

北京科技大学硕士学位论文

论文题目： 加热过程材料微观组织演变的图像分析

作者： 王建飞

指 导 教 师： 刘双科 副教授 单位： 北京科技大学

协助指导教师： 单位：

 单位：

论文提交日期： 2007 年 03 月 1 日

学位授予单位： 北 京 科 技 大 学

摘 要

材料在热加工处理过程的行为、性能以及形成的使用功能，从根本上讲是由热处理过程相应的微观组织特征所决定的。研究材料热加工过程的微观组织图像演变规律，一方面，可以深入研究材料使用功能的形成机制；另一方面，如同建立材料性能与微观组织参数的定量关系一样，可以建立微观组织参数与材料所在气氛温度的定量关系。因此，研究材料性能、微观组织和气氛温度三者的关系，有助于精确控制材料性能的形成和最大限度的实现热加工过程的节能降耗。

材料热加工处理过程的微观组织图像属于一种纹理图像，微小的晶体以有序或者无序的排列形式存在，分布的晶体在数量上的大量性和形状分布的多样多变性，使得微观组织演变图像的纹理特性研究很难深入，目前基本停留在人为观察对比和人工计数统计研究阶段。至今为止的研究表明，定量描述材料的微观组织图像特征，图像分析方法具有不可替代的作用。然而，如何对材料微观组织的截面（金相磨面）图像进行分析，从二维截面图像中获取二维图像的定量信息，以及通过体视学原理进一步获取有关三维几何形态的定量信息，从而直接用于建立组织结构与材料性能或功能间的定量关系。因此，建立对材料微观组织截面二维图像定量信息的分析与提取方法，至关重要。

本论文针对不同气氛温度下材料热加工处理过程中二维截面微观组织图像，利用数字图像分析与处理方法，研究不同材料同一温度的微观组织图像，以及同一材料不同温度多时段多截面的微观组织图像。建立静态和动态的微观组织图像的分析与研究方法，以揭示不同条件下材料热加工处理过程中晶体微观组织的演变规律。

本论文的研究结果，将为低耗能热加工炉的优化设计提供精确的热工参数，同时也为有效控制热加工材料的使用性能提供新的理论依据。本课题的完成，有助于改变我国钢铁企业耗能大户的旧面貌，也有利于推进我国在微观晶体研究水平上研发新材料的步伐。

关键词：热处理，材料微观组织，图像分析

Image Analysis on Material Microstructure Evolution in Heat Process

Abstract

Action and performance as well as acquired using function are ultimately decided by microstructure character in material heat treatment process. Study microstructure images evolvement law, on one hand, can further research the formative mechanism of material using function; on the other hand, the same as constituting the measurable relation between material character and microstructure, can constituting the measurable relation between ambience temperature of material and microstructure parameter. Therefore, study the relation among material character and microstructure as well as ambience temperature, is an important problem for reducing energy consumption furthest and controlling material performance accurately.

The microstructure images belong to texture images, because tiny crystals present in the form of order or disorder arrangement, the crystals distribution with great of mount and various shapes make the study of texture character hard to embedded, and still remain on the state of artificial observation contrast and count statistic study. So far as the study indicate the function cannot be replaced that image analysis is used to describe material microstructure images characters quantificationally. In search of the quantificational relation between structure and material performance or function, it is necessary to analyse the section image of material microstructure, and capture quantificational information from planar image, and about the three-dimensional geometry conformation by the theory of stereology. Therefore, it is the very important to establish the method that analyse and distil quantificational information from planar section image of material microstructure.

The paper study the microstructure images of different kinds of material in heat treatment process, and the same material in different temperatures, aim at the planar section images in different ambience temperatures, by using digital image analysis and processing method. To establish static state and dynamic analysis and processing method is to open out the microstructure evolution law in material heat treatment process.

The result of the paper will supply accurate pyrology parameters for optimal design in low energy consuming heat treatment furnace, and new theory foundation for controlling heat treatment material using performances effectively. The paper could help the steel corporation to improve the former visage of large energy consumption in country, yet is in favour of improving the development of the new functions material based on crystals microstructure study.

Key Words: heat treatment, material microstructure, image analysis

独 创 性 说 明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了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的研究成果，也不包含为获得北京科技大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。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做了明确的说明并表示了谢意。

签名： 王建飞 日期： 2007.3.20

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵循此规定）

签名： 王建飞 导师签名： Zupairif 日期： 2007.3.20

引 言

新型工业加热炉的发展要求，确定合理的加热工艺制度，降低轧制过程能耗；改善轧材组织性能，减少各种裂纹缺陷，提高轧材质量等。研究材料的加热温度、内部微观组织以及相应的使用功能三者之间的相互关系，是建立新型加热炉优化控制系统的基本问题。

上述三者关系中，材料的加热温度与微观组织之间的关系最为重要。依据材料加热过程微观组织结构的形成机制，决定材料加热温度以及加热炉的气氛温度，是优化轧制的基本依据；反过来，利用所建立的加热温度与微观组织的关系，通过调控加热炉气氛温度，形成一定的微观组织结构，实现材料新的使用功能，是优化轧制的根本目的。

至今为止的研究表明，定量描述材料的显微组织图像特征，图像分析方法具有不可替代的作用。然而，如何对材料显微组织的截面（金相磨面）图像进行分析，从二维截面图像中获取二维图像的定量信息以及有关三维几何形态的定量信息，从而直接用于建立组织结构与材料性能或功能间的定量关系。因此，建立对材料显微组织截面二维图像定量信息的分析与提取方法，至关重要。

目前对高温气氛中的材料所特有的热变形行为特征与微观组织演化规律尚缺乏系统深入的研究和全面的认识。与微观组织结构相关的因素，例如金属的变形温度、应变速率，变形前热历史、成分偏析、溶质元素行为和非平衡相变，以及动态应变时效现象对位错组态和晶界迁移的影响等及其复杂，这给微观组织的控制带来极大的困难。利用图像分析的方法研究微观组织的演变，通过微观组织与气氛温度的关系，以及微观组织与材料性能或功能的关系，达到优化控制热处理参数的问题，已经成为目前这一研究领域所关注的热点问题。由于不同种类的热加工材料，以及同一材料在不同温度范围内的微观组织演变图像，极其复杂。微观组织图像实际上属于一种纹理图像，微小的晶体以有序或者无序的排列形式存在，分布的晶体在数量上的大量性和形状分布的多样多变性，使得目前的微观组织演变图像的纹理特性研究，很难深入，基本停留在人为观察对比和人工计数统计研究阶段。

本论文将针对不同气氛温度下材料热加工处理过程中二维截面微观组织图像，利用数字图像分析与处理方法，研究不同材料同一温度的微观组织图像，以及同一材料不同温度多时段多截面的微观组织图像。建立静态和动态的微观组织图像的分析与研究方法，以揭示不同条件下材料热加工处理过程中晶体微观组织的演变规律。企图建立材料微观组织与加热炉气氛温度之间，以及与热加工材料性能、功能之间的关系。

1 文献综述

1.1 目前加热炉的研究现状

加热炉是冶金行业生产环节中重要的热工设备。它在轧钢生产中占有十分重要的地位，它的生产任务是按轧机的轧制节奏将钢材加热到工艺要求的温度水平和加热质量，并且在优质高产的前提下，尽可能降低燃料的消耗，减少氧化烧损^[1]。

加热炉的目的是为了提高钢坯的温度，使它具有良好的塑性，以利于进行压力加工。它是一个具有大惯性、纯滞后和分布参数的非线性系统，其加热方式有连续式和批量式等多种形式。炉内的热状态、钢坯温度分布等许多重要参数难以直接在线监测，炉型结构和工艺参数也各不相同^[2]。这些因素一直阻碍着炉窑过程控制技术的进一步发展。

自从20世纪70年代能源危机以来，人们已经开始认识到世界上的能源并不是取之不尽，用之不竭的。因此，怎样以较少的能源消耗，生产出多的合格产品来，就成为人们研究的重点。对于加热炉的研究也是如此，也对加热炉的工艺和控制系统提出了更高的要求。

于是针对加热炉产生了各种优化策略，运用各种理论和试验的方法来研究炉内的热工过程，以改善炉子的热工性能，从而达到节能、降耗的目的。

1.1.1 加热炉的结构

加热炉是一个复杂的热工设备，它由以下几个基本部分组成：炉膛、燃料系统、供风系统、排烟系统、冷却系统、余热利用装置、装出料设备、检测及调节装置、电子计算机控制系统等^[3]。

1.1.2 加热炉的作用

随着科学技术的不断发展，加热炉的理论和实践在不断深化和日趋完善，加热炉的结构型式也在不断演进。优质、高产、低消耗的新式炉型不断涌现，加热炉的结构目前仍处在不断变革之中，但是，不管加热炉怎么变革，它的目的总是要满足生产工艺对炉子的技术经济要求，即优质、高产、低消耗、炉子寿命长、劳动条件好。应该指出的是，这几方面是对加热炉总的要求，在对待具体的炉子时，还应辩证地看待各项指标之间的关系。

1.1.3 加热炉的工艺制度

金属在轧制和锻造之前的加热，是金属的热加工过程中一个必要的环节。加热

的目的是：

1) 提高金属的塑性

金属在冷的状态下可塑性很低，为了改善金属的热加工条件，必须提高金属的塑性。一般来说，金属的热加工温度越高，可塑性越好。例如高碳钢在常温下的变形抗力约为 6000kg/cm^2 ，这样在轧制时就需要很大的轧制压力，消耗很大的能量。如果将它加热到 1200°C ，这时的变形抗力降低到大约 300kg/cm^2 ，比常温下的变形抗力降低20倍。所以钢的温度越低，加工所消耗的能量越大，轧机的磨损也越快，而且温度不足时还容易发生断辊事故。

2) 使金属锭或坯内外温度均匀

由于金属内外的温度差，使其内部产生应力，应力会造成轧材时的废品或缺陷。通过均热使断面上温差缩小，避免出现危险的温度应力。

3) 改变金属的结晶组织

金属经过冷加工以后，组织结构改变，处于加工硬化状态，需要加热进行热处理，达到所要求的物理性能和力学性能。有时钢锭在浇铸过程中会带来一些组织缺陷，例如高速钢中碳化物的偏析等，通过在高温下长时间保温，可以消除或减轻这类缺陷的危害。

金属加热的质量直接影响到轧材的质量、产量、能源消耗以及轧机寿命。正确的加热工艺可以提高金属的塑性，降低热加工时的变形抗力，按时为轧机提供加热质量优良的锭或坯，保证轧机生产顺利进行。反之，如加热工艺不当，或者加热炉的工作配合不好，就会直接影响轧机的生产。例如加热温度过高，会发生钢的过热、过烧，轧制时就要造成废品；又如钢的表面发生严重的氧化或脱碳，也会影响钢的质量，甚至报废。目前有的轧机不能充分发挥作用，往往是因为加热工艺这一环节薄弱。因此，必须了解金属加热工艺的基本知识，制定正确的加热工艺制度，防止加热过程中可能出现的各种缺陷。

金属的加热工艺包括确定加热温度、加热速度、加热时间、炉温制度、炉内气氛等。为了制定正确的加热工艺，还应当了解与金属加热有关的金属热物理性能及力学性能，了解加热过程中缺陷产生的原因及防止的措施^[2]。

1.1.4 目前研究的重点

长期的实践和研究表明，材料的性能是由其内部的微观组织结构所决定的。因此，可由化学成分和制备工艺来实现对组织的控制，在此基础上确定材料的使用性能和改善材料性能是常用的材料研究方法，其中显微组织的测量与分析是判断材料状态和内

部结构的主要途径。随着材料科学的发展,研究材料的组织、成分和性能之间更为定量、本质的相互关系显得尤为重要,可由材料的显微结构来预测材料的性质,保障产品的质量^[4]。因此,加热炉的加热工艺的改进需要结合材料的微观组织的分析来进行。

钢坯在加热炉内的加热过程是一个非常复杂的物理、化学过程,一方面要求被加热的钢坯出炉时达到要求的目标温度和断面温差;另一方面还要求尽可能地减少燃料消耗。在考虑生产工业要求的前提下,与炉子生产相关的变量可划分为三类:结构和操作参数、热工过程参数和生产指标^[5]。它们之间的关系可表示如下:

$$\left. \begin{array}{l} \text{结构参数} \\ \text{操作参数} \end{array} \right\} \rightarrow \text{热工过程参数} \rightarrow \text{生产过程参数}$$

炉子结构和热工操作直接影响炉内热工过程,通过热工过程间接地影响炉子的生产指标。由此可以看出,若要降低炉子的燃料消耗,可以从两个方面进行研究:一是对炉子的结构参数进行优化;二是对炉子的操作参数进行优化。炉子的结构和操作是相互联系的,结构必须满足操作的要求,而操作必须符合结构的特点。

1) 加热炉结构参数优化的研究

通过改变炉子的结构参数来研究炉内的热工过程,以达到节能的目的,在这方面人们曾作了大量的工作,并取得了一定的成就。Costick等人曾用段法研究了燃油连续加热炉的炉膛高度、烧嘴安装位置、炉顶曲线、火焰形状等对坯料一升温曲线、金属表面的热流分布和炉壁温度分布的影响。得出的结论是:在这种燃油的加热炉上,影响金属温度分布、金属表面热流及其分布的主要因素是火焰形状和位置;炉顶形状和炉膛高度对金属温度、热流及其分布的影响不大,但对炉顶温度以及分布却有很大影响。这一研究结果对炉子的设计有重要的参考价值。Salter用类似的方法对炉子进行了数学模型研究,开发出了顺流逆流式加热炉。宁宝林、杨泽宽等人通过数学模型试验,研究了不连续滑块、半热滑轨及全热滑轨等在相同炉子和坯料条件下的效果和性能。研究结果表明:错交排开(“千鸟足型”)的滑块减小钢坯水管黑印的效果最为显著。

此外,采用数学模型对炉子结构参数进行研究的还有:Roth, Vesiocki,

Carpenter, Mahendra, Filippi, Kim等^[6-11]。改变炉子结构对降低燃料消耗的作用是很大的,范循厚、杨宗山等曾采用“无闲区炉头”、“扼流式”结构等节能技术,成功地对营口中板厂的加热炉进行改造,燃料节约率达63.9%。再如增设辐射网、预热段采用龙型结构、炉内壁喷涂高温涂料等,这些对加热炉的节能降耗都有很明显的应用效果。

2) 加热炉操作参数优化的研究

通过改变操作参数来实现炉子的节能降耗,在这方面人们也作了很多的工作。其中人们最熟悉的莫过于端头供热的加热原则。对于逆流式连续加热炉,它要求使燃料供入点所处的位置尽量靠近出料端,这条原则性地指出了节能操作的方向。1974年, J. E. Hovis提出了加热炉的产量与热负荷配合的问题。对于一个五段加热炉,在炉子尺寸为32004mmx 10058mm,被加热物料为152mm x 9144mm的钢坯条件下,它研究了水管绝热率分别为50%和80%时,在与产量相适应的热负荷控制下和与产量不相适应的不良控制下产量变化对炉子能耗的影响。研究结果表明:当产量为最大产量的53%时,通过提高绝热率可降低能耗13%,通过改善操作方法可降低能耗14%。在国内,针对产量变化对热工操作的影响,陆钟武、李成之通过对一单点供热,被加热物为水管的试验炉的测量数据进行分析、整理,提出了炉子产量、热负荷与单耗之间的关系(“Q-P”方程和“b-P”方程)。随后,陆钟武、杨宗山等在试验炉上又研究了炉子产量、热负荷、废气出炉温度、空气预热温度及空气过剩系数之间的相互关系。任世铮根据炉料在炉内热交换过程中获得的热收益与燃料的引入为之有关这一特点,采用逆流换热器的基本方程提出了热价值的概念及其计算公式,并对竖炉和加热炉等设备内部的热交换过程进行了分析,其理论对于加热炉的热工操作有一定的指导意义。1982年,王景文、陆钟武研究了多点供热加热炉的供热分配问题。对各种烧嘴供热量可以不一致的炉子,所求得的最佳供热分配的方法是先打开从端头起的第一组烧嘴,当由于产量增加而达到烧嘴的最大供热能力时,打开其它烧嘴,直至满足要求为止。该研究指出,实现最佳操作的炉子,当产量变化很大时,单耗的波动很小。

近年来,由于计算机的发展和普及,使加热炉最优操作制度的研究同加热炉

操作控制紧密结合起来,最佳操作制度的研究提供了计算机控制的策略和控制算法。M. Ono等采用线性规划的方法,通过对目标函数中炉温加权系数的确定,对钢坯加热炉的最佳操作制度进行了优化。之后, Y Misaka发表了他们自1977年以来采用同样方法的应用结果。M. Kamata采用在均热段维持恒定的燃料流量,在加热段中沿烟气流向依次从最大限制流量逐渐增加下调幅度的控制策略,实现加热炉的次最优控制,取得了同样的节能效果和控制精度。V G. Lisicenko等通过采用Mont Carlo方法建立的加热炉数学模型,对加热炉的操作进行数学模拟,以寻找最优的加热制度,加热炉的控制采用由模拟结果得到的炉温与产量的多项式进行,并通过表面钢温与产量的多项式回归方程反馈控制结果。除此之外,采用优化的方法确定加热炉的最佳操作制度还可以直接采用燃料量作为目标函数,采用区段热平衡的方法,借助于线性规划的技术,对以燃料量为目标函数的数学模型进行优化。

在国内,谭志强采用段法构造的加热炉数学模型对操作参数进行模拟,建立了钢温、断面温差与燃料量和产量回归式,以此,采用惩罚函数法对燃料量的分布进行了优化。宁宝林等采用相同的模型结构对天津轧钢三厂的推钢式连续加热炉的操作制度进行了以燃料量为目标函数的离线优化,提出了总括热吸收率的在线动态补偿算法。杨勇耀、吕勇哉采用数学模型的启发式优化策略,求取加热炉的最佳炉温设定值,通过递阶的计算机控制结构,实现了国内的第一套加热炉计算机控制系统。

1.1.5 加热炉计算机控制的发展

随着现代轧机向连续、大型、高速、高精度与多品种等方向的发展,对钢坯加热质量的要求越来越离,从而对加热炉控制也提出了更高和更新的要求,这就促使人们去研究以计算机为工具的加热炉控制系统^[1]。

在我国,加热炉计算机控制的研究始于80年代初。就控制策略而言,主要集中在以传统燃烧控制技术为基础的直接数字控制上,即通过空燃比控制、烟道残氧量控制以及燃料流量与助燃空气流量的交叉限幅控制等,实现燃料的最佳燃烧,从而获得较为稳定的炉子工况。例如,武钢的加热炉自动控制系统^[12]、成都无缝钢管厂的加热炉控制系统^[13]以及重钢五厂2号板坯加热炉微机控制系统^[14],在提高产品质量的同时,都取得了较好的经济效益。这类控制系统的主要局限是,仅从燃烧过程本身来探求节能和提高产品质量。

进入八十年代中期,随着加热炉控制系统从单级到多级,从常规DDC到SCC等的发展,原先认为比较成熟的加热炉燃烧控制策略逐渐显露出某些缺陷与不足。在加热炉高级控制系统的DDC级中,机械地套用这些控制算法,已往往不能获得满意的控制品质。为解决这一问题,科学工作者对加热炉燃烧控制策略和控制结构进行了改进,逐步打破了只有燃烧控制的局限。出现了变参数燃烧控制和加热炉多模式设定值控制^[15]。杨永规和吕勇哉^[16]采用数学模型的启发式优化策略,计算加热炉的最佳炉温设定,通过递阶的优化控制结构,实现了我国第一套加热炉SCC控制系统。宁宝林和陈海耿等建立加热炉段法数学模型,在天津中板厂^[17]及天津轧钢三厂^[18]等单位,实现了以能耗为目标函数的加热炉计算机控制系统,并提出了总括热吸收率的在线补偿算法,提高了计算机控制系统的实用性。刘日新^[19]等人在加热炉稳态和动态数学模型的基础上,对不同待轧时间进行数学模拟及优化研究,得出了合理的待轧策略,实现了不同待轧时间的最佳操作。此外,鞍钢小型厂^[20]、太钢一轧厂^[21]以及宝钢热轧厂^[22]的加热炉计算机控制系统,也相继实现了SCC+DDC的控制,并都取得了一定的节能效果。

在国外,加热炉优化操作与控制的研究起步较早。七十年代初,加热炉计算机控制就已基本进入实用化阶段。前苏联学者 V. G. Lisienko^[23]研究了直通式火焰炉在产量变化时的金属加热控制模型。该模型以加热费用为目标函数,研究了产量变化时热负荷的变化规律,建立了以每个区段的产量来控制各区段工作温度的模型。Boledon^[24]采用先进的计算机控制系统,优化加热炉各段燃料量分配,制定了合理的待轧策略,取得了26%的节能效果,同时提高了产品质 A 和降低了氧化烧损。Y. Misaka 等^[25]在日本 Sumitomo 金属工业公司采用 Φ_{cr} 法进行钢坯温度预示,并以此为基础研究了待轧策略和计算机控制策略,取得了节能 4.18×10^4 J/t 的效果。日本新日铁君津钢厂建立的连续式加热炉计算机控制系统^[26]采用有限元法,对板坯导热方程进行在线计算,提高了在线模型的准确性。其他一些工业发达的国家,如英国^[27]、意大利^[28]和法国^[29]等先后开发了一批加热炉计算机控制系统,在生产实践中发挥了重要的作用。总的来说,由于近几十年来计算机技术以及智能控制技术的迅速发展,国内的加热炉控制技术在理论上已达到国际先进水平;在工程应用上也日趋广泛,控制水平有明显提高。但就硬件而言,尤其是高级计算机系统的硬件,基本上都是引进的,实际控制水平和发达国家相比,还存在较大差距。所以,充分地发挥计算机潜力,致力于某些尝试性研究和开创性研究,以进一步提高加热炉计算机控制的水平,是十分必要的。

1.2 材料热处理的研究现状

1.2.1 热处理概述

1) 热处理的作用

金属热处理是将金属工件放在一定的介质中加热到适宜的温度,并在此温度中保持一定时间后,又以不同速度冷却的一种工艺。

金属热处理是机械制造中的重要工艺之一,与其他加工工艺相比,热处理一般不改变工件的形状和整体的化学成分,而是通过改变工件内部的微观组织,或改变工件表面的化学成分,赋予或改善工件的使用性能。其特点是改善工件的内在质量,而这一般不是肉眼所能看到的。

为使金属工件具有所需要的力学性能、物理性能和化学性能,除合理选用材料和各种成形工艺外,热处理工艺往往是必不可少的。钢铁是机械工业中应用最广的材料,钢铁微观组织复杂,可以通过热处理予以控制,所以钢铁的热处理是金属热处理的主要内容。另外,铝、铜、镁、钛等及其合金也都可以通过热处理改变其力学、物理和化学性能,以获得不同的使用性能。

热处理是机械零件和工模具制造过程中的重要工序之一。大体来说，它可以保证和提高工件的各种性能，如耐磨、耐腐蚀等。还可以改善毛坯的组织和应力状态，以利于进行各种冷、热加工。例如白口铸铁经过长时间退火处理可以获得可锻铸铁，提高塑性；齿轮采用正确的热处理工艺，使用寿命可以比不经热处理的齿轮成倍或几十倍地提高；另外，价廉的碳钢通过渗入某些合金元素就具有某些价昂的合金钢性能，可以代替某些耐热钢、不锈钢；工模具则几乎全部需要经过热处理方可使用。

2) 热处理的发展历史

在从石器时代进展到铜器时代和铁器时代的过程中，热处理的作用逐渐为人们所认识。早在公元前 770~前 222 年，中国人在生产实践中就已发现，铜铁的性能会因温度和加压变形的影响而变化。白口铸铁的柔化处理就是制造农具的重要工艺。公元前六世纪，钢铁兵器逐渐被采用，为了提高钢的硬度，淬火工艺遂得到迅速发展。随着淬火技术的发展，人们逐渐发现淬冷剂对淬火质量的影响。三国蜀人蒲元曾在今陕西斜谷为诸葛亮打制 3000 把刀，相传是派人到成都取水淬火的。1863 年，英国金相学家和地质学家展示了钢铁在显微镜下的六种不同的金相组织，证明了钢在加热和冷却时，内部会发生组织改变，钢中高温时的相在急冷时转变为一种较硬的相。法国人奥斯蒙德确立的铁的同素异构理论，以及英国人奥斯汀最早制定的铁碳相图，为现代热处理工艺初步奠定了理论基础。与此同时，人们还研究了在金属热处理的加热过程中对金属的保护方法，以避免加热过程中金属的氧化和脱碳等。1850~1880 年，对于应用各种气体（诸如氢气、煤气、一氧化碳等）进行保护加热曾有一系列专利。1889~1890 年英国人莱克获得多种金属光亮热处理的专利。二十世纪以来，金属物理的发展和其他新技术的移植应用，使金属热处理工艺得到更大发展。一个显著的进展是 1901~1925 年，在工业生产中应用转筒炉进行气体渗碳；30 年代出现露点电位差计，使炉内气氛的碳势达到可控，以后又研究出用二氧化碳红外仪、氧探头等进一步控制炉内气氛碳势的方法；60 年代，热处理技术运用了等离子场的作用，发展了离子渗氮、渗碳工艺；激光、电子束技术的应用，又使金属获得了新的表面热处理和化学热处理方法。

3) 热处理的工艺分类

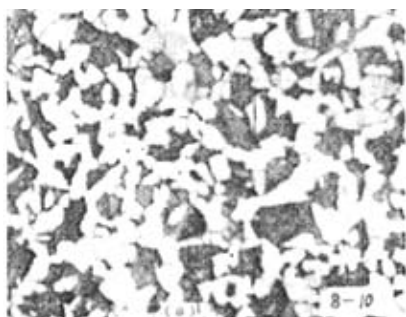
热处理工艺一般包括加热、保温、冷却三个过程，有时只有加热和冷却两个过程。这些过程互相衔接，不可间断。

