

材料科学与工程著作系列
HEP Series in Materials Science and Engineering

HEP
MSE

屈服准则与 塑性应力-应变关系 理论及应用

**Yield Criteria and
Plastic Stress-Strain Relations
Theory and Application**

王仲仁 胡卫龙 胡 蓝 著

高等教育出版社

屈服准则与 塑性应力-应变关系 理论及应用

**Yield Criteria and
Plastic Stress-Strain Relations
Theory and Application**

王仲仁 胡卫龙 胡 蓝 著

QUFU ZHUNZE YU SUXING YINGLI-YINGBIAN GUANXI LILUN JI YINGYONG

高等教育出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

屈服准则与塑性应力-应变关系理论及应用 / 王仲仁,
胡卫龙, 胡蓝著. — 北京: 高等教育出版社, 2014. 7
(材料科学与工程著作系列)
ISBN 978-7-04-039504-4

I. ①屈… II. ①王… ②胡… ③胡… III. ①塑性力
学—塑性理论—研究 IV. ①O344.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第069715号

策划编辑	刘剑波	责任编辑	焦建虹	封面设计	姜磊	版式设计	杜微言
责任校对	窦丽娜	责任印制	韩刚				

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 涿州市星河印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 27.75
字 数 550千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2014年7月第1版
印 次 2014年7月第1次印刷
定 价 69.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 39504-00

作者简介

王仲仁,教授、博士生导师。1934年5月生于江苏,1955年毕业于北京钢铁学院(现北京科技大学),1955—1957年在哈尔滨工业大学研究生班师从苏联专家学习,毕业后留校任教。曾被评为航天工业部有突出贡献专家,享受国务院的政府特殊津贴。



他提出并从理论上推证了“应力-应变顺序对应规律”后又加以实验证明,并已被纳入国家级重点教材《金属塑性成形原理》中,该规律给出了平面应力各成形工序尺寸的变化趋势;他首次给出了沿屈服椭圆的应变增量变化图与体积成形各工序在 Mises 柱面上的应力-应变分区;他与朱宝泉一起首次给出了超塑性材料的屈服准则的实验研究结果;他与何祝斌共同给出一点应力分量的三维图形,还用应力莫尔圆移动法求证 Hencky 应力方程。

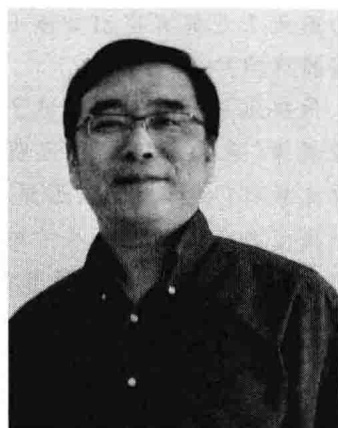
作为项目总工程师,王仲仁教授参加了载人航天用空间环境模拟器 KM6(亚洲最大,世界第三大)的真空容器研制,该空间环境模拟器为神舟系列飞船、嫦娥系列探月飞船及天官系列等大型航天器提供升空前相关性能测试,进而为发放“通行证”提供测试依据。后又任 FL9 高雷诺数大型增压风洞(亚洲唯一)洞体研制项目总工程师,该风洞已成功投入运营。他发明了无模胀球新工艺,即不用压力机、不用模具制造球形容器。用该技术制造了液化气球形储罐、压力供水罐、球形供水塔等共 11 套,运行状况均良好。此外还制造了以青岛市“五月的风”等为代表的多个大尺寸球形装饰。曾先后获国家科技进步二等奖 3 项、国家发明四等奖 1 项、省部级科技进步一等奖 2 项、省部级二等奖 7 项。此外,无模胀球技术获第 36 届尤里卡发明博览会金奖。

