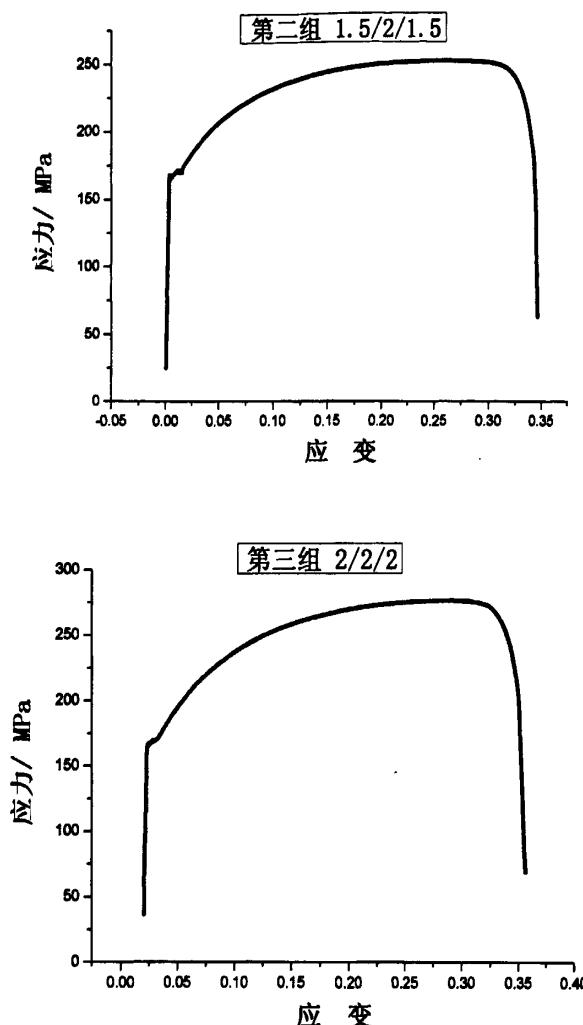


图 3-13 三组复合材料拉伸应力应变曲线

通过拉伸实验得到了复合材料的强度参数：

表 3-5 复合材料拉伸数据

试样	屈服应力 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
第一组 1/2/1	250.2	312.5
第二组 1.5/2/1.5	170.6	246.3
第三组 2/2/2	166	268.1

由表 3-5 拉伸数据可知，后两组的数据相差不大，第一组的数据偏差比较大。后面两组数据的屈服应力介于退火态的无氧铜 (72.5MPa) 和纯铁 (175MPa) 之间，由此可知，铁层有效的保证了复合材料的强度。

### 3.5 层厚变化规律分析

层状复合材料已经广泛的应用于各个领域，一些层状复合材料的性能很多时候取决于成品材料的层厚比关系，但是不同材料进行轧制复合的时候，由于两种

金属的材料不同，力学性能也不同，所以无论是各自的厚度还是厚比都在实时的发生变化。对于实际应用，双金属任何一层的最终厚度都有精确的要求，因此，研究双金属复合轧制过程中的层厚比问题有着至关重要的意义。

本文通过热轧和冷轧实验，首先分析 Cu/DT9/Cu 层状复合材料在 50% 的压下率下进行热轧复合时，各层的厚度变化规律；然后分析了后续冷轧的厚度变化规律。

### 3.5.1 第一道次热轧层后厚变化

通过第一道次 50% 压下量的热轧实验，经过对厚度的测量，截面图如图 3-14，得到各层厚度及其所占总厚度的百分比和总厚度的数据，如下表 3-6：



图 3-14 热轧后复合材料实物截面

表 3-6 热轧实验厚度变化

	第一组		第二组			第三组			
	Cu	Fe	Cu	Cu	Fe	Cu	Cu	Fe	Cu
厚度百分数	25%	50%	25%	30%	40%	30%	33.3%	33.3%	33.3%
原始	1	2	1	1.5	2	1.5	2	2	2
总厚			4		5			6	
厚度百分数	25.0%	50.0%	25.0%	29.6%	40.7%	29.6%	32.4%	35.3%	32.4%
轧后厚度	0.5	1	0.5	0.74	1.01	0.74	0.97	1.05	0.97
总厚			1.96		2.50			3.0	

从上表可以看出，第一道次热轧后，各层厚度所占总厚度的百分比和原来相差不大，第一组样各层的压下量基本上是 50%，即占总厚度的 25%，这主要是因为铜层和铁层经过铆合之后，变形相互制约，在厚度相同的情况下，变形量趋于一致，这也说明在铜和铁已经实现很好复合；而第二组和第三组铜层的压下量超过 50%，铁层的压下量没有 50%，主要原因是铜层变厚之后，由于铜层变形的空间增加，与铁的相互制约效果不如第一组好，导致铜层压下率超过 50%，而铁层的压下量就低于 50%，但总的来说，两者变形率相差不大。

### 3.5.2 后续冷轧层厚变化

在第一道次热轧后，后续进行了多道次的冷轧，通过光学显微镜对厚度进行了观察和测量，如图 3-15，经过测量得到的数据为表 3-7。

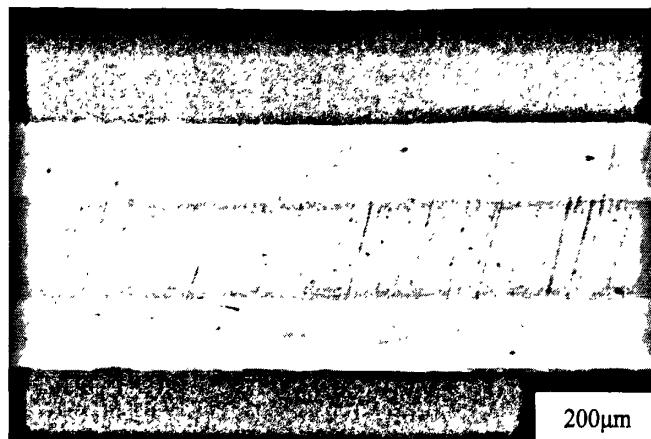


图 3-15 冷轧后厚度观察

表 3-7 冷轧厚度变化数据

试样分组	第一道复合热轧		中间冷轧减薄		中间冷轧减薄		最后冷轧减薄	
	压下量	厚度	压下量	厚度	压下量	厚度	压下量	厚度
第一组	Cu	25%	0.49	25.5%	0.26	25%	0.12	24.7% 0.05
	Fe	50%	0.98	50%	0.51	50.9%	0.24	51.5% 0.11
	Cu	25%	0.49	24.4%	0.248	24.1%	0.12	23.8% 0.05
	总厚		1.96		1.02		0.48	0.21
第二组	Cu	29.6%	0.74	29.8%	0.32	29.7%	0.15	29.4% 0.06
	Fe	40.7%	1.02	37.7%	0.39	41%	0.21	42.9% 0.09
	Cu	29.6%	0.74	31.0%	0.32	29.3%	0.15	27.7% 0.06
	总厚		2.48		1.03		0.51	0.21
第三组	Cu	32.4%	0.972	32.2%	0.32	31.8%	0.15	33.8% 0.08
	Fe	35.3%	1.059	35.6%	0.36	35.2%	0.17	32% 0.07
	Cu	32.4%	0.972	32.3%	0.32	33%	0.16	34.2% 0.08
	总厚		3.0		1.0		0.48	0.23

通过上表的数据分析可知，在随后的冷轧过程中，各层每道次的压下率趋于一致，这就表明通过热轧后，Cu/DT9/Cu 叠层材料实现了很好的复合。这是因为在热轧复合后，两组元已相互粘结，形成了牢固的金属键，此时它们相互粘结约束，即铜层的变形受到了铁层的制约，结果使两组元变形趋于一致，以相同的速度出口。两种金属层厚比变化比较小，每道次之间厚度变化在 1.0% 左右，累计变化最大的为 1.4%。

