

材料和热加工领域的 物理模拟技术

PHYSICAL SIMULATION IN
MATERIALS AND HOT-WORKING

牛济泰 编著

国防工业出版社

TB3

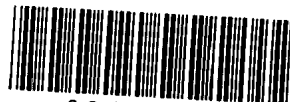
N79

450002

材料和热加工领域的 物理模拟技术

PHYSICAL SIMULATION IN MATERIALS AND HOT - WORKING

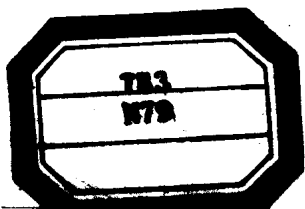
牛济泰 编著



00450002

国防工业出版社

·北京·



图书在版编目(CIP)数据

材料和热加工领域的物理模拟技术/牛济泰编著. —北京:国防工业出版社, 1999. 9

ISBN 7-118-02123-7

I. 材… II. 牛… III. ①物理模拟-应用-工程材料①物理模拟-应用-热加工 IV. ①TB3②TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 30375 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 200 千字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 20.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员 (以姓氏笔划为序)	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

序

材料在铸造、压力加工、热处理、焊接等热加工工艺过程中,以及在制成零部件后的实际服役过程中,会产生各种物理/力学行为。这些行为相当复杂,往往难于用一般的材料科学的知识来分析,特别是难于进行定量预测。为了改善工艺质量,提高产品性能,保证安全服役,就需要采用各种模拟技术。早期的模拟技术,或者追求简略而不能确切地反映实际情况,或者机械地模仿实际而失之庞杂。近年来,伴随着先进的测试技术、计算机科学和控制理论的发展,材料现代物理模拟技术应运而生。它可以采用小试样,利用热/力模拟试验装置,较精确迅速地研究材料在接近实际情况下的组织和性能的变化规律;其在评定热加工工艺的合理性、研究新材料、发展新工艺方面有独特的优越性,因而越来越引起材料工程界的广泛重视。这类模拟技术及模拟装置涉及材料、热学、力学、检测、控制、计算机、数值模拟等领域的知识与技能,而且据此可以获得很多新的信息,形成新的理论,实际上已形成一个跨学科的专业领域。在我国已形成一支专门的队伍,从事这方面的科学研究和生产实践。

牛济泰同志从 80 年代中期开始,利用从美国引进的 Gleeble 热/力模拟试验机,进行了大量的、卓有成效的材料物理模拟试验研究,积累了较丰富的实践经验。他还花较大力气把国内物理模拟同行们组织起来,定期进行技术与学术交流,并积极主动地开展了与国外材料物理模拟界的合作研究或学术联系,使我国物理模拟技术水平与国际先进水平的差距正逐渐缩小,某些方面(如在航空、航天等领域的应用)还有独到之处,引起国际上的关注,这是令人倍感欣慰的。该书是作者十几年以来在材料物理模拟方面教学

与科研实践的结晶,它还广泛吸收了当前国内外最新研究成果,从理论与实践的结合上,在国内外首次全面、系统地论述材料与热加工领域物理模拟的基本理论和应用技术,是一本颇具特色的学术专著。该书的出版,不但填补了我国材料科学与工程界在物理模拟著作领域中的一块空白,并且对促进物理模拟技术在我国的应用,使材料科学的研究由“经验”走向科学,由“定性”走向“定量”,起到重要推动作用。相信该书的出版,会受到广大读者的欢迎。

中国工程院院士



1999年5月

前 言

物理模拟、数值模拟和专家系统,是材料科学及热加工工艺研究从“经验”走向“科学”、从“定性”走向“定量分析”的桥梁,是 20 世纪 70 年代以来伴随计算机技术与现代控制理论的发展而在材料科学与工程领域研究方法上的重大突破,其对新材料研制和新工艺开发的巨大推动作用,以及带来的显著经济效益是无法用数字估量的。

