

上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 94



脉冲电流凝固细晶 技术基础研究

- 作者：范金辉
- 专业：材料学
- 导师：翟启杰



上海大学出版社
2005年上海大学博士学



脉冲电流凝固细晶 技术基础研究

- 作者：范金辉
- 专业：材料学
- 导师：翟启杰



图书在版编目(CIP)数据

2005 年上海大学博士学位论文. 第 2 辑/博士论文编辑部编. —上海: 上海大学出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-81118-367-2

I. 2… II. 博… III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2005 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 180878 号

2005 年上海大学博士学位论文

——第 2 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人: 姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 274.25 字数 7641 千

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1~400

ISBN 978-7-81118-367-2/G·490 定价: 980.00 元(49 册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2005)

**Fundamental Research on
Refinement of Solidification
Structure of Metals
with Pulse Current**

Candidate: Fan Jinhui

Major: Materials Science

Supervisor: Zhai Qijie

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任:	李建国	教授,上海交通大学材料学院	200030
委员:	向顺华	教授级高工,宝钢集团技术中心	200122
	王浩伟	教授,上海交通大学材料学院	200030
	任忠鸣	教授,上海大学材料学院	200072
	张捷宇	教授,上海大学材料学院	200072
导师:	翟启杰	教授,上海大学	200072

评阅人名单:

胡汉超	教授,北京科技大学材料学院	100083
郭景杰	教授,哈尔滨工业大学材料学院	150001
李建国	教授,上海交通大学材料学院	200030

评议人名单:

王浩伟	教授,上海交通大学材料学院	200030
张虎	教授,北京航空航天大学材料学院	100083
魏兵	教授,西安理工大学材料学院	710048
戚飞鹏	教授,上海大学材料学院	200072

答辩委员会对论文的评语

范金辉同学在查阅了大量国内外相关文献基础上,选择“脉冲电流凝固细晶技术基础研究”作为博士研究生研究课题,选题符合当前金属凝固新技术研究主要发展动向,具有重要的学术价值和应用前景。

该博士生从实验设备的设计和制造开始,通过大量的实验,研究了脉冲电流对单元单相纯金属、多元多相合金、多元复杂多相合金凝固组织和凝固特性的影响,取得了以下创新性成果:

采用自制脉冲电源产生的脉冲电流细化了具有不同凝固特性的单元单相纯金属、多元多相合金、多元复杂多相合金的凝固组织。

通过实验结果和数学分析获得了纯铝、奥氏体不锈钢和过共晶灰铸铁凝固组织细化效果与脉冲电流的峰值、脉宽和频率的定量关系式,确定了脉冲电流三个参数对金属凝固组织细化影响程度的大小,并发现三个参数之间的交互作用对凝固组织细化有明显的影响。

通过三种不同凝固特性的金属材料在脉冲电流处理后温度-时间曲线的对比,发现脉冲电流处理使金属的凝固温度升高,凝固时间缩短,提出了脉冲电流对金属凝固造成的“电致过冷”效应。

该论文实验方案合理,工作量饱满,实验数据可信,理论分析深入,条理清楚,文笔流畅,表明作者已经掌握了本学科坚实宽广的基础理论和系统深入的专业知识,具有较强的独立从事科学研究的能力。答辩过程中,叙述清晰,回答问题正确。

答辩委员会表决结果

答辩委员会通过无记名投票,一致同意通过范金辉同学的博士学位论文答辩,并建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席:**李建国**

2005 年 8 月 11 日

摘 要

根据实验要求研制了专用于金属凝固研究的高能脉冲电源及脉冲电流测量装置,分析了脉冲电源放电过程中的电流变化,系统测量了电流峰值、电流脉宽和脉冲频率等电流参数随放电回路中电压、电容量和传输线等变化的定量关系。

结合材料的组成、相特征、凝固特性和工程实用性,以纯铝、奥氏体不锈钢和过共晶灰铸铁为实验材料,采用热分析技术与金相分析技术相结合的方法,研究了脉冲电流处理对不同材料的金属材料凝固过程、凝固组织及力学性能的影响,发现脉冲电流处理使金属的凝固温度升高,凝固时间缩短,温度梯度减小,使金属更趋向于体积凝固方式,凝固组织细化,力学性能得到改善。根据实验现象,提出了脉冲电流对金属凝固造成的“电致过冷”效应。