他曾任全国锻压学会理事长(1991—1994 年),并主持了第四届国际塑性加工会议(ICTP,1993,北京)及第一届新成形技术国际会议(ICNFT,2004,哈尔滨)。1993—2008 年为国际塑性加工会议常务理事会内唯一的中国常务理事(SAB of ICTP)。已培养 39 名博士。主编《塑性加工力学基础》(国防工业出版社)、《省力与近均匀成形》(高等教育出版社)、《锻压手册》锻造卷(机械工业出版社)及《王仲仁文选》(科学出版社)、《塑性加工词典》(机械工业出版社)等书籍 11 本,发表

论文 300 多篇。

鉴于王仲仁教授在国内外享有盛誉,2004 年国际著名期刊《Journal of Material Processing Technology》(Elsevier) 及国内《塑性工程学报》分别出专刊祝贺王仲仁教授 70 华诞。

胡卫龙,1959 年生于辽宁,1982 年本科毕业,1989 年考入哈尔滨工业大学,师从王仲仁教授,1992 年毕业获得博士学位。攻读博士期间,与导师在《力学学报》上联合发表了广义屈服准则方面的论文。毕业后,曾在企业和政府部门工作,曾任深圳市统计信息局总经济师、信息产业办公室常务副主任及国资和外资企业总经理等职。1999 年到美国,现为 Troy Design & Manufacturing INC (美国福特汽车公司全资子公司)技术专家(Technical Specialist)。



目前主要工作内容为板材成形、与汽车相关的实验数值模拟分析、结构强度分析和工程实际问题的解决(trouble shooting)。与此同时,继续研究塑性力学的相关问题,在理论上的主要成就是提出了“等效状态”的概念,即从物理机制上解释了各向异性强化和一般性非等向强化塑性变形发展过程,从塑性本构关系上给出了屈服方程(加载方程)与塑性位势方程之间的对应关系,将应力强化增量与塑性应变增量对应联系起来,进而给出材料单元体的非等向强化塑性应力-应变关系。在《International Journal of Plasticity》、《Philosophical Magazine Letters》、《Philosophical Magazine》、《International Journal of Machine Tools and Manufacture》、《Computational Materials Science》、《Journal of Materials Processing Technology》等期刊上发表学术论文 70 多篇。

胡蓝,博士,1984年生于山东,本科毕业于哈尔滨工业大学材料成形及控制工程专业,2008年和2012年分别获哈尔滨工业大学材料加工工程专业硕士和博士学位。博士期间师从苑世剑教授,从事大型薄壁构件充液整体成形技术研究,作为第一批优秀博士出国访问计划入选者到英国进行交流。现任上海航天设备制造总厂塑性成形工艺研究室主任兼车间技术主任,主要从事金属塑形成形理论、新成形方法、成形过程有限元仿真、大型复杂构件拉深技术等研究。目前,作为技术负责人,参与国家重大科技项目2项、省部级项目3项,发表学术论文近20篇。



前 言

屈服准则是指对特定材料的单元体在任意应力状态下是否产生塑性变形和使塑性变形继续进行必须满足的判据,它的基本数学表达式称为屈服方程,通常用应力张量的分量与材料的流动应力之间的数学式描述。塑性应力-应变关系则是描述塑性变形时应力偏量分量与应变(或应变速率)分量之间的数量关系。以上这两者又称为“塑性本构关系”,它是反映物质塑性变形时宏观性质的数学模型,属于物理方程。最熟知的反映纯力学性质的本构关系还有胡克定律、牛顿黏性定律、理想气体状态方程、热传导方程等。对于不同的力学,如弹性力学、塑性力学及流体力学,其几何方程、平衡方程都是相同的,只是物理方程不同而已,也就是说,所采用的本构关系是不同力学的本质区别。

坊间有不少关于塑性本构关系的书籍,其作者多为力学方面的学者,书中侧重于方程的推导和公理的论证,而本书的作者们曾多年进行塑性力学的理论与应用的研究,这些研究成果构成了本书的主要内容,作者们的背景使其有可能从物理概念角度去阐明数学公式的本质,并侧重如何利用塑性力学来定性或定量地解决实际问题。概括来讲,本书有以下特色:

(1) 物理概念严谨、清晰

书中强调应力与力的不同,指明应力的数值取决于其所作用平面的方位,即使在简单拉伸时,作用在不同方位平面上的应力也是不等的,而力是一个数值不变的向量,不应该像有些文献中错误地将作用于不同平面上的应力当成力的概念进行合成。又如,书中特别强调应力偏张量的分量是决定塑性变形的发生、发展与变形类型的依据,并用应力莫尔圆及应变增量莫尔圆很形象地与其相对应,明确了中间主应力(不是最大或最小主应力)决定所产生的应变状态,并以此为依据将应力状态分为伸长类、平面应变类及压缩类三种,这就从本质上说明为什么九种应力状态只产生三种应变状态。

(2) 重视实验研究

书中第二章列出了分别代表应变强化类、应变速率强化类、应变强化与应变速率强化共存类、复合材料类及各向异性材料类的单向拉伸力学特性,它们中很多都是航天、航空及汽车领域新近研发的材料,这些材料的会聚为本书增色颇多。本书第三章介绍了验证屈服准则与塑性应力-应变关系的薄壁管 $P-p$ (加内压与轴向力)试验、薄壁管 $P-M$ (加轴向力与扭矩)试验、薄板双拉试验,还包括王仲仁与付元首次进行的薄壁管加外压与轴压的双压试验及王仲仁与朱宝泉对超塑性材料进

行的薄壁管 $P-p$ 试验研究,从经典到现代,相当全面。并将超塑性材料的薄壁管 $P-p$ 试验作为完整的案例,见本书的附录四。

(3) 注意反映我国学者在相关领域的研究成果

以屈服准则为例,书中除阐述了经典的 Mises 准则与 Tresca 准则以及附录列出的 Hill 与 Barlat 各向异性屈服准则外,在正文中还邀请到西安交通大学俞茂宏教授亲自执笔编写由他提出的双剪应力准则及统一屈服准则(曾经获得 2011 年国家自然科学奖)两节,与此同时,还介绍了本书作者王仲仁、胡卫龙提出的广义屈服准则(曾经发表在 1989 年《力学学报》21 卷)。此后,胡卫龙对各向异性屈服方程及在后续屈服过程中塑性变形的几种强化特性又进行了深入的研究,提出了“等效强化状态”概念,从物理本质上解释了非等向强化塑性变形发展过程中可能出现的应力加载、中性变载和“软化”变载所共同反映出的“等效强化”现象。给出了“屈服方程”与“塑性位势”的应力强化增量与塑性应变增量之间的对应关系。

(4) 尊重前辈的贡献

众所周知,我国塑性力学的前辈是北京大学的王仁先生与中国科学院力学研究所的李敏华先生,是他们两位于 20 世纪 50 年代从美国回来后领导一批年轻人从阅读塑性应力-应变关系文献入手起步研究塑性力学,在研读 100 多篇文献的基础上由王仁、李敏华先生合写了《塑性应力-应变关系理论的文献总结》,刊登在 1958 年第 02 期《力学学报》上,这是国内在塑性力学方面的第一篇论文,也是奠基性论文。1991 年 7 月 23 日在国际理论与应用力学(IUTAM)“金属多晶体弹塑性大变形本构关系”北京研讨会上王仁先生作主旨报告,介绍了中国塑性本构关系研究的近况,后来将报告稿译成中文发表在《力学与实践》1992 年第 05 期,在本书的附录中全文转发上述两篇珍贵的文献,借此机会感谢他们为中国开创塑性力学研究与人才的培养,更是寄托对两位前辈的怀念。

