

大锻件形变 新理论新工艺

DADUANJIAN XINGBIAN XINLILUN XINGONGYI

刘助柏 倪利勇 刘国晖 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



大锻件形变新理论新工艺

刘助柏 倪利勇 刘国晖 著



机械工业出版社

本书是一部大型锻件锻造领域关于形变新理论新工艺的专著。它涉及及作者曾负责或主要参加的国家自然科学基金重点项目、国家科技攻关项目、原机械工业部教育司科技基金、“七五”机械工业部科技攻关项目等6个科研项目及其后续研究的主要内容。全书反映出新工艺新技术与相应工程应用理论相互依赖、相互促进与发展的内在关系。后者的价值与本书的内容处于同等重要的地位,能给读者以启迪。

本书分7章,包括:从新概念视角对锻粗进行重新认识、从新概念视角对拔长进行重新认识、在新理论的指导下,提出一系列新工艺和关键技术、控制锻造理论与工艺、残余应力理论与技术。这些都是创新性成果,可归纳成原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新三大类。

本书的若干内容,曾获河北省科技进步一等奖、国家机械工业局科技进步二等奖、山西省科技成果二等奖、冶金部科技成果三等奖。

本书可供金属塑性加工行业的工程技术人员、科研人员以及某些从事工程应用力学的科技工作者阅读,也可供大专院校师生(包括研究生)参考。

图书在版编目(CIP)数据

大锻件形变新理论新工艺/刘助柏等著. —北京:机械工业出版社, 2009. 1

ISBN 978-7-111-25743-1

I. 大… II. 刘… III. 锻件—锻造 IV. TG316

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 192922 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:邓海平 版式设计:霍永明 责任校对:樊中英

封面设计:王伟光 责任印制:王书莱

三河市宏达印刷有限公司印刷

2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 17 印张 · 326 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-25743-1

定价:39.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是一部大型锻件锻造领域关于形变新理论新工艺的专著。它包括了作者曾负责或主要参加的国家、省(市)部级鉴定(或验收)的六个科研项目的主要内容。这六个科研项目的:

(1) 国家自然科学基金重点项目(59235101)大型锻件的模拟技术及质量控制研究。

(2) 原机械工业部教育司科技基金(91251011)塑性力学镦粗基本理论与饼类锻件锻造新工艺的研究。

(3) 原机械工业部教育司科技基金(92251012)塑性力学拔长新理论与新工艺的研究。

(4) “七五”机械工业部科技攻关项目课题(75-50-07-11B13)冷轧辊残余应力的研究。

(5) 国家科技攻关项目((86)冶钢特字第006号)采用新工艺提高模具钢质量。

(6) 机械工业部(85-30204-04-01)30万、60万kW发电机、汽轮机低压转子工艺完善化研究。

诸内容经充实、提高和扩充后,大部分已先后在《自然科学进展》、《中国科学基金》、《机械工程学报》(中英文版)、《钢铁》、《中国机械工程》、《塑性工程学报》、《锻压技术》、《锻造与冲压》、《大型铸锻件》等期刊和第12届、第13届、第14届、第15届和第16届国际锻冶师会议(International Forgemasters Conference)、中国第1届国际锻造会议(1st China International Metalforming Conference)、第2届世界集成设计与工艺会议(The Second World Conference on Integrated Design & Process)上发表。但上述文章内容相对分散,不能形成一个完整的内容体系,因此作者整理形成该书,以飨读者。

本书分7章。各章内容分别为:第1章 绪论;第2章 从新概念视角对镦粗进行重新认识;第3章 从新概念视角对拔长进行重新认识;第4章 新工艺与关键技术;第5章 控制锻造理论与工艺;第6章 轴对称物体(实心件)内的残余应力;第7章 轴对称变形强化护环(空心件)的残余应力。

本书阐述了以下五个方面的内容:

(1) 从新概念视角对镦粗进行力学分析。对普通平板镦粗圆柱体,根据高径

比的不同,提出了两个新理论,即高径比大于1的刚塑性力学模型的拉应力理论和高径比小于1的静水应力区力学模型的切应力理论。平板镦粗新理论已被定性与定量物理模拟、数值模拟和生产解剖试验所证实。