脉冲电流处理能使纯铝试样凝固组织由粗大柱状晶转变为细小等轴晶,可大幅度细化纯铝的晶粒尺寸;使奥氏体不锈钢的柱状晶间距明显细化,并增加凝固组织中奥氏体的相对含量;使高碳当量的过共晶灰铸铁中出现大量D型过冷石墨和发达的奥氏体枝晶,细化共晶团尺寸。分别给出了本实验条件下,纯铝、奥氏体不锈钢和过共晶灰铸铁凝固组织细化效果与脉冲电流的峰值、脉宽和频率的定量关系。表明三种材料的凝固组织细化效果分别随着峰值、脉宽和频率的增大而增大。脉冲电流三个参数中,电流峰值对金属凝固组织细化的影响最大,脉冲频率次之,电流脉宽的影响最小。三个参数之间的交

互作用对凝固组织细化有很明显的影响。

根据现有金属熔体结构和凝固理论,综合考虑脉冲电流的焦耳热和电磁力等效应,并结合脉冲电流处理验证试验,分析了脉冲电流作用后金属凝固组织细化的机理,重点讨论了脉冲电流对凝固形核过程的多重复杂作用机制。理论分析表明,脉冲电流处理后,使液态金属中结构起伏的尺寸增大且趋于稳定,从而增加了晶胚数;使金属熔体的临界晶核半径和临界形核功减小,同时减小了临界形核过冷度;使金属熔体中异质核心的表面活化和净化,促进了金属的形核过程,从而使金属凝固组织细化。

基于经典形核理论,推导出脉冲电流作用下的金属形核模型。指出脉冲电流作用下形核功的变化与晶核和熔体两者的电导率及体积的大小有关,晶核的电导率增大和体积减小,降低形核功,促进形核;脉冲电流处理对扩散激活能有正反两方面的作用,电磁压力的作用增大扩散激活能,抑制原子的扩散,而焦耳热的作用降低扩散激活能,促进原子的扩散;脉冲电流引起的电磁振动和焦耳热造成的晶粒熔断、破碎、游离和增殖是凝固组织细化的重要原因。

结合实验研究和理论分析,以及材料本身的凝固特性与物理特性,分别对脉冲电流作用下纯铝、奥氏体不锈钢和过共晶灰铸铁凝固组织细化的形成机理进行了深入讨论。

关键词 脉冲电流,凝固,细化晶粒,纯铝,奥氏体不锈钢,灰铸铁

Abstract

A high-energy pulse power source used for researching solidification of metals and a Rogowski coil used for measuring strong pulse current were developed according to the requirement of the present experiment. The variation of electrical current during the discharge of pulse power source was analyzed. Furthermore, an examination was made of the quantitative relation of peak current, pulse width and pulse frequency etc. versus voltage, capacitance and transmission line of discharging circuit.

Combined with the components, phase and solidification characteristics, and engineering practicability, the pure aluminum, austenitic stainless steel and hypereutectic gray cast iron were selected as the research objectives. And the effect of pulse current on the solidification process, microstructure and mechanical properties was investigated by thermal analysis and metallographic examination. It was found that pulse current treatment increases the solidification temperature, decreases solidification time and depresses the temperature gradient. In this case, the sample is inclined to solidify in the mode of volume solidification, resulting in a refined microstructure and improved mechanical properties. Based on the experimental results, a concept of "Electro-

undercooling effect” was proposed.

Pulse current treatment makes the solidification microstructure of pure aluminum transform from coarse columnar grains to fine equiaxed ones, reduces the grain sizes of pure aluminum to a great extent and spacing of columnar grains for austenitic stainless steels, and increases the austenite percentage in the solidification microstructure. Additionally, the pulse current treatment can also induce the appearance of a large amount of D-type undercooling graphite and developed austenite dendrites in hypereutectic gray cast iron with high carbon equivalents as well as the refined eutectic colonies. For the given experimental conditions, the quantitative relation of refinement effect for those chosen materials against the pulse parameters including peak current, pulse width and pulse frequency etc. was analyzed. The effect of grain refinement was shown to increase with increasing the peak current, pulse width and pulse frequency under the present conditions. Amongst the three interactive parameters the peak current plays the most important role for grain refinement, pulse frequency takes the second place, and the pulse width only has a marginal influence. In particular, remarkable refinement effect can also be gained attributing to the coupled effects of these influencing factors.