物理模拟是实现数值模拟及建立专家系统的前提与基础,物理模拟本身又可以直接指导科学研究与实际生产,因此对于材料和热加工领域物理模拟技术的基本理论和应用方法的研究已越来越引起材料科学与工程界的普遍重视。自 80 年代以来,国际上每两年召开一次全球性的物理模拟学术会议,我国从 1988 年开始,至今也已举行过三次全国物理模拟技术研讨会。

笔者从 1986 年开始,利用从美国引进的 Gleeble-1500 热/力模拟试验机从事材料和热加工领域的科研和教学工作,至今已有十余年。其间,笔者曾三次赴英国、芬兰等国从事压力加工和焊接领域的物理模拟合作研究,并到美国、日本两家世界上最先进的模拟试验机生产厂家进行考察或培训,还担任组委会主席举办过两次国际性的物理模拟学术会议。从上述活动中,笔者深感我国物理模拟技术的开发程度和应用水平与国外存在较大差距。尽管我国拥有的物理模拟试验装置的数量居世界前列,但利用率却很低,其重要原因之一是许多材料工作者尚不太了解物理模拟技术,仍满足于袭用本专业传统的试验手段进行经验性质的科研活动,而不晓得利用物理模拟技术不但可以获得精确的试验结

果,还可以节省试验费用,缩短试验周期。另一方面,一些物理模拟工作者(模拟试验装置的专职操作人员)材料领域的知识功底尚不深厚,因此对模拟设备功能的开发缺乏明确的思路和针对性。鉴于上述原因,激起了笔者写一本系统地介绍物理模拟技术,并密切结合材料与热加工领域实际应用的学术专著的强烈愿望,以满足国内材料界同行们的需求;同时,这也是作者义不容辞的责任。

本书是吸收了当前国内外物理模拟技术最新的研究成果,并结合作者本人的教学与科研实践而写成的。作者特别感谢美国 DSI 科技联合体的 Hugo Ferguson 博士和 Wayne Chen 博士提供了十分宝贵的最新技术资料。

本书第一章、第二章由美国 DSI 科技联合体的陈伟昌博士和洛阳船舶材料研究所欧长春高级工程师审阅,陈伟昌博士还撰写了第二章的第 2.2.2 和 2.2.3 节;第三章由天津大学张文钺教授审阅;第四章由上海大学徐有容教授审阅;第五章由哈尔滨工业大学曾松岩教授审阅;第六章由哈尔滨工业大学李仁顺教授审阅,在此谨向他们表示衷心感谢。

本书的顺利完成还要感谢哈尔滨工业大学物理模拟实验室的同事们多年来的良好合作与帮助,感谢焊接教研室田锡唐教授对写作本书的一贯支持与关心。

作者还要特别感谢国防科技图书出版基金评审委员会的大力支持,以及责任编辑邢海鹰先生的辛勤工作。

物理模拟是一门边缘性的新兴学科,它涉及到许多领域的专业知识,由于作者学识有限,书中缺点甚至错误在所难免,恳请读者不吝指正。

牛济泰

1999 年 4 月

于哈尔滨工业大学

目 录

第一章 概论	1
1.1 材料现代物理模拟的基本概念及其研究意义	1
1.2 物理模拟与数值模拟的关系	2
1.3 材料物理模拟技术的发展概况	3
1.3.1 世界各国材料物理模拟技术及试验装置的发展概况	3
1.3.2 中国热模拟技术的发展及其在科技和国防现代化中的应用	5
参考文献	13
第二章 常用热/力模拟试验装置	15
2.1 物理模拟技术对热/力模拟试验装置的基本要求	15
2.2 美国产 Gleeble 系列热/力模拟试验机	16
2.2.1 Gleeble-1500 热/力模拟试验机	16
2.2.2 Gleeble-2000 热/力模拟试验机	29
2.2.3 Gleeble-3200/3500/3800 数字控制热/力模拟试验机	30
2.3 日本产感应加热物理模拟试验机	32
2.3.1 Thermorestor-W 热拘束模拟装置	33
2.3.2 Thermecmastor-Z 热/力模拟试验机	39
2.4 国产热模拟试验机	44
参考文献	47
第三章 物理模拟技术在焊接领域的应用	49
3.1 焊接热循环曲线及其基本参数	49
3.1.1 焊接热循环的主要参数及其物理意义	50
3.1.2 焊接热循环主要参数的数学模型	55
3.1.3 焊接热循环曲线的实际测定	77
3.1.4 焊接热模拟常用软件的数学基础	80
3.2 物理模拟技术在焊接热影响区组织和性能研究	