(2) 从新概念视角对拔长进行力学分析。提出了拔长矩形截面毛坯的新理论,即研究平砧拔长矩形截面毛坯时,不但要研究轴向应力问题,而且需要考虑横向应力问题;同时,用料宽比和砧宽比控制锻件内部质量的拔长工艺,简称LZ锻造法。

(3) 在新理论的指导下,提出一系列新工艺和关键技术。它们包括新FM(NFM)锻造法、无横向拉应力锻造法、锥形板镦粗新工艺、水平V形砧锻造新工艺、小锻比锻造新工艺等,以及轴类、板类和饼类大型锻件锻造的关键技术。这些理论和技术已部分转化为生产力,创造了可观的经济效益。

(4) 控制锻造理论与工艺。根据试验结果,提出应用控制锻造来实现低压转子钢均匀化、细化晶粒、消除混晶的三种工艺:高温停锻、低温停锻和大锻件形变热处理。

(5) 残余应力理论与技术。对轴对称变形强化护环(空心件)残余应力产生的机理、测量与消除等理论方面进行了全面、系统的研究。从变形强化后的回弹入手,把轴对称变形强化护环中的残余应力,分为两个平衡系统去分析研究,即把力学上的一个空间问题,分为两个二维问题的叠加去处理。对冷轧辊(实心件)三维残余应力场的问题,建立了新的轴对称空间力学模型,引入了卸载和非卸载应力的概念,在求解中提出了变应力函数及其解法,并发展了Sachs内剥层法求解残余应力。

上述每一部分,都从知识创新思维方法的视角,进行了某些综合的小结。

本书的出版,得到了吉林大学宋玉泉院士、北京航空材料研究院曹春晓院士、哈尔滨工业大学罗守靖教授、合肥工业大学刘全坤教授和武汉理工大学华林教授等学者的大力支持,并对本书内容给予了高度评价,这对作者是个莫大的鼓舞与鞭策。

本书的出版,得到了燕山大学学术著作出版基金的资助。

本书由刘助柏统稿,倪利勇和刘国晖各参与撰写10万多字。此外,在行文过程中,还得到了李纬民、王雷刚、王连东、梁辰、齐作玉、刘晓东、刘喜波、谢心钊、刘宏玉、朱继武、康鹏超、赵长财、官英平、张永军、肖文辉、邓冬梅、朱文博、王海平等的诚挚协助。

在过去长期的科研合作中,得到了中国第二重型机械集团公司、中国第一重型机械集团公司、太原重型机器厂(现太原重型机械集团公司)、齐齐哈尔钢厂(现

黑龙江第一重工股份有限公司)、陕西重型机器厂、中国钢研科技集团公司、北京机电研究所、清华大学机械工程系以及我校有关部门的大力支持与帮助。借本专著出版之际,一并致以由衷的谢意。

限于作者水平,书中疏误之处在所难免,恳请读者批评指正。

(作者的电子信箱是: liuzb@ysu.edu.cn)

作者
于燕山大学

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 大型锻件在国民经济中的重要地位	1
1.2 大型锻件的生产特点	1
1.2.1 产品品种范围广	1
1.2.2 单件、小批生产	2
1.2.3 技术准备工作繁杂, 产品生产周期长	2
1.2.4 产品要求质量高, 生产难度大	2
1.3 成形过程理论分析与计算的基本方程	3
1.3.1 平衡微分方程	3
1.3.2 变形几何协调方程	3
1.3.3 材料屈服准则	3
1.3.4 本构方程	4
1.3.5 体积变化率	5
1.3.6 边界条件	5
1.4 大型锻件锻造概述	5
1.4.1 基本任务、基本工序与液压机锻造能力范围	5
1.4.2 大型锻件用钢锭	11
1.4.3 锻造对金属组织和性能的影响	18
1.4.4 大型锻件锻后冷却及热处理	22
1.5 大型锻件工艺理论与技术的发展	24
1.5.1 问题的提出	24
1.5.2 主要成果	25
1.6 本书的特点与研究方法	27
参考文献	28
第2章 从新概念视角对镦粗进行重新认识	29
2.1 已有镦粗知识概述	29
2.1.1 镦粗的应用	29
2.1.2 镦粗时的金属流动	29
2.1.3 圆柱体镦粗时的应力分布	33
2.1.4 改善镦粗不均匀变形的措施	34