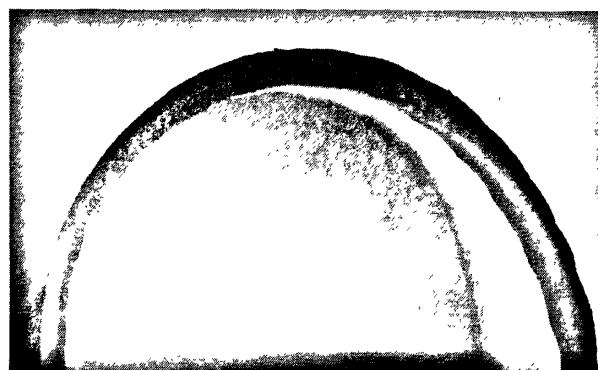


图 3-16 厚度为 0.21mm 的样品实物

从上图 3-16 可以看出，当冷轧到 0.21mm 时，Cu/DT9/Cu 复合材料没有出现分层现象，也说明复合材料复合得相当好。通过三组厚度不同的热轧复合以及后续冷轧减薄，发现第二组实验（Cu/DT9/Cu 厚度为 1.5/2/1.5）制备的复合材料最后的层厚比关系与我们所需的产品尺寸（Cu/DT9/Cu 厚比为 5/8/5）相近，制备的复合材料的最终厚度为后续加工保留了加工余量，符合产品的厚度要求（ $0.18\text{mm}\pm0.01$ ）。

### 3.5.3 厚度变化的影响因素

金属板的变形抗力是决定轧制力的主要因素，也是影响复合板厚比分配的主要因素。双金属轧制复合中，各层金属屈服极限不同，要实现对厚度变化的控制，要满足轧制力相等的条件，要适当的选择各层金属的压下率、和轧制初速度，增加复合面之间的摩擦也会提高厚比的精确性。

## 3.6 复合材料几何精度分析

层状复合材料的平整度和平行度不仅对复合材料的性能有很大的影响，而且对后续的加工也有很大的影响。平整度主要是指轧后复合材料的表面凹凸状况，如凹坑、瑕疵等缺陷，弯曲程度等。平行度就是层状复合材料层间的厚度偏差，也可以说是铜铁复合界面的弯曲程度。

本文通过对 Cu/DT9/Cu 复合材料截面的放大观察和测量，如图 3-17，由图可知，由于是平辊热轧复合，轧后的复合材料上下表面比较平整，但是由于热轧时，铜表面难免的会有一些氧化物或者是轧辊表面的赃物等，还是有一些微小的凹坑，缺陷深度在  $10\mu\text{m}$  左右，满足产品要求（小于  $20\mu\text{m}$ ）。

平辊轧制复合相对于其他的复合方法，层间的平行度对是最好的。通过对下图 0.22 厚度复合材料的界面线的观察，放大 500 倍后，发现铜铁复合界面有微小的波浪弯曲；通过对厚度的测量，得到了中间铁层厚度的偏差，即最大厚度减去最小厚度，约为  $8.6\mu\text{m}$ ，在产品要求范围之内（小于  $10\mu\text{m}$ ）。

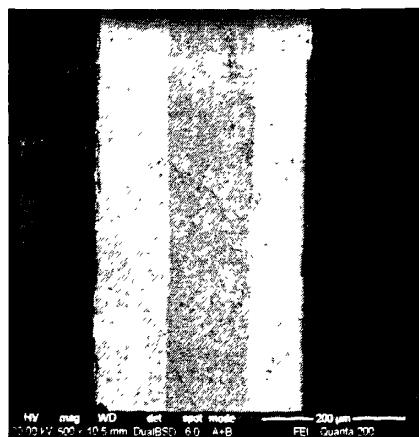


图 3-17 平整度观察图

### 3.7 本章小结

本章通过三组厚度不一样的 Cu/DT9/Cu 的热轧和冷轧实验，主要结论有：

(1) 得到了 Cu/DT9/Cu 层状复合材料，并且对退火后复合材料的结合强度进行了检测，得到三组实验结果相差不大，结合强度在 155MPa 左右，并且还分析了结合强度的影响因素。

(2) 对复合材料的拉伸性能进行了试验，三组复合材料的屈服强度在 175MPa 左右，抗拉强度在 250MPa 左右。

(3) 通过对铜铁复合的机理进行了分析，Cu/DT9/Cu 的复合机理可以概述为：在热轧时铜铁的表面层破裂，形成真实物理接触，在高温高压的影响下，表两原子被激活，而使新鲜质点间产生金属键结合。

(4) 本章分析了轧制过程的铜铁层厚变化关系，发现铜层和铁层变形率趋于一致；通过最终复合材料的层厚测量，发现 Cu/DT9/Cu 原始厚度为 1.5/2/1.5 的复合材料层厚比关系符合产品精度要求。

(5) 通过对最终得到的 Cu/DT9/Cu 复合材料的平整度以及平行度的分析，得知表面缺陷深度大约 10 $\mu\text{m}$ ，中间层厚度偏差大约为 8.6 $\mu\text{m}$ ，符合产品要求。

## 第四章 热轧数值模拟

现代制造业离不开现代塑性加工技术，有限元模拟技术为现代加工技术提供了科学依据<sup>[47]</sup>。随着计算机辅助分析（CAE）的广泛应用和计算机能力的飞跃发展，数值模拟技术成为科研和工程问题的有效解决方法。计算机技术与塑性加工理论分析方法的结合使金属成型从过去以经验和知识为依据的工艺技术阶段向以模型化、最优化和柔性化为特征的工程科学阶段过渡，借助于计算机这个有力的工具，人们可以对生产中的金属成型过程进行计算机过程模拟、可视化结果分析、工艺优化等，使有限元方法在全面深入揭示金属塑性变形行为方面成为最理想的理论分析方法。

### 4.1 高性能计算平台

众所周知，现代高新技术领域的发展和创新依赖于理论、实验和计算三大科学研究手段进步，开展科学与工程计算的高性能计算软、硬件设施及其技术的先进程度，已经成为衡量一个国家科学技术研究、产品研发实力和创新能力的重要标志之一。近年来，高性能计算作为大规模 CAE 应用的基石，在工业和制造业领域的应用越来越普遍和广泛。高性能计算的应用，大大提高了有限元方法的计算效率和计算精度；而且依靠它强大的计算能力，参数的设置也可以越逼近真实的生产过程。在材料成型的有限元模拟中，其模型复杂、高度非线性、大变形导致网格畸变重划等，需要耗费大量的计算时间。基于高性能计算平台，有限元法计算量大、计算时间长的难题得到解决，可大大缩短新产品新工艺的开发周期和开发成本，使金属成形仿真技术已经进入一个高效、实用的新阶段。

自从计算机诞生以来，人们对高性能计算的追求一直没有停止过。科学和工程计算中对计算性能的提出了无限需求，似乎一直在不断冲破和超越摩尔定律的梦想。高性能计算经历了向量机、大规模并行处理机时代，目前，采用刀片服务器通过高速计算网络互联而组成的计算集群（Cluster）在高性能计算领域占据绝对主导地位，未来的网格计算、云计算时代也初见端倪。

高性能计算集群（HPCC：High Performance Computing Cluster）是计算机科学的一个分支，以解决复杂的科学计算和工程计算问题为目的。HPCC 硬件一般由刀片服务器、高速计算网络、管理网络、海量存储以及 KVM 等输入、输出设备组成，我们可以进一步将其简化成由一台登录管理计算机（一般为机架式服务器）和多台节点计算机（一般为刀片服务器）通过高速计算网络构成的一种松散耦合的计算节点集合，为用户提供高性能计算、网络请求响应或专业的应用程序服务，如并行计算（Parallel Computing）、数据库和 Web 等服务。集群系统