加热是热处理的重要工序之一。金属热处理的加热方法很多，最早是采用木炭和煤作为热源，进而应用液体和气体燃料。电的应用使加热易于控制，且无环境污染。利用这些热源可以直接加热，也可以通过熔融的盐或金属，以至浮动粒子进行间接加热。

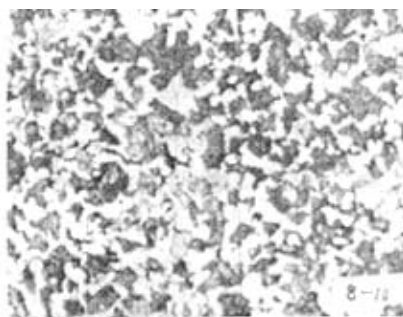
金属加热时, 工件暴露在空气中, 常常发生氧化、脱碳(即钢铁零件表面碳含量降低), 这对于热处理后零件的表面性能有很不利的影响。因而金属通常应在可控气氛或保护气氛中、熔融盐中和真空中加热, 也可用涂料或包装方法进行保护加热。

冷却也是热处理工艺过程中不可缺少的步骤, 冷却方法因工艺不同而不同, 主要是控制冷却速度。一般退火的冷却速度最慢, 正火的冷却速度较快, 淬火的冷却速度更快。但还因钢种不同而有不同的要求, 例如空硬钢就可以用正火一样的冷却速度进行淬硬。

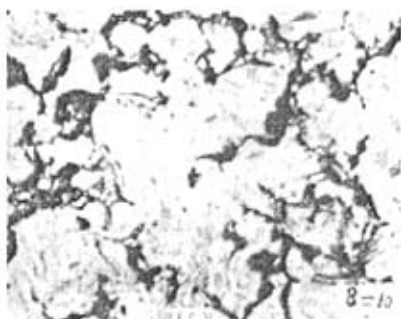
退火是将工件加热到适当温度, 根据材料和工件尺寸采用不同的保温时间, 然后进行缓慢冷却, 目的是使金属内部组织达到或接近平衡状态, 获得良好的工艺性能和使用性能, 或者为进一步淬火作组织准备。正火是将工件加热到适宜的温度后在空气中冷却, 正火的效果同退火相似, 只是得到的组织更细, 常用于改善材料的切削性能, 也有时用于对一些要求不高的零件作为最终热处理。



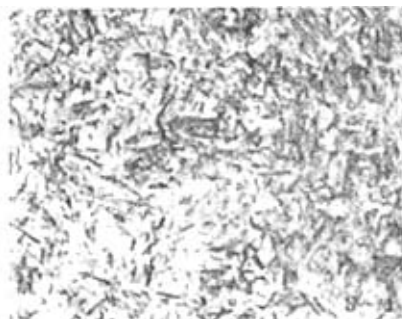
(a) 840°C退火



(b) 840°C正火



(a) 840°C油冷



(b) 840°C水冷

图 1.1 45 钢在不同冷却速度下的组织

淬火是将工件加热保温后,在水、油或其他无机盐、有机水溶液等淬冷介质中快速冷却。淬火后钢件变硬,但同时变脆。为了降低钢件的脆性,将淬火后的钢件在高于室温而低于 650℃ 的某一适当温度进行长时间的保温,再进行冷却,这种工艺称为回火。退火、正火、淬火、回火是整体热处理中的“四把火”,其中的淬火与回火关系密切,常常配合使用,缺一不可。

“四把火”随着加热温度和冷却方式的不同,又演变出不同的热处理工艺。为了获得一定的强度和韧性,把淬火和高温回火结合起来的工艺,称为调质。某些合金淬火形成过饱和固溶体后,将其置于室温或稍高的适当温度下保持较长时间,以提高合金的硬度、强度或电性磁性等。这样的热处理工艺称为时效处理。

1.2.2 热处理的温度控制

加热温度是热处理工艺的重要工艺参数之一,选择和控制加热温度,是保证热处理质量的主要问题。加热温度随被处理的金属材料 and 热处理的目的不同而异,但一般都是加热到相变温度以上,以获得高温组织。另外转变需要一定的时间,因此当金属工件表面达到要求的加热温度时,还须在此温度保持一定时间,使内外温度一致,使显微组织转变完全,这段时间称为保温时间。采用高能密度加热和表面热处理时,加热速度极快,一般就没有保温时间,而化学热处理的保温时间往往较长。

要想实现准确的温度控制,就必须准确掌握某温度下金属材料的性能特点,根据需要的性能来决定需要的加热温度和保温时间。长期的实践和研究表明,材料的性能是由其内部的微观组织结构所决定的,显微组织的测量与分析是判断材料状态和内部结构的主要途径。这时候,微观组织的定量测量成为需要解决的头等问题。而金相的定量测量最好的办法就是与计算机结合的图像处理技术。

一般的图像处理分析系统主要由图像拾取和图像分析两大系统构成,前者由光学镜头、扫描台和存储设备等硬件组成,后者主要是指用于图像处理和分析计算的软件。鉴于此种特点,国内多家研究机构和大学在现有硬件设备的基础上,或是自行开发,或是直接利用当下流行而又廉价的图形软件来替换昂贵的图像分析仪去完成图像处理和显微组织定量分析的工作。

通过图像处理技术的应用,迅速、廉价、准确地获取金相微观组织的定量信息,为加热温度的控制系统提供依据,实现加热温度的优化控制。

1.3 材料微观组织的研究现状

材料的组织特征与性能存在着密切的联系：如晶粒尺寸减小，屈服强度增加；位错密度增加，流变应力增加；单相合金界面积增加，硬度提高。但粗略地描述不能确切表达他们之间地关系，因此，给出确切的组织参数，建立组织参数与性能、状态间更为本质的、定量的关系，是材料科学所迫切需要的。

概括地讲测量晶粒大小，复相合金中各组织（或相）的相对量，界面曲率，位错密度，第二相粒子尺寸及分布等都属于定量金相的范畴。我们可以通过微观组织特征参量的定量测量，建立组织参数、状态、性能间的定量关系，寻其变化规律，从而达到合理设计合金，预报、控制评定材料质量及从事理论研究等目的。

定量金相的基础是体视学。由于金属不透明，不能直接观察三维空间的组织图像，故只能在二维截面上得到微观组织的有关几何参数，然后运用数理统计的方法推断三维空间的几何参数，即用二维组织图像来解释三维组织图像，这门学科称为“体视学”^[30-31]。

用于做定量测量时显示微观组织图像的工具是多种多样的，凡是能显示测量对象各类显微镜均可做定量测量。如光学显微镜，电子显微镜、场离子显微镜等。测量可通过装在目镜上的测量模板直接测量观察到的组织，也可以在投影显微镜的投影屏幕上或在微观组织照片上进行测量。测量的手段可由人工进行，也可借助专门的图像分析仪进行。

定量测量的量必须具有统计意义，为了获得一个可靠的数据往往需要几百次至上千次的重复测量，因此，由人工测量得到定量信息是件耗时而且乏味的工作，有时产生的误差也较大。为了解决这一问题，近几十年来人们探索进行自动图像测量取得了显著的进展。

材料微观组织结构图像的获取、存储和传输新方法以及更好的图像处理、分析方法的不断出现和改进，体视学原理与实验技术的不断发展和普及应用，计算机硬件与软件能力的高速发展均为材料显微组织形态学由定性表征向定量表征、由二维观测向三维几何形态信息测试的发展和应用提供了难得的机遇。同时，实验方法的高度自动化和大量微观组织定量数据的轻易获取也导致了某些先进图像分析实验方法的误用或不必要的使用提供了更多的可能性，亦不能不引起高度重视。

1.3.1 组织分类

组织有宏观和微观两种。宏观组织是指 30 倍以下的放大镜或人的眼睛直接能观察到的金属材料内部所具有的各组成物的直观形貌。例如观察金属材料的断口组织，渗碳层的厚度，以及经酸浸蚀后低倍组织等，一般分辨率是 0.15mm。微观组织是指光学显微镜下能够看到的金属材料内部所具有的各组成物的直观形貌。一般分辨率为 μm 或 nm 级。它所包含的内容是各种相，各种相的形状，大小，分布及相对量等^[32]。

经抛光的金属材料试样，在显微镜下检查，只能分析研究非金属夹杂物的组织。经浸蚀后的试样在显微镜下检查，则可看到各种形态的组织，但就相的多少来说归纳起来有下列三类：

(1) 单相组织：它包括纯金属和单相合金，在显微镜下看到的是许多边形晶粒组成的多晶体组织。例如经常看到的工业纯铁，Fe-Si 和 Cu-Ni 等合金的组织。研究晶粒界，晶粒形状、大小，以及晶粒内出现的亚结构。

(2) 两相组织：这一类组织的花样很多，如 60/40 黄铜即 $\alpha + \beta$ 黄铜；Al-Si 合金；Pb-Sn 合金，Sn-Sb 合金和 Cu-Pb 合金等的组织。

(3) 多相组织：许多高合金钢多半是具有多相的复杂组织，如高速钢、不锈钢耐热钢等。

Pb-Sn-Bi 三元合金，是金相实验中经常看到的最简单的三相组织。

这些组织中相的相对量、形状、大小、分布是最重要的内容。

1.3.2 组织与性能

组织是性能的根据，性能是组织的反映。

影响组织变化的条件首先是合金的成分，不同的合金显示不同的组织。当合金的成分确定后，影响金属材料组织变化的因素就是生产工艺条件。凝固、锻压及热处理等对组织的形成影响极大。例如在生产中普通浇注的铸锭和连续铸锭的组织不同，前者的宏观组织显示出细等轴晶区、柱状晶区及中心大等轴晶区，呈典型的铸锭组织；而后者柱状晶发达，中心等轴晶极少。又如同是含碳量 0.2% 的碳钢，一般浇注条件得到魏氏组织而退火条件得到的组织为均匀的铁素体晶粒和珠光体。同样是 20 钢从奥氏体化区空冷则得到细小均匀的铁素体晶粒和珠光体。

1.3.3 微观组织特性

在实际金属材料的金相分析研究中，应当注意材料显微组织的如下特点，尤其有助于实验方案设计的系统性和严谨性，以及减少对表面微观组织形态的误解和不合理分析的可能性。

1) 材料显微组织结构的多尺度性

晶粒微观组织层次, 细观组织层次, 宏观组织层次等。

2) 材料显微组织结构的不均匀性

实际显微组织常常存在几何形态学上的不均匀性, 化学成分的不均匀性, 微观性能(如显微硬度、局部电化学位)的不均匀性等。

3) 材料显微组织结构的方向性

包括晶粒形态各向异性, 低倍组织的方向性, 晶体学择优取向, 材料宏观性能的方向性等多种方向性, 应予以分别分析和表征。

4) 材料显微组织结构的多变性

化学组成改变, 外界因素及时间变化引起相变和组织演变等均可能导致材料微观组织结构变化, 从而, 除需要对静态微观组织形态进行定性、定量分析外, 应注意是否存在对固态相变过程、微观组织演变动力学和演变机理研究的必要。

5) 材料显微组织结构可能具有的分形(fractal)特性和特定金相观测可能存在的分辨率依赖特性

可能导致其显微组织定量分析结果强烈依赖于图像分辨率, 当进行材料断口表面组织形态进行定量分析以及对显微组织数字图像文件进行存储和处理时更应注意这一点。

6) 材料显微组织结构非定量研究的局限性

虽然微观组织的定性研究有时尚可满足材料工程的需求, 但材料科学分析研究总是还需要对微观组织几何形态的科学进行定量测定以及对所得定量分析结果的误差分析(随机误差、系统误差、粗差)。

7) 材料显微组织结构截面或投影观测的局限性等等

铸铁片状石墨及珠光体三维结构的深蚀观测已表明该类局限性极易导致人们对截面图像或投影图像的错误解读。

从材料的微观组织的多尺度性、不均匀性、方向性、多变性这些特点我们可以得出的结论是: 我们需要对微观组织进行定量的分析研究, 并把定量分析与高精度度、快速、方便的图像处理技术联系起来。在此基础上对材料的微观组织的演变机理进行研究。

1.3.4 显微组织研究现状

金相技术作为材料研究和检验手段, 要追溯到索拜(Sorby) 1860 年开始运用光学显微镜研究金属内部组织并于 1864 年在历史上最早发表金属显微组织的论文^[30]。此后, 光学显微镜逐渐成为研究和检验金属材料组织的有效手段。正因如此, 金相学被认

为是金属学的先导，是金属学赖以形成与发展的基础，亦曾被用作早期金属学的代名词；金属材料与热处理专业在过去相当一段时期内则被简称为“金相专业”。同样，光学显微镜技术对于无机非金属材料学和其它材料分支学科的重要作用亦类同于其对于金属学；国际上亦有建议采用材相学(materialography)取代金相学之称，以反映其研究对象已从金属材料拓展到无机非金属材料和高分子材料、复合材料这一现实。

目前，金相技术仍是材料科学与工程领域最广泛应用的、易行有效的研究和检验方法，金相检验则是各国和 ISO 国际材料检验标准中的重要物理检验项目类别。但随着材料研究与检验方法的不断丰富，为与其它实验手段区分，目前金相学习上已只取其狭义，主要指借助光学（金相）显微镜、放大镜和体视显微镜等对材料显微组织、低倍组织和断口组织等进行分析研究和表征的材料学科分支，既包含材料三维显微组织的成像及其定性、定量表征，亦包含必要的样品制备、准备和取样方法。其观测研究的材料组织结构的代表性尺度范围为 10^{-9} ~ 10^{-2} m 数量级，主要反映和表征构成材料的相和组织组成物、晶粒（亦包括可能存在的亚晶）、非金属夹杂物乃至某些晶体缺陷（例如位错）的数量、形貌、大小、分布、取向、空间排布状态等。当需要对不透明材料的三维显微组织进行无偏定量表征时，基于几何概率学、定量金相学和图像分析技术等发展起来的材料体视学测试技术则成为必不可少的工具。

1.4 图像技术的发展及应用

1.4.1 图像技术的发展

“图”是物体透射光或反射光的分布，“像”是人的视觉系统对图的接收在大脑中形成的印象或认识。图像是两者的结合。人类获取外界信息是靠听觉、视觉、触觉、嗅觉、味觉等，但绝大部分（约 80%左右）来自视觉所接收的图像信息。但直到第三代计算机问世后，图像处理技术才得到迅速发展。1964 年美国的喷气推进实验室应用第三代计算机处理了太空船“徘徊者 7 号”发回的月球照片，标志着图像处理概念开始得到重视和应用。从今年美国“勇气号”火星探测车登陆火星后经过 1.2 亿公里后所传送到地球的火星各种画面来看，短短的四十多年，图像处理技术有了突飞猛进的发展。并已经从信息处理、自动控制系统理论、计算机科学、数据通信、电视技术等学科中脱颖而出，成长为旨在研究图像信息获取、传输、存储、变换、显示与综合利用的崭新学科。通信、广播、计算机技术乃至生物学、医学、社会科学的尖端课题无一不与图像处理技术的发展密切相关。如今的图像处理技术已经给人类带来了巨大的经济效益^[52~55]。

1.4.2 图像技术的应用

图像处理就是对图像信息进行加工处理，以满足人的视觉心理和实际应用的需要。简单的说，依靠计算机对图像进行各种目的的处理我们就称之为数字图像处理。早期的数字图像处理的目的是以人为对象，为了满足人的视觉效果而改善图像的质量，处理过程中输入的是质量差的图像，输出的是质量好的图像，常用的图像处理方法有图像增强、复原等。随着计算机技术的发展，有一类图像处理是以机器为对象，处理的目的是使机器能够自动识别目标，这称之为图像的认识。

通常所说的数字图像处理（Digital Image Processing）是指用计算机进行的处理，因此也称为计算机图像处理（Computer Image Processing）。总的来说，数字图像处理包括以下内容^[33-35]：

1) 点运算

点运算主要是针对图像的像素进行加、减、乘、除等运算。图像的点运算可以有效地改变图像的直方图分布，这对提高图像的分辨率以及图像均衡都是非常有益的。

2) 几何处理

几何处理主要包括图像的坐标转换，图像的移动、缩小、放大、旋转，多个图像的配准以及图像扭曲校正等。几何处理是最常见的图像处理手段，几乎任何图像处理软件都提供了最基本的图像缩放功能。图像的扭曲校正功能可以将变形的图像进行几何校正。

3) 图像增强

图像增强的作用主要是突出图像中重要的信息，同时减弱或者去除不需要的信息。常用的方法有直方图增强和伪彩色增强等。

4) 图像复原

图像复原的主要目的是去除干扰和模糊，从而恢复图像的本来面目。例如去噪声复原处理。

5) 图像形态学处理

图像形态学是数学形态学的延伸，是一门独立的研究学科。利用图像形态学处理技术，可以实现图像的腐蚀、细化、和分割等效果。

6) 图像编码

图像编码研究属于信息论中信源编码的范畴，其主要宗旨是利用图像信号的统计特性及人类视觉特性对图像进行高效编码，从而达到压缩图像的目的。图像编码是数字

图像处理中一个经典的研究范畴,有 60 多年的历史,目前已经制定了多种编码标准,如 H.261、JEPG、和 MPEG 等。

7) 图像重建

图像的重建起源于 CT 技术的发展,是一门新兴的数字图像处理技术,主要是利用采集的数据来重建出图像。图像重建的主要算法有代数法、迭代法、傅立叶反投影法和使用最广泛的卷积反投影法等。

8) 模式识别

模式识别也是数字图像处理的一个新兴的研究方向,当今的模式识别方法通常有 3 种:统计识别法、句法结构模式识别法和模糊识别法。目前广泛应用的文字识别(OCR)技术就是应用模式识别技术开发出来的。

其中典型的应用有:

1) 遥感技术中的应用

遥感图像处理的用处已越来越大,并且其效率和分辨率也越来越高。它被广泛地应用于土地测绘、资源调查、气象监测、环境污染监督、农作物估产和军事侦察等领域。目前遥感技术已经比较成熟,但是还必须解决其数据量庞大、处理速度慢的缺点。

2) 医学应用

图像处理在医学上有着广泛的应用。其中最突出的临床应用就是超声、核磁共振、 γ 相机和 CT 等技术。在医学领域利用图像处理可以实现对疾病的直观诊断和无痛、安全方便的诊断和治疗,受到了广大患者的欢迎。

3) 安全领域

利用图像处理的模式识别等技术,可以应用在监控、指纹档案管理等安全领域中。目前油清华大学工程物理系开发研制的大型集装箱检测系统,就是利用图像处理技术来实现全自动集装箱检测,从而加快了海关的工作效率,为打击走私立下了汉马功劳。

4) 工业生产

产品的无损检测也是图像处理技术的一项广泛的应用。

总之,图像处理技术的应用是相当广泛的,它在国家安全、经济发展、日常生活中充当着越来越重要的角色,对国计民生有着不可忽略的作用。

1.5 图像处理技术在材料微观组织方面研究和应用的现状

金相学或微观组织学在材料科学与工程领域中的重要功能是对材料的宏观和显微组织及其与材料加工处理过程的行为、性能以及使用功能的关系给出真实和统计可靠的定量描述。微观组织的定量化分析已经成为金相学的一个重要分支,它随着材料科学、体

视学和计算机技术的有机结合而得到发展,许多材料工作者都致力于这方面的研究。传统的利用定量金相学的原理测量微观组织都是用人工完成的,工作量大而繁琐,费时费力。

近年来新兴起来的数字图像分析技术很好的解决了这个问题,把人们从繁琐的重复劳动中解脱了出来。国外起步较早,如 Russ 于 1991 年发表文章论述了采用计算机辅助进行球铁等材料结构的图形分析法^[36], Leithner 也论述了利用计算机进行定量分析的一些基础知识^[37],这些技术都使得定量金相得到广泛应用^[38~40]。同时也推出了各种图像分析仪,如英国 Leico 公司推出的 Quantiment Soo 系统等。国内在这方面的研究从早期的引进为主发展到现在的原创性研究,如华中科技大学对扫描电镜进行改进实现了材料断口形貌的分析^[41],北京钢铁研究总院的 CSR298 型彩色图像粒度分析仪^[42],这些都极大地推动了微观组织定量分析的前进步伐。

在获得不透明材料三维组织几何形态的定量表征信息方面,图像分析起着几乎不可替代的作用。图像分析技术可定义为从图像(多为二维)中提取特定几何形态和光密度数据的技术或方法。然而,至今为止的自动图像分析和人工图像分析技术,所得数据一般均仅限于一维或二维图像的定量信息,难于直接用于建立组织结构与材料性能或功能间的定量关系,或对所得关系难于给出具有实际物理意义的解释,具有明显的局限性。而图像分析技术与体视学的有机结合,则使组织图像的定量分析(定量金相学)成为材料科学与工程发展史上最成功的实验技术之一。

体视学(stereology)是建立从高维(三维)组织的截面(二维金相磨面)图像所获得的低维测量量与定量表征该组织本身的三维空间组织参数之间关系的数学方法并加以应用的一门交叉性科学^[31]。三维结构的二维截面或投影图像丢失了三维结构的许多信息,但仍有大量三维信息隐含其中。体视学的作用即在于其复原二维图像分析结果中隐含的三维定量信息的强大功能。体视学分析可以获得二维图像所对应的三维组织结构的极为宝贵的、用其它方法无法获得的系统性的三维空间定量描述信息,从而使二维图像分析的原始数据得到更充分的利用。因此,首先需要解决的问题是不同加热温度下的二维图像特征分析与处理。

数字图像分析技术是光学、电子学、数字计算技术及相应的信号处理技术相结合而产生的新兴技术。根据二维截面或投影面上的图像参数去推断三维的空间图像参数,提取需要的特征信息并自动进行处理及输出特征参数值^[43]。将数字图像分析技术应用于金属材料组织的定量分析,使人们摆脱了长期采用传统的定性和半定量的方法对金相组织进行分析和评定^[44]。由于数字图像分析技术对试样的每一视场的各特征参数的统计、计

算均由计算机完成，因此效率要比人工测量高得多。而且，图像由微小的像素点组成，普通的显示模式 $1024 \times 768 = 786432$ 个像素点，因而测量精度也比人工测量高。数字图像分析主要包括各种图像几何信息(尺寸、数量、形貌、位置)和密度信息(灰度、色彩)等的定量测量和计算，它应用了多种图像处理技术和数学方法，主要包括三个方面：

- 1、图像的数字化和编码，把图像从连续形式变换为离散形式，以进行计算机处理，并尽量节省存储空间和信息容量；
- 2、图像的增强和恢复，即改善图像质量，降低噪声；
- 3、图像的分割和描述，把图像变换成简化的“图形”，以进行定量参数测量和性质描述。

2 加热钢坯的金相磨面制作及微观组织图像采集的方法

“组织”是指构成材料各组成物的直观形貌，而“结构”是指材料中原子排列的特征，随着近代观测技术的发展，组织与结构之间的界限正被突破。为了正确地分析组织，必须掌握金相分析技术，它包括宏观组织分析、光学微观组织分析（光学金相方法）以及电子微观组织分析（电子金相方法）三类。

金属材料的宏观组织主要是指肉眼或低倍（ ≤ 30 倍）下所见的组织，宏观分析的优点是方法简便易行，观察区域大，可以综观全貌。它的不足之处是人眼分辨率有限，缺乏洞察细微的能力，这就促使人们找寻新的工具和手段，突破视觉的生理界限，逐步发展微观组织分析方法。

金属材料的微观组织是指在放大倍数较高的金相显微镜下观察到的组织。光学显微镜用于金相分析已有一百多年的历史，比较成熟，目前仍是生产检验的主要工具。它的最大分辨率 ≤ 0.2 微米，使用放大倍数一般小于 2000 倍。电子显微镜有更高的分辨率和放大倍数，因此在金相分析中得到愈来愈广泛的应用。

2.1 钢坯加热实验微观组织获取过程

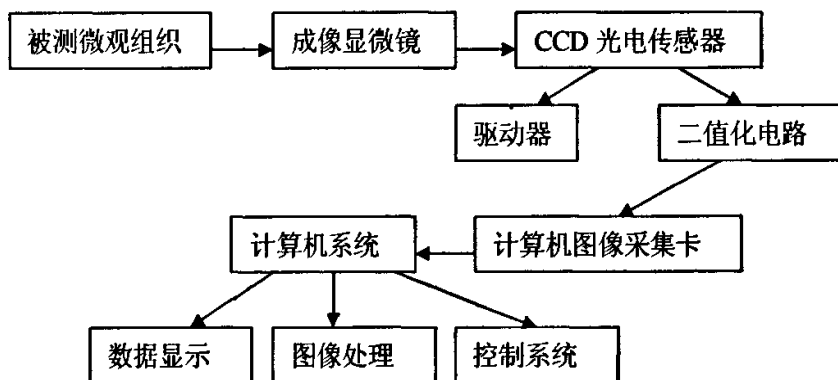


图 2.1 微观组织采集与控制流程

如上图 2.1 为钢坯加热实验中材料的微观组织获取过程的示意图，材料的微观组织通过成像显微镜获得图像，并把图像反映在 CCD 光电传感器上，把微观组织图像转化成电信号通过图像采集卡输入计算机，计算机利用图像处理软件对微观组织图像进行处理与分析，把有用的结果数据反馈给控制系统，控制加热过程的优化。