Based on the theories of metal melts structure and solidification, taking the Joule heat and electromagnetic force into account and coupling the pulse current treatment experiment, the mechanism of grain refinement was

investigated, placing an emphasis on the multi-effect of pulse current on the solidification nucleation. Theoretical analysis indicated that the influence of pulse current treatment is mainly focused on three principal ways. Firstly, both the size of structural fluctuations and the number of embryos in liquid metals increases and becomes more stable. Secondly, the critical nucleus radius and critical nucleation work of liquid metals decreases, as well as the critical nucleation undercooling degree. Thirdly, the surfaces of heterogeneous nucleation sites in liquid melts are activated and purified, favoring the nucleation process and grain refinement.

According to the classical nucleation theory, a nucleation model was derived considering the effect of pulse current. It was pointed out that the nucleation work is closely related to the conductivity and volume of nucleus and melt. Generally speaking, a conductivity increase and volume decrease of nucleus would reduce the nucleation work and facilitate nucleation. Pulse current treatment has a dual effect on the activation energy for diffusion. Electromagnetic force can increase the activation energy for diffusion and suppress the atomic diffusion, whereas the Joule heat depresses the corresponding event and favors the atomic diffusion. Grain fusion, fragmentation, dissociation and multiplication caused by electromagnetic vibration and Joule heat are the important factors that refine the solidification microstructure.

In combination with experimental investigations and theoretical analysis as well as the intrinsic solidification

characteristics and physical properties, an in-depth study for the mechanism of the pulsed electrical current on the grain refinement of pure aluminum, austenitic stainless steel and hypereutectic gray cast iron was made.

Key words pulse current, solidification, grain refinement, pure aluminum, austenitic stainless steel, grey cast iron

目 录

第一章 综述	1
1.1 材料电磁加工及其发展	1
1.2 生态环境材料	4
1.3 材料发展与凝固科学技术	5
1.4 金属凝固细晶方法	8
1.5 电流凝固技术的理论与实践	13
1.6 本文的研究意义及研究内容	25
第二章 实验设备研制与脉冲电流分析测量	28
2.1 脉冲电源研制	28
2.2 脉冲电流测量装置	30
2.3 脉冲电源放电过程中的电流变化	31
2.4 脉冲电流的测量	34
2.5 本章小结	37
第三章 实验方法与实验材料的选择	38
3.1 实验材料	38

3.2	熔化设备及其辅助装置	41
3.3	温度测量装置	42
3.4	实验方法	44
3.5	本章小结	46
第四章	脉冲电流对金属凝固组织的影响	47
4.1	引言	47
4.2	多元函数逼近模型	48
4.3	脉冲电流对单元单相纯金属凝固组织的影响	49
4.4	脉冲电流对多元多相合金凝固组织的影响	62
4.5	脉冲电流对多元复杂多相合金凝固组织的影响	75
4.6	本章小结	93
第五章	脉冲电流对金属凝固过程影响的热分析	95
5.1	引言	95
5.2	脉冲电流对单元单相纯金属凝固过程的影响	95
5.3	脉冲电流对多元多相合金凝固过程的影响	111
5.4	脉冲电流对多元复杂多相合金凝固过程的影响	121
5.5	本章小结	132
第六章	脉冲电流作用下金属凝固过程的机理分析	133
6.1	引言	133
6.2	脉冲电流处理对金属熔体结构的影响	133

6.3	脉冲电流处理对临界形核条件的影响	136
6.4	脉冲电流处理对形核过程的影响	140
6.5	脉冲电流作用下的金属形核模型	143
6.6	脉冲电流作用下的晶粒游离和增殖	152
6.7	脉冲电流对金属凝固过程及组织影响的实验结果 分析	154
6.8	本章小结	159
第七章 结论		160
参考文献		162
致 谢		178