(5) 重视定性解决实际问题

在处理工程问题时往往需要迅速给出一个正确的思路,例如,如何减少变形所需的载荷,如何避免开裂,如何避免工件局部变薄,等等,这些问题很难靠有限元来解决,因为后者只是一个工具,不能给出思路。例如,Levy 于 1871 年, Mises 于 1913 年分别提出了塑性变形时应变增量与相对应的偏应力张量的分量成比例的应力-应变关系,但实际上很难应用,原因之一是工程上关心的是应变全量而不是瞬时的增量,原因之二是应力偏量一般很难确定,本人提出的“应力-应变顺序对应规律”就是在主应力的顺序(指相对大小)不变但数值可变的条件下对 Levy-Mises 应力-应变关系严格地推广,是一种定性半定量规律,运用该规律可在不提“应力偏量”一词的条件下给出应变全量之间的相对大小。在本书第七章给出了薄壁管拉拔、无模液压胀球及薄壁管缩口时各个方向尺寸的相对变化,并给出这些工序壁厚控制的思路。

(6) 提供了用多种方法定量计算成形过程应力-应变分析的范例

在本书第八章给出了多种塑性加工工序应力-应变分析的实例,全部来自本书作者们自身的研究成果。所用应力-应变关系包括增量理论、全量理论,后续强化模型包括等向强化模型和等向强化/运动强化模型,计算方法包括解析解、有限差分数值解及有限元分析,不仅为读者提供了具体问题的应力-应变分析结果,从总体上看,也提供了一个广阔的视野。所以本书不仅指明了解决问题的定性思路,还给出了很多定量计算的范例。

应该说明的是,编写这样一本风格独特、理论和应用并重的专著实非易事,在此本人要感谢西安交通大学俞茂宏教授将他获得国家自然科学奖的成果亲自执笔成文列入本书,感谢哈尔滨工业大学张泽华教授提供了关于球墨铸铁等材料薄壁管 $P-p$ 试验的研究结果,感谢北京航空航天大学万敏教授提供了关于薄板双拉的试验研究结果,感谢哈尔滨工业大学侯珍秀教授及王国锋分别提供了他们对素有“金属玻璃”之称的 PC 材料及钛合金在不同应变速率下热态拉伸的研究成果,感谢宝钢研究院汽车用钢研究所蒋浩民所长及陈新平高工提供了典型汽车用高强钢性能研究成果,感谢在英国帝国理工学院工作的王礼良研究员及青岛大学程联军博士在收集资料方面所提供的帮助,感谢胡志力博士、张伟玮博士生及崔晓磊博士生在整理书稿方面所付出的辛劳。

本人感到十分欣慰的是能与我的弟子胡卫龙博士及隔辈弟子胡蓝博士共同完成此书稿,难能可贵的是卫龙博士在学校攻读博士期间就对塑性力学有浓厚兴趣,直到现在,作为美国福特汽车公司解决汽车冲压件生产难题的高级技术专家仍在不断地应用塑性力学解决实际问题,还在继续研究塑性本构理论,他已在国际著名期刊上发表多篇高水平论文,其中部分内容已整理成本书的第四、第五、第六章及第八章 8.5 节书稿;胡蓝博士负责本书第二章的编写,并以其在博士期间的研究工作为基础编写了第八章的 8.4 节及 8.6 节,此外,还负责按出版要求整理全部书稿,工作量很大,做得十分认真。

最后,我要特别感谢刘剑波编辑,作为本书的策划编辑,她对作者们自主选题表示尊重,对编写大纲的变动表示理解,她的精品意识使我们不敢懈怠,激励我们努力编写出有特色、有水平的专著。

王仲仁

2013 年 10 月于哈尔滨

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第一章 塑性力学的基本概念与主要公式	1
1.1 应力分析	1
1.1.1 应力的概念	1
1.1.2 应力状态及其描述	2
1.1.3 应力张量及应力偏张量	7
1.1.4 应力莫尔圆	10
1.1.5 微元体平衡方程	13
1.2 应变分析	15
1.2.1 名义应变与真实应变	15
1.2.2 小变形时应变与位移的关系方程	18
1.2.3 最大剪应变及八面体应变表达式	21
1.2.4 应变速率与应变速率张量	21
1.2.5 体积不变条件与主应变图	23
1.3 常用的屈服准则	25
1.3.1 屈服准则的概念	25
1.3.2 Mises 屈服准则	26
1.3.3 Tresca 屈服准则	27
1.3.4 Mises 与 Tresca 屈服准则的几何图形	27
1.3.5 双剪应力屈服准则	32
1.4 统一屈服准则	34
1.4.1 统一屈服准则的数学建模	34
1.4.2 统一屈服准则的数学表达式	34
1.4.3 统一屈服准则的几何图示	35
1.4.4 统一屈服准则的扩展	36
1.5 广义屈服准则	38
1.5.1 广义屈服准则的表达式	38
1.5.2 广义屈服准则的物理概念、几何意义及其简化形式	39
1.5.3 不可压缩材料系数的确定	41
1.5.4 可压缩材料系数的确定	42
1.6 屈服准则的应用	43