中的多台刀片服务器节点通过相应的硬件及高速网络互联，由软件控制将复杂的问题分解开来，分配到各个刀片计算节点，每个集群的刀片计算节点独立运行自己的进程，这些进程之间可以彼此通过消息传递接口（MPI: Message Passing Interface）通信，共同读取统一的数据资源，协同完成整个计算任务，以多台计算节点共同并行运算的模式来换取较少的计算时间。对用户而言，HPCC 就像是个单一系统，为用户提供单一客户视图。相比起传统的小型机，HPCC 有极强的伸缩性，在不影响原有应用与计算任务的情况下，可通过在计算集群中增加或删减刀片计算节点的方式，随时增加和降低系统的处理能力。还可以通过人为分配和调度的方式，将一个大型集群系统分割为多个小型集群，分配给多个不同的用户使用，运行不同的计算作业和开展不同的应用。

## 4.2 热轧模拟

金属薄板热轧成形过程是一个复杂的高度非线性弹塑性大变形过程，既有材料非线性、几何非线性，又有边界条件的非线性，对计算软件和计算机能力有较高的要求。本文应用杰出的非线性仿真有限元软件 ABAQUS 首次对 Cu/Fe/Cu 薄板热轧复合进行模拟。基于高性能超级计算机平台，通过对三组厚度不同的 Cu/DT9/Cu 的复合热轧，获得了轧制过程的应力应变场和温度场，以及各层材料在轧制过程厚度变化关系，为产品提供良好的厚度预测，同时为轧制工艺的制定提供了理论依据。

有限元数值模拟技术主要包括前处理、求解、后处理三大步骤，前处理主要有几何建模、材料定义、网格划分、边界条件、求解定义几个模块。

### （1）几何模型

根据复合轧制的工艺和方法和有限元理论，在 ABAQUS/CAE 前处理界面建立起三维有限元模型，由于对称关系模型，采用四分之一模型以减少计算量。三组 Cu/DT9/Cu 初始厚度分别为 1/1/1, 1.5/2/1.5, 2/2/2 (单位 mm)。取对称关系后，铜片和铁片的长宽分别为 100、30mm。轧辊采用刚性面进行简化，几何参数如下：轧辊直径：300mm，辊面宽度为 40mm；其中一组厚度为 1.5/2/1.5 的三维和二维视图如图 4-1 所示。

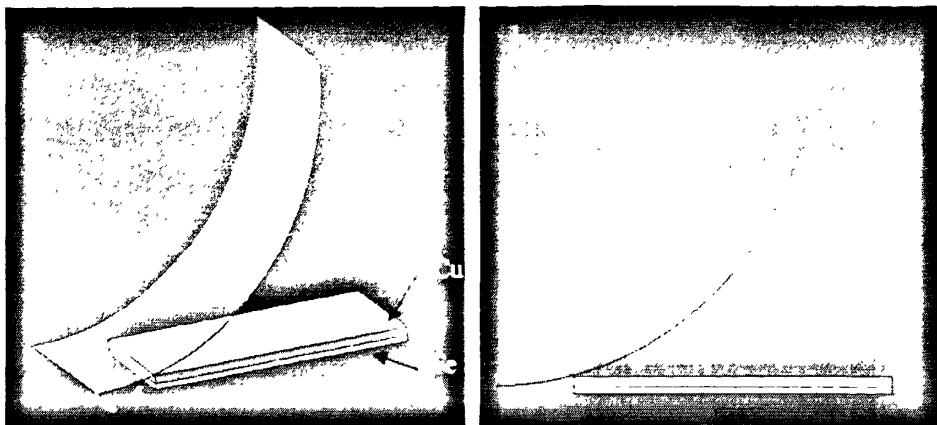


图 4-1 几何模型 a 为三维图、b 为二维视图

### (2) 材料属性定义

根据热轧成型工艺，同时根据软件的要求，需要定义材料的高温真实塑变曲线，以及一些热物性参数。根据前面第二章的工程应力应变的实验数据，转化成真实的应力应变曲线，根据公式：

$$\varepsilon_{Tr} = \ln(1 + \varepsilon_{en}) \quad \text{公式 (4-1)}$$

$$\delta_{Tr} = \delta_{en} \times (1 + \varepsilon_{en}) \quad \text{公式 (4-2)}$$

公式中  $\varepsilon_{Tr}$ 、 $\delta_{Tr}$ 、 $\varepsilon_{en}$  分别是真是应变、真实应力、工程应变。根据得到的数据直接导入 ABAQUS 软件，完成对材料的定义。

### (3) 网格划分

由于模型比较规则，全部划分为六面体单元，单元种类为 C3D8RT，由于轧辊是为解析刚体，不需要划分网格。由于铜层的变形比较大，网格比铁层要密一些，其二维有限元模型如图：

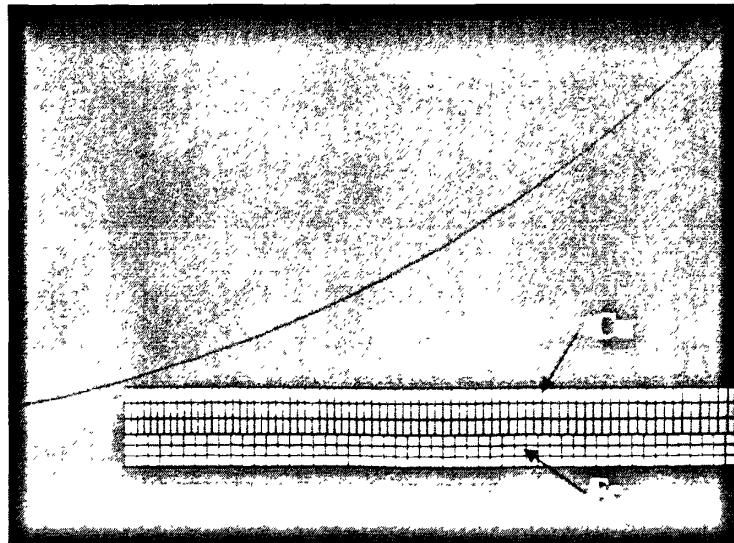


图 4-2 有限元模型

#### (4) 边界条件

由于是热力耦合模拟，边界条件比较复杂，为了更真实的模拟热轧实验，根据实验的条件和前期观察，在进行数值模拟的时候，铁和铜前端接触面的一条线采用共节点处理，使在轧制过程中各层不会分离（效果和实验时一样）；其他边界条件见表 4-1：

表 4-1 边界条件

压下率	50%
轧辊速度	50mm/s
板料初始速度	40mm/s
轧辊与铜板摩擦系数	0.3
轧辊初始温度	25°C
铜铁板料的初始温度	850°C

本文通过给板料 40mm/s 的初始速度，与轧辊接触后在摩擦作用下板料咬入发生变形，铜和轧辊之间的摩擦系数为 0.3，摩擦采用罚摩擦模型，罚摩擦公式适用于大多数接触问题，包括在大部分金属成型过程（如冲压、锻造、旋压成型过程等）仿真模拟的应用。辊的转速为 50mm/s，压下率为 50%，轧辊初始温度为室温 25°C，板料的初始温度为 850°C。

热边界条件在实际环境中有点复杂，传热系数在不同环境下也有很大的变化。在通常情况下，接触热传导系数为  $15\sim25 \text{ kw/m}^2\cdot\text{C}$ ，对流换热系数为  $0.02\sim0.04\text{kw/m}^2\cdot\text{C}$ 。在本文的所有算例中，由于变形速度较快，且时间短，对流换热系数取  $0.03\text{ kw/m}^2\cdot\text{C}$ ，常接触热传导系数取  $20\text{ kw/m}^2\cdot\text{C}$ 。