中的应用	84
3.2.1 焊接热影响区连续冷却转变图的建立	84
3.2.2 钢、铝、钛的焊接热影响区划分与特征	88
3.2.3 焊接热影响区脆化区韧性的研究	95
3.2.4 焊接热影响区热应变脆化物理模拟	98
3.2.5 模拟组织与实际焊接热影响区组织的比较	100
3.3 物理模拟技术在焊接热裂纹研究中的应用	105
3.3.1 零强温度 (NST) 的测定	107
3.3.2 零塑性温度 (NDT) 的测定	108
3.3.3 脆性温度区间 (BTR) 及零塑性温度区间 (NDR)	111
3.3.4 焊接结晶裂纹的凝固循环热拉伸试验	114
3.3.5 热裂纹敏感性的 SICO 试验法	115
3.4 物理模拟技术在焊接冷裂纹研究中的应用	116
3.5 物理模拟技术在再热裂纹研究中的应用	121
3.6 物理模拟技术在层状撕裂研究中的应用	129
3.7 物理模拟技术在应力腐蚀开裂研究中的应用	133
3.8 激光焊接热影响区的物理模拟	135
3.9 物理模拟技术在焊接领域的其它应用	137
3.9.1 扩散焊	137
3.9.2 电阻对焊	138
3.9.3 相变超塑性焊接	139
参考文献	141
第四章 物理模拟技术在压力加工领域中的应用	144
4.1 金属的塑性变形及压力加工物理模拟的基本参数	144
4.2 物理模拟在金属塑性变形抗力研究中的应用	145
4.2.1 圆柱体单向压缩法	146
4.2.2 平面应变压缩试验	153
4.3 物理模拟在形变奥氏体再结晶规律研究中的应用	157
4.4 应力松弛试验及 PTT 图的测定	165
4.4.1 应力松弛试验及其在热变形研究中的实际意义	165
4.4.2 PTT 图的测定	168

4.5 物理模拟在动态 CCT 曲线测定中的应用	174
4.6 物理模拟在超塑性研究中的应用	179
参考文献	180
第五章 物理模拟技术在铸造领域的应用	182
5.1 铸件形成过程的热、力学行为及物理模拟的 基本参数	182
5.2 铸造物理模拟试验技术的特点与基本要求	185
5.3 铸造物理模拟时金属的熔化与凝固控制	188
5.4 金属晶粒生长方向的模拟与控制	191
5.5 物理模拟技术在连铸领域的应用	192
5.5.1 原位熔化连铸模拟试验	193
5.5.2 连铸钢坯的高温力学性能拉伸试验	194
5.5.3 用物理模拟方法绘制连铸图	199
参考文献	200
第六章 物理模拟在新材料研制及热处理领域的应用	202
6.1 现代科学技术对材料的要求及提高结构材料 性能的途径	202
6.2 物理模拟技术在碳/碳复合材料超高温力学性能 研究中的应用	203
6.3 铝基复合材料高温压缩变形行为的物理模拟 试验研究	208
6.4 金属间化合物的拉伸性能模拟试验研究	210
6.5 差热分析法测量相变点	214
6.6 板带状试样 CCT 图的建立	216
6.7 板带材退火过程模拟	218
6.8 金属材料高温断裂极限的测定	220
6.9 热/力疲劳物理模拟	225
参考文献	227
第七章 材料和热加工领域物理模拟技术的发展方向	228
7.1 物理模拟技术应用范围的开拓	228