2.2 金属磨面的制作方法

要想观察到真实的、清晰的微观组织，首先要制备好金相样品。

金相试样的制备包括取样 → 磨制 → 抛光 → 浸蚀 等几个步骤。

取样应考虑的问题是：取样部位、切取方法，检验面的选择以及样品是否要装夹或镶嵌。

试样的截取可采用不同方法，如手锯、砂轮切割、机床截取或气割等。但不论用何种方法，都要避免检验部位过热或变形而使试样组织发生变化。

2.2.1 金相试样的截取与镶嵌

金属材料铸件、型材或破损零件的检验，在什么部位取样是很重要的。取样部位的恰当与否，直接影响检验结果的正确与谬误。

金相试样截取部位决定于检验的目的与要求。例如要求检验机械设备某零件破损的原因，就应该在零件破裂处和远离破裂处分别取样，观察组织的异同，分析比较找出导致破裂的可能原因。

对于热轧型材应同时截取横向及纵向的金相试样。横向试样垂直于轧制方向截取，主要研究表面缺陷（如脱碳折叠等）及非金属夹杂物的分布；对于很长的轧制型材，应在两端和中间各取试样观察，以比较夹杂物的偏析情形。纵向试样平行轧制方向截取，主要研究非金属夹杂物的形状，以决定夹杂物的类型，同时也可以根据纵向磨面上晶粒拉长的程度，估计冷变形程度以及轧制工艺的情况。

经过一系列热处理工艺后的机械零件，其内部的金相组织是比较均匀的，可以截取任一截面的试样，但有时也应注意零件的表层情况如氧化，脱碳等。表面化学热处理和镀层部件取样应垂直于表面。以便观察其组织，和测试其厚度。

金相试样取样部位确定以后，应进一步确定哪一个试样面作为磨面。一般在研究结果或检验报告上所列金相图片，必须说明试样截取的部位与金相磨面的方向，有些情况下还应该绘图示意标出。

上述截割磨平的试样，如果形状尺寸合适，便可直接进行磨光、抛光操作。但是形状不规则，尺寸过于细薄（如薄板、细线材、细管材等），磨光抛光不易持拿的试样，需要镶嵌成较大尺寸，便于操作。软的、易碎、需要检验边缘组织的试样，以及为了便于在自动磨光和抛光机上研磨的试样，都需要镶嵌。试样镶嵌的方法很多，早期镶嵌试样，通常是用低熔点金属材料，如乌德合金和立普氏合金（熔点 70℃）等。虽然目前这些镶嵌材料被塑料镶嵌所代替，但是有些试样的制备中仍然需要它。拜德尔

(Bender) 研究钠时, 制备钠的试样就是用乌德合金镶样, 因为有机的镶样材料与钠起作用。目前广泛应用的方法有塑料镶嵌法和机械夹持法。

2.2.2 金相试样的磨光与抛光

磨平与抛光的基本要求是在磨平表面的同时, 尽力防止造成假相, 为揭示真实组织准备好条件。

磨平: 将试样先后用砂轮及粗、细砂纸磨平。操作中应使试样受力均匀, 压力适中。打砂轮时试样要充分冷却, 以免过热引起组织变化。

抛光: 目的是去除细磨痕以获得光滑的镜面, 并去除形变扰乱层。

常用的方法有机械抛光、电解抛光、化学抛光或它们的综合应用。

经截取镶嵌好的试样, 表面粗糙, 形变层厚。在显微镜检查之前, 必须经过磨光与抛光。在磨光与机械抛光过程中的一个共同问题就是磨料的选择。磨料选择恰当与否, 对制备好金相样品是极其重要的。

只有金刚石和氧化铝既适用于粗磨、细磨, 也适用于粗抛、细抛。是金相样品制备的最好磨料。其次适合于磨光用的是 SiC 混合刚玉 (Emery) 和人造刚玉等; 适合于抛光用的是氧化镁 (MgO), 氧化铁 (Fe_2O_3) 和氧化铬 (Cr_2O_3)。

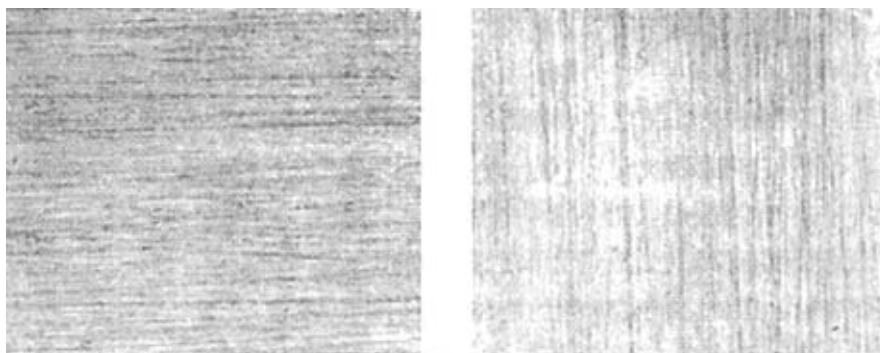
磨光是为了消除取样时产生的变形层。变形层消除的步骤, 根据取样的方法不同, 略有差异。一般是先用砂轮磨平而后用砂纸磨光。如果是用砂轮切割机或钼丝切割机截取的试样, 表面平整光滑, 可以直接在砂纸上打磨。磨光操作一般有两种, 一种是手工磨光, 一种是机械设备来磨光。

金相经磨光后, 有细微磨痕以及表面仍有金属的形变扰动层, 影响正确的显示组织, 因而必须抛光。抛光的目, 一方面为抛掉磨面上的痕迹, 另一方面为消除磨面上的形变扰动层。抛光的基本方法有机械抛光, 化学抛光和电解抛光。也有把化学与机械抛光结合在一起, 形成化学机械抛光, 也有把电解与机械抛光结合在一起, 形成电解机械抛光。机械抛光是普遍广泛应用的方法。抛光是金相试样制备过程的最后一道操作, 抛光结果的好坏与磨光是密切相联的, 抛光前应仔细检查磨面的磨光质量, 然后再进行抛光。

金相样品的制备要得到好结果, 清洁是相当重要的。伴随着磨光和抛光的每一步操作, 必须相应地进行一次清洁, 把磨光和抛光时的磨料颗粒从试样上完全消除, 以免污损, 影响下一步的制样效果。细磨到粗抛这一步特别关键, 需要彻底地清洁。化学抛光或电解抛光之前, 试样表面必须无油脂。试样表面上的残渣、手印和不易觉察到的膜, 能够使试样各部分的浸蚀速度不一样, 干扰浸蚀。

清洁的方法不少，最常用的是漂洗。可以直接在流水下冲洗；也可以在盛水容器中漂洗。漂洗时可以使用柔软毛刷或棉花球试擦。超声波清洗是最有效和彻底的清洗方法。不仅能够消除表面的污染，而且能够把裂缝、空腔中保留的细颗粒物清除掉。超声波清洗只需 10 到 30 秒。所以超声波清洗是目前最受欢迎的方法。

清洗后试样应当快速干燥。首先在酒精、苯或其他低沸点的液体中漂洗，然后置于热空气吹干机下，使裂缝、孔洞中保留的液体蒸发，表面不留任何残迹。



(a) 粒度 400 号砂纸磨痕

(b) 粒度 600 号砂纸磨痕

图 2.2 各号砂纸磨光时在金相磨面上留下的磨痕

2.3 金相磨面的微观组织图像采集方法

2.3.1 金相试样微观组织的显示

抛光好的金相试样，要得到有关微观组织的信息，还必须经过组织的显现。长期以来习惯地把这一步操作称为浸蚀或腐蚀，这是经典的化学浸蚀显示组织的延续。

抛光后的试样表面是平整的镜面，在显微镜下只能看到孔洞、裂纹、石墨、非金属夹杂物等。要观察金属的组织，必须采用恰当的浸蚀方法，使显微镜能真实地、充分地、细致地显示出来。常用的浸蚀方法有：化学浸蚀法和电解浸蚀法，此外还发展了若干显示组织的特殊方法。

未经浸蚀的金相试样，其组织组成的反光能力差别大于 10% 者才能明显地区分开来。例如钢中的非金属夹杂物，铸铁中的石墨等。不经浸蚀就能在光学显微镜下检验评级，就是由于这一种差别。多数情况下，抛光的金相试样，不经浸蚀，不显示其显微组织。由于组织组成的反光能力差别小，入射光均匀地被反射，人的眼睛不能区分其组织组成。

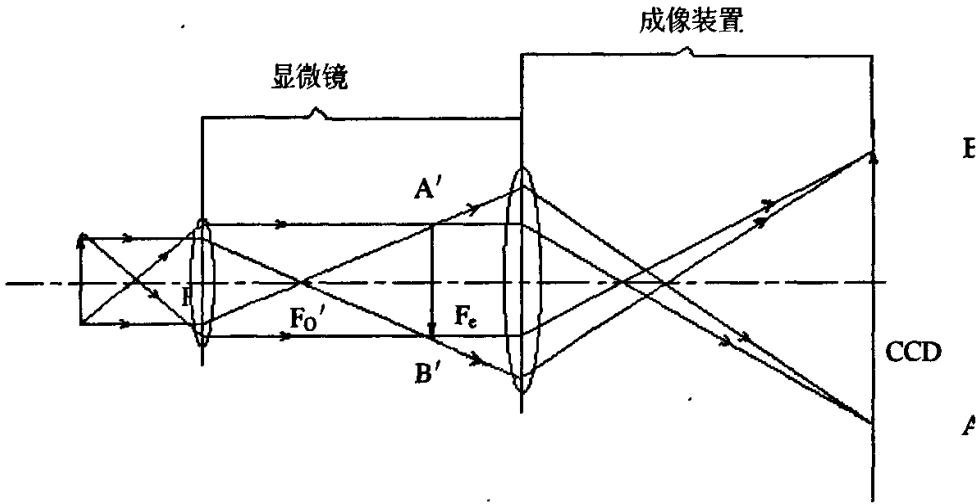
要使人眼能识别抛光金相试样组织中的各种相或组成，必须采用各种方法来显示组织，使相或组成间的衬度增大。显示组织的方法很多，根据对抛光表面改变的情况，归纳为光学法，化学（或电化学）法和物理法。

光学法是基于 Kohler 照明的原理，借助于显微镜上某些特殊装置，应用一定的照明方式显示组织，包括暗场、偏光、干涉和相衬。

2.3.2 金相试样的摄像

金相显微摄影借助于照相显微镜来完成，其照相原理和普通摄影（人像或景物）相同。照相显微镜的构造和观察用的金相显微镜基本相同，不过附加了一套照相装置。一类照相显微镜是在主体上已经配备了完善的照相用暗箱装置及照相镜头，如各类卧式及立式金相显微镜。另一类显微镜的主体不带照相装置，但另配备了一套适用该显微镜的摄影附件，这类显微镜是指直立式光程的台式金相显微镜。

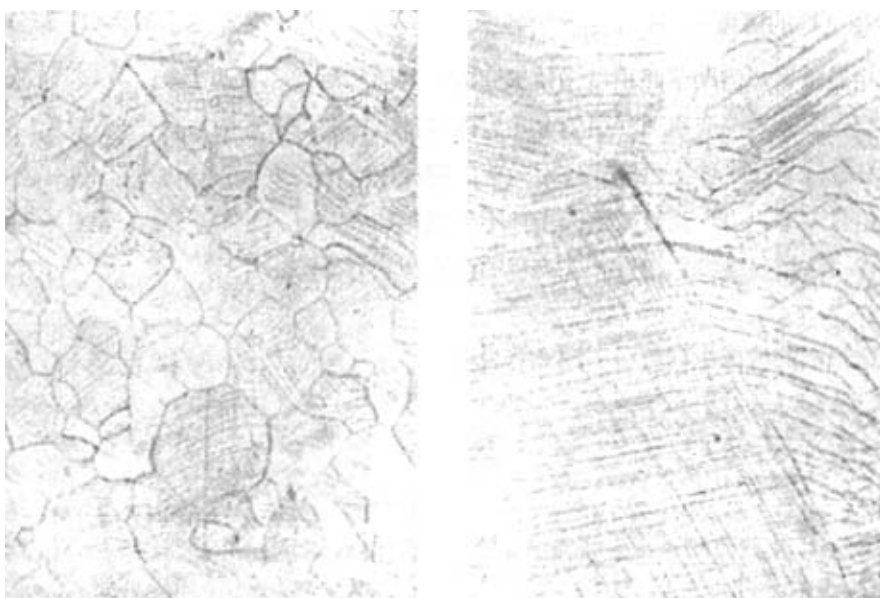
显微摄影的成像原理可由下图 2.3 说明。



E—显微镜的目镜；O—显微镜的物镜； F_0' —物镜的后焦点； F_e —目镜的前焦点；AB—被拍摄的微小物体（组织）； $A'B'$ —投影在 CCD 上 AB 的像； F_e' —目镜的出射光瞳

图 2.3 显微镜成像原理图

光线从微小物体 AB 射入物镜 O 后，在 I_1 处形成一个放大而倒立的实像 $A'B'$ 。由于 I_1 位于目镜的前焦点以外，所以 $A'B'$ 经目镜后在 CCD (I_2) 处形成一个进一步放大的实像 $A''B''$ 。待物像 $A''B''$ 聚焦清晰，即可通过 CCD 转换成数字信号，经过图像采集卡传入计算机，直接显示在计算机显示器上。



(a) 工业纯铁，机械抛光浸蚀后拉伸
拉伸前用 4% 硝酸酒精浸蚀
放大倍数 200

(b) 纯铝，电解抛光
抛光时有浸蚀，后拉伸
放大倍数 200

图 2.4 金相微观组织图像

2.4 本章小结

对金属材料的微观组织进行分析，首先要制取真实的、清晰的金相磨面，然后再采集微观组织图像，这些前期工作的好坏直接影响后面微观组织分析的成败，因此金相的制取很重要，其步骤为：

- 1) 金相磨面的制备包括取样 → 磨制 → 抛光 → 浸蚀 等几个步骤。
- 2) 金相磨面的微观组织图像采集分为金相试样的显示和摄像。

3 加热材料微观组织的静态图像分析

我们在生活中时时刻刻都在进行特征的分析。环顾四周，我们能认出周围的物体是桌子、椅子，能认出对面的人是张三、李四；听到声音，我们能区分出是汽车驶过还是玻璃破碎，是猫叫还是人语，是谁在说话，说的是什么内容；闻到气味，我们能知道是炸带鱼还是臭豆腐。我们所具备的这些识别特征的能力看起来极为平常，谁也不会对此感到惊讶，就连猫狗也能认识它们的主人，更低等的动物也能区别食物和敌害。因此过去的心理学家也没有注意到特征的识别是个值得研究的问题，就像苹果落地一样见惯不惊。只有在计算机出现之后，当人们企图用计算机来实现人或动物所具备的识别特征的能力时，它的难度才逐步为人们所认识。正如金属高温晶体的微观组织，人眼很容易把不同温度、不同材料的晶体图像区分开，但却很难让计算机做到这一点^[45]。

本文讨论的特征分析是让计算机实现人具有的特征识别的能力，也就是让加热炉现场控制设备的处理系统能够根据采样得到的金属晶体微观组织，能够进行合理的识别分类，并采用相应的处理措施。这里的特征分析，可以归类于计算机领域的模式识别。

有两种基本的特征分析的方法，即统计特征分析方法和结构（句法）特征分析方法，采用傅立叶变换获取的分类信息正是统计的特征分析的办法。基于统计的系统一般由四个部分组成：数据获取，预处理，特征提取和选择，分类决策，如下图所示：

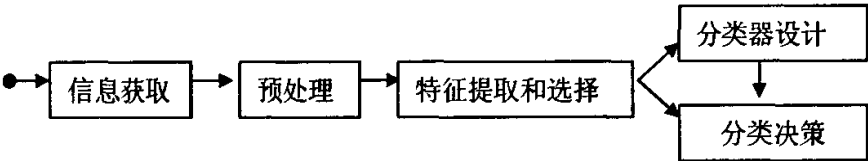


图 3.1 统计分析系统的基本构成

3.1 材料微观组织图像的特征观察

3.1.1 不同加热工艺过程中晶体变化特性

金属材料的加热工艺，其目的是：提高金属的塑性，使金属锭或坯内外温度均匀，改变金属的结晶组织。金属材料的结晶组织的改变直接决定材料的性能质量的改变。例如在钢铁中，不同的相（铁素体、珠光体、马氏体及奥氏体等）以及析出的第二相的大小、形状和分布状态都会影响钢的性能，因此，钢的组织与性能一直是各国冶金和材料

科学工作者的研究课题。而晶粒的组织形貌的改变直接受加热工艺的控制，下面以奥氏体晶粒的改变为例。

奥氏体晶粒的大小明显地影响钢的冲击韧性、强度、塑性以及切削加工等性能。在相同硬度条件下，小晶粒的冲击韧性要高得多。由图 3.2 所示的奥氏体形成过程可以看到，刚刚形成的奥氏体晶粒总是十分细小的。

正因为如此，才能通过控制加热温度，得到细小的奥氏体晶粒，通过细化组织改善性能。

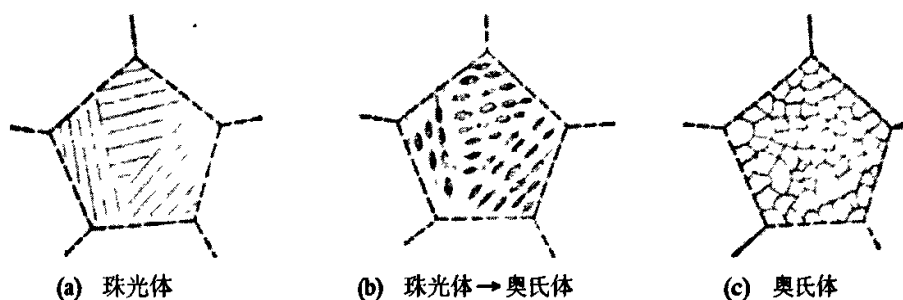


图 3.2 奥氏体起始晶粒形成示意图

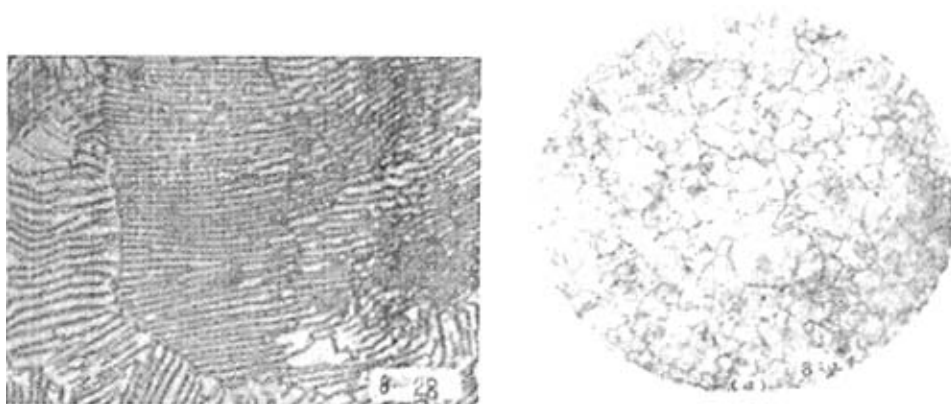


图 3.3 珠光体与奥氏体晶粒图像

3.1.2 温度对晶体成长的影响

加热温度对材料微观组织的形成和影响比较显著。图 3.4 是用热发射电子显微镜直接观察奥氏体晶粒长大的情况，同一试样在 1066℃ 加热，分别保温 3 分钟、30 分钟后的奥氏体晶粒大小。如图所示，随着温度的升高，保温时间的增长，加热时形成的奥氏体晶粒逐步长大。在一般情况下，加热温度是决定奥氏体晶粒大小的主要因素；但温度很高时，保温时间对晶粒长大的影响比较显著。

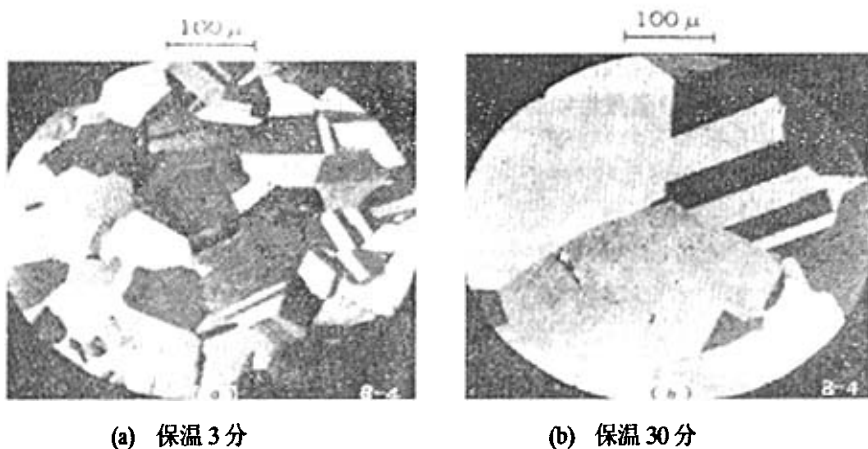


图 3.4 1066℃ 加热时保温时间对奥氏体晶粒大小的影响

3.1.3 晶体组织结构的复杂性

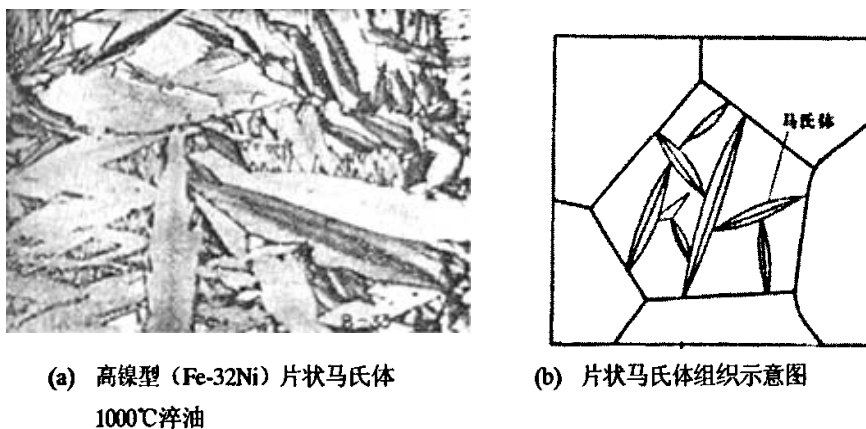


图 3.5 片状马氏体图像

材料的晶体微观组织结构非常复杂，即使是同一材料中的同一种晶相，其相互之间的差别也是非常大的。如图 3.5 所示马氏体晶相的形貌特点，很难从定量的角度去描述一种晶相组织的结构形式。由于材料晶相微观组织的复杂性与大量性，必须借助高速发展的计算机技术和图像处理技术，才能逐渐对材料的微观组织结构进行准确、快速的定性、定量描述。

3.2 材料微观组织图像的纹理特征统计分析

3.2.1 金相纹理

金属材料的晶相的微观组织结构往往可以表征为一些一致的结构，这些结构类似于布匹的纹理。金属材料微观组织的纹理特性度量可以作为材料性能定性分析的依据，以及指导各晶相图像的分类。

如下图 3.6 为材料在不同处理温度时的微观组织的纹理粗糙度比较。

(a) $\text{Pb}(\text{Zn}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ 800℃ (b) $\text{Pb}(\text{Zn}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ 1200℃

图 3.6 材料微观组织纹理粗糙度比较

一些学者试图定性地描绘纹理。Pickett^[46]指出“纹理可以用来描绘二维数组变量。在特征的重复性保留的情况下，间距或排列的要素和规则可以任意布置。”Hawkins^[47]给出了一个更为详细的纹理的描述“纹理的概念依赖于三个部分：

- 1) 一些局部“样式”在一个区域内重复出现，该区域的尺寸大于样式的尺寸；
- 2) 该试样的要点是基本部分非随机布置；
- 3) 这些部分是一些大致上均匀的物体，这些物体在纹理区域内的任何地方都有近似相同的尺寸。”

虽然这些纹理的描述在感觉上比较合理，但是这些方法却不能直接地用于简单地定量描述纹理，因为一个边缘不连续性的描述需要根据边缘的位置、倾斜角度和高度来对边缘定量描述。

在相同的视觉条件下,一个羊毛织物的质地比丝绸织物的质地要粗糙,在这个意义上说,纹理常根据其粗糙度来定性地描述。粗糙度与局部结构的空重复周期有关。周期大则表明纹理粗糙,周期小则表示纹理细密。这种感观上的粗糙度很明显不足以定量描述纹理,但是至少可以用来判断纹理尺寸的斜度,即纹理尺寸小的表示纹理细密,纹理尺寸大的表示纹理粗糙。

目前还没有一个普遍可以接受的对视觉纹理的量化定义。因此,正致力于寻找一个量化纹理度量方法的研究人员被迫依赖直觉来寻找纹理特征,并试图用原型特征和品质因素这两种定量的方法来评定他们的做法。

现在已经提出的有傅立叶频谱方法。边缘检测方法,如 Rosenfeld 和 Troy^[48]提出的一种度量一个邻域中边缘数量的方法作为对一个纹理的度量。自相关方法,自相关函数已经被提出用作纹理度量的基础,对于一个固定的变换点(m, n),一个粗糙纹理区域较之细密区域将呈现出更高的相关性,纹理粗糙度应与自相关函数的分布成比例, Faugeras 和 Pratt^[49]提出了自相关分布度量法。去相关方法、从属矩阵方法、微观结构方法、Gabor 滤镜方法、变换和小波方法、单值分解方法等。