1.7 塑性应力 - 应变关系经典理论	46
1.7.1 塑性变形时应力 - 应变关系理论在早期的发展	46
1.7.2 增量理论	47
1.7.3 全量理论	53
参考文献	55
第二章 单向拉伸时材料力学特性的试验研究	59
2.1 应变强化材料单向拉伸的应力 - 应变关系	59
2.2 应变速率强化材料单向拉伸的应力 - 应变关系	61
2.3 应变强化与应变速率强化共存时单向拉伸的应力 - 应变关系	62
2.4 包辛格效应	68
2.5 碳纤维复合材料拉伸试验	69
2.6 各向异性材料的拉伸试验	72
2.6.1 试验材料及方案	73
2.6.2 材料真实应力 - 应变曲线	74
2.6.3 板材力学性能参数	74
参考文献	78
第三章 非单向加载条件下材料力学性能试验研究	79
3.1 薄壁管 $P-p$ 试验研究结果	79
3.2 薄壁管 $P-M$ 试验研究结果	83
3.3 薄板双向拉伸试验	86
3.4 静水应力对材料力学特性的影响	91
3.4.1 高压试验测试技术	92
3.4.2 静水压力对材料流动行为的影响	94
3.4.3 静水压力对材料断裂行为的影响	101
3.5 其他非单向拉伸试验研究	105
3.5.1 平面压缩试验	105
3.5.2 法向和切向载荷试验	107
3.6 双向压应力加载对薄壁管缩颈过程进行模拟试验研究	109
3.6.1 薄壁管双向压应力试验装置	110
3.6.2 试验结果及其分析	112
3.7 体积成形时的应变场物理模拟方法	114
参考文献	120
第四章 不同因素对初始屈服准则及屈服轨迹的影响	125
4.1 静水应力对材料屈服特性的影响	125
4.1.1 Drucker-Prager 屈服方程的一般表达形式	125
4.1.2 受静水应力影响的初始屈服轨迹特征	128

4.2 应力状态类型与静水应力对材料屈服特性的综合影响	130
4.2.1 应力状态类型与静水应力共同影响的屈服方程	130
4.2.2 应力状态类型与静水应力对材料屈服特性的影响	132
4.2.3 屈服方程的简化形式	139
4.2.4 屈服方程的预测值与试验数据值的比较	140
4.3 各向异性材料的初始屈服特性	144
4.3.1 屈服方程与塑性位势无关联的形式及基本特性	145
4.3.2 屈服方程与塑性位势相关联的形式及基本特性	154
4.3.3 屈服方程预测值与试验数据间的比较	159
参考文献	167
第五章 后续屈服与塑性应力-应变关系分析的相关理论	169
5.1 后续屈服与后续屈服方程	169
5.2 塑性位势理论的基本物理概念及与 Mises 屈服函数间的关系	172
5.2.1 塑性位势概念的提出	172
5.2.2 塑性位势的基本物理概念	173
5.2.3 Mises 屈服函数(塑性位势)的物理含义	174
5.3 塑性应变增量梯度理论的一般性定理及等效强化状态	177
5.3.1 屈服方程与塑性位势相关联的塑性应力-应变关系	177
5.3.2 屈服方程与塑性位势非关联的塑性应力-应变关系	189
5.4 材料塑性变形中出现的“软化”现象	193
5.4.1 压力敏感性材料应力-应变关系的力学模型	194
5.4.2 各向异性材料应力-应变关系的力学模型	199
5.4.3 材料的“软化”现象分析	203
参考文献	210
第六章 塑性变形的几种强化特性	211
6.1 材料的等向强化特性及塑性本构关系	211
6.1.1 等向强化的基本特性	211
6.1.2 等向强化模型所对应的塑性本构关系	215
6.2 各向异性材料的非等向强化特性及塑性本构关系	217
6.2.1 各向异性强化及在主应力空间的表现形式	217
6.2.2 各向异性塑性应变增量的预测	234
6.2.3 各向异性强化对成形板件反弹数值模拟结果的影响	246
6.2.4 各向异性塑性流动特性对塑性本构关系的影响	248
6.3 压力敏感性材料的非等向强化特性及塑性本构关系	250
6.3.1 后续屈服方程与塑性位势	251
6.3.2 等效强化状态及塑性应变关系式中比例参数的确定	253