7.2 物理模拟精度的提高及模拟试验结果的修正	230
7.3 物理模拟与数值模拟及专家系统的联合应用	234
参考文献	235

CONTENTS

Chapter I INTRODUCTION	1
1.1 Fundamental Conception of Modern Physical Simulation and its Signification	1
1.2 The Relationship between Physical Simulation and Numerical Simulation	2
1.3 Development Survey of Physical Simulation Technology in Materials and Hot – Working	3
1.3.1 An Overview of Materials Physical Simulation Technology and Testing Equipments in the World	3
1.3.2 Development of Thermal Simulation Technology in China and its Application in Science and National Defense Modernization	5
REFERENCES	13
Chapter II TESTING EQUIPMENT FOR PHYSICAL SIMULATION	15
2.1 Essential Requirements of Physical Simulation Technology for Testing Equipment	15
2.2 Gleeble Thermal/Mechanical Simulator System	16
2.2.1 Gleeble – 1500	16
2.2.2 Gleeble – 2000	29
2.2.3 Gleeble – 3200/3500/3800	30
2.3 High – Frequency Induction Heating Simulator System	32
2.3.1 Thermorestor – W	33
2.3.2 Thermecmasto – Z	39
2.4 Thermal Simulators made in China	44

REFERENCES	47
Chapter III THE APPLICATION OF PHYSICAL	
SIMULATION TO WELDING	49
3.1 Welding Thermal Cycle and its Essential Parameters ...	49
3.1.1 Essential Parameters of Welding Thermal Cycle and Their Physical Implications	50
3.1.2 Mathematics Models of Essential Parameters of Welding Thermal Cycle	55
3.1.3 A Practical Measurement for Welding Thermal Cycle Parameters	77
3.1.4 Mathematics Foundation of Software for Welding Simulation	80
3.2 The Application of Physical Simulation to Microstructure and Property of Welded HAZ	84
3.2.1 Generating of SH-OCT Diagram	84
3.2.2 Delimitation and Feature of Welded HAZ of Steel, Aluminum and Titanium	88
3.2.3 Research on Toughness of Brittle Zone in Welded Joint	95
3.2.4 Physical Simulation of Thermal Strain Embrittlement of Welded HAZ	98
3.2.5 Comparison in Microstructure between the Simulated HAZ and Actual HAZ	100
3.3 Physical Simulation of Welding Hot Crack	105
3.3.1 Nil-Strength Temperature (NST) Measurement	107
3.3.2 Nil-Ductility Temperature (NDT) Measurement	108
3.3.3 Determination of Brittleness Temperature Range (BTR) and Nil-Ductility Range (NDR)	111
3.3.4 Hot Tensile Testing for Welding Solidification Crack	114
3.3.5 Crack Susceptibility Test Using SICO Procedure	115
3.4 Physical Simulation of Welding Cold Crack Research ...	116
3.5 Physical Simulation of Reheat Crack	121
3.6 Physical Simulation of Lamellar Tearing	129

3.7	Physical Simulation of Stress Corrosion Cracking	133
3.8	The HAZ Simulation of Laser Welding	135
3.9	Other Applications of Physical Simulation to Welding ..	137
3.9.1	Diffusion Welding	137
3.9.2	Upset Butt Welding	138
3.9.3	Phase - changing Superplastic Welding	139
REFERENCES		141

Chapter IV THE APPLICATION OF PHYSICAL SIMULATION TO METAL PLASTIC WORKING

4.1	Metal Plastic Deformation and Essential Parameters for Physical Simulation in Plastic Working	144
4.2	The Application of Physical Simulation to Deformation Resistance Research in Metal Plastic Working	145
4.2.1	Cylindrical Uniaxial Compression Test	146
4.2.2	Plane Strain Compression Simulation	153
4.3	The Application of Physical Simulation to Recrystallization Study of Deformed Austenite	157
4.4	Stress Relaxation Test and Development of PTT Diagram	165
4.4.1	Stress Relaxation Test in Physical Simulation	165
4.4.2	Development of PTT Diagram	168
4.5	The Application of Physical Simulation to Developing Dynamic CCT Diagrams	174
4.6	Physical Simulation of Metals Superplasticity	179
REFERENCES		180

Chapter V THE APPLICATION OF PHYSICAL SIMULATION TO CASTING

5.1	The Thermal and Mechanical Behavior and Essential Parameters of Physical Simulation in Casting	182
-----	---	-----