3.2.2 纹理分析的傅立叶频谱方法

因为纹理的粗糙度与其空间周期成比例,在一个粗糙纹理区域中,纹理的傅立叶频谱能量应集中于低频空间区域。相对的细密纹理区域的傅立叶频谱能量则集中于高频空间区域。对于不同来源的图像来说,由于纹理模式重复周期和阶段中的空间变化,所以经常会出现一些困难,实验^[50]证明会存在相当多的具有不同自然纹理的区域的频谱重叠,如从航空图片中提取的城市、乡村和森林区域。但对于同种金属材料在不同状态下的微观组织图像,以及少数几种不同材料的微观组织图像,这种频谱的重叠是不会出现的。因此本文根据材料的微观组织的频谱特性来对材料进行定性的分类。傅立叶频谱分析在煤矿工人的黑色肺疾病的检测和分类中的成功应用^[50-51],可以作为傅立叶频谱分析能够成功应用于材料微观组织分析领域的有力支持。

可以把图像的频率用声音来类推说明,如下图 3.7 所示:

图 3.7(a)是高频(high frequencies)图像,(b)是低频(low frequencies)图像。由图可看出,声音的高频、低频是由产生声音的机械振动的快慢决定的,相对于声音,图像的高、低频是由图像纹理变化的快慢决定的。即高频图像代表的图像纹理细腻,低频图像代表的图像纹理粗糙^[56-57]。

如图 3.8,可清楚地看出图像的低频代表粗略部分,即总体灰度的平滑区域。图像的高频代表细微部分,即边缘和噪声。其中,(a)是粗略部分,(b)是细微部分。声音可

以用频率来控制，如通过立体声音响设备所附带的音调控制器，把 TREBLE(高音)调低的话将发出很闷的声音，相反把 BASS(低音)调低的话将发出尖利的声音。图像同样可以进行频率处理。以图 3.8 的处理为例，去掉高频成分的话，细微部分就消失了，从而图像变得模糊不清。相反去掉低频成分的话，粗略部分就不见了，仅留下边缘。用频率来处理图像，首先需要把图像进行频率变换。

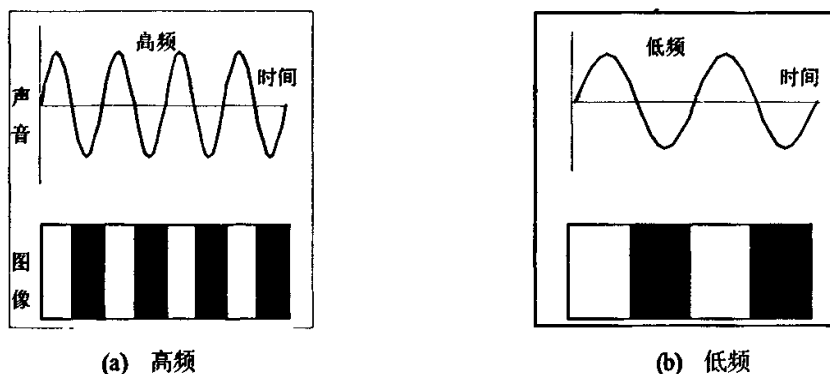


图 3.7 声音与图像的高频与低频的比较

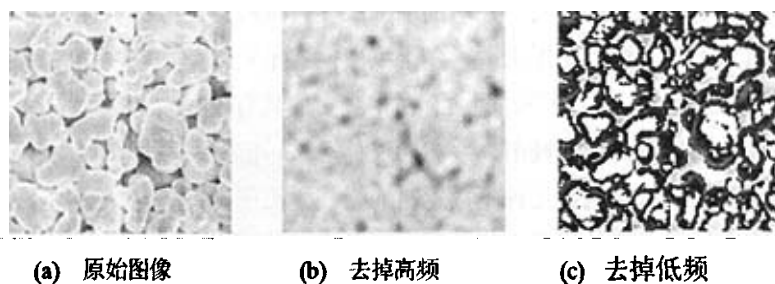


图 3.8 图像的低、高频显示

3.2.3 图像的傅立叶变换原理

数字图像处理的方法主要有两类：空间域处理法（空域法）及频域法（或者称变换域法）。

1) 空间域法

主要是在空间域中对图像像素灰度值直接进行运算处理。例如，将包含某点的一个小区域内的各点灰度值进行平均计算，用所得的平均值代替该点的灰度值，即所谓的平滑处理。空间域法的图像增强技术可以用下式来描述：

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (3.1)$$

其中， $f(x, y)$ 是处理前的图像； $g(x, y)$ 表示处理后的图像； $h(x, y)$ 为空间运算函数。

2) 频率域法

就是在图像的某种变换域中（通常是频率域中）对图像的变换值进行某种运算处理，然后变换回空间域。一般采用的变换方式都是线性正交变换，又称为酉变换。目前，图像的正交变换被广泛地运用于图像的特征提取、图像增强、图像复原、图像压缩和图像识别等邻域。

傅立叶变换是最常用的频率域法，是线性系统分析的一个有力的工具，它使我们能够定量地分析诸如数字化系统、采样点、电子放大器、卷积滤波器、噪声、显示点等的作用（效应）。从某种意义上来说，傅立叶变换就好比描述函数的第二种语言，能讲两种语言的人常常会发现，在表达某种观点时，一种语言会比另一种语言优越。

对于金属材料的微观组织的分析，可以先对图像进行傅立叶变换，再对图像的频谱进行某种修正（如滤波等），最后再将修正后的图像进行傅立叶反变换回空间域中，从而增强该图像。它是一种间接处理方法，可以用频率域增强模型来描述该过程。

$$f(x, y) \xrightarrow{\text{正变换}} F(u, v) \xrightarrow{\text{修正}} H(u, v) \xrightarrow{\text{逆变换}} g(x, y)$$

上式中 $f(x, y)$ 为输入图像， $F(u, v)$ 为图像经傅立叶变换后的频率， $H(u, v)$ 为滤波器的频率特性， $G(u, v)$ 为滤波后的图像的频率，而 $g(x, y)$ 为经傅立叶反变换重新转变到空间域的输出图像。

用傅立叶变换分析处理图像有许多优点，应用很普遍。但是傅立叶变换也存在明显的缺陷，比如傅立叶变换需要计算复数而不是实数，傅立叶变换的收敛速度慢等。

3.2.4 图像的二维傅立叶变换

图像是平面的，所以是二维信号，具有水平和垂直两个方向上的频率。另外在图像的频谱中常常把频率平面的中心作为直流分量。

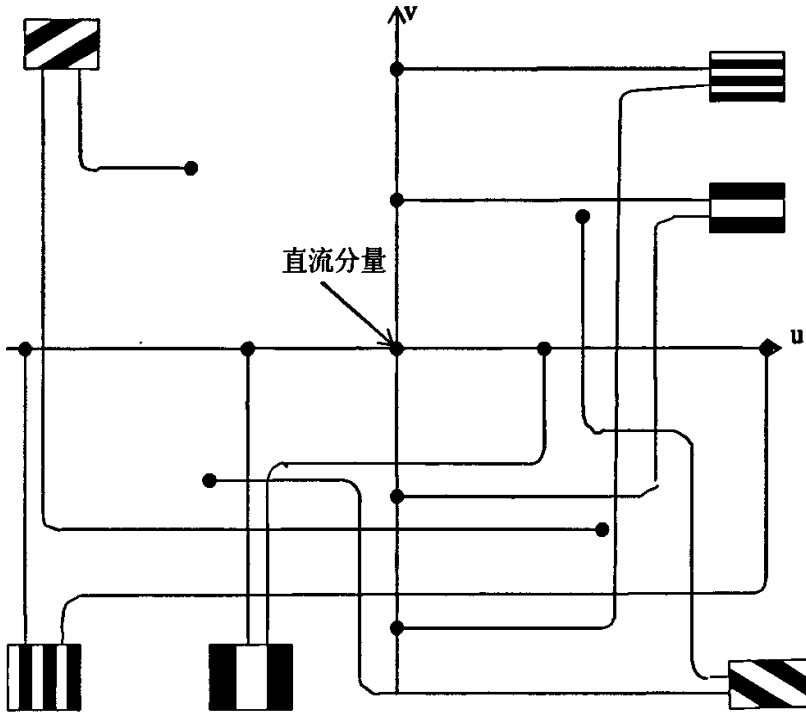


图 3.9 二维图像的频率变换示意图

图 3.9 是当水平频率为 u 、垂直频率为 v 时与实际图像对应的情形。同样二维频谱的幅度特性是以幅度 A 轴为对称轴的对称，相位特征是以原点为对称点的点对称，本文主要研究的是图像频率的幅度特性分布。可以看出，以 u 、 v 为对称轴，图像的频率的幅度对称分布，并且频率越低，越靠近图像的中心点。依据这一特点，可以通过统计频谱图像中高频、低频的分布，也就是靠近中心点的点的数量，达到定性分析图像粗糙度的目的，作为分析图像反映的材料组织性能的依据。

利用 `vc` 编程对图像进行快速傅立叶变换 FFT 算法，采用该算法进行离散傅立叶变换，把幅度特性作为灰度值来图像化，结果如图 3.10 所示（傅立叶推导公式及 FFT 算法见附录）。图 3.10(a)与 (b)进行比较，(a)是细节少的图像，(b)是细节多的图像，由图可知，细节少的图像上低频较多，而细节多的图像上高频较多。

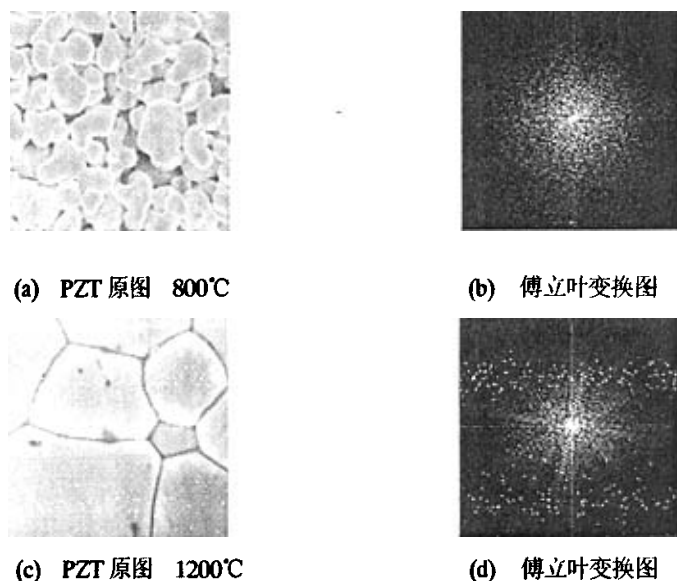


图 3.10 高低频图像的频谱图像比较

图中所示的 PZT 材料是采用熔结技术的 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ 陶瓷合金材料，PZT 材料由于卓越的压电性能被广泛应用于各种领域。在 PZT 陶瓷合金的烧结过程中 PbO 的气化蒸发问题使得其微观组织和机电性能难以控制，同时会引起环境的污染。低温烧结 PZT 陶瓷合金不仅能解决 PbO 的气化问题，同时也减少环境污染和处理设施的花费。因此，研究降低 PZT 陶瓷合金烧结温度引起学者们越来越多的关注。通过 SEM 电镜观测比较，分别在 800°C — 1200°C 时的微观组织图像，以及通过加入 $\text{LiBiO}_2 + \text{CuO}$ 作为烧结辅助添加剂后的微观组织图像，获得最佳结构性能时的状态。

通过傅立叶频谱纹理分析的方法，可以把 PZT 陶瓷合金在不同状态下的微观组织图像变换成频谱图像，从而通过分析图像的高低频分布来定性分析 PZT 陶瓷合金晶相的纹理分布，确定合金的性能状态，达到优化性能的目的。

3.2.5 图像频率滤波处理

滤波器 (filter) 的作用就是使某些东西通过，某些东西阻断。频率域中的滤波器则是使某些频率通过，使某些频率被阻断。

本文通过 vc 编程实现傅立叶滤波处理。这个程序通过设定参数 a 和 b 的值，使 a 以上、 b 以下的频率 (斜线表示的频率) 被阻断，其他的频率通过，以此来进行滤波处理，如图 3.11 所示。图 3.12(a) 所示是 PZT 陶瓷合金原图，(b) 是把图像经过 FFT 处理得到频率分布图，(c) 是把频率成分的高频分量设置为 0，(d) 是再进行 IFFT 处理变换

回空间域处理的图像。从处理的结果可以看出，图像的高频分量（细节部分）消失了，从而图像变模糊了。把低频分量设置为 0，其处理结果如图 7 所示。结果边缘被提取出来了，这是由于许多高频分量包含在边缘中的原因。

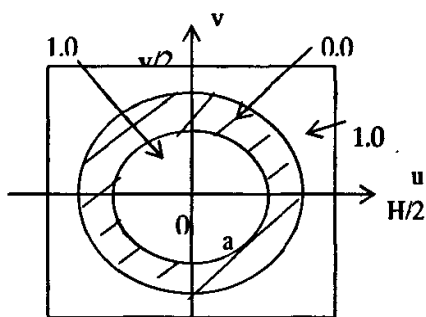
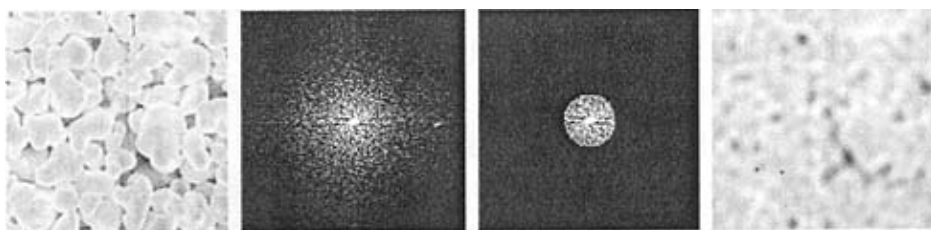
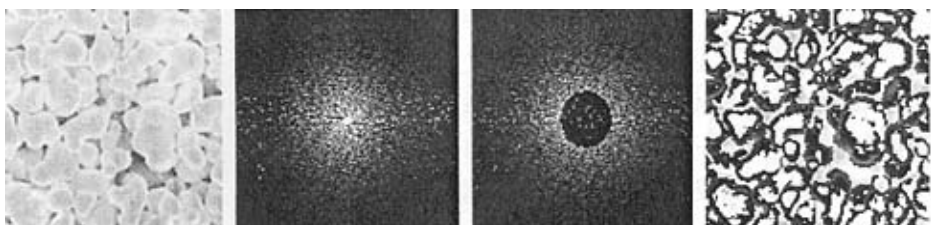


图 3.11 傅立叶滤波示意图



(a) PZT 原图 800℃ (b) 傅立叶变换图 (c) 频率滤波图 (d) 反变换输出图

图 3.12 高频滤波



(a) PZT 原图 1200℃ (b) 傅立叶变换图 (c) 频率滤波图 (d) 反变换输出图

图 3.13 低频滤波

从图 3.12 和 3.13 的处理结果可以看出, 可以通过计算以中心点为圆心、不同半径也就是不同频率的圆上点的个数来分析图像中高、低频晶体结构的数量, 达到定性分析图像粗糙度的目的, 作为分析图像反映的材料组织性能的依据。

3.2.6 图像纹理统计分析

本文通过 vc 编程实现微观组织频谱图像的不同半径(频率)的圆上的点的数量的统计。当通过灰度图像来表示图像的频率分布的时候, 某一频率结构的多少通过灰度图上同半径圆上像素点的数量以及像素点的灰度值来体现。因此, 本文利用 vc 编程统计不同半径的圆上像素点的平均灰度值, 即用某半径的圆的灰度级别代表该频率的晶体结构的多少。

如图 3.14、3.15 所示为 PZT 分别在 800°C 和 1200°C 时的频谱分布图。其中图(a)为微观组织图像的灰度二维分布图, 图(b)为图像的灰度三维分布图, 图 3.14 相对于图 3.15 就是高频图像。从两图的二维、三维灰度分布比较可以看出, 高频图像中的灰度较高的点比较分散, 而低频图像中的灰度较高的点集中在图像中心附近。

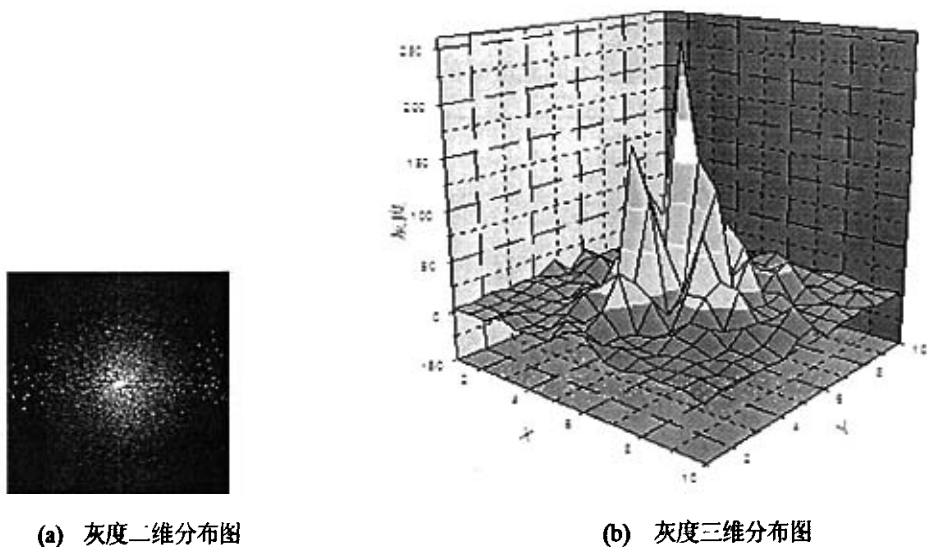


图 3.14 PZT 频谱分布图 800°C

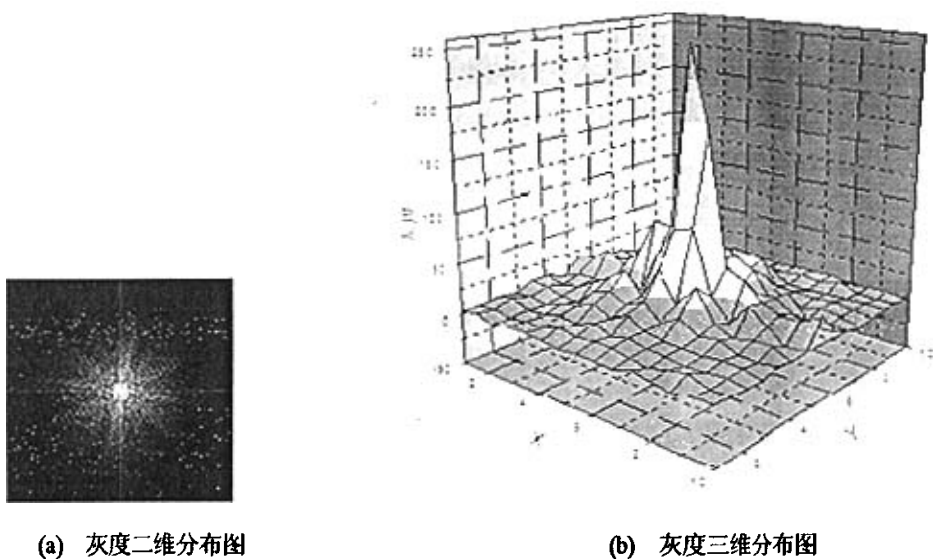
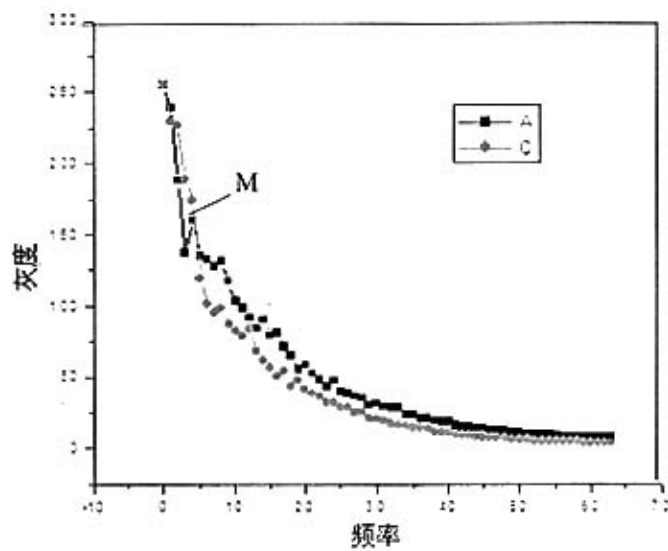


图 3.15 PZT 频谱分布图 1200°C

如下图 3.16 为相同材料在不同温度时的微观组织图像的频率统计结果:



A—PZT 800°C; C—PZT 1200°C

图 3.16 PZT 频谱灰度分布比较图

上图 3.16 横轴的数值是以图的中心点为圆心，以离中心点的距离为半径的长度；纵轴为离中心的距离即为某半径长度的点的平均灰度值，即某半径的圆弧上的所有点的灰度均值。由图可看出，曲线 A 的低频量比曲线 C 少，而高频量比曲线 C 多。而低频表现的是结构变化平缓的部分，高频表现的是结构变化强的部分。曲线 A 的高频量比曲线 C 多，即表明曲线 A 的结构更复杂，晶体更细小、更多。

如图中有一点 M，为曲线 A 和曲线 C 的交点，可以作为 A 和 C 的高频、低频的分界点。在对材料进行定性分析时，即可把新制备的材料的微观组织图像频率统计结果与标准材料标本图像进行比较，找出 M 点的位置，就可分析新制备的材料与标准材料之间的纹理分布差异，定性判断新制备的材料性能特性。

如下图为不同材料之间的微观组织图像的频率统计结果：

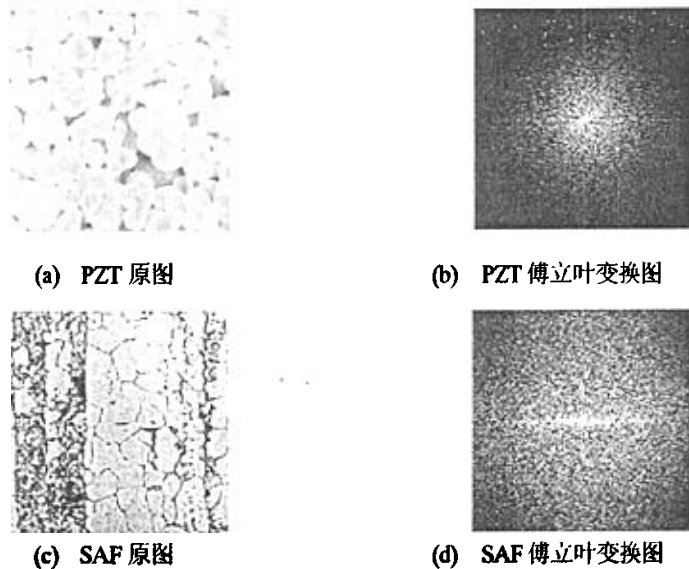
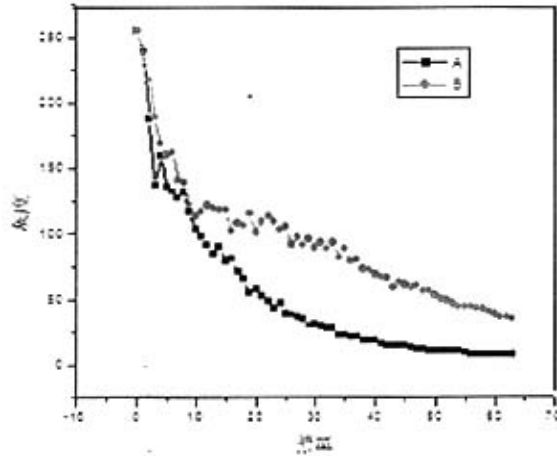


图 3.17 不同材料频谱灰度分布比较图

由图 3.17 不同材料频谱灰度分布比较图可以看出，PZT 与 SAF 的频谱分布差别很大，SAF 材料的高频、低频都有很广泛的分布，利用傅立叶频谱纹理分析方法能够很快地对这两种材料进行区分，如图 3.18 所示，对不同频率进行定量统计，对比更明显。

由此，我们可以认为，不同的材料之间的频谱分布图往往差别很大。对不同材料的识别与区分，利用计算机图像处理傅立叶频谱分析的办法，把新制备的材料微观组

织图像频率统计结果与不同材料的标准标本图像进行比较，就能准确、快速获得大批量的结果。



A—PZT; B—SAF

图 3.18 不同材料频谱灰度分布比较图

3.3 材料微观组织图像的预处理与定量测量

从文献综述可知，材料的微观组织决定了材料的性能特点，组织是性能的根据，性能是组织的反映。上文第三章对材料微观组织的纹理利用傅立叶频谱分析的办法进行了定性的分析，但是，随着加热炉控制的进一步深化，要实现实时离线和在线的预测加热炉的气氛温度，钢坯内温度及分布，仅仅获得材料微观组织的定性数据是不够的，还需要对材料的微观组织实现定量的测量，并以定量测量的数据为基础，对材料的微观组织的几何特征进行分析，达到分析材料性能的目的，从而可以实现：

- 1) 在准确达到材料性能要求的情况下，优化控制材料在加热炉内的时间以及温度，提高加热炉的生产能力，减少能源消耗，指导加热炉现场的工艺优化。
- 2) 可以快速、准确、大批量的分析测量不同状态下的材料性能，为制取满足不同应用性能要求的新材料打下基础。

本章结合图像处理的方法，对材料的微观组织进行定量分析，探索图像处理进行材料微观组织定量分析的实际有用的完备方法。

3.3.1 图像预处理步骤

3.3.1.1 图像八方向锐化 (Sharpening)