#### (5) 求解设置

由于模型网格比较细小，而且是高度非线性耦合分析，计算量很大，所以把轧制过程看作是准静态过程，忽略变形过程的惯性效应，采用动态显式算法 ABAQUS/Explicit，这与采用 ABAQUS/Standard 隐式算法相比大大提高了计算效率和收敛速度并能保证计算精度。由于是大变形问题，使用 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)自适应网格技术<sup>[48]</sup>来避免求解过程中的网格畸变，保证求解的顺利进行。由于实验备料规格比较小，整个模拟时间为 1s，与实际时间相符。采用了认为增大增量步的技术来节省时间，即采用质量放大技术，只要板料的动能和内能之比很小（一般小于 5%），可以认为质量缩放技术是合理的。

### 4.3 作业提交与计算

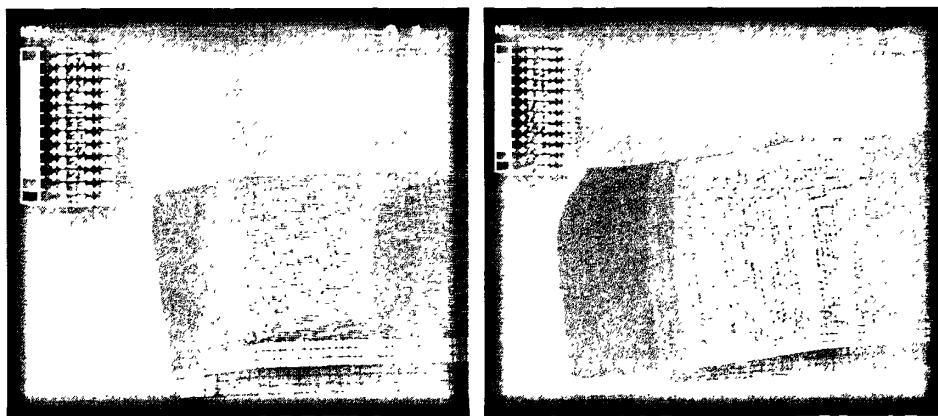
在前处理完成后，进行数据检查后，输出 INP 格式计算文件，然后准备提交计算。利用 SSHSecureShellClient 软件远程登录高性能计算中心，上传计算所需的 INP 文件到用户目录下，编辑 PBS 文件，定义所需节点和 CPU 数量等一些信息，然后提交 PBS 文件即可计算。高性能计算平台是基于 64 位 Linux 系统的计算机集群（HPCC），各节点通过信息传递接口（MPI）通信，共同读取统一的

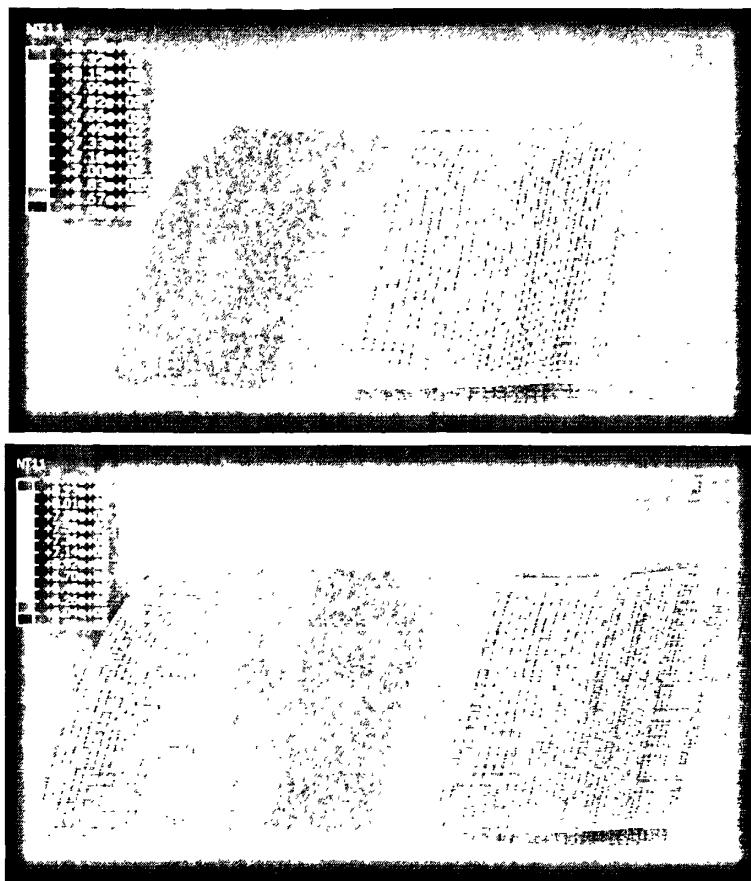
数据资源，以多台计算节点共同并行运算协同完成整个计算任务，相对于 Windows 系统大大提高了计算效率，提高了计算精度和缩短了计算时间。计算完成后，从远程服务器下载结果文件到本地计算机，进行结果分析。

## 4.4 结果分析

### 4.4.1 温度场分析

在现实轧制过程中，很难对轧件的温度场进行监控，通过数值模拟，可以很好的对轧制过程的温度变化有个很好的认识，可以为轧制工艺提供良好的理论依据。本文通过对热轧过程的数值模拟，得到了热轧过程温度场的变化，图 4-3 就是轧制过程  $t=0.1、0.2、0.3、0.5\text{s}$  的温度云图。轧制刚开始的时候，轧件温度是  $850^\circ\text{C}$ ，由图 4-3a 可以看到，板料刚开始接触轧辊的时候，由于轧辊温度较低，接触的导热系数较大，与轧辊接触的地方，铜层的温度下降比较明显，而其他地方，由于有散热影响，表面对流系数不大，所以温度变化不是很大。随着轧制的进行，在  $t=0.2\text{s}$ ，由图 4-3b 可以看到，温度变化比较大，板料进入轧辊后，温度下降了很多，最大温差达到  $120^\circ\text{C}$  左右；由于轧辊与铜层接触，铁层的温度变化还比较小。在图 4-3c 中，轧制已经进入稳态状态，温度继续降低，出辊后的铜层温度只有  $650^\circ\text{C}$  左右，而铁层还只有前端由于铜层的冷却作用，温度在下降，但下降的速度比较慢。到了  $t=0.5\text{s}$  的时候，在图 4-3d 中可以看到，温度最低的地方不是板料的最前端，这可能是由于轧辊的作用，模拟的时候轧辊只取四分之一，轧辊对刚出辊的板料影响较小，但对后来出辊板料温度会有影响，使中间部位的温度下降的更快一点，此时最大温差有  $260^\circ\text{C}$ 。随着轧制的继续进行，板料温度会继续降低。