2.2 普通平板间镦粗圆柱体的新理论	37
2.2.1 基本假设	37
2.2.2 刚塑性力学模型的拉应力理论	38
2.2.3 静水应力区力学模型的切应力理论	40
2.2.4 结论	41
2.2.5 降低饼类锻件探伤废品率的工艺原则	42
2.3 圆柱体镦粗刚塑性力学模型拉应力理论的物理模拟	42
2.3.1 定性物理模拟	43
2.3.2 定量物理模拟	46
2.4 圆柱体在普通平板间镦粗时应力场的数值模拟	51
2.4.1 应用刚粘塑性有限元法有限元分析	51
2.4.2 应用 ANSYS 商业软件	56
2.5 圆柱体漏盘镦粗	66
2.5.1 平板漏盘间圆柱体镦粗的两个新力学模型	66
2.5.2 圆柱体在内凹球面镦粗板和内凹漏盘间镦粗时的两个力学模型	71
2.5.3 漏盘镦粗圆柱体的试验研究	75
2.6 变形速率对平板镦粗圆柱体内部应力状态的影响	81
2.6.1 试验研究结果	81
2.6.2 理论分析初探	81
2.7 小结	82
参考文献	82
第3章 从新概念视角对拔长进行重新认识	84
3.1 已有拔长知识概述	84
3.1.1 拔长工艺操作	84
3.1.2 砧子形状和毛坯形状对锻件质量的影响	88
3.1.3 砧子宽度对锻件质量的影响	89
3.1.4 锻造条件对毛坯内部空洞闭合的影响	89
3.2 方柱体镦粗	96
3.2.1 方柱体镦粗的两个新力学模型	96
3.2.2 方柱体镦粗的数值模拟	101
3.3 平砧拔长矩形截面毛坯的新理论	105
3.3.1 名词释义	106
3.3.2 砧宽比 W/H 和料宽比 B/H ——平砧拔长的重要工艺参数	107
3.4 新拔长理论工艺参数的量值匹配与确定	108

3.4.1 平砧拔长的展宽	108
3.4.2 拔长毛坯的截面变换计算	109
3.5 平砧拔长矩形截面毛坯的物理模拟	110
3.5.1 定性物理模拟——平砧拔长矩形截面毛坯横向应力控制的 试验研究	110
3.5.2 定量物理模拟	114
3.6 平砧拔长矩形截面毛坯的数值模拟	116
3.6.1 砧宽比与轴向拉应力模拟	116
3.6.2 料宽比与横向拉应力模拟	117
3.6.3 综合模拟的结果	117
3.6.4 拔长数值模拟结论	121
3.7 锻造倒棱工艺数值模拟	121
3.7.1 建立有限元模型	122
3.7.2 对角压下应力应变分布及变形规律	122
3.7.3 另一对角压下的应力分布及变形规律	123
3.7.4 倒棱数值模拟结论	123
3.8 小结	125
参考文献	126
第4章 新工艺与关键技术	128
4.1 锥形板镦粗新工艺	128
4.1.1 锥形板镦粗圆柱体的力学模型	128
4.1.2 实验验证	129
4.1.3 结论	132
4.2 上锥形板、下锥面漏盘间镦粗圆柱体的新工艺	132
4.3 LZ 锻造法	133
4.4 新 FM(NFM) 锻造法	135
4.4.1 新 FM(NFM) 锻造法的实质	136
4.4.2 毛坯变形后的展宽	136
4.4.3 新 FM(NFM) 法锻造毛坯的截面变换计算	137
4.5 无横向拉应力锻造法	137
4.5.1 问题的提出	137
4.5.2 锥面砧拔长矩形截面毛坯的力学模型	138
4.6 水平 V 形砧锻造新工艺	138
4.6.1 新颖构思与砧形设计	139
4.6.2 定性物理模拟	140