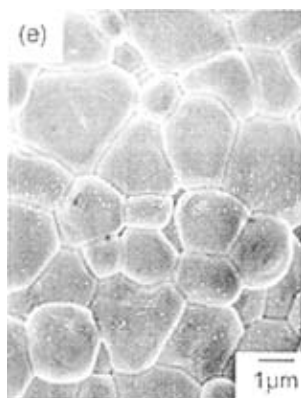


图 3.19 PZT 微观组织图像

如上图 3.19 为上节提到的 PZT 陶瓷合金的微观组织图像，图中左上角的(e)是图像的编号，而右下角是比例标识，即微观组织通过放大后，图中显示的横线的长度为实际的 $1\mu\text{m}$ 的长度。现在处理的该图像是灰度图 (Grayscale)，是指只含亮度信息，不含色彩信息的图像，灰度图把亮度值进行量化，分为 0~255 共 256 个级别，0 最暗（全黑），255 最亮（全白）。

要进行定量的测量必须要首先识别图像中的每个晶体，从图上我们可以看出，晶体的边缘与晶体之间的灰度差别并不是很大，这时候区分并识别每个晶体比较困难。因此必须对图像进行锐化处理，让边缘轮廓更明显，利于下一步的晶体识别的进行。

图像锐化处理的目的是为了使图像的边缘、轮廓线以及图像的细节变的清晰，而图像平滑往往使图像中的边界、轮廓变的模糊，经过平滑的图像变得模糊的根本原因是因为图像受到了平均或积分运算，因此可以对其进行逆运算（如微分运算）就可以使图像变得清晰。从频率域来考虑，图像模糊的实质是因为其高频分量被衰减，因此可以用高通滤波器来使图像清晰。

为了要把图像中间任何方向伸展的的边缘和轮廓线变得清晰，我们希望对图像的某种运算是各向同性的。可以证明偏导平方和的运算是各向同性的，即：

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \quad (3.2)$$

式中 (x, y) 是图像旋转前的坐标, (x', y') 是图像旋转后的坐标。梯度运算就是在这个式子的基础上开方得到的。

梯度有两个重要的性质:

- 1) 梯度的方向在函数 $f(x, y)$ 最大变化率方向上。
- 2) 梯度的幅度用式 3.3 表示。

$$G(x, y) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

由此式可得出这样的结论: 梯度的数值就是 $f(x, y)$ 在其最大变化率方向上的单位距离所增加的量。

为了突出物体的边缘, 常常采用梯度值的改进算法, 将图像各个点的梯度值与某一阈值作比较, 如果大于阈值, 该像素点的灰度用梯度值表示, 否则用一个固定的灰度值表示。

我们在对图像增强的过程中, 采用的是一种简单的高频滤波增强方法:

$$G(x, y) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \approx |f(x, y) - f(x+1, y)| + |f(x, y) - f(x, y+1)| \quad (3.4)$$

上面的公式 3.4 称为罗伯特 (Roberts) 梯度。如果直接采用梯度值 $G(x, y)$ 来表示图像, 即令 $g(x, y) = G(x, y)$, 由上面的公式可见: 在图像变化缓慢的地方其值很小 (对应于图像较暗); 而在线条轮廓等变化较快的地方的值很大。这就是图像在经过梯度运算后使其清晰从而达到锐化的目的。

拉普拉斯运算也是偏导数运算的线性组合, 而且是一种各向同性 (旋转不变性) 的线性运算符, 设 $\nabla^2 f$ 为拉普拉斯算子, 则:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (3.5)$$

对于离散数字图像 $f(i, j)$ ，其一阶偏导数为：

$$\begin{aligned}\nabla^2 f(i, j) &= \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial y^2} \\ &= f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) - 4f(i, j) \\ &= -5(f(i, j) - \frac{1}{5}[f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) + f(i, j)])\end{aligned}\quad (3.6)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial f(i, j)}{\partial x} = \Delta_x f(i, j) = f(i, j) - f(i-1, j) \\ \frac{\partial f(i, j)}{\partial y} = \Delta_y f(i, j) = f(i, j) - f(i, j-1) \end{cases}\quad (3.7)$$

则其二阶偏导数为：

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial x^2} = \Delta_x f(i+1, j) - \Delta_x f(i, j) \\ \quad = [f(i+1, j) - f(i, j)] - [f(i, j) - f(i-1, j)] \\ \quad = f(i+1, j) + f(i-1, j) - 2f(i, j) \\ \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial y^2} = f(i, j+1) + f(i, j-1) - 2f(i, j) \end{cases}\quad (3.8)$$

所以，拉普拉斯算子 $\nabla^2 f$ 为：

$$\begin{aligned}\nabla^2 f(i, j) &= \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(i, j)}{\partial y^2} \\ &= f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) - 4f(i, j) \\ &= -5(f(i, j) - \frac{1}{5}[f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) + f(i, j)])\end{aligned}\quad (3.9)$$

对于扩散现象引起的图像模糊，可用下式进行锐化：

$$g = f - kr\nabla^2 f \quad (3.10)$$

式中 f , g 分别为锐化前后的图像, kr 是与扩散效应有关的系数。 $\nabla^2 f$ 表示对图像 f 进行二次微分的拉普拉斯算子。这表明不模糊的图像可以由模糊的图像减去乘上系数的模糊图像拉普拉斯算子来得到。 kr 这个系数的选择也很重要, 太大了会使图像的轮廓过大, 太小了则图像锐化不明显。如果令 $kr=1$, 可以用下面的模板表示:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

在具体实现时, 上述模板 H 中的各个系数可以改变, 用其他形式:

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & -20 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

本文采用的八方向锐化的模板是:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

如下为金属材料的微观组织的八方向锐化结果:

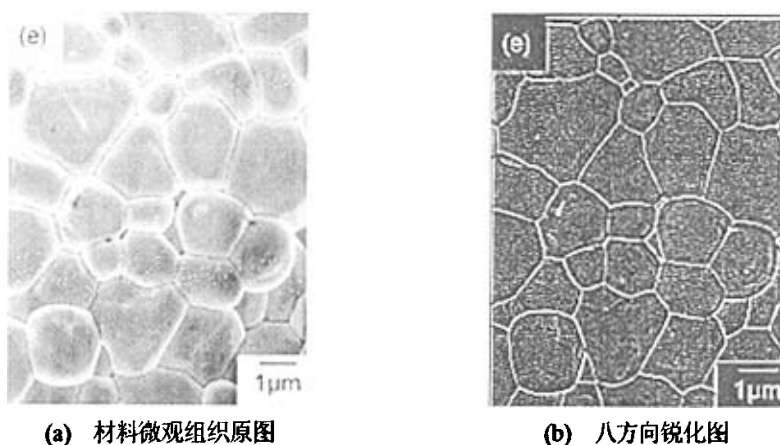


图 3.20 图像的锐化处理

3.3.1.2 图像阈值分割(Threshold detect)

灰度的阈值变换可以将一幅灰度图像转变成黑白二值图像。它的操作过程是先设定一个阈值，如果图像中某像素的灰度值小于该阈值，则将该像素的灰度值设置为 0，否则灰度设置为 255。图像分割是在阈值变换的基础上，计算机自动选取一个阈值，达到阈值化的要求，目的是把图像空间分割成一些有意义的区域。例如：一幅航空照片，可以分割成工业区、住宅区及湖泊、森林等。这里“有意义”的内涵随着解决的问题的不同而不同。例如可以按幅度不同来分割各个区域；按边缘不同来划分各个区域；按形状来分割各个区域等^[60-62]。

在本文对金属材料的微观组织的阈值分割，是要对进行八方向锐化之后的图像进行阈值化，把图像的灰度值变成 0 和 255 两个值，并进一步清晰化微观组织的结构脉络。

取阈值是最常见的并行的直接检测区域的分割方法。假设图像由具有单峰灰度分布的目标和背景组成，在目标或背景内部的相邻象素间的灰度值是高度相关的，但在目标和背景交界处两边的像素在灰度值上有很大的差别。如果 1 幅图像满足这些条件，它的灰度直方图基本上可看作是由分别对应目标和背景的 2 个单峰直方图混合而成。此时如果这 2 个分布大小（数量）接近且均值相距足够远，而且均方差也足够小，则直方图应是双峰的。对这类图像常可用取阈值方法来较好地分割。

最简单的利用取阈值方法来分割灰度图像的步骤如下。首先对 1 幅灰度取值在 g_{min} 和 g_{max} 之间的图象确定一个灰度阈值 T ($g_{min} < T < g_{max}$)，然后将图像中每个象素的灰度值与阈值 T 相比较，并将对应的象素根据比较结果（分割）划为 2 类：象素的灰度值大于阈值的为 1 类，象素的灰度值小于阈值的为另 1 类。这 2 类象素一般对应图像中的 2 类区域。

取单阈值分割后的图像可定义为：

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{如 } f(x,y) > T \\ 0 & \text{如 } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (3.11)$$

1) 极小值点阈值

如果将直方图的包络看作 1 条曲线，则选取直方图的谷可借助求曲线极小值的方法。设用 $h(z)$ 代表直方图，那么极小值点应满足：

$$\frac{\partial h(z)}{\partial z} = 0 \quad \text{和} \quad \frac{\partial^2 h(z)}{\partial z^2} > 0 \quad (3.12)$$

和这些极小值点对应的灰度值就可用作分割阈值。

2) 最优阈值

设 1 幅混有加性高斯噪声的图像的混合概率密度是：

$$p(z) = P_1 p_1(z) + P_2 p_2(z) = \frac{P_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(z-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{P_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{(z-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] \quad (3.13)$$

其中 μ_1 和 μ_2 分别是背景和目标区域的平均灰度值， σ_1 和 σ_2 分别是关于均值的均方差， P_1 和 P_2 分别是背景和目标区域灰度值的先验概率。参见下图，假设 $\mu_1 < \mu_2$ ，我们定义一个阈值 T 。这时错误地将一个目标像素划分为背景的概率和将一个背景像素错误地划分为目标的概率分别是：

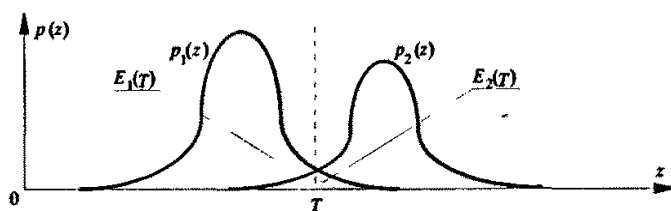


图 3.21 阈值分割示意图

$$E_1(T) = \int_{-\infty}^T p_2(z) dz \quad (3.14)$$

$$E_2(T) = \int_T^{\infty} p_1(z) dz \quad (3.15)$$

总的误差概率是

$$E(T) = P_2 \times E_1(T) + P_1 \times E_2(T) \quad (3.16)$$

求解上式，如果 2 个区域的方差相等，则可得到 1 个最优阈值：

$$T_{\text{optimal}} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} + \frac{\sigma^2}{\mu_1 - \mu_2} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (3.17)$$

3) 迭代阈值

首先取图像灰度范围的中值作为初始阈值 T_0 （设共有 L 个灰度），然后按下式进行迭代：

$$T_{i+1} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{T_i} h_k \cdot k}{\sum_{k=0}^{T_i} h_k} + \frac{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k \cdot k}{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k} \right\} \quad (3.18)$$

其中 h_k 是灰度为 k 值的象素个数，迭代一直进行到 $T_{i+1} = T_i$ 结束，取结束时的 T_i 为分割阈值。

本文采用的阈值分割的方法就是迭代求最佳阈值的办法。

如下图 3.22 所示为金属材料的微观组织图像经过八方向锐化后，进一步阈值分割的结果：

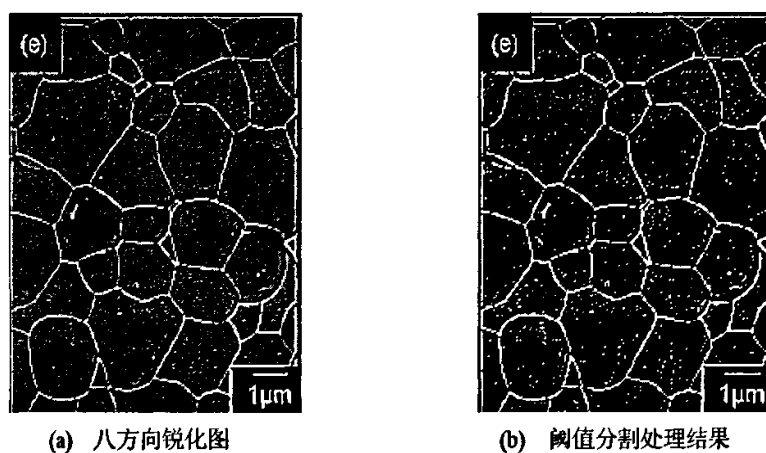


图 3.22 图像的阈值分割

对比八方向锐化图，阈值分割处理图像只有 0 和 255 两种亮度，因此晶体组织的边缘脉络更加明显，使得晶体组织的识别变得更容易。但是，由于二值化的处理，使得一些原来不太明显的像素点的灰度值也变成 0 或 255，这就形成了阈值分割处理结果中的椒盐噪声点，这些噪声点必然会影响到对晶体结构的识别，因此必须设法清除。

3.3.1.3 图像椒盐噪声的去除 (Peppersalt Noise)

噪声，指妨碍人们感觉器官对所接收的信源信息理解的因素。不可预测，只能用概率统计方法来认识的随机误差。

噪声描述，可以借用随机过程及其概率分布函数和概率密度函数。通常，数字特征，即均值方差，相关函数等。产生的原因：外部噪声和内部噪声。外部噪声指系统外部干扰从电磁波或经电源传进系统内部而引起的噪声，如电气设备，天体放电现象等引起的噪声。

噪声可以分为以下四种形式：

1) 加性噪声，此类噪声与输入图像信号无关，含噪图像可表示为 $f(x, y) = g(x, y) + n(x, y)$ ，信道噪声及光导摄像管的摄像机扫描图像时产生的噪声就属这类噪声；

2) 乘性噪声，此类噪声与图像信号有关，含噪图像可表示为 $f(x, y) = g(x, y) + n(x, y)g(x, y)$ ，飞点扫描器扫描图像时的噪声，电视图像中的相干噪声，胶片中的颗粒噪声就属于此类噪声。

3) 量化噪声，数字图像的主要噪声源，其大小显示出数字图像与原始图像的差异。对这类噪声减小的最好办法是采用按灰度级概率密度函数选择量化级的最优量化措施。

4) 椒盐噪声，即黑图像的白点，白图像上的黑点，往往由图像切割引起。

噪声图像的滤除办法可分为：

1) 均值滤波器

对一些图像进行线性滤波可以去除图像中某些类型的噪声，如采用邻域平均法的均值滤波器就非常适用于去除通过扫描得到的图像中的颗粒噪声。邻域平均法是空间域平滑技术。对于给定的图像 $f(x, y)$ 中的每个像点 (x, y) ，取其邻域 S_{xy} ，设 S_{xy} 含有 M 个像素，取其平均值作为处理后所得图像像点 (x, y) 处的灰度。用一像素邻域内各像素灰度平均值来代替该像素原来的灰度，即是邻域平均技术。邻域平均法有力地抑制了噪声，同时也由于平均而引起了模糊现象，模糊程度与领域半径成正比。为了尽可能地减少模糊失真，也可采用阈值法减少由于邻域平均而产生的模糊效应。其公式如下：

$$f(x, y) = \begin{cases} \sum f(x, y)/M & \left| f(x, y) - \sum f(x, y)/M \right| \geq T \\ f(x, y) & \left| f(x, y) - \sum f(x, y)/M \right| < T \end{cases} \quad (3.19)$$

T 即为规定的阈值。

上述方法也可称为算术均值滤波器，除此之外还可以采用几何均值滤波器、谐波均值滤波器和逆谐波均值滤波器。几何均值滤波器所达到的平滑度可以与算术均值滤波器相比，但在滤波过程中会丢失更少的图像细节。谐波均值滤波器对“盐”噪声效果更好，但是不适用于“胡椒”噪声。它善于处理像高斯噪声那样的其他噪声。逆谐波均值滤波器更适合于处理脉冲噪声，但它有个缺点，就是必须要知道噪声是暗噪声还是亮噪声，以便于选择合适的滤波器阶数符号，如果阶数的符号选择错了可能会引起灾难性的后果。

2) 自适应维纳滤波器

它能根据图像的局部方差来调整滤波器的输出，局部方差越大，滤波器的平滑作用越强。它的最终目标是使恢复图像 $g(x, y)$ 与原始图像 $f(x, y)$ 的均方误差 $E[(f(x, y) - g(x, y))^2]$ 最小。该方法的滤波效果比均值滤波器效果要好，对保留图像的边缘和其他高频部分很有用，不过计算量较大。维纳滤波器对具有白噪声的图像滤波效果最佳。

3) 中值滤波器

它是一种常用的非线性平滑滤波器，其基本原理是把数字图像或数字序列中一点的值用该点的一个领域中各点值的中值代换。设 $f(x, y)$ 表示数字图像像素点的灰度值，滤波窗口为 A 的中值滤波器可以定义为：

$$f(x, y) = \text{MED}\{f(x, y)\} \quad f(x, y) \in A \quad (3.20)$$

其主要功能是让周围像素灰度值的差比较大的像素改取与周围的像素值接近的值，从而可以消除孤立的噪声点，所以中值滤波对于滤除图像的椒盐噪声非常有效。中值滤波器可以做到既去除噪声又能保护图像的边缘，从而获得较满意的复原效果，而且，在实际运算过程中不需要图像的统计特性，这也带来不少方便，但对一些细节多，特别是点、线、尖顶细节较多的图像不宜采用中值滤波的方法。如果希望强调中间点或距中间点最近的几个点的作用，则可采用加权中值滤波。其基本原理是改变窗口中变量的个数，可以使一个以上的变量等于同一点的值，然后对扩张后的数字集求中值。这种方法比简单中值滤波性能更好地从受噪声污染的图像中恢复出阶跃边缘以及其他细节。另有

一种可以处理具有更大概率的冲激噪声的是自适应中值滤波器,在进行滤波处理时,能依赖一定条件而改变领域的大小。其优点是在平滑非冲激噪声时可以保存细节,所以既能除去“椒盐”噪声,平滑其他非冲激噪声,还能减少诸如物体边界细化或粗化等失真。

4) 形态学噪声滤除器

将开启和闭合结合起来可用来滤除噪声,首先对有噪声图像进行开启操作,可选择结构要素矩阵比噪声的尺寸大,因而开启的结果是将背景上的噪声去除。最后是对前一步得到的图像进行闭合操作,将图像上的噪声去掉。根据此方法的特点可以知道,此方法适用的图像类型是图像中的对象尺寸都比较大,且没有细小的细节,对这种类型的图像除噪的效果会比较好。

5) 小波去噪

由小波变换的特性可知,高斯噪声的小波变换仍然是高斯分布的,它均匀分布在频率尺度空间的各部分,而信号则由于其带限性,它的小波变换系数仅仅集中在频率尺度空间上的有限部分,这样,从信号能量的观点来看,在小波域上,所有的小波系数都对噪声有贡献,也就是噪声的能量分布在所有的小波系数上,而只有一小部分小波系数对信号能量有贡献,所以可以把小波系数分成两类,第一类小波系数仅仅由噪声变换后得到,这类小波系数幅值小,数目较多,第二类小波系数由信号变换得来,并包含噪声的变换结果,这类小波系数幅值大,数目较小。根据信号小波分界的这个特点,可以通过这种小波系数幅值上的差异来降低噪声。对信号的小波系数设置一个阈值,大于这个阈值的小波系数认为属于第二类系数,它同时含有信号和噪声的变换结果,可以简单保留或进行后续操作,而小于这个阈值的小波系数,则认为是第一类小波系数,即完全由噪声变换而来,应该去掉这些系数。这样达到了降低噪声的目的。同时由于这种方法保留了大部分包含信号的小波系数,因此可以较好地保持图像细节。小波分析进行图像去噪主要有3个步骤:

a) 对图像信号进行小波分解

选择合适的小波和恰当的分解层次,然后对含有噪声的图像 X 进行 N 层小波分解。

b) 对经过层次分解后的高频系数进行阈值量化

对于分解的每一层,选择一个恰当的阈值,并对该层高频系数进行阈值量化处理。

c) 利用二维小波重构图像信号

同样,根据小波分解后的第 N 层近似(低频系数)和经过阈值量化处理后的各层细节(高频系数),来计算二维信号的小波重构。传统的低通滤波方法将图像的高频成分滤除,虽然能够达到降噪的效果,但破坏了图像细节,利用小波分析的理论可以构造一种既能够降低图像噪声,又能保持图像细节信息的方法。

本文针对上一步经过阈值分割的金属材料的微观组织存在的椒盐噪声的去除办法,采用的是八方向搜索图像块的边缘,如果边缘的像素点的个数小于给定阈值,则认为该图像块太小,不是材料的微观组织而是椒盐噪声,直接删除,令边缘内的像素的灰度值为 0。

八方向轮廓跟踪的基本方法是:

先根据某些严格的“探测准则”找出目标物体轮廓上的像素,再跟据这些像素的某些特征用一定的“跟踪准则”找出目标物体上的其他像素。

首先找到第一个边界像素的“探测准则”是:按照从左到右,从下到上的顺序搜索,找到的第一个黑点一定是最左下方的边界点,记为 A 。它的右、右上、上、左上四个邻点中至少有一个是边界点,记为 B 。从 B 开始找起,按右、右上、上、左上、左、左下、下、右下的顺序找相邻点中的边界点 C 。如果 C 就是 A 点,则表明已经转了一圈,程序结束;否则从 C 点继续找,直到找到 A 为止。判断是不是边界点很容易:如果它的上下左右四个邻点都不是黑点则它即为边界点。(即跟踪准则)。

这种算法要对每个边界像素周围的八个点进行判断,计算量比较大。下面有另外一种跟踪准则。

首先按照上面所说的“探测准则”找到最左下方的边界点。以这个边界点起始,假设已经沿顺时针方向环绕整个图像一圈找到了所有的边界点。由于边界是连续的,所以每一个边界点都可以用这个边界点对前一个边界点所张的角度来表示。因此可以使用下面的跟踪准则:从第一个边界点开始,定义初始的搜索方向为沿左上方;如果左上方的点是黑点,则为边界点,否则搜索方向顺时针旋转 45° 。这样一直找到第一个黑点为止。然后把这个黑点作为新的边界点,在当前搜索方向的基础上逆时针旋转 90° ,继续用同样的方法继续搜索下一个黑点,直到返回最初的边界点为止。

如下图 3.23 所示为金属材料的微观组织图像经过阈值分割后,去除椒盐噪声的结果:

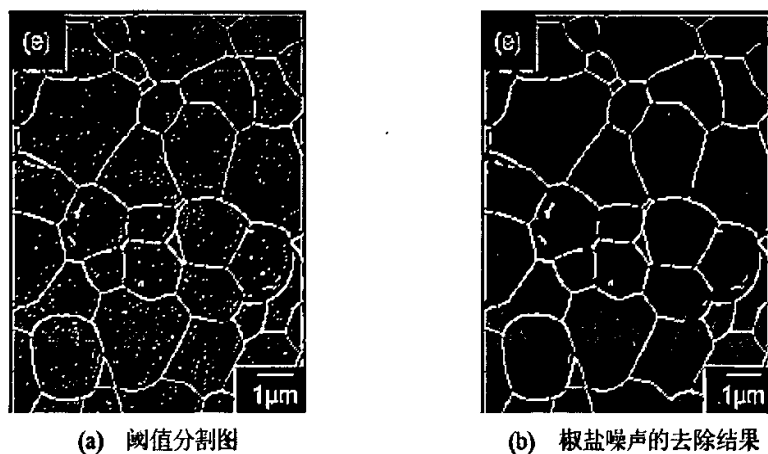


图 3.23 图像的椒盐噪声的去除

对比阈值分割图，去除椒盐噪声后的图像清晰明了，晶体结构的边缘脉络清晰，可以进行具体的识别工作。这时候可以采用上述的八方向轮廓跟踪的办法，记录所有的灰度值变为 255 的晶体的边缘结构的像素点，即可提取晶体的轮廓，结果如下图 3.24 所示。

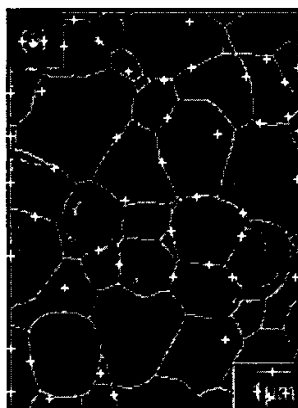


图 3.24 晶体边缘识别图

该图识别结果以十字星号作为识别的晶体的中心，即以某个晶体的边缘所在像素的坐标和的平均值作为坐标。晶体的边缘结构采用降低灰度处理，从原来的 255 降低为

50, 起到衬托突出中心十字星号的目的。但是, 从图上可以看出, 只有很少的十字星号落在晶体的中心, 大部分落在了晶体的边缘组织上。这是由于:

1) 晶体的边缘线是间断的, 在程序扫描图像跟踪边缘线的时候, 会把同一个晶体的边缘线当成几个晶体的边缘对待, 从而一个晶体的边缘获得了几个十字星号。

2) 两个相邻晶体的边缘线是相互粘连的, 程序又会把两个或多个晶体的边缘当成一个晶体的边缘对待, 同样不能正确识别晶体组织。

对于以上两个问题的解决, 可以采用合并相邻的中心点, 获得新的中心点的办法, 或者依据指纹识别的办法对边缘结构线进行修补再识别, 或者固定边缘搜索在三叉点的方向为顺时针或逆时针等方法, 但算法都过于麻烦, 且效果不好。本文采用先腐蚀增宽晶体边缘而后识别的办法。

3.3.1.4 图像腐蚀 (Erosion)

腐蚀的目的就是对晶体进行腐蚀, 起到加宽边缘的目的, 使每个晶体的边缘断开的部分连接起来。腐蚀是二值图像基本的形态学运算之一, 形态学是一门新兴科学, 它的用途主要是获取物体拓扑和结果信息, 它通过物体和结构元素相互作用的某些运算, 得到物体更本质的形态^[63]。它在图像处理中的应用主要是:

1) 利用形态学的基本运算, 对图像进行观察和处理, 从而达到改善图像质量的目的;

2) 描述和定义图像的各种几何参数和特征, 如面积, 周长, 连通度, 颗粒度, 骨架和方向性。

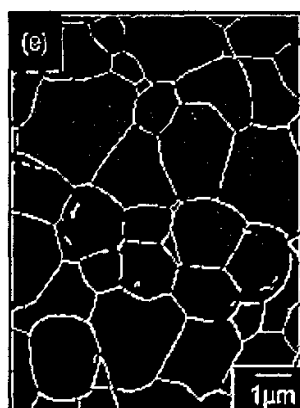
二值图像基本的形态学运算是腐蚀和膨胀, 简单的腐蚀是消除物体的所有边界点的一种过程, 其结果是使剩下的物体沿其周边比原物体小一个像素的面积。如果物体是圆的, 它的直径在每次腐蚀后将减少两个像素, 如果物体在某一点处任意方向上连通的像素小于三个, 那么该物体经过一次腐蚀后将在该点处分裂为二个物体。简单的膨胀运算是将与某物体接触的所有背景点合并到该物体中的过程。过程的结果是使物体的面积增大了相应数量的点, 如果物体是圆的, 它的直径在每次膨胀后将增大两个像素。如果两个物体在某一点的任意方向相隔少于三个像素, 它们将在该点连通起来。

本文采用的腐蚀模板:

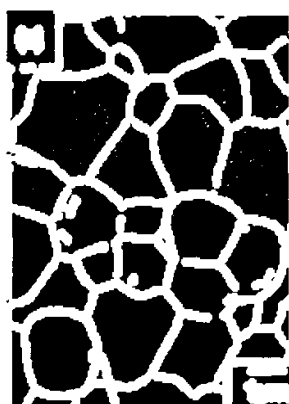
$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ 和 } \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

循环使用这两个模板相当于使用 5×5 的模板。

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



(a) 椒盐噪声的去除图



(b) 图像腐蚀结果

图 3.25 图像的腐蚀

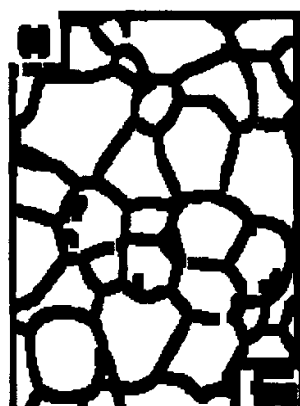


图 3.26 图像的反色

对比去除椒盐噪声的图像，图像腐蚀的结果边缘非常清晰、连贯，没有断开的部分，但是这是以损失测量晶体的精确度为代价的，实际上连续进行两次 3×3 的腐蚀，相当于去除了晶体两层一个像素厚度的外皮。

因为目的是对图像中的晶体进行识别，利用程序使图像反色，即使原来灰度值为 0 的改变为 255，而原来为 255 的变为 0，从而对图像中灰度为 255 的晶体进行识别。反色结果如上图 3.26 所示。

通过一系列的处理之后，晶体的微观组织图像彼此相对地独立地分布于图像中，下一步就可以采用边缘检测的办法对晶体进行识别。

3.3.1.5 图像微观组织识别 (Recognize)

利用计算机进行图像处理有两个目的：一是产生更适合人观察和识别的图像；二是希望能由计算机自动识别和理解图像。无论为了哪种目的，图像处理中关键的一步就是对包含有大量各式各样景物信息的图像进行分解。分解的最终结果是图像被分解成一些具有某种特征的最小成分，称为图像的基元。相对于增幅图像来说，这种基元更容易被快速处理。

图像的特征指图像场中可用作标志的属性。它可分为图像的统计特征和图像的视觉特征两类。图像的统计特征是指一些人为定义的特征，通过变换才能得到，如图像的直方图、矩、频谱等等；图像的视觉特征是指人的视觉可直接感受到的自然特征，如区域的亮度、纹理或轮廓等。利用这两类特征把图像分解成一系列有意义的目标或区域的过程称为图像的分割。

图像的边缘是图像的最基本特征。所谓边缘（或边沿）是指其周围像素灰度有阶跃变化或屋顶变化的那些像素的集合。边缘广泛存在于物体与背景之间、物体与物体之间、基元与基元之间。因此，它是图像分割所依赖的重要特征。

物体的边缘是由灰度不连续性所反映的。经典的边缘提取方法是考察图像的每个像素在某个邻域内灰度的变化，利用边缘邻近一阶或二阶方向导数变化规律。用简单的方法检测边缘。这种方法称为边缘检测局部算子法。

边缘的种类可分为两种：一种称为阶跃性边缘，它两边的像素的灰度值有着明显的不同；另一种称为屋顶状边缘，它位于灰度值从增加到减少的变化转折点。如图中给出了这两种边缘的示意图及相应的一阶方向导数、二阶方向导数的变化规律。对于阶跃性边缘，二阶方向导数在边缘处呈零交叉；而对于屋顶状边缘，二阶方向导数在边缘处取极值。

如果一个像素落在图像中某一个物体的边界上，那么它的邻域将成为一个灰度级的变化带。对这种变化最有用的两个特征是灰度的变化率和方向，它们分别以梯度向量的幅度和方向来表示。

边缘检测算子检查每个像素的邻域并对灰度变化率进行量化，也包括方向的确定。大多数使用基于方向导数掩模求卷积的方法。

轮廓提取和轮廓跟踪的目的都是获得图像的外部轮廓特征。在必要的情况下应用一定的方法表达轮廓的特征，为图像的形状分析做准备。

二值图像轮廓提取的算法非常简单，就是掏空内部点：如果原图中有一点为黑，且它的 8 个相邻点都是黑色时（此时该点是内部点），则将该点删除。

联系到形态学的内容，可以看到，这实际上相当于用一个九个点的结构元素对原图像进行腐蚀，再用原图像减去腐蚀图像。本文采用的是层层细化的办法，细化一次也就是每次剥离一个像素厚度的晶体边缘，直到晶体的边缘的连通区域中没有任何的非边缘点为止。每次细化都求出该边缘的中心点，在最后细化完之后合并邻近的中心点，合并后的中心点作为晶体的中心^[58-59]。

如下图，在具体实现的时候，把识别了的晶体的内部像素灰度设置为 50，同时把边缘灰度设置为 250，既与未识别的晶体区别，又在晶体上突出边缘。并且求出晶体边缘坐标的平均值，画上十字星号作为中心的标志，如下图所示。

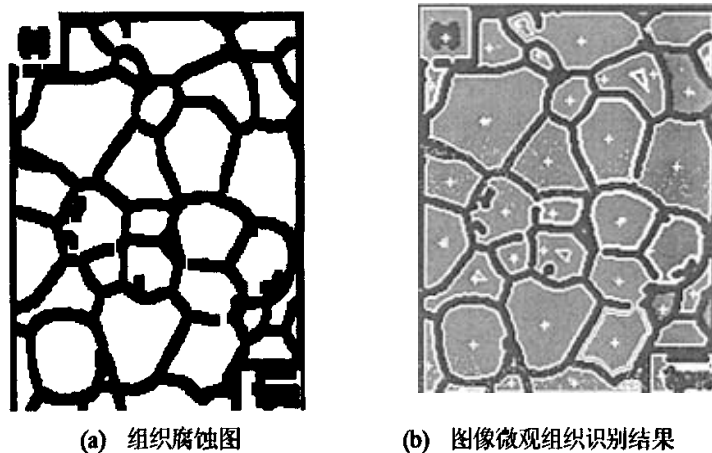


图 3.27 图像的组织识别

3.3.1.6 图像识别修正 (Correct)

仔细观察上图 4.6 的图像微观组织识别结果，有的晶体的边缘被多次识别，如下图 3.28(a)。



图 3.28 图像的识别修正

这是由于原图在腐蚀之后，这几块晶体没有被完全腐蚀分离，存在像素相连，于是边界搜索过程中就被当成一个晶体识别了，如图 3.28(b)。可以根据输出的晶体周长的结果，依据平均周长为 108 像素点数，把太大的组织边缘去掉，从而对识别的图像进行修复，如图 3.28 (c)。最后的修复结果为下图 3.29 所示。

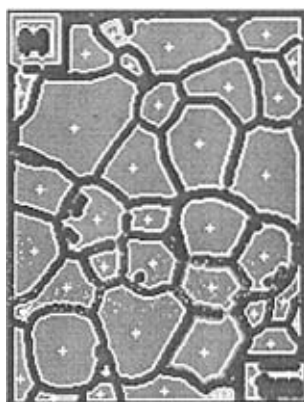


图 3.29 图像的识别修正结果

3.3.1.7 图像结果标识与输出 (Result)

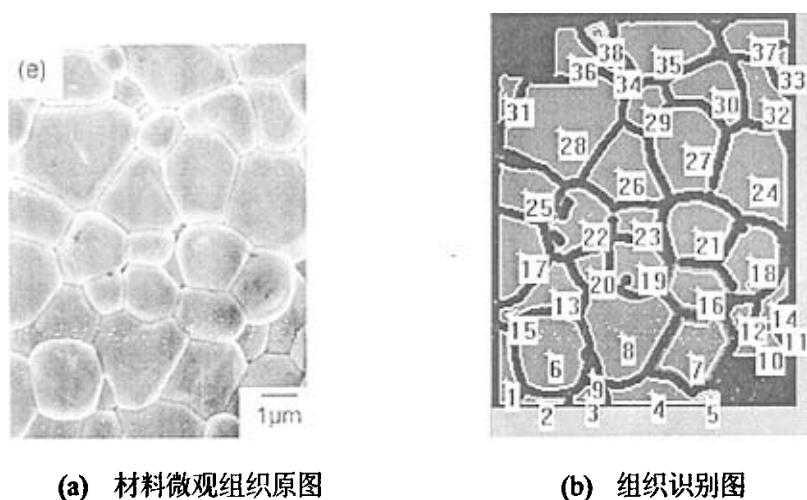


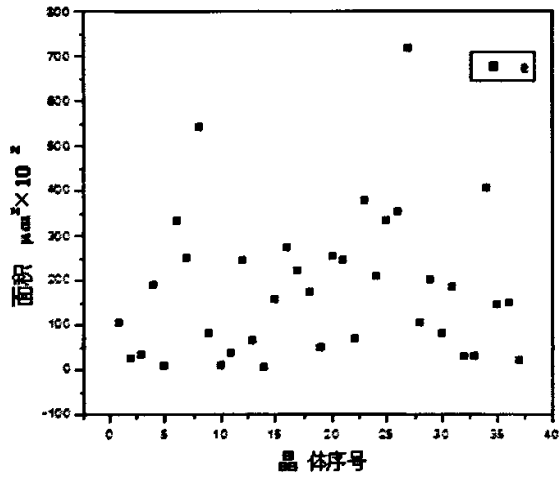
图 3.30 图像的结果标识

如上图 3.30 所示，通过以上一系列的处理过程之后，最终获得了识别结果，通过程序把已经识别的晶体逐一标号表示。

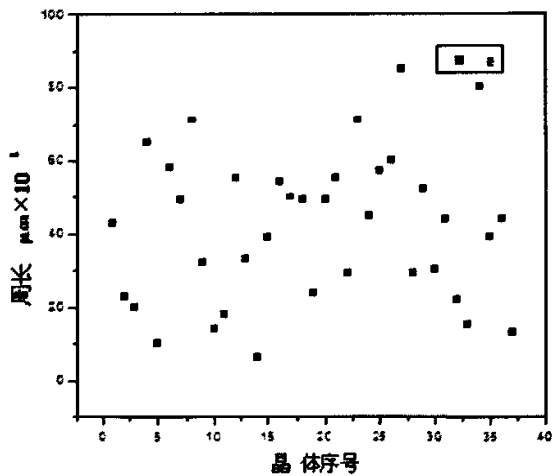
通过程序测量可知，图 3.30(a)中的 $1\mu\text{m}$ 在图中所占的长度为 21 个像素点，可以根据微观组织的面积、周长所占的像素点的量确定其具体数值。

即单位像素的长度为 $1/21\mu\text{m}$ ，单位像素的面积为 $1/441\mu\text{m}^2$ 。

因为微观组织比较小，这里采用 $\mu\text{m}^2 \times 10^{-2}$ 、和 $\mu\text{m} \times 10^{-1}$ 分别为面积和长度的单位。结果如下图 3.31 所示。



(a) e 图晶体面积分布图



(b) e 图晶体周长分布图

图 3.31 图像的结果输出

3.3.2 定量金相测量

计算机定量金相分析属于冶金自动化的重要组成部分，是金相分析和图像信息处理的结合。一方面它是建立在传统定量金相分析方法的基础上，通过对微观组织参数的测定来分析金属。另一方面它试图抛弃传统的主观的人工判断方法，借助于图像处理技术

测定所需参数，并采用模式识别等技术进行智能判断的方法取而代之^[64-66]。因此该类系统是两个或更多不同领域学科紧密结合的结果。

定量金相测量的符号与原理参见文后附录 B。

特征参数的定量测量，由于研究目的不同，常常采用不同的特征参数描述组织，建立这些参数与可直接测量量间的关系，即可实现对组织的特征参数作定量描述的要求。

3.3.2.1 晶粒大小的测量

1) 平均截线长

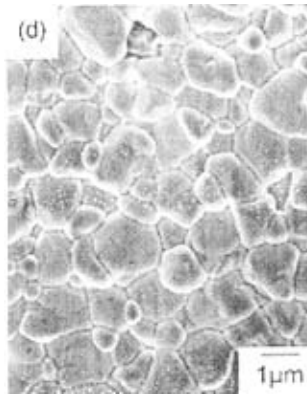
三维物体的截线长度用 L_3 表示，它是指随机截取三维物体时，在物体内部截线长度的平均值。当测量次数足够多，二维截面的平均截线长 L_2 等于 L_3 。

用随机直线截取晶粒，若测量线总长度为 L_T ，截过晶粒数为 N ，则对连续分布的单相晶粒：

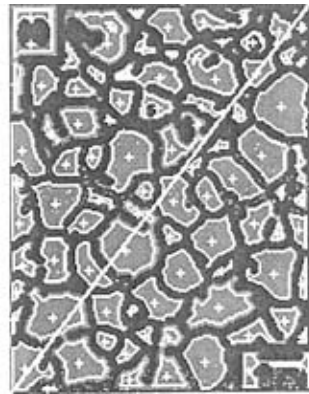
$$L_3 = L_T / N = 1 / N_L \quad (3.21)$$

对于第二相粒子

$$(L_3)_s = (L_L)_s / (N_L)_s \quad (3.22)$$



(a) 微观组织原图



(b) 微观组织测量图

图 3.32 材料微观组织截线测量

如图 3.32 (b) 中的对角线可看作是随机直线 L_T ，这可在程序的手动操作中任意位置画相应的直线。并利用程序数直线所穿过的晶体的个数 N ，此图中 $N=12$ 。

所用的微观组织的原图的尺寸是 174×225 像素，且由结果输出可知单位像素的长度为 $1/21 \mu\text{m}$ ，则平均截线长：

$$\begin{aligned} L_T &= \sqrt{\text{Width}^2 + \text{Height}^2} \times L_M \\ &= \sqrt{174^2 + 225^2} \times (1/21) \\ &= 14 \mu\text{m} \\ L_3 &= L_T / N \\ &= 5973/12 \\ &= 11 \mu\text{m} \times 10^{-1} \end{aligned}$$

Width——图像像素宽度；

Height——图像像素高度；

L_M ——单位像素的实际尺寸；

2) 晶粒平均面积 \bar{A}

\bar{A} 表示截面上晶粒面积的平均值，即

$$\bar{A} = \frac{\sum A_i}{N} = \frac{1}{N_A} \quad (3.23)$$

本图为连续分布的单相晶体，则平均面积可由上式总面积除以总晶体数求得。由输出结果可知总点数 $N=91$ ，则晶粒平均面积 \bar{A} 为：

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \frac{\text{Width} \times \text{Height}}{N} \times L_M^2 \\ &= 174 \times 225 / 91 \times (1/21)^2 \\ &= 98 \mu\text{m}^2 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

3) 晶粒度

晶粒度是用来描述单相合金晶粒大小及复相合金中连续分布的基体相晶粒大小的，按晶粒度的定义：

$$n = 2^{G-1} \quad (3.24)$$

式中 G ——晶粒度级数;

n ——线放大倍数为 $100\times$ 时每平方英寸的晶粒个数。换成每平方毫米的晶粒个数 N_A 时,

$$G = \frac{\log N_A}{\log 2} - 3 = \frac{\log \frac{1}{A}}{\log 2} - 3 \quad (3.25)$$

故: 已知 N_A 或 \bar{A} , 即可评出晶粒级别。

即此图中:

$$\begin{aligned} G &= \frac{\log \frac{1}{A}}{\log 2} - 3 \\ &= \frac{\log \frac{1}{98 \times 10^{-2}} \times 10^6}{\log 2} - 3 \\ &= 3.673 \end{aligned}$$

3.3.2.2 界面曲率的测量

曲率是描述曲线在某一点的弯曲程度, 界面曲率的研究在金属学中具有重要意义, 如第二相的粗化和晶粒的正常长大都与界面曲率有关。

如 3.3.1.7 图像结果标识与输出中所示, 我们可以根据所做的标识, 依据上面的公式计算某个晶体的界面曲率, 以及整个测量面积内的平均曲率。

1) 单个粒子的平均曲率

以 3.3.1.7 图像结果标识与输出中标为 8 的晶体为例。根据输出结果可知, 8 号晶体的 $L_C = 71 \mu\text{m} \times 10^{-1}$ 。且测量体在人为规定的曲线逆时针方向的左侧, 公式取正号。

$$\bar{k} = \pm \frac{2\pi}{L_C} \quad (3.26)$$

$$\bar{k}^* = \frac{\pi}{4} \bar{k} \quad (3.27)$$

代入数据:

$$\begin{aligned}\bar{k} &= \frac{2\pi}{71 \times 10^{-1}} \\ &= 0.885 \mu\text{m}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{k}^* &= \frac{\pi}{4} \times 0.885 \\ &= 0.070 \mu\text{m}^{-1}\end{aligned}$$

2) 二维截面内的平均曲率

以 3.3.1.7 图像结果标识与输出中图为例, 粒子数 $N_A=38$, N_{AH} 即孔洞数为零, 总周界长 $L_A=3274\mu\text{m} \times 10^{-1}$ 。

$$\Delta\theta = 2\pi(N_A - N_{AH}) \quad (3.28)$$

$$\bar{k} = \frac{\Delta\theta}{L_A} \quad (3.29)$$

代入数据计算:

$$\begin{aligned}\bar{k} &= \frac{2\pi \times 38}{3274} \\ &= 0.729 \mu\text{m}^{-1}\end{aligned}$$

3.4 本章小结

对材料的微观组织的静态图像的晶体纹理特征分析可以得出以下结论:

1) 不同的加工工艺, 尤其是加工温度使材料晶体的微观组织的变化非常大, 并且微观组织的结构非常复杂, 现有的方法很难进行定性分析和定量描述。

2) 晶体材料的微观组织纹理可以变换到频率域进行分析, 而频率的高频、低频对应晶体的细密、粗糙。傅立叶频谱方法能对不同状态、不同种类的材料纹理进行定性的区别分析。

3) 要实现金相图像的微观组织识别, 需要先经过八方向锐化、阈值分割、图像腐蚀等处理, 随之进行必要的识别修正, 最后输出识别的图像微观组织的具体结果。

4) 通过对图像中的晶体的识别, 可以获取晶体的平均截线长、平均面积、晶粒度, 以及晶体界面的曲率, 这些定量测量为实现加热炉优化控制提供准确的参数。

4 加热材料微观组织的演变图像分析

4.1 材料微观组织图像的几何特征分类分析

在微观组织被完全识别的情况下，如下图 4.1 所示，我们可以看出晶体的微观组织形貌有很多几何分布特征，这些特征将直接影响材料的组织性能，对这些几何特征进行合理的分析，将有利于我们更清楚的认识材料性能，以及掌握材料组织在不同状态下演变的特性。首先，我们可以根据这些基本几何特征进行分类。

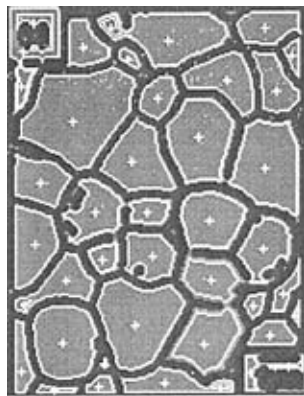


图 4.1 微观组织识别图像

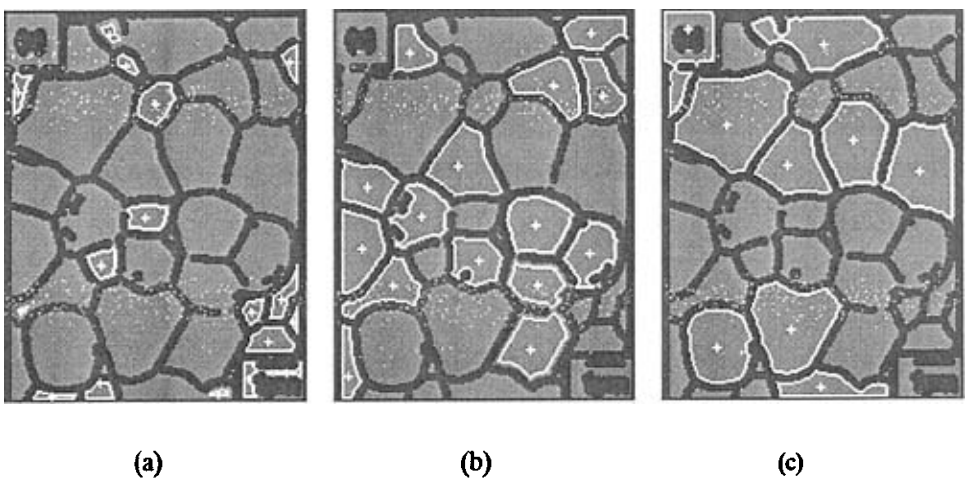


图 4.2 微观组织图像按面积分类

我们可以根据：

1) 按面积大小分类：

如上图 4.2 所示。

2) 按圆度大小分类：

本文采用的圆度定义，为晶体边缘上的点到晶体中心的距离的最小值与最大值之比，通过程序直接求得并按不同的圆度范围划分晶体。如下图 4.3 所示，(a)、(b)、(c)三图划分的圆度范围分别是 0.5~1.0、0.3~0.5、0.0~0.3。

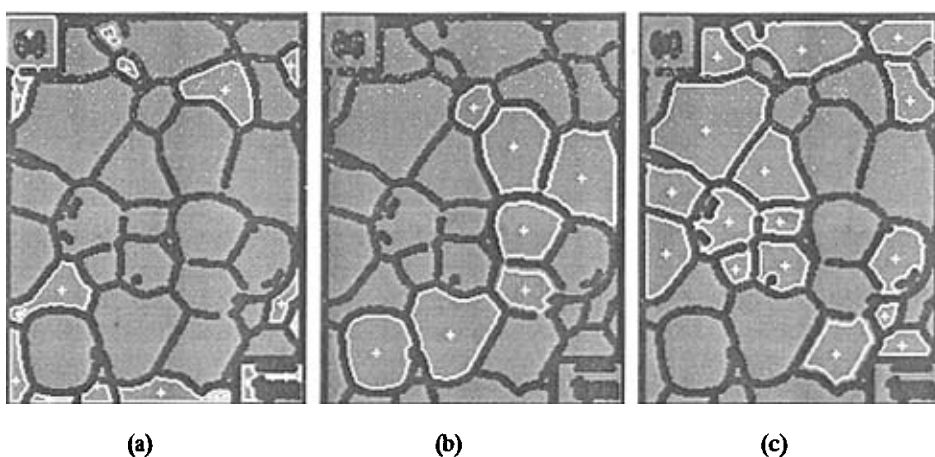


图 4.3 微观组织图像按圆度分类

4.2 材料微观组织图像的分类检测与匹配

通过上一节的分类分析可知，材料的微观组织有很多的几何形状分布，在钢铁冶金中，若某种形态的晶体的数量达到一定的程度，我们就可以认为该状态下的材料的微观组织达到要求的状态，即材料的性能达到了要求的性能参数。对于某种特定的材料晶体结构的组成数量与分布，本文采用图像的模板匹配的方法进行分析。

模板匹配是数字图像处理的重要组成部分之一。把不同传感器或同一传感器在不同时间、不同成像条件下对同一景物获取的两幅或多幅图像在空间上对准，或根据已知模式到另一幅图中寻找相应模式的处理方法就叫做模板匹配。

图像匹配在许多场合都有着重要的应用，文献^[34]把这些应用粗略地分为了四类：

1) 由同一场景、不同传感方式获得的图像的配准。

典型应用：多传感器的信息融合。

方法特点:通常需要利用传感器模型,需要对灰度进行预对准,利用物体形状和定位标志可以简化问题。

应用:医学图像处理,CT, MRI, PET, SPECT图像结构信息融合。遥感图像领域中的多电磁波段图像信息融合。

2) 在图像中寻找参考模板的最佳匹配

典型应用:在图像中识别和定位模板图像,例如:地图、目标物体等。

方法特点:基于模式,预先选定特征,已知物体属性,高级特征匹配。

应用:遥感数据处理,定位和识别已定义或已知特征的场景,如:飞机场、高速路、车站等。模式识别,字符识别,标志确认,波形分析等。

3) 对不同观察点获得的图像进行配准

典型应用:深度或形状重建。

方法特点:变形多位透视变换;常应用视觉几何和表面属性等假设条件;典型的方案是特征相关;必须考虑遮挡问题。

应用:计算机视觉,从视觉差异中构建三维深度和形状信息,运动跟踪,序列图像分析。

4) 对同一场景上不同时间或不同条件下获得的图像的匹配

典型应用:检测或监视变化或增长。

利用模板匹配可以在一幅图像中找到已知的物体。在金属微观组织的图像中,要在图像中找到某一个或一类组织结构,如铁素体、珠光体的位置,这时就可以采用模板匹配的方法。模板匹配具体过程为:拿已知的模板,和原图像中同样大小的一块区域去对。最开始时,模板的左上角点和图像的左上角点是重合的,拿模板和原图像中同样大小的一块区域去对比,然后平移到下一个像素,仍然进行同样的操作,所有的位置都对比完后,差别最小的那块就是我们要找的物体。