6.3.3 塑性本构关系的应用特性及预测结果与试验结果的比较	255
6.4 包辛格效应对塑性本构关系的影响	265
6.4.1 考虑包辛格效应的基本塑性应变增量本构关系	267
6.4.2 由运动强化所产生的非材料属性的各向异性塑性流动特性	269
参考文献	280
第七章 应力-应变顺序对应规律及其在塑性成形工序分析中的应用	283
7.1 应力-应变顺序对应规律及其试验验证	283
7.1.1 应力-应变顺序对应规律	283
7.1.2 应力-应变顺序对应规律的试验验证	286
7.1.3 应力-应变顺序对应规律的应用	288
7.2 平面应力屈服图形的分区	290
7.3 平面应力塑性成形工序应力-应变分析	293
7.3.1 管材拉拔	293
7.3.2 板材拉深	294
7.3.3 内高压成形	295
7.4 Mises 屈服柱面的展开与三向应力状态在其中的表征	296
7.5 三向应力状态屈服面上的应力-应变分区与典型成形工序的定位	298
7.6 圆柱与圆环压缩时工件变形区中不同质点的加载路径	304
参考文献	305
第八章 典型平面应力成形工序的应力-应变分布解析与数值模拟	307
8.1 轴对称平面应力稳态成形各工序应力-应变分布的增量理论解	307
8.1.1 应力与应变分布的两种表达形式	307
8.1.2 薄筒件稳态成形分类	310
8.1.3 基本公式与主要假设	310
8.1.4 无摩擦稳态成形的应力-应变分布	311
8.1.5 有摩擦稳态流动锥面成形的应力-应变分布	320
8.2 缩口工序的应力-应变分析与试验研究	322
8.2.1 缩口工序应力-应变分析的增量理论解	323
8.2.2 缩口工序应力-应变分析的全量理论解	333
8.2.3 缩口过程的工艺试验研究	341
8.3 拉拔工序的应力-应变分析与试验研究	345
8.3.1 无芯拉拔过程应力-应变分析	346

8.3.2	无芯拉拔过程试验研究	349
8.3.3	无芯拉拔过程数值模拟	350
8.4	薄壁管充液弯曲全量与增量理论的数值解	352
8.4.1	平衡方程的建立	352
8.4.2	全量理论的有限差分数值解	354
8.4.3	基于增量理论的有限元分析	355
8.5	强化模型对板材成形过程影响的数值分析	359
8.5.1	运用等向强化模型和等向强化/运动强化模型对板材成形 过程数值模拟的对比分析	359
8.5.2	利用运动强化进行汽车冲压件成形过程的数值 模拟实例分析	366
8.6	椭球液压胀形过程的数值模拟	369
8.6.1	椭球壳体无模液压胀形变形特征分析	370
8.6.2	有限元分析	371
	参考文献	374
附录一	我国塑性本构关系研究的近况	375
附录二	塑性应力-应变关系理论的文献总结	383
附录三	Hill 各向异性屈服准则的发展与 Hosford 及 Barlat 屈服准则	397
附录四	Sn-Pb 共晶超塑性材料薄壁管在复合加载下的试验研究	403