4.6.3 生产性试验	142
4.6.4 结论	143
4.7 小锻造比锻造新工艺(减少镦粗工序)	143
4.7.1 小锻造比锻造的形变原理	144
4.7.2 形变过程力学分析	145
4.7.3 结论与讨论	145
4.8 轴类锻件锻造的关键技术	146
4.8.1 问题的提出	146
4.8.2 大型轴类锻件技术的进步及需要探讨的问题	146
4.8.3 大型轴类锻件锻造的关键技术	147
4.8.4 讨论与结论	148
4.9 板类锻件锻造的关键技术	148
4.9.1 问题的提出	149
4.9.2 常规锻造工艺生产大型板类锻件的致命弱点及其解剖试验	149
4.9.3 新 FM(NFM)法是锻造板类锻件的最佳工艺	153
4.9.4 结论	154
4.10 饼类锻件锻造的关键技术	154
4.10.1 问题的提出	154
4.10.2 大型饼类锻件常规生产的成形分析及解剖试验	155
4.10.3 饼类锻件锻造的关键技术	157
4.10.4 结论	158
4.11 小结	159
参考文献	159
第5章 控制锻造理论与工艺	161
5.1 问题的提出	161
5.1.1 汽轮机转子生产和发展概况	161
5.1.2 低压转子的生产情况和存在的问题	161
5.1.3 问题的分析及解决途径	162
5.2 控制锻造力学模型的建立	163
5.2.1 现代金属学理论为控制锻造提供了理论依据	163
5.2.2 控制锻造关键环节的选择	164
5.2.3 热扭转变形模拟轴类锻件成形工艺力学模型的建立	165
5.2.4 热扭转变形模拟转子成形工艺力学模型的建立	165
5.3 转子控制锻造的模拟实验	167
5.3.1 转子实际生产的应变及应变速率的估算	167

5.3.2 模拟实验	170
5.4 模拟实验的结果分析	172
5.4.1 低压转子钢动态再结晶及其临界变形量的规律	172
5.4.2 形变对奥氏体自发再结晶的影响	174
5.4.3 低压转子钢静态再结晶规律	176
5.5 控制锻造消除混晶的工艺	182
5.5.1 高温停锻	182
5.5.2 低温停锻	182
5.5.3 大锻件形变热处理	183
5.6 小结	183
参考文献	183
第6章 轴对称物体(实心件)内的残余应力	185
6.1 前言	185
6.2 轴对称问题残余应力的 Sachs 解法	185
6.2.1 基本理论	185
6.2.2 内剥层实验	189
6.3 轴对称问题残余应力的无损测算法	194
6.3.1 理论推导	195
6.3.2 计算实例	197
6.4 轴对称物体内三维残余应力场的确定	199
6.4.1 力学模型	199
6.4.2 实验	201
6.4.3 变应力函数的选择与确定	202
6.4.4 残余应力的求解	203
6.4.5 计算结果及讨论	205
6.5 冷轧辊的综合应力分析	208
6.5.1 轧辊工作力学分析	208
6.5.2 容许残余应力条件	210
6.5.3 结论	211
6.6 小结	211
参考文献	212
第7章 轴对称变形强化护环(空心件)的残余应力	213
7.1 引言	213
7.2 基本设想	213

7.3 护环变形强化后的卸载过程	214
7.4 位移曲线的微分方程	216
7.5 求残余应力的基本式	218
7.6 护环残余应力的分析与理论计算	218
7.6.1 残余应力产生的原因	218
7.6.2 残余应力的理论计算	221
7.7 确定护环或筒形件残余应力分布的测量理论与方法	226
7.7.1 测量由于附加弯矩在护环中引起的残余应力	228
7.7.2 测量由于强化变形程度不同所引起的切向残余应力	232
7.8 护环残余应力分布的解剖测量实例	233
7.8.1 解剖测量实例	233
7.8.2 解剖实验的分析	237
7.9 护环残余应力的理论计算实例	240
7.9.1 7号护环残余应力的理论计算	240
7.9.2 理论计算与解剖试验比较	242
7.10 消除护环有害残余应力	242
7.10.1 降低和消除护环(或筒形件)有害残余应力的基本原理	242
7.10.2 消除护环有害残余应力的模拟实验	245
7.10.3 生产性实验	247
7.11 小结——本章内容研究的认识过程解析	247
参考文献	251