传统的匹配技术主要采用归一化灰度级相关方法(NGC) 确定模板在图像中的位置^[35]。在计算过程中,模板依次被移动到图像中所有可能的位置,模板中像素的灰度级乘以图像中被模板覆盖的对应像素的灰度级,得到的总和(NC值)存储在二维数组中,由这个数组可以得到模板在图像中的位置。两个向量对应的元素相乘定义了向量间的点积。在NGC中,像素的灰度级相乘同样也是由图像和模板中相应像素的灰度级组成的向量之间的点积,其结果— NC值衡量了一个向量在另一个向量上投影的大小,也即两个向量的相似程度,图像中某一区域和参考图像越相似,那么这个区域对应的NC值就越大。二维数组中NC值最大的元素的位置就是模板在图像中的位置。

$$NC = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S^{i,j}(m,n) T^{i,j}(m,n) \quad (4.1)$$

但是，点积本身并不能准确地定位，因为二维数组中NC值中的大小还受到像素灰度级大小的影响，如果图像中某一区域很亮——像素具有较大的灰度级，那么其NC值自然地也就变大了。我们更加关心的是向量间的夹角，并以此消除图像亮度变化对定位的影响。

根据以上的分析，我们可以得到如下的计算公式：

$$\cos \theta = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S^{i,j}(m,n) T^{i,j}(m,n)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m,n)]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T^{i,j}(m,n)]^2}} \quad (4.2)$$

其中， $T(m \times n)$ 个像素为模板， S_{ij} 为图像被模板覆盖的区域(子图)， i, j 为子图在图像中的坐标。

另外，如果把图像和参考图像都看作随机量，则由相关系数的概念又可以得到下面的计算公式：

$$R = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m,n) - \bar{s}][T^{i,j}(m,n) - \bar{T}]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m,n) - \bar{s}]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T^{i,j}(m,n) - \bar{T}]^2}} \quad (4.3)$$

其中， \bar{s} ， \bar{T} 为子图和模板中像素灰度级的平均值，分子是协方差，分母是标准差的乘积。 R 就是匹配的相似程度。

因此可以通过设定不同的 R 值，用模板对微观组织图像进行匹配，测定在不同的相似度 R 下与模板这种组织形貌相似的微观组织晶体的分布与数量。如下图 4.4 所示，为当 R 值最大时的匹配结果，其中，(a) 为模板，对微观组织(b)图进行逐行扫描匹配，匹配的最佳结果如图(c)所示。

因此，通过模板匹配，就可建立某状态下的材料微观组织与结构性能之间比较直接的关系，同时也能够对同一材料在不同状态下的微观组织演变进行分析。

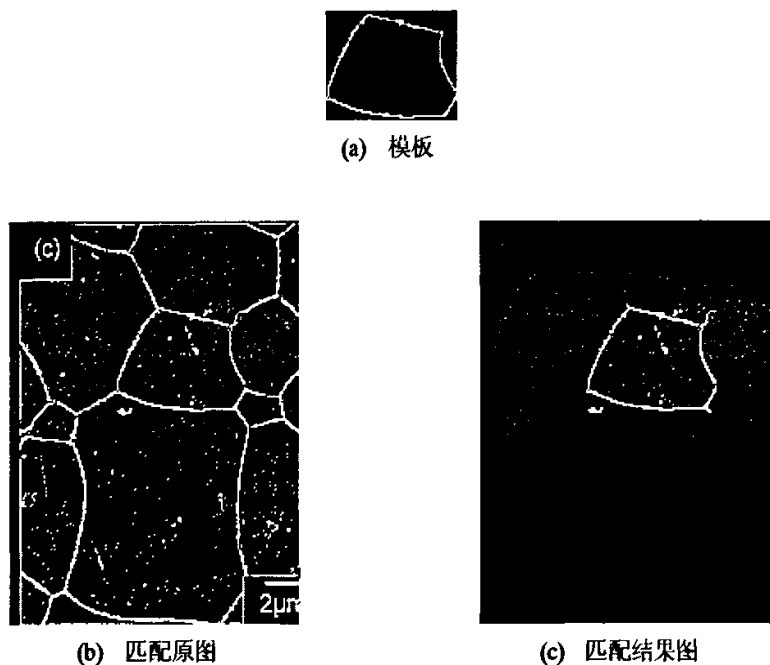


图 4.4 微观组织图像模板匹配

4.3 材料微观组织图像不同状态的特征

如下图 4.5 所示为不同温度的材料微观组织图像，(a)、(b)、(c)分别代表 PZT 陶瓷合金材料在 800℃、880℃、1000℃时的微观组织，可以看出，它们的结构之间有一定的联系，同时又有一定的演化，本文采用对它们进行模板匹配的方法分析它们之间的联系和区别。

根据图像晶体识别的输出结果，图 4.5(a)、(b)、(c)三张图中的晶体的平均面积分别为 368、1144、1147 个像素面积。从图中标识的比例尺可以看出，其中(c)图一个像素代表的实际长度为(a)、(b)两个像素的长度，因为(c)的放大倍数是(a)、(b)的两倍。本文采用建立与晶体图像平均面积等大的不同形状的模板对微观组织图像进行匹配分析。

对于图 4.5(a)，与平均面积等大的正方形边长取 $L=19$ 像素，等大的圆直径取 $D=22$ 像素，等大的正三角形底边长取 $S=29$ 像素。

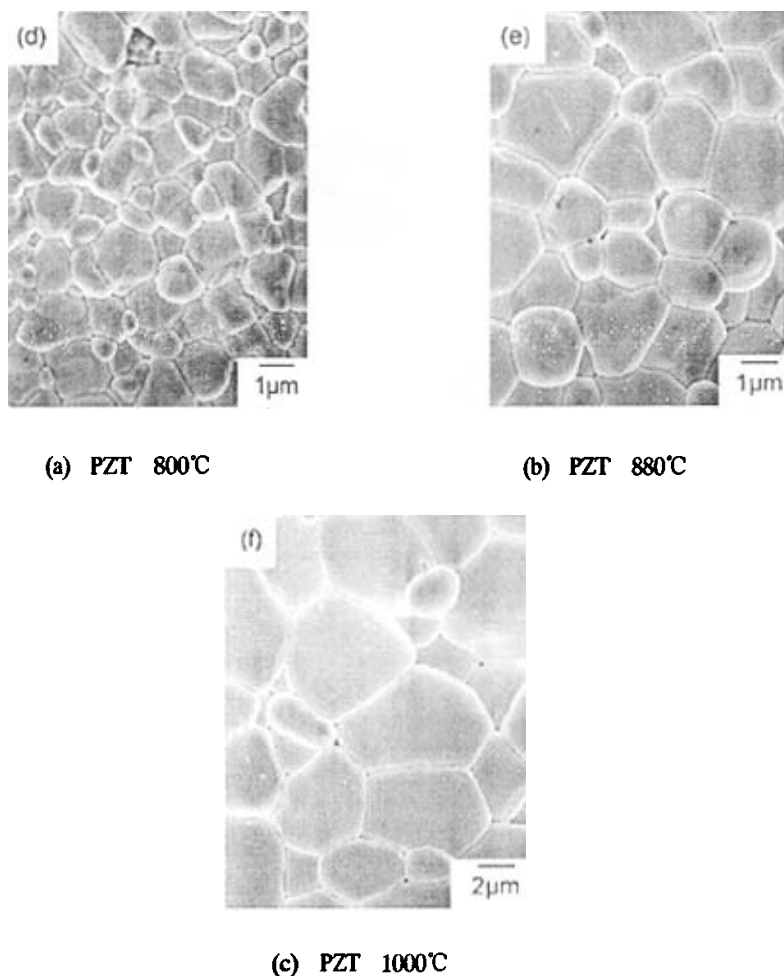


图 4.5 PZT 在不同温度下的微观组织图

如下图 4.6 是对 800°C 时 PZT 陶瓷合金材料用不同模板匹配的结果，其中(b)是采用方形匹配结果，匹配率 $R=0.5$ ，(d)是采用圆形匹配结果，匹配率 $R=0.5$ ，(f)是采用三角形匹配结果，匹配率 $R=0.46$ 。通过这三种模板的匹配，我们就能够认识和分析该材料在这种状态时的结构特点，从而与它的性能进行联系，指导下一步的加工处理。

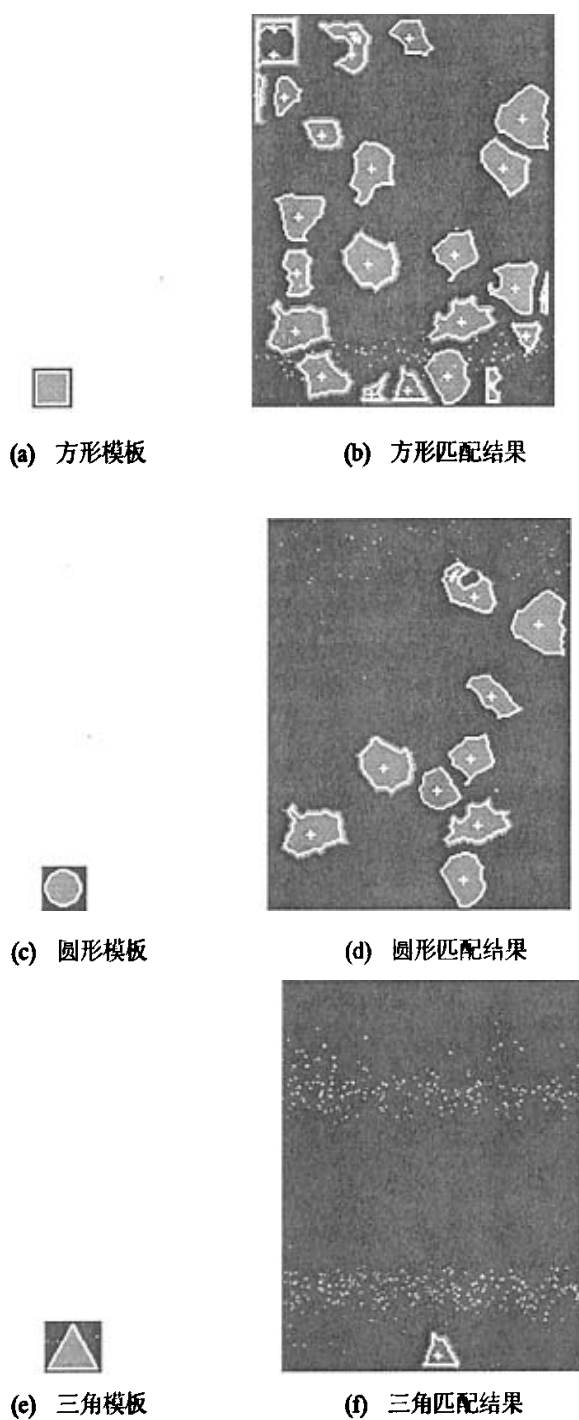


图 4.6 对 800°C 时 PZT 不同模板匹配结果

同样，对于图 4.5(b)，三种不同的模板的基本参数，分别取 $L=34$ 像素， $D=38$ 像素， $S=51$ 像素。对于图 4.5(c)，分别取 $L=34$ 像素， $D=38$ 像素， $S=51$ 像素。如下图 4.7 为对图 4.5(b)进行匹配的模板。



图 4.7 对 880°C 时 PZT 匹配的不同模板

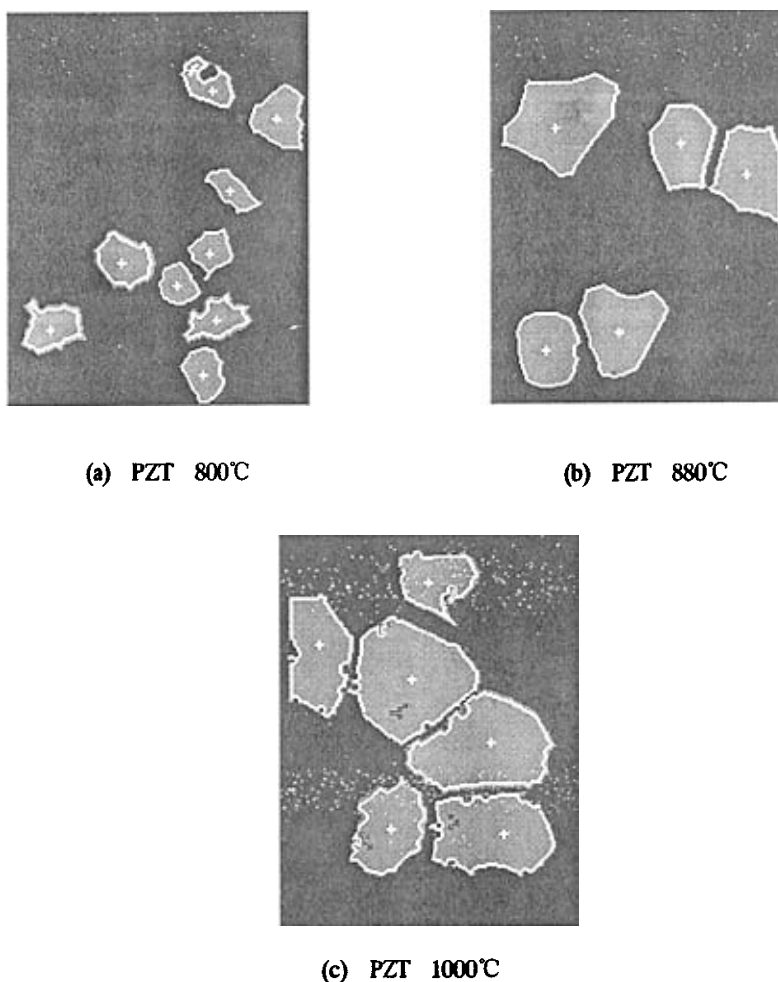


图 4.8 用圆形模板对不同温度下 PZT 匹配结果

对于材料的微观组织的分析，我们会对某一种晶相特别感兴趣，因为此种晶相在这种状态下的存在情况对该材料的性能起决定作用。因此，分析某种形状的模板对材料在不同温度状态下的匹配结果，以及与这种形状的模板对应的晶相在不同温度情况下的数量、大小及分布情况，并从中总结出该晶相的演变特性，意义重大。

如下图 4.8 是用圆形模板对不同温度下 PZT 材料的匹配结果，其中不同温度下的材料所用的模板的面积不同，模板的面积都与与之匹配的图像的晶体的平均面积相等。

对图 4.8 所示三个匹配结果进行比较分析，可以得出材料晶相演变的特性。

4.4 材料微观组织晶相演变分析

如下图 4.9 所示，横坐标分别为 PZT 陶瓷合金在 800℃、880℃、1000℃时的微观组织图像，图中两条线中 A 表示各图晶体面积演变值，单位为 $\mu\text{m}^2 \times 10^{-2}$ ，G 表示各图周长演变值，单位为 $\mu\text{m} \times 10^{-1}$ ，纵坐标表示各图晶体平均面积或周长的具体数值。

从该线图可以看出，PZT 合金在三个不同温度时的基本晶体特征。通过此图的数据，本文进一步作出面积分别等同于三个不同温度时的平均值，模板的形状可以根据需要选取，本文选取圆形不同大小的模板对 PZT 在三个温度时的微观组织图像进行匹配，匹配结果如上图 4.8 所示，采用线图对图 4.8 的结果进行分析。

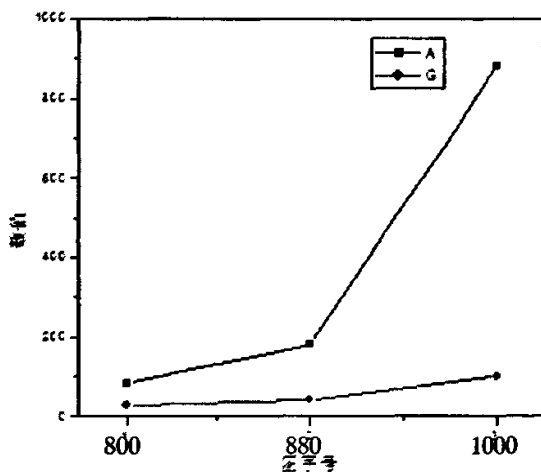


图 4.9 微观组织演变图

如下图 4.10 所示为在三种温度下微观组织的晶体匹配面积分布图，其中 a、b、c 分别代表图 4.8(a)、(b)、(c)中的结果，对图 4.8 中的晶体以从下往上、从左往右的顺序排序，并在横坐标上表示，纵坐标表示每个晶体的面积，单位 $\mu\text{m}^2 \times 10^{-2}$ 。

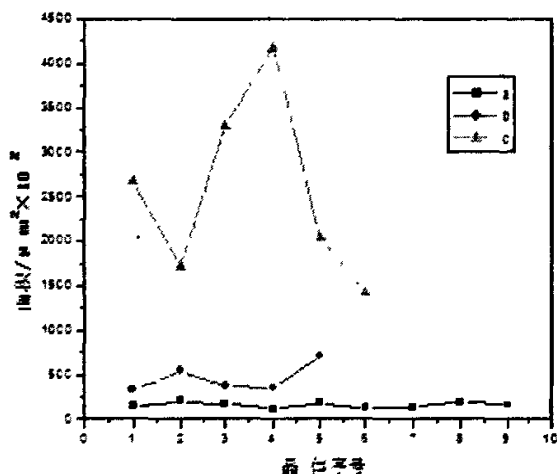


图 4.10 不同温度微观组织匹配面积分布图

图 4.10 体现了在材料的微观组织图像中某类晶相组织在不同状态下的演变情况，展现了此类晶相的实际大小，数目，组织分布，以及随温度的变化晶相的组织演变。

4.5 本章小结

对材料的微观组织的动态图像的晶体纹理特征分析可以得出以下结论：

- 1) 晶体的微观组织形貌有很多几何分布特征，这些特征将直接影响材料的组织性能，如对晶体进行面积、圆度的分类，有利于我们认识材料性能，掌握材料组织在不同状态下演变的特性。
- 2) 材料的微观组织在不同状态下的结构之间有联系，又有变化，本文采用建立特征模板对不同状态下的微观组织图像进行匹配分析的方法，定量它们之间的联系和区别。
- 3) 通过对不同温度下组织晶体演变分析，可以获得不同特征的晶体的成长演变特性参数。

结 论

本论文针对不同气氛温度下材料热加工处理过程中二维截面微观组织图像, 利用数字图像分析与处理方法, 研究了不同材料同一温度的微观组织图像, 以及同一材料不同温度多时段多截面的微观组织图像。建立静态和动态的微观组织图像的分析与研究方法, 初步揭示了不同条件下材料热加工处理过程中晶体微观组织的部分演变规律。本论文在讨论加热炉气氛温度、加热材料微观组织、以及该微观组织所决定的材料性能三者的关系中, 从建立微观组织与气氛温度的关系的角度出发, 分析了不同材料同一温度的微观组织图像, 以及同一材料不同温度多时段多截面的微观组织图像。主要获得了下面的结论:

1) 包括钢坯等在内的材料加热过程, 形成所希望的微观组织时的炉内气氛温度, 是加热炉需要控制的有效温度。以此有效温度为依据形成的加热制度, 有利于实现加热炉的优化控制。

2) 基于热处理的基本目的, 把控制炉温精度与实现材料轧制性能和使用功能联系起来, 有助于进一步改进和发展新一代加热炉及其热过程控制的新技术。

3) 静态微观组织图像的分析所获得的结论: a) 通过对大量已有静态微观组织图像的观察与分析表明, 不同加热工艺过程中的同一材料, 其微观组织结构相互之间具有明显的特征联系; 而且同一材料同一工艺过程的不同温度、或者相同温度(如保温过程), 微观组织也在不断的变化和成长之中; 每一种微观组织图像极其复杂多样, 在一定程度上体现利用图像处理的必要性。b) 在对材料微观组织图像的纹理特征统计分析中, 对于具体的金相纹理, 分别建立了傅立叶频谱法、图像频率滤波法、图像纹理统计法等图像分析方法; 利用这些方法对具体实验图像的分析表明, 这些方法简单、合理、有效。c) 通过对材料微观组织图像进行预处理, 可以对图像中的晶体进行识别, 获取晶体的平均截线长、平均面积、晶粒度, 以及晶体界面曲率的定量测量, 为实现加热炉优化控制提供准确的参数。

4) 动态微观组织图像的分析所获得的结论: a) 对于数量巨大形态各异的微观组织图像, 采用几何特征分类分析是可行的和有效的; b) 采用提取的单个晶体特征所建立的模板, 可以对整个图像进行扫描式检测与匹配, 能够实现对整个图像中不同的特征晶体的分析与统计; c) 通过对同一材料不同温度下的组织图像分析表明, 本文所建立的晶体模板法, 能有效的检测有共同特征的晶体, 并能够获得该晶体几何特征参数; d) 通过对不同温度下组织晶体演变分析, 完全可以获得晶体的成长率特性参数。

5) 本课题的展望。对于材料加热过程微观组织演变的图像分析的进一步深入研究的方向为: a) 随着图像处理以及模式识别技术的进一步发展, 对图像的纹理有了准确且实用的定义, 通过对材料纹理的识别和定量测量准确确定微观组织图像所对应的材料性能, 并进一步分析获取所需的新的性能的材料。b) 对材料在不同状态下的晶体演变特性进一步深入研究, 掌握不同材料不同状态下的演变机理。c) 把数字图像处理与材料体视学完美结合, 通过二维材料微观组织图像对材料进行三维重构, 与材料的演变机理相结合, 实现材料三维演变计算机真实重现, 从而指导优化控制。

参考文献

- [1]张卫军, 陈海耿, 杨泽宽. 对我国轧钢加热炉计算机控制应用现状的分析及发展中几个问题的探讨[J]. 冶金能源, 1997, 16(6): 52~55.
- [2]蔡乔方. 加热炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [3]戚翠芬. 加热炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [4]周玉, 武高辉. 材料分析测试技术—材料 X 射线衍射与电子显微分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [5]于庆波. 加热炉计算机辅助设计基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [6]Roth J L. Computer control of slab furnace based on physical models[J]. Iron and Steel Engineer, 1986(8): 41~47.
- [7]Vesiöcki T A. Automatic slab heating control at inland's 80-in hot strip mill[J]. Iron and Steel Engineer, 1986(12): 41~46.
- [8]Carpenter D G. Temperature control and optimization of a reheating furnace using a distributed control system[J]. Iron and Steel Engineer, 1987(8): 44~50.
- [9]Mahendra V B. Revamping of a billet reheating furnace at TATA SSL[J]. Steel Times International, 1999, 23(4): 23~24.
- [10]Filippi E, Sobrero S. Developments in reheating furnace design[J]. Metallurgia, 1997, 64(12): 3~6.
- [11]Kim J G, K M IT, Huh KY. Three-dimensional analysis of the walking-beam-type slab reheating furnace in hot strip mills[J]. Numerical Heat Transfer. Part A, Application, 2000, 38(6): 589~609.
- [12]朱培元. 板坯温度校正模型的研制[J]. 钢铁, 1986, 21(4): 31~35.
- [13]陈南岳. 成都无缝钢管厂 133 加热炉燃烧控制[J]. 冶金自动化, 1985, 12(1): 8~16.
- [14]马宏远, 谢运昌, 喻芳少. 重钢五厂 2#板坯加热炉微型机控制系统[J]. 冶金自动化, 1983, 10(7): 50~57.
- [15]杨永耀, 梁军. 加热炉多模式控制[J]. 冶金自动化, 1991, 15(5): 15~19.
- [16]蒋炯, 杨永规, 吕勇哉. 步进加热炉计算机优化控制[J]. 冶金自动化, 1989, 13(1): 3~7.

- [17] 陈海耿, 杨泽宽, 张卫军, 宁宝林. 天津中板厂燃油加热炉数学模型优化控制[J]. 工业炉, 1995, 44(2): 48~53.
- [18] 宁宝林, 陈海耿, 杨泽宽, 王英斌. 加热炉控制数学模型[J]. 冶金能源, 1989, 8(5): 37~41.
- [19] 刘日新, 宁宝林. 加热炉动态操作数学模型[J]. 钢铁, 1991, 26(10): 54~58.
- [20] 徐春柏, 李曙光. 步进式加热炉微机在线控制数模与策略[J]. 钢铁, 1989, 24(10): 53~57.
- [21] 陈海耿, 杨泽宽, 张卫军, 宁宝林. 太钢一轧厂加热炉数学模型优化控制[J]. 冶金能源, 1995, 14(4): 39~43.
- [22] 杨晔. 宝钢热轧厂步进式加热炉计算机过程控制[J]. 冶金能源, 1995, 14(5): 33~36.
- [23] Lisienko V G, et al. 直通式火焰加热炉在产量变化时的金属加热控制[C]. 第八届世界大会钢铁自动化论文集, 1980.
- [24] Boledon. A control system for fuel optimization of reheating furnace [J]. Scand J Metallurgy, 1986(15):16~24.
- [25] Misaka Y, Tskaharhi R, Shinjo A, et al. Computer control of a reheat furnace at Kashima still work's hot strip mill[J]. Iron and steel Engineer, 1982, 59(5): 51~55.
- [26] Iwahash Y. 连续加热炉计算机控制系统[C]. IFAC 第八届世界大会钢铁自动化论文集. 1980. 206~215.
- [27] Grill A, Sorimachi K, Brimaciobe J K. Heat flow, gap formation and bread-out in the continuous casting of steel slabs[J]. Metall Trans B, 1996(7):177~189.
- [28] Hofschier R A, Harding J M. Distributed process control system for bloom reheat furnace[J]. Iron and Steel Engineer, 1987, 64(3): 23~24.
- [29] Carpentier D G, Droctor C W. Temperature control and optimization of a reheat furnace using a distributed control system[J]. Iron and Steel Engineer, 1987, 64(8): 44~49.
- [30] 刘国权, 刘胜新等. 金相学和材料显微组织定量分析技术[J]. 中国体视学与图像分析, 2002, 7(4): 248~251.