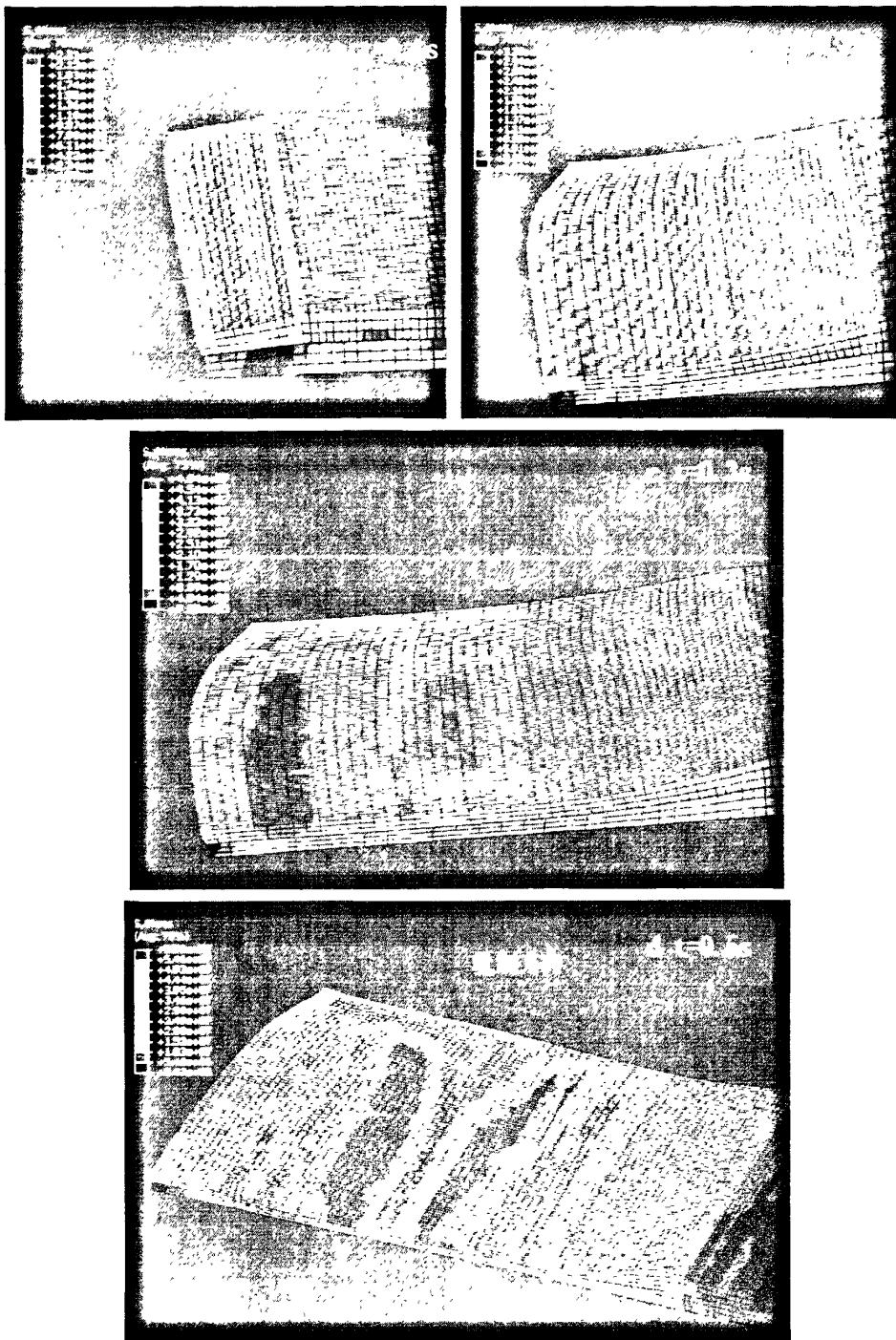


a、b、c、d 分别为 0.1、0.2、0.3、0.5s 的温度云图

图 4-3 温度场云图

#### 4.4.2 应力场分析

通过三组厚度不同的 Cu/DT9/Cu 热轧复合的模拟计算，输出各种状态变量的结果。图 4-4 是 Cu/DT9/Cu 厚度为 1/2/1 在  $t=0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.3$ 、 $0.5$ s 时热轧时的等效应力场。从图 4-4a 中可以看到，板料与轧辊接触后，铜层由于屈服应力小，先开始变形，随着铜层的硬化，应力达到铁的屈服应力后，铁层开始变形，最大应力出现在铁层底部，由图可知，铁层的应力比铜层的要大。随着轧制的进行，板料在摩擦力的作用下咬入并发生大变形，在图 4-4b 中，前端的铜铁接触的地方应力最大，这是因为铜层变形大，和铁层之间有很大的剪切作用，由于前端采用共节点处理，两者无法产生滑移，剪应力比较大，所以在此等效应力很大。在图 4-4c 中，可以看到，轧制进入稳态状态，但是由于有温度的影响，出辊后温度降低的很快，板料会产生热应力，由图可知，出辊后的板料要比轧辊下的应力要大。到  $t=0.5$ s 的时候，稳态下轧辊下面的轧件应力变化不是很大，但是出辊后的板料由于温度的影响，应力变化比较大，由图可知，板料中间有两块应力比较大的地方（红色区域），因为温度的影响，对照  $t=0.5$ s 的温度云图，可知温度低的地方由于冷缩的作用导致两边受到拉应力作用，所以会产生两块应力比较大的地方，最大应力为 59MPa。随着轧制的进行，铜层表面的残余应力会比较大。



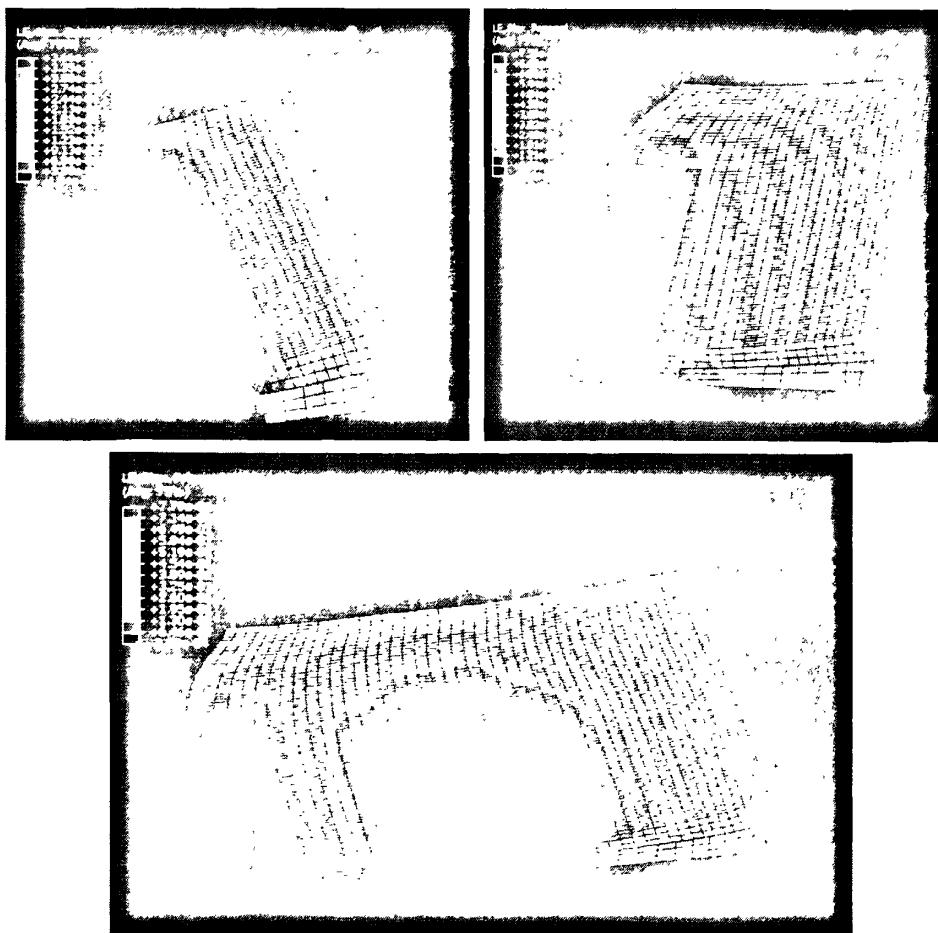
a、b、c、d 分别为 0.1、0.2、0.3、0.5s 的应力云图

图 4-4 应力场云图

#### 4.4.3 应变场分析

本文试验的 Cu/DT9/Cu 叠片采用单道次 50% 大压下率进行热轧复合。数值模拟时, 由于采用了 ALE 网格方法, 网格畸变比较小。分析了铜铁厚度为 1/2/1 的应变过程。图 4-5 表示的是 0.1、0.2、0.3、0.5s 时的真应变云图。从图 4-5a