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Important role of heavy forgings in domestic economic	1
1.2 Manufacturing features of heavy forgings	1
1.2.1 Broad products categories	1
1.2.2 Individual and small – scale production	2
1.2.3 Complex technological preparation and long production period	2
1.2.4 High products quality requirements and difficulty	2
1.3 Theoretical analysis of deformation and basic calculation equations	3
1.3.1 Equilibrium differential equations	3
1.3.2 Deformation compatibility equations	3
1.3.3 Yield criterion of material	3
1.3.4 Constitutional equations	4
1.3.5 Change ratio of volume	5
1.3.6 Boundary conditions	5
1.4 Sketch of manufacturing processes of heavy forgings	5
1.4.1 Basic tasks and sequences and forging capacity of hydraulic press	5
1.4.2 Ingots for heavy forgings	11
1.4.3 Influence of forging on metal tissue and properties	18
1.4.4 After – forging cooling and heat treatment of heavy forgings	22
1.5 Development of processes theory and technology of heavy forgings	24
1.5.1 Presence of problems	24
1.5.2 Main achievements	25
1.6 Features and research methods of the book	27
References of Chapter 1	28
Chapter 2 Re – analysis of upsetting from the angle of new concepts	29
2.1 Outline of the state – of – art of upsetting	29
2.1.1 Application of upsetting	29
2.1.2 Metal flow during upsetting	29
2.1.3 Stress distribution in cylinders during upsetting	33
2.1.4 Measures for the rectification of uneven deformation	34
2.2 New theory of cylinder upsetting between common flat platens	37
2.2.1 Basic hypotheses	37

2.2.2	Tensile stress theory of rigid – plastical mechanical model	38
2.2.3	Shear stress theory of mechanical model in static hydraulic zone	40
2.2.4	Summary	41
2.2.5	Processes determination principles of reducing scanning reject ratio of disk – shaped forgings	42
2.3	Physical modeling of tensile stress theory of rigid – plastical mechanical model for cylinder upsetting	42
2.3.1	Qualitative physical modeling	43
2.3.2	Quantitative physical modeling	46
2.4	Numerical simulation of stress field of cylinder upsetting between common flat platens	51
2.4.1	Analysis by rigid – plastical FEM	51
2.4.2	Analysis by FEM software Ansys	56
2.5	Cylinder upsetting on supporting ring	66
2.5.1	New mechanical model of cylinder upsetting between flat platen and supporting ring	66
2.5.2	New process of cylinder upsetting between conic platen and conic supporting ring	71
2.5.3	Experimental study of cylinder upsetting on supporting ring	75
2.6	Influence of deformation velocity on inner stress state of cylinder upsetting between platens	81
2.6.1	Experimental results	81
2.6.2	Tentative theoretical analysis	81
2.7	Summary of the chapter	82
	References of Chapter 2	82
Chapter 3	Re – analysis of stretching from the angle of new concepts	84
3.1	Outline of the state – of – art of stretching	84
3.1.1	Operation of stretching	84
3.1.2	Influence of anvil shape and billet shape on forging quality	88
3.1.3	Influence of anvil width on forging quality	89
3.1.4	Influence of forging conditions on inner cavities closure	89
3.2	Upsetting of cubic billet	96
3.2.1	Two new mechanical models of upsetting of cubic billet	96
3.2.2	Numerical simulation of upsetting of cubic billet	101
3.3	New stretching theory of rectangular cross section billet with flat anvils	105

3.3.1	Nomenclatures	106
3.3.2	The ratio of anvil width to billet height (AWR) and the ratio of billet width to billet height (BWR) — important process parameters of stretching with flat anvils	107
3.4	Quantitative match and determination of new stretching process parameters	108
3.4.1	Lateral flow of stretching with flat anvils	108
3.4.2	Cross - section size calculation of stretched billet	109
3.5	Physical modeling of stretching rectangular cross section billet with flat anvils	110
3.5.1	Qualitative physical modeling—experimental research on transversal stress control of stretching rectangular cross section billet with flat anvils	110
3.5.2	Quantitative physical modeling	114
3.6	Numerical simulation of stretching rectangular cross section billet with flat anvils	116
3.6.1	Simulation of AWR and axial tensile stress	116
3.6.2	Simulation of BWR and transversal tensile stress	117
3.6.3	Comprehensive simulation results	117
3.6.4	Conclusions on numerical simulation of stretching	121
3.7	Numerical simulation of chamfering	121
3.8	Summary of the chapter	125
	References of Chapter 3	126
Chapter 4	New processes and key technology	128
4.1	New upsetting process with conic platens	128
4.1.1	Mechanical model of cylinder upsetting with conic platens	128
4.1.2	Experimental verification	129
4.1.3	Summary	132
4.2	New process of cylinder upsetting with upper conic platen and lower conic supporting ring	132
4.3	LZ forging method	133
4.4	New FM forging method (NFM)	135
4.4.1	Essence of NFM forging method	136
4.4.2	Lateral flow of deformed billet	136
4.4.3	Cross - section size calculation of billet forging with NFM	137
4.5	Non - transversal tensile stress forging method	137