- [31] 余永宁, 刘国权. 体视学组织定量分析的原理和应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989. 12.
- [32] 任怀亮. 金相实验技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986. 5.
- [33] 何斌, 马天予等. Visual C++数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [34] Brown L G, A survey of image registration techniques[J]. Computing Surveys, 1992, 24(4):325~376.
- [35] Rosenfel A, Kak A C. Digital Picture Processing[M]. Orlando: Academic Press, 1982.
- [36] Russ J C. Computer aided Quantitative Microscopy[J]. Materials Characterization, 1991, 27: 185~197.
- [37] Leithner K A. Basics of Quantitative Image Analysis[J]. Advanced Materials & Processes, 1993, 11: 18~23.
- [38] 徐建林. 球铁金相图片分析系统[J]. 钢铁研究学报, 2001, 13(1): 73~76.
- [39] Dighe M, Tewari A, Patel G. Application of Digital Image Processing to Reconstruct 3D Microprosity in Cast A356. 0 Alloy[J]. AFS Transactions, 1999, 107: 353~356.
- [40] Roebach B. Measurement of grain size and size distribution in engineering materials[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16(10): 1167~1174.
- [41] 陶景光, 廖兆曙. 分形在显微图像分析中的应用[J]. 物理测试, 1995, 5: 23~25.
- [42] 胡荣泽, 刘森英. CSR - 98 型彩色图象粒度分析仪在定量金相上的应用[J]. 硬质合金, 1999, 16 (3): 180~183.
- [43] 刘继雄, 汪美蕾, 彭涛. 图像分析和定量评级法的技术特征[J]. 钢铁研究, 1996, 91(4), 33~36.
- [44] 雷圣祖. 图像分析技术——一种新的检测材料微观结构特征的分析技术[J]. 钢铁研究, 1994, 1, 43~45.
- [45] 边肇祺, 张学工等. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [46] R M Pickett, B C Lipkin, A Rosenfeld. Visual Analysis of Texture in the Detection and Recognition of Objectsin [J]. Picture Processing and Psychopictorics, New York: Academic Press, 1970, 289~308.

- [47] J K Hawkins, B C Lipkin, A Rosenfeld, Eds. Textural Properties for Pattern Recognition[J]. Picture Processing and Psychopictorics, New York: Academic Press, 1970, 1970: 347~370.
- [48] A Rosenfeld, E B Troy. Visual Texture Analysis [C]. Kelly Communications Conference, University of Missouri—Rolla, MO, 1970, 2: 10~1.
- [49] O D Faugeras, W K Pratt. Decorrelation Methods of Texture Feature Extraction[C]. IEEE Trans, Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, PAMI-2, 4: 323~332.
- [50] R P Kruger, W B Thompson, A F Turner. Computer Diagnosis of Pneumoconiosis[C]. IEEE Trans, Systems, Man and Cybernetics, 1974, SMC-4, 1: 40~49.
- [51] R N Sutton, E L Hall. Texture Measures for Automatic Classification of Pulmonary Disease[C]. IEEE Trans, Computers, 1974, C-21: 667~676.
- [52] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 阮秋琦等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [53] Pratt W K. 数字图像处理[M]. 邓鲁华等译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [54] Castleman K R. 数字图像处理[M]. 朱志刚等译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [55] 唐克. MFC 程序设计[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002.
- [56] 陈兵旗, 孙明. Visual C++实用图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [57] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [58] 徐慧等. VC 数字图像实用工程案例精选[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [59] 苏彦华等. VC 数字图像识别技术典型案例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [60] 薛景浩, 章毓晋, 林行刚. 一种新的图像模糊散度阈值化分割算法[J]. 清华大学学报, 1999, 39(1): 47~50.
- [61] 陈果, 左洪福. 图像的自适应模糊阈值分割法[J]. 自动化学报, 2003, 29(5): 791~796.
- [62] 付峰, 应义斌. 生物图像阈值分割方法的研究[J]. 浙江大学学报, 2003, 29(1): 108~112.
- [63] 姜帆, 章毓晋. 一种基于形态学操作的新闻标题条检测算法[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(12): 1647~1652.

[64] 刘双科, 王国玉, 王建飞等. 绕水翼超空化阶段空泡相分布的定量图像分析[J]. 中国体视学与图像分析, 2004, 9(3):186~188.

[65] 刘双科, 王建飞, 朱彩兰等. 颗粒成像特性的研究[J]. 中国体视学与图像分析, 2006, 11(1):45~48.

[66] 刘 斌, 曾立波, 刘生浩. 血液细胞图像自动识别系统的研究[J]. 计算机工程, 2003, 29(1):174~176.

附录A 傅立叶变换推导公式

1 傅立叶变换的基本概念

傅立叶变换在数学中的定义是非常严格的，它的定义如下：

设 $f(x)$ 为 x 的函数，如果 $f(x)$ 满足下面的狄里赫莱条件：

- 1) 具有有限个间隔点。
- 2) 具有有限个极点。
- 3) 绝对可积。

则定义 $f(x)$ 的傅立叶变换公式为：

$$F(\mu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-j2\pi\mu x} dx \quad (A1)$$

它的逆变换公式为：

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\mu) e^{j2\pi\mu x} d\mu \quad (A2)$$

其中 x 为时域变量， μ 为频率变量。如果再令 $\omega = 2\pi\mu$ ，则上面两式可以写成：

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-j\omega x} dx \quad (A3)$$

由上面的公式可以看出，傅立叶变换结果是一个复数形式。设 $F(\mu)$ 的实部为 $R(\omega)$ ，虚部为 $I(\omega)$ ，则：

$$F(\omega) = R(\omega) + jI(\omega) \quad (A4)$$

或者写成指数形式：

$$F(\omega) = |F(\omega)| e^{j\theta(\omega)} \quad (A5)$$

其中：

$$|F(\omega)| = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)} \quad (\text{A6})$$

$$\phi(\omega) = \arctan \frac{I(\omega)}{R(\omega)} \quad (\text{A7})$$

通常称 $|F(\omega)|$ 为 $f(x)$ 的傅立叶幅度谱, $\phi(\omega)$ 为 $f(x)$ 的相位谱。

傅立叶变换也可以推广到二维情况。如果二维函数 $f(x, y)$ 满足狄里赫莱条件, 那么它的二维傅立叶变换为:

$$F(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(\mu x + \nu y)} dx dy \quad (\text{A8})$$

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\mu, \nu) e^{j2\pi(\mu x + \nu y)} d\mu d\nu \quad (\text{A9})$$

同样, 二维傅立叶变换的幅度谱和相位谱为:

$$|F(\mu, \nu)| = \sqrt{R^2(\mu, \nu) + I^2(\mu, \nu)}$$

$$(\text{A10}) \phi(\mu, \nu) = \arctan \frac{I(\mu, \nu)}{R(\mu, \nu)}$$

(A11)

可以定义:

$$E(\mu, \nu) = R^2(\mu, \nu) + I^2(\mu, \nu) \quad (\text{A12})$$

通常称 $E(\mu, \nu)$ 为能量谱。

2 离散傅立叶变换

为了在数字图像处理中应用傅立叶变换, 必须引入离散傅立叶变换 (DFT, Discrete Fourier Transform) 的概念。它的数学定义如下:

如果 $f(x)$ 为一个长度为 N 的数学序列, 则其离散傅立叶变换 $F(\mu)$ 为:

$$F(\mu) = \mathfrak{F}[f(x)] = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-j \frac{2\pi\mu x}{N}} \quad (\text{A13})$$

离散傅立叶的反变换为:

$$f(x) = \mathfrak{F}^{-1}[F(\mu)] = \frac{1}{N} \sum_{\mu=0}^{N-1} F(\mu) e^{j \frac{2\pi\mu x}{N}} \quad (\text{A14})$$

其中: $x=0, 1, 2, \dots, N-1$

如果令 $W = e^{j \frac{2\pi}{N}}$, 那么上述公式变成:

$$F(\mu) = \mathfrak{F}[f(x)] = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-j \frac{2\pi\mu x}{N}} = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W^{-\mu x} \quad (\text{A15})$$

$$f(x) = \mathfrak{F}^{-1}[F(\mu)] = \frac{1}{N} \sum_{\mu=0}^{N-1} F(\mu) e^{j \frac{2\pi\mu x}{N}} = \frac{1}{N} \sum_{\mu=0}^{N-1} F(\mu) W^{\mu x} \quad (\text{A16})$$

公式 A15 写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} F(0) \\ F(1) \\ \vdots \\ F(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & \vdots & W^0 \\ W^0 & W^{1 \times 1} & W^{2 \times 1} & \vdots & W^{(N-1) \times 1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W^0 & W^{1 \times (N-1)} & W^{2 \times (N-1)} & \vdots & W^{(N-1) \times (N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ \vdots \\ f(N-1) \end{bmatrix} \quad (\text{A17})$$

公式 A16 写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ \vdots \\ f(N-1) \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & \vdots & W^0 \\ W^0 & W^{-1 \times 1} & W^{-2 \times 1} & \vdots & W^{-(N-1) \times 1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W^0 & W^{-1 \times (N-1)} & W^{-2 \times (N-1)} & \vdots & W^{-(N-1) \times (N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F(0) \\ F(1) \\ \vdots \\ F(N-1) \end{bmatrix} \quad (\text{A18})$$

同理，二维离散函数 $f(x, y)$ 的傅立叶变换为：

$$F(\mu, \nu) = \mathcal{F}[f(x)] = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{\mu x}{M} + \frac{\nu y}{N})} \quad (\text{A19})$$

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[F(\mu, \nu)] = \frac{1}{MN} \sum_{\mu=0}^{M-1} \sum_{\nu=0}^{N-1} F(\mu, \nu) e^{j2\pi(\frac{\mu x}{M} + \frac{\nu y}{N})} \quad (\text{A20})$$

其中： $x=0, 1, 2, \dots, M-1$

$y=0, 1, 2, \dots, N-1$

在数字图像处理中，图像取样一般是方阵，即 $M=N$ ，则二维离散傅立叶变换公式为：

$$F(\mu, \nu) = \mathcal{F}[f(x)] = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{\mu x + \nu y}{N})} \quad (\text{A21})$$

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[F(\mu, \nu)] = \frac{1}{N^2} \sum_{\mu=0}^{N-1} \sum_{\nu=0}^{N-1} F(\mu, \nu) e^{j2\pi(\frac{\mu x + \nu y}{N})} \quad (\text{A22})$$

3 快速傅立叶变换

随着计算机技术和数字电路的迅速发展，离散傅立叶变换已经成为数字信号处理和图像处理的一种重要的手段。然而，离散傅立叶变换需要的计算量太大，运算时间长，在某种程度上限制了它的应用。按照公式 A13，计算一个长度为 N 的一维离散傅立叶变换，对 μ 的每一个值需要做 N 次复数乘法和 $(N-1)$ 次复数加法。那么对 N 个 μ ，则需要 N^2 次复数乘法和 $N(N-1) \approx N^2$ 次复数加法。很显然，当 N 很大时，计算量是相当可观的。

1965 年，库里 (Cooley) 和图基 (Turkey) 首先提出一种快速傅立叶变换 (FFT) 算法，采用该算法进行离散傅立叶变换，复数乘法和加法次数正比于 $N \log_2 N$ ，这在 N 很大时计算量会大大减少。如表 A1 所示：

FFT 算法与普通傅立叶变换算法的对比

N	N ² (普通 FT)	Nlog ₂ N (FFT)	计算收益 (N/log ₂ N)
2	4	2	2.0
4	16	8	2.0
8	64	24	2.7
16	256	64	4.0
32	1024	160	6.4
64	4096	384	10.7
128	16384	896	18.3
256	65536	2048	32.0
512	262144	4608	56.9
1024	1048576	10240	102.4
2048	4194304	22528	186.2

可见,采用 FFT 可以减少运算量,图像越大减少越多。对于长为 1024 的离散序列,用普通的离散傅立叶变换往往要计算几十分钟,而采用 FFT,一般只要几十秒。

快速傅立叶变换不是一种新的变换,它只是离散傅立叶变换的一种改进算法。它分析了离散傅立叶变换中重复的计算量,并尽最大的可能使之减小,从而达到快速计算的目的。下面就从一维离散傅立叶变换来讨论。

一维离散傅立叶变换可以用矩阵表达式 A17 来表示:

$$\begin{bmatrix} F(0) \\ F(1) \\ \vdots \\ F(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & \vdots & W^0 \\ W^0 & W^{1 \times 1} & W^{2 \times 1} & \vdots & W^{(N-1) \times 1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W^0 & W^{1 \times (N-1)} & W^{2 \times (N-1)} & \vdots & W^{(N-1) \times (N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ \vdots \\ f(N-1) \end{bmatrix}$$

观察系数矩阵,并结合 W 的定义表达式 $W = e^{j\frac{2\pi}{N}}$, 可以发现系数 $W^{m \times n}$ 是以 N 为周期。这样系数矩阵中很多系数是相同的,不必进行多次计算。而且由于

$W^{\frac{N}{2}} = e^{j\frac{2\pi}{N} \times \frac{N}{2}} = -1$, 因此 $W^{m \times n + \frac{N}{2}} = W^{m \times n} \times W^{\frac{N}{2}} = -W^{m \times n}$, 即 $W^{m \times n}$ 又具有对称性,因而利用 $W^{m \times n}$ 的对称性可以进一步减少计算量。

例如,对于 $N=4$, 系数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix}$$

由 W^{mn} 的周期性可以得出： $W^4=W^0$ ， $W^6=W^2$ ， $W^9=W^1$ ；由 W^{mn} 的对称性可以得出： $W^3=-W^1$ ， $W^2=-W^0$ 。因此系数矩阵可以转化为：

$$\begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & -W^0 & -W^1 \\ W^0 & -W^0 & W^0 & -W^0 \\ W^0 & -W^1 & -W^0 & W^1 \end{bmatrix}$$

可见系数矩阵的系数重复是很多的，如果把序列分解成若干短序列，并与系数矩阵元素巧妙的结合起来计算离散傅立叶变换，可以简化运算，这就是FFT的基本思路。

设 $N=2^\beta$ （ β 为整数），下面我们按照奇偶来将序列 $x(n)$ 进行划分，设：

$$\begin{cases} g(n) = x(2n) \\ h(n) = x(2n+1) \end{cases} \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots, N/2-1)$$

因此，离散傅立叶变换可以改写成下面的形式：

$$\begin{aligned} X(m) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot W_N^{mn} \\ &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} g(n) \cdot W_N^{mn} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} h(n) \cdot W_N^{mn} \\ &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) \cdot W_N^{m(2n)} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) \cdot W_N^{m(2n+1)} \\ &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) \cdot W_{\frac{N}{2}}^{mn} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) \cdot W_{\frac{N}{2}}^{mn} \cdot W_N^m \\ &= G(m) + W_N^m \cdot H(m) \end{aligned} \quad (A23)$$

因此,求一个点的离散傅立叶变换可以转换成求 $N/2$ 点的离散傅立叶变换。

离散傅立叶变换的计算时间主要是由乘法决定的,完成普通离散傅立叶变换大约需要进行 N^2 次乘法运算。进行分解后的快速傅立叶变换所需的乘法运算次数大为减少:第一项为 $(N/2)^2$ 次,第二项为 $(N/2)^2 + N$ 次...总共只需要 $2 \times (N/2)^2 + N$ 次,即大约只需要普通离散傅立叶变换的乘法运算次数的一半。相应地,快速傅立叶变换的速度也快了一倍。

当 N 为 2 的整数幂时,上式中的 $G(m)$ 、 $H(m)$ 可以再被分解为两个更短的序列,可以进一步加快运算速度。

根据分解的方式,快速傅立叶变换可以划分为两种不同的类型。一类是上面介绍的按时间分解的 FFT,即按时间分组的 FFT;另一类是按频率分解的按频率分组的 FFT。两种类型的推导过程类似,计算速度基本相同。

附录B定量金相测量的符号与原理

定量金相中所用的测量量很多，为了工作方便，规定用统一的符号。以 P 、 L 、 A 、 S 、 V 、 N 等分别表示点、线、面（平面）积、曲面积、体积和个数。测量结果常用被测对象的量的比值来描述，以带下标的符号表示。例 $N_A = \frac{\text{测量对象个数}}{\text{测量用的面积}}$ ，表示单位测量面积上测量对象的个数；同理， P_L 表示单位测量线长度上和测量对象的交点数； S_V 表示单位测量体积中测量对象的面积。其它符号可以如此类推。

表 B1 常用的基本符号

符 号	量 纲	定 义
P	—	点的数目
P_P	L^0	测量对象落在总测试点上的点分数
P_L	L^{-1}	单位测量用线长度上的点（相截的点）数
P_A	L^{-2}	单位测量用面积上的点数
P_V	L^{-3}	单位测量用体积中的点数
L	L	线的长度
L_L	L^0	线的百分数，在单位长度测量用的线上测量对象占的长度
L_A	L^{-1}	单位测量用面积上的线长度
L_V	L^{-2}	单位测量用体积中的线长度
A	L^2	测量对象或测量用的平面积
S	L^2	内界面积（可以不是平面）
A_A	L^0	面积百分数。在单位测量用的面积上测量对象占的面积
S_V	L^{-1}	单位测量体积中含有的表面积
V	L^3	测量对象的体积或测量用的体积。
V_V	L^0	体积百分数。在单位测量用体积中，测量对象占的体积
N	—	测量对象的数目
N_L	L^{-1}	每个单位测量用线长度上遇到测量对象的数目
N_A	L^{-2}	每个单位测量用面积上遇到测量对象的数目

N_V	L^3	每个单位测量用体积中包含测量对象的数目
\bar{L}	L	平均截线长度, 等于 L_L/N_L
\bar{A}	L^2	平均截面积, 等于 A_L/N_A
\bar{S}	L^2	平均内界面积, 等于 S_V/N_V
\bar{V}	L^3	测量对象的平均体积, 等于 V_V/N_V

在这些量中, 有些量是可以直接测量的, 如 P_P , P_L , P_A , P_V 等; 有些量是不能直接测量的, 如 V_V , S_V , L_V , P_V 等, 可借助体视学基本公式找出它们与可直接测量量的关系, 从而计算出来。故又称间接测量量。

定量金相中常用的几个基本公式如下:

$$V_V = A_A = L_L = P_P \quad (B1)$$

$$S_V = \frac{4}{\pi} L_A = 2P_L \quad (B2)$$

$$L_V = 2P_A \quad (B3)$$

$$P_V = \frac{1}{2} L_V * S_V = 2P_A P_L \quad (B4)$$

以上公式的导出除了要求测试时的随机性之外, 没有其它附加条件, 因此应用时不受组织形状、尺寸大小及分布的限制, 公式本身不会给计算带来误差, 但测量次数的多少却直接影响测量值的可靠性, 因此, 公式的应用必须以无规、大量测量为条件。由公式可见, 金相组织的定量测量就是建立在这些简单、最基本量测量的基础上, 通过二维截面上可直接测量的组织参数的测量, 得到我们所需的三维组织参量。

1 定量测量的基本方法

1) 计点法:

此法最简单, 又称点分析法。可测量点分数 P_P 、单位测量用线长度上测试线与测量对象相截的点数 P_L 、单位测量用面积上的点组织的点数 P_A 、单位长度测试线上遇到测试对象的个数 N_L 、单位测试面积上测试对象的个数 N_A 。

根据体视学公式, 通过这些参数可以计算出的三维组织参数为:

以计点法测量体积密度:

$$V_V = P_P \quad (B5)$$

单位体积内的表面密度:

$$S_V = 2P_L \quad (B6)$$

合金中粒子的平均直径:

$$\bar{D} = 3P_F/P_L \quad (B7)$$

在平面上线长度密度:

$$L_A = \frac{2}{\pi} P_L \quad (B8)$$

2) 线分析法:

线分析法主要用于金相组织线性长度的测量。可以在目镜中插入有刻度的玻璃片，直接在显微镜下测量；也可以利用目镜中某一点，通过移动载物台，记录移动载物台的总长度 L_T 和该点通过测量对象的长度 l ，则 $L_L = l/L_T$ 。也可以测量粒状第二相的平均截线长度 \bar{L}_2 ，它们的平均间距等等。应用体视学公式，可计算例如：

晶体的体积百分数:

$$V_V = L_L \quad (B9)$$

粒状第二相的平均直径:

$$\bar{D} = \frac{3}{2} \bar{L}_2 \quad (B10)$$

3) 面积分析法:

面积测量法是指测量对象为组织的面积参数的方法。例如金相组织中晶粒的平均面积 \bar{A} ，金相组织中某组织的面积分数 A_A 等。这种方法很难在显微镜下直接测量，但微观组织定量测量与图像处理技术结合之后，面积分析法变得很容易，并且由于图像技术越来越高的分辨率，面积分析法的精度越来越高。常用的体视学的公式为：

材料晶体的体积百分数:

$$V_V = A_A \quad (B11)$$

2 界面曲率的测量

· 曲率是描述曲线在某一点弯曲程度的。将二维截面的曲线上，每点曲率的平均值定义为二维曲线的平均曲率:

$$\bar{k} = \frac{\Delta\theta}{L} \quad (B12)$$

式中 $\Delta\theta$ ——P1, P2 两点切线的交角;

L ——P1P2 曲线的长度;

\bar{k} ——P1P2 曲线的平均曲率。

由体视学关系得到: 空间三维曲面的平均曲率 \bar{k}^* 和二维截面的平均曲率 \bar{k} 的关系是:

$$\bar{k}^* = \frac{\pi}{4} \bar{k} \quad (B13)$$

以复相合金中的第二相粒子为例，其周界是封闭曲线，每个粒子的平均曲率:

$$\bar{k} = \pm \frac{2\pi}{L_c} \quad (B14)$$

式中 L_c ——粒子周界长

正负号的含义是: 人为规定沿曲线逆时针方向测量，测量体在左侧，为正; 测量体在右侧，为负。粒子在二维截面上的平均曲率

$$\bar{k} = \frac{\Delta\theta}{L_A} \quad (B15)$$

$$\Delta\theta = 2\pi(N_A - N_{Ah}) \quad (B16)$$

式中 N_A ——单位测量面积上的粒子数；

N_{Ah} ——单位测量面积上，粒子中的孔洞（或夹杂）数；

L_A ——单位测试面积上粒子的总周界长。

当只讨论外界面作用时，成堆粒子与单一粒子讨论相同，此时所不同处是 N_A 以单位测量面积上的粒子堆数计；如果每堆粒子的内界面也要考虑时：

$$\bar{k} = \frac{2\pi(N'_A - N'_{Ah})}{L'_A} \quad (B17)$$

式中 N'_A ——第二相粒子数；

N'_{Ah} ——第二相粒子内的孔洞数；

$L'_A = L''_A + 2L_{aa}$ ；

L''_A ——单位测试面积上，粒子（包括成堆粒子）外界面的周界长；

L_{aa} ——单位面积上，成堆粒子内界面的周界长。

在学研究成果

一、 在学期间取得的科研成果

在学期间作为主要参加人进行了北京理工大学课题《绕水翼空化流场图像分析的研究》，该课题经北京理工大学科研处评定，于2004年11月完成。

二、 在学期间所获的奖励

(1) 荣获2003~2004学年“优秀共青团员”称号，共青团北京科技大学委员会，2004年11月。

(2) 荣获2004~2005学年“优秀共青团干部”称号，共青团北京科技大学委员会，2005年11月。

三、 在学期间发表的论文

(1) 刘双科，王国玉，王建飞，朱彩兰. 绕水翼超空化阶段空泡相分布的定量图像分析. 中国体视学与图像分析, 2004, 9(3): 186~188.

(2) 刘双科，王建飞，朱彩兰，单明，杨彩青. 颗粒成像特性的研究. 中国体视学与图像分析, 2006, 11(1): 45~48.

(3) 王建飞，刘双科，朱彩兰，单明，杨彩青. 基于邻域加权差值阈值法的大颗粒形貌图像及其识别的研究. (已投稿)

致 谢

本文是在刘双科老师的精心指导下完成的。刘老师渊博的知识、严谨的作风及平易近人的态度令我受益匪浅。在研究生期间，在学习上，刘老师尽心尽力地指导，培养了我发现问题，深入思考问题，解决问题的能力；在生活上，刘老师给予了无微不至地关心和照顾，并且乐于与学生一起进行球类运动，在体育锻炼的同时教会我做人做事的道理，在此表示衷心的感谢。刘老师严谨的治学态度，敏锐的科学思维，活跃的学术思想，一丝不苟的工作态度，以及为人师表、乐于奉献、公而忘私的崇高风范使我收益匪浅，刘老师的人生态度和治学精神将是我一生学习的榜样。

单明、杨彩青和王建永等研究生在实验室中创造了轻松和谐的环境，使论文得以顺利完成，在此深表感谢。