中的变形图可以看出，轧制开始时，铜层在轧辊的滚压下，发生较大的压下变形，前端的网格开始变扁，铁层的应变比较小，最大应变为 0.36。轧制进行到  $t=0.2s$  的时候，应变云图如图 4-5b 所示，铜层和铁层网格都发生了较大变形，网格变扁拉长了，同时铜铁叠片在宽度方向上还有一定的宽展变形。在轧辊的摩擦作用下，铜层的剪切变形越来越大，铁层的剪切变形比较小。由图还可以看出，边部的应变比较小，主要是边部的剪切变形比较小。随着轧制的进行，在  $t=0.3s$ ，此时轧制已经进入稳态阶段，从图 4-5c 可以看出，板料出了轧辊后，由于本模型铁层和铜层前端采用共节点处理，采用罚函数摩擦模型，在轧制过程中，铁层和铜层之间没有发生相对滑移，在铜层前端和中部的应变比较大，边部的应变比较小，最大应变高达 0.779。在  $t=0.5s$  的时候，因为铁的屈服应力比铜高，所以铜层的上表面会有较大的剪切变形，导致上表面的应变比较大，最大达到 0.789。随着剪切变形的减小，铜层的应变沿厚度方向逐渐减小。铁层的剪切变形和压下变形都比较小。板料在轧制过程中，因为摩擦效应和温度降低的影响，板料表面上部速度较快，所以中部剪切变形较大，导致如图 4-5d 所示，中部总应变比较大。





a、b、c、d 分别为 0.1、0.2、0.3、0.5s 的应变云图

图 4-5 真应变云图

#### 4.4.4 轧制力及平均轧制压力分析

轧制力的大小直接影响辊系变形及强度、工作机架主要零件的强度等的计算，还直接影响着轧制厚度的计算。因此，确定轧制时的轧制力具有重大意义。本文通过后处理提取数据和处理，得到三组不同厚度轧制过程的轧制力曲线，从图 4-6 中曲线可以看出，刚开始咬入轧件的时候，轧制力比较大，到达稳态的时候有所下降，出现锯齿性的波动。通过对三条曲线的对比，可以发现总第三组的轧制力稍微大点，这是因为在轧制过程中，厚度越大，轧制变形区就愈大，变形所需的力就越大；由于 Cu/DT9/Cu 高温热轧的时候，屈服强度比较小，所需的轧制力并不是很大，最大值也在 15KN 左右。由于板料比较薄，利用接触面积的水平投影作为计算平均轧制压力的面积，计算出了最大平均轧制压力为 41.6MPa，可以为设备选择提供参考。

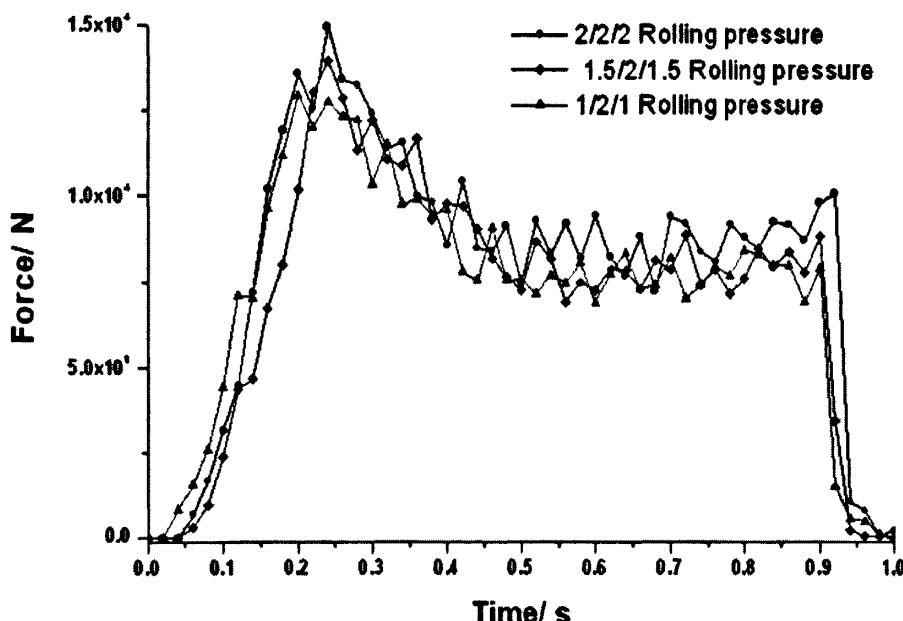
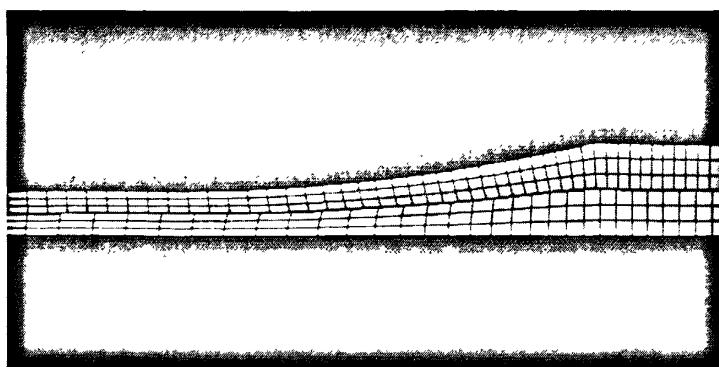
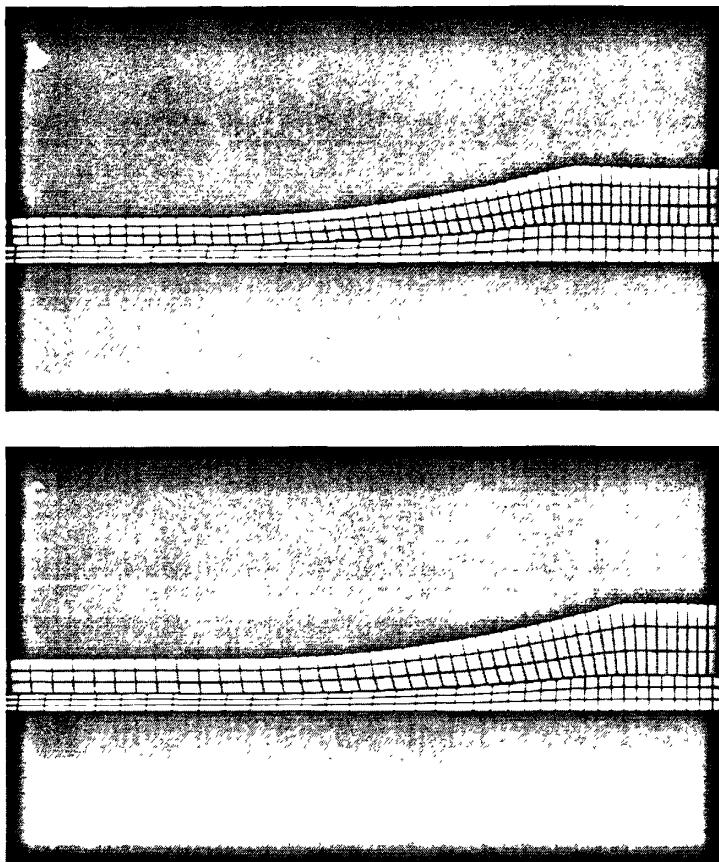