Contents

- Chapter 1 Fundamentals of Plasticity** 1
 - 1.1 Stress Analysis 1
 - 1.1.1 Stress 1
 - 1.1.2 Stress State and Its Application 2
 - 1.1.3 Stress Tensor and Stress Deviator 7
 - 1.1.4 Mohr’s Stress Circle 10
 - 1.1.5 Equilibrium Equation of Infinitesimal Element 13
 - 1.2 Strain Analysis 15
 - 1.2.1 Nominal Strain and True Strain 15
 - 1.2.2 Infinitesimal Strains as Functions of Displacement 18
 - 1.2.3 Maximum Shear Strain and Octahedral Strain Expressions 21
 - 1.2.4 Strain Rate and Strain Rate Tensor 21
 - 1.2.5 Incompressibility Condition and Scheme of Principal Strain 23
 - 1.3 Common Yield Criteria 25
 - 1.3.1 Concept of Yield Criteria 25
 - 1.3.2 Mises Yield Criteria 26
 - 1.3.3 Tresca Yield Criteria 27
 - 1.3.4 Geometric Illustration of Mises and Tresca Yield Criteria 27
 - 1.3.5 Twin Shear Stress Yield Criteria 32
 - 1.4 Unified Yield Criteria 34
 - 1.4.1 Mathematical Model of Unified Yield Criteria 34
 - 1.4.2 Mathematical Expression of Unified Yield Criteria 34
 - 1.4.3 Geometric Illustration of Unified Yield Criteria 35
 - 1.4.4 Expand of Unified Yield Criteria 36
 - 1.5 Generalized Yield Criteria 38
 - 1.5.1 Mathematical Expression of Generalized Yield Criteria 38
 - 1.5.2 Physical Concepts, Geometric Meaning and Simplified Form of Generalized Yield Criteria 39
 - 1.5.3 Derivation of Incompressible Material Coefficient 41

1. 5. 4	Derivation of Compressible Material Coefficient	42
1. 6	Application of Yield Criteria	43
1. 7	Classical Theory of Plastic Stress-Strain Relationship	46
1. 7. 1	Early Development in Stress-Strain Relationship Theory	46
1. 7. 2	Incremental Strain Theory	47
1. 7. 3	Total Strain Theory	53
	References	55
Chapter 2	Experimental Investigation on Mechanical Property by Uniaxial	
	Tensile test	59
2. 1	Stress-Strain Relationship of Strain-Hardening Material During Tensile Test	59
2. 2	Stress-Strain Relationship of Strain Rate-Hardening Material During Tensile Test	61
2. 3	Stress-Strain Relationship of Strain and Strain Rate Hardening Material During Tensile Test	62
2. 4	Bauschinger Effect	68
2. 5	Tensile Test of Carbon Fiber Composites	69
2. 6	Tensile Test of Anisotropic Materials	72
2. 6. 1	Materials and Methods	73
2. 6. 2	Ture Stress-Strain Relationship	74
2. 6. 3	Mechanical Properties	74
	References	78
Chapter 3	Experimental Investigation on Mechanical Property in	
	Non-uniaxial Loading Conditions	79
3. 1	Thin Tube $P - p$ Experiment	79
3. 2	Thin Tube $P - M$ Experiment	83
3. 3	Biaxial Tention of Thin Sheet	86
3. 4	Effect of Hydrostatic Stress on Mechanical Property	91
3. 4. 1	High Pressure Test	92
3. 4. 2	Effect of Hydrostatic Stress on Flow Stress	94
3. 4. 3	Effect of Hydrostatic Stress on Fracture Behavior	101
3. 5	Other Non-Uniaxial Tensile Test	105
3. 5. 1	Plane Compression Test	105
3. 5. 2	Normal and Tangential Loading Test	107
3. 6	Experimental Study on Thin Tube Necking by Biaxial Compression Stress Loading	109