4.5.1	Presence of problems	137
4.5.2	Mechanical model of stretching rectangular cross section billet with conic anvils	138
4.6	New forging process with horizontal V – shaped anvils (HVA)	138
4.6.1	New conception and anvil design	139
4.6.2	Qualitative physical modeling	140
4.6.3	Pilot production	142
4.6.4	Summary	143
4.7	New forging process with small forging ratio (for the reduction of upsetting sequence)	143
4.7.1	Deformation principle of forging process with small forging ratio ...	144
4.7.2	Mechanical analysis of deformation	145
4.7.3	Summary and discussion	145
4.8	Key technology for axial forgings	146
4.8.1	Presence of problems	146
4.8.2	development of axial forgings and problems on discussion	146
4.8.3	Key technology for axial forgings	147
4.8.4	Summary and discussion	148
4.9	Key technology for platen – shaped forgings	148
4.9.1	Presence of problems	149
4.9.2	Fatal defects of conventional process for heavy platen – shaped forgings and dissection testing	149
4.9.3	NFM method of optimal forging method of platen – shaped forgings	153
4.9.4	Summary	154
4.10	Key technology for disk – shaped forgings	154
4.10.1	Presence of problems	154
4.10.2	conventional deformation process analysis of disk – shaped forgings and dissection testing	155
4.10.3	Key technology for disk – shaped forgings	157
4.10.4	Summary	158
4.11	Summary of the chapter	159
	References of Chapter 4	159
Chapter 5	Theory and process of controlled forging	161
5.1	Presence of problems	161
5.1.1	Outline of production and development of steam turbine rotors	161

5.1.2	Production of low pressure rotors and current problems	161
5.1.3	Analysis of problems and solutions	162
5.2	Mechanical model of controlled forging	163
5.2.1	Theoretical basis of controlled forging in modern metallography principle	163
5.2.2	Determination of key sequence of controlled forging	164
5.2.3	Mechanical model of axial forging stretching process modeling by heat torsion test	165
5.2.4	Mechanical model of rotors deformation process modeling by thermo - torsion test	165
5.3	Modeling experiment of rotor controlled forging	167
5.3.1	Estimation of strain and strain velocity during rotor production	167
5.3.2	Modeling experiment	170
5.4	Modeling experiment results analysis	172
5.4.1	Law of dynamic recrystallization and its critical deformation of steel of low pressure rotors	172
5.4.2	Influence of deformation on Austenitic spontaneous recrystallization	174
5.4.3	Law of static recrystallization of steel of low pressure rotors	176
5.5	Controlled forging process for the elimination of hybrid crystal sizes	182
5.5.1	Final forging under high temperature	182
5.5.2	Final forging under low temperature	182
5.5.3	Thermo - mechanical heat treatment of heavy forgings	183
5.6	Summary of the chapter	183
	References of Chapter 5	183
Chapter 6	Residual stress in axisymmetric solid body	185
6.1	Introduction	185
6.2	Sachs solution of residual stress in axisymmetric body	185
6.2.1	Basic theory	185
6.2.2	Inward peeling experimental	189
6.3	Non-destructive testing of residual stress in axisymmetric body	194
6.3.1	Theoretical deducing	195
6.3.2	Calculation examples	197
6.4	Determination of 3D residual stress field in axisymmetric body	199
6.4.1	Mechanical model	199
6.4.2	Experiment	201