图 4-6 轧制力对比曲线

#### 4.4.5 厚度变化

层状复合材料的轧制，厚度控制显得十分重要。本文采用数值模拟和实验相结合的手段研究了热轧的厚度变化规律。为了利用数值模拟能准确的预测厚度变化，需要对模拟后的厚度进行测量和分析。经过对三组厚度不一样的 Cu/DT9/Cu 进行热轧模拟后，对结果进行了测量和分析，得到了在热轧后各层厚度的变化规律，由于模型采用对称设置，所以这里只分析上半部分的铜铁厚度变化。厚度变化如下图所示：





a 是第一组 (1/2/1), b 是第二组 (1.5/2/1.5), c 是第三组 (2/2/2)

图 4-7 三组厚度变化图

在 ABAQUS 软件后处理中进行测量, 由于有温度变化的影响, 各层压下量在不同时刻可能不一样, 经过多点采集数据然后取平均, 得到了各层的厚度变化数据, 如下表:

表 4-2 铜铁层厚变化对比

实验组	Cu 层厚度与压下量	Fe 层厚度与压下量
第一组 (1/2/1)	0.498, 50.16%	0.505, 49.49%
第二组 (1.5/2/1.5)	0.748, 50.13%	0.503, 49.72%
第三组 (2/2/2)	0.994, 50.29%	0.506, 49.46%

从表中数据可以看出, 铜层的压下率都在 50%以上, 铁层的压下率都比 50%要小, 而且两者的压下率相差比较小, 这是因为: 为了更好的模拟真实加工过程, 在施加边界条件的时候, 使铜层和铁层的端面使用了节点耦合的作用, 导致铜层和铁层在变形的时候相互制约, 导致变形率相差不是很大; 在轧制过程中, 由于高温下铜层和铁层的屈服应力相差不大, 铜层和铁层之间在轧辊的压力作用下, 导致变形率趋于一致。

通过对 Cu/DT9/Cu 第一道次的热轧数值模拟得到的数据和实验测量的数据进

行对比,如表 4-3。然后做出对比曲线,如图 4-15:

表 4-3 热轧后铜铁厚比数据对比

轧后 Cu/Fe 厚度比	数值模拟	热轧实验	相对误差
第一组 1/2/1	0.493	0.5	1.4%
第二组 1.5/2/1.5	0.7435	0.732	1.5%
第三组 2/2/2	0.982	0.923	6.4%

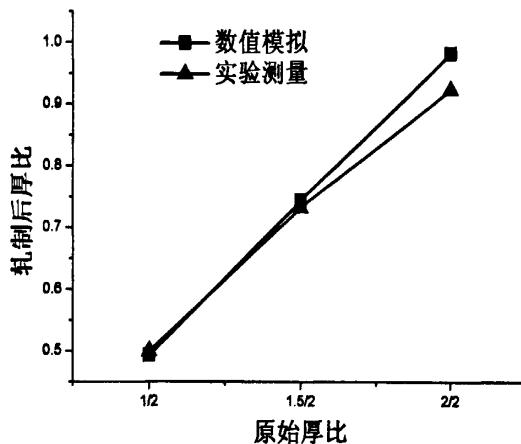


图 4-15 热轧后铜铁层厚比数值模拟与实验的对比

通过数值模拟和实验测量的数据对比可知,热轧后铜铁层厚比数据结果吻合良好,两者之间的误差要小于 7%,可以说数值模拟的结果完全可以接受,并且可以对厚度变化提供良好有效的预测。

#### 4.5 本章小结

本章运用大型有限元分析软件 ABAQUS 首次对 Cu/DT9/Cu 复合板的轧制过程进行热轧数值模拟,利用 ALE 网格技术,基于高性能计算平台得到了热轧过程的温度、应力应变的变化规律。主要结论有:

- (1) 首次基于高性能计算平台,利用 ABAQUS 有限元软件成功实现了对三组厚度不一的 Cu/DT9/Cu 的热轧复合模拟。
- (2) 模拟结果显示 Cu/DT9/Cu 厚度为 1/2/1 的轧制过程的温度变化和应力、应变的分布,轧制过程中最大应力达到 59MPa,最大应变达到 0.789;三组模拟中最大轧制力在 15KN 左右,平均轧制压力约为 41.63MPa。
- (3) 热轧过程中铜层的压下率为 51%左右,铁层的压下率为 49.7%左右,与轧制压下两趋于一致;
- (4) 数值模拟结果与实验数据对比,发现热轧后铜铁层厚比两者误差小于 7%,可以为产品提供良好的厚度预测。

## 第五章 结 论

本文通过热轧实验制备了 Cu/DT9/Cu 叠层复合材料，并且对复合材料的界面结合强度、界面结合机理、力学性能、厚度变化规律进行了检测分析；而且进行了 Cu/DT9/Cu 热轧数值模拟分析，得到的主要结论有：

(1) 确定了 Cu/DT9/Cu 热轧复合工艺，即热轧温度为 850℃左右；采用气氛保护加热，保温 0.5h，加热时间不超过 1h；采用 50%以上的大压下率。

(2) 通过三组坯料厚度比不同的 Cu/DT9/Cu 热轧复合实验，得到了复合良好的 Cu/DT9/Cu 层状复合材料，其界面结合强度达 155MPa；退火后三组复合材料屈服强度约 170MPa，抗拉强度约 250MPa。

(3) 通过实验分析了轧制过程铜铁层厚变化规律，结果显示铜层和铁层变形率趋于一致；热轧后经多道次冷轧与退火，制备了厚度达 0.22mm 的 Cu/DT9/Cu 叠层复合材料，表明热轧使 Cu/Fe 界面已实现牢固结合；通过对最终复合材料的厚度测量，发现原始厚度配比为 1.5/2/1.5 时，经过轧制后满足最终产品厚度要求；几何精度分析表明，Cu/DT9/Cu 叠层复合材料表面缺陷深度大约 10μm，中间层厚度偏差大约为 8.6μm，符合产品要求。

(4) 通过检测分析 Cu/DT9/Cu 复合的机理可概述为：在热轧时铜铁的表面层破裂，形成真实物理接触；在高温高压的影响下，两接触表面的原子被激活，而使新鲜质点间产生金属键结合。

(5) 首次基于高性能计算平台，利用 ABAQUS 有限元软件，实现了 Cu/DT9/Cu 热轧复合数值模拟，获得了轧制过程的温度、应力及应变变化；三组模拟中最大平均轧制压力约为 41.6MPa；热轧后铜铁层厚比的数值模拟和实验结果误差小于 7%，可为厚度变化提供有效预测。

## 参考文献

- [1]王荣国.复合材料概论[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1991.1~22
- [2]克雷德,温仲元.金属基复合材料[M].北京:国防工业出版社,1982.36~99
- [3]于春田.金属基复合材料[M].北京:冶金工业出版社,1994.1~9
- [4]刘正春,王志法, 姜国圣.金属基电子封装材料进展[J].兵器材料科学与工程  
2001,24(2):49~54
- [5]马慧君,段云雷.高散热复合金属多层板的研制[J].电子工艺,1993,4:2~6
- [6]王海山.轧制复合 Cu/Mo/Cu 电子封装材料的研究:[硕士学位论文].长沙:中南大  
学,2004
- [7]杨扬,李正华,程信林等.Cu/Mo/Cu 爆炸复合界面组织特征[J].稀有金属材料与工  
程,2001,30(5):339~341
- [8]徐卓辉,王海平,王乃千.新型热沉用复合金属材料[J].电力电子技  
术,2000,(3):61~62
- [9]潘晓亮,高芝,谢世坤等.金属层状材料的复合技术及其新进展[J].安徽冶金,2008  
(4) :20~23
- [10]吴成.Q235-304 不锈钢复合板热轧有限元模拟研究:[硕士学位论文].西安:西安  
建筑科技大学,2005
- [11]朱泉,潘大炜,张文奇等. 铜、铝与钢冷轧固相复合的粘合机制[J].轧  
钢,1989(04):70~75
- [12]张永福. 双金属复合工艺和结合机理的实验研究:[硕士学位论文].哈尔滨:东  
北工学院,1986
- [13]张文奇. 双金属带材固相复合轧制工艺及机理研究:[硕士学位论文].哈尔滨:  
东北工学院, 1986
- [14]闫志彬.包 Al 复合钢板制备工艺研究:[博士学位论文].北京:华北电力大  
学,2004
- [15]朱泉,潘大炜.铝与钢冷轧固相复合的粘合机制[J].轧钢,1989,(4):19~23
- [16]侯英武.不锈钢复合板冷轧过程有限元模拟:[硕士学位论文]. 河北:燕山大  
学,2003
- [17]赵腾伦.ABAQUS6.6 在机械工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版  
社,2007.5~8
- [18]曹金凤, 石亦平.ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M].北京:机械工业出版  
社,2009.97~108
- [19]赵辉,刘靖,鹿守理.金属塑性变形过程的数值计算方法 [J].钢铁研

- 究,1997,(3):15~20
- [20]陈欣如.塑性有限元法及其在金属成型中的应用[M].重庆:重庆大学出版社,1989.35~51
- [21] P.V.Marcal. A Stiffness Method for Elastic-plastic Problems [J].International Journal of Mechanical Science.1965, 7(3):229~238
- [22] C Liu, E Hartly, C. E. N. Sturgess and G. W. Rowe. Analysis of Stress and Strain Distributions in Slab Rolling Using an Elastic plastic Finite Element Method[J].International Journal for Numerical Methods in Engineering.1988,25:55~66
- [23] 刘才,杜凤山,连家创.薄板连轧过程的变形和应力场[J].机械工程学报.1992,28(1):104~108
- [24] 刘才,杜风山,连家创.薄板带张力轧制时金属流动的计算机模拟[J].钢铁,1992,27(1):35~38
- [25] 杜风山.三维有限元法模拟板带轧制过程:[博士学位论文].河北:燕山大学,1990
- [26] W.Schwenzfeier 等.辊缝的三维分析.第六届国际轧钢会议译文集(3).中国金属学会轧钢学会, 1994:205~210
- [27] Z.Y.Jiang, A.K.Tieu. A simulation of three-dimensional metal rolling processes by rigid-plastic finite element method [J].Journal of Material Processing Technology, 2001, 112:144~151
- [28] Jiang Zhengyi , Xiong Shangwu, Liu Xianghua et al. 3-D rigid-plastic FEM analysis of the rolling of a strip with local residual deformation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 79:109~112
- [29] A.Alsamhan, P.Hartely, I.Pillinger. The computer simulation of cold-roll-forming using FE methods and applied real time re-meshing techniques [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142 :102~111
- [30] R.Boman, L.Papeleux, Q.V.Bui, et al. Application of the Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation to the numerical simulation of cold roll forming process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177:621~625
- [31] L.M. Galantucci, L.Tricaricob. Thermo-mechanical simulation of a rolling process with an FEM approach[J].Journal of Materials Processing Technology, 1999 ,93: 494~501
- [32] X. Duan, T. Sheppard. Three dimensional thermal mechanical coupled simulation during hot rolling of aluminum alloy3003 [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002,44 :2155~2172

- [33] 余伟霞.热轧三维热力耦合的数值模拟研究:[硕士学位论文].河北:河北工业大学,2006
- [34] 王立东.双金属成型过程的有限元分析:[硕士学位论文].上海:上海交通大学,1996
- [35] 贺艳苓.双金属复合带材轧制过程的有限元数值模拟研究:[硕士学位论文].昆明:昆明理工大学,1999
- [36] 刘浪飞.精密合金层状复合材料轧制变形规律的研究:[硕士学位论文].长沙:中南工业大学,2000
- [37] 朱旭霞.不锈钢/铝合金/不锈钢多层材料热轧复合及性能研究:[硕士学位论文].长沙:中南工业大学,2000
- [38] 张志臣.塑性有限元法模拟板带两种特殊轧制过程的研究:[硕士学位论文].河北:燕山大学,2000
- [39] 黄亮.不锈钢复合板热轧复合仿真及参数分析:[硕士学位论文].河北:燕山大学,2004
- [40] Zone-Ching Lin, Tang-Guo Huang, Hot rolling of an aluminum/copper sandwich at strip with the three-dimensional finite element method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000,99:154~168
- [41] Zone-Ching Lin,Tang-Guo Huang. Different degree of reduction and sliding phenomenon study for three-dimensional hot rolling with sandwich flat strip [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000,42: 1983~2012
- [42] H. Danesh Manesh, A. Karimi Taheri, An investigation of deformation behavior and bonding strength of bimetal strip during rolling [J]. Mechanics of Materials, 2005,37: 531~542
- [43] 钟卫佳,肖恩奎.高品质无氧铜的生产[J].世界有色金属,2003,09:8~11
- [44] 钟卫佳,马可定,吴维治.铜加工使用技术手册.北京:冶金工业出版社,2007.108~113
- [45] 颜鸣皋.中国航空材料手册第四卷.北京:中国标准出版社,1988,315~318
- [46] 袁希文.纯铁 DT9 性能介绍[J].真空电子技术,1993,03:13~44
- [47] 刘建生,陈慧琴,郭晓霞.金属塑性加工有限元技术与应用[M].北京:冶金工业出版社,2003.2~11
- [48] 王学,基于 ALE 方法求解流固耦合问题:[硕士学位论文].长沙:国防科学技术大学,2007

## 致 谢

本论文是在导师林高用教授的悉心指导和严格要求下完成的。在研究工作的整个过程中，从论文选题、研究方案的确定到实验过程、最后到论文完成，林老师给予了我无微不至的关怀和大力的帮助，在论文的写作、构思及框架方面提出了大量的宝贵建议。导师渊博的知识、严谨的治学态度和求实的科研作风使学生受益匪浅；导师扎实的理论基础、丰富的实践经验、清晰敏捷的思路和诲人不倦的精神令我敬佩。在此，我谨向导师致以崇高的敬意和衷心的感谢！

感谢王德志老师和张胜华老师对我无微不至的关心与辅导。

感谢中南大学升华电子封装所提供的热轧实验帮助，感谢材料学院各实验室和材料厂的帮助，感谢中南大学高性能计算中心提供的计算平台！

此外，感谢家人对我的鼓励，同时本论文的完成，还要感谢杨伟和冯迪师兄、杨益航博士、柳华炎硕士的帮助；还得到了本课题组刘健、孙利平、曾菊花、周玉雄、宋佳胜、王莉等同学的大力帮助，在此表示致谢。

祝各位老师和同学们身体健康、万事如意！

致谢人：邹艳明

2011年4月28日

## 攻读学位期间主要成果

### 1. 发表论文

- [1] 林高用,邹艳明,周佳,冯迪. 采用空心锭挤压 BFe10-1-1 铜合金管材的数值模拟[J].热加工工艺,2009 (39) 19:112~115
- [2] 邹艳明,林高用,杨益航等.Cu/Fe/Cu 叠片热轧复合数值模拟[J].钢铁研究学报 (已接收)
- [3] 邹艳明,林高用,刘 健等.铝型材挤压数值模拟与模具优化设计[J]/LW2010 第四届铝型材技术(国际)论坛会议论文集.广州, 广州有色研究院,2010:568~573
- [4] 林高用,周玉雄,邹艳明等. 高性能计算平台在铜铁薄板热轧复合数值模拟中的应用[J].材料导报 (已接收)

### 2. 所获奖项

中南大学材料学院第七届学术年会优秀奖

### 3 所完成项目

- (1)邵阳正骨医院胫骨平台生物力学有限元分析
- (2)上海中舟海洋科技有限公司套管塑变连接有限元分析