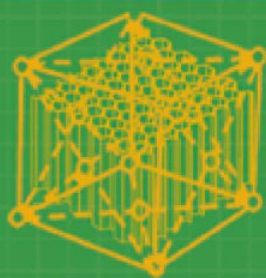


材料成型原理



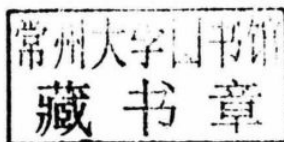
主 编 ○ 王忠堂 张玉妥 刘爱国

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等院校机械类及相关学科规划教材

材料成型原理

主 编 王忠堂 张玉妥 刘爱国
副主编 梁海成 马 明 董淑婧



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

为了适应“材料成型原理”课程改革的需要，编者参考了国内外该领域已经出版的教材以及学者的科学研究成果，并且补充了编者自己的研究成果，编写出版了此书。本书包括三部分内容，即“塑性成形原理”“铸造成形原理”“焊接成型原理”。本书为本科层次教材，亦可供研究生、大学教师、工程技术研究人员等参考使用。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

材料成型原理/王忠堂, 张玉妥, 刘爱国主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2019.7 (2019.8 重印)

ISBN 978 - 7 - 5682 - 7271 - 1

I. ①材… II. ①王… ②张… ③刘… III. ①工程材料 - 成型 - 教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 146344 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 23.5

字 数 / 552 千字

版 次 / 2019 年 7 月第 1 版 2019 年 8 月第 2 次印刷

定 价 / 59.00 元

责任编辑 / 陆世立

文案编辑 / 赵 轩

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

材料成型与控制工程是机械制造业的重要组成部分，是汽车、电力、石化、造船及机械等支柱产业的基础制造技术。塑性成形、液态成形及连接成型等材料成型技术是国民经济可持续发展的主体技术，是新一代材料研究及应用的重要成型与控制技术，也是先进制造技术的重要内容。“材料成型原理”课程是材料成型与控制工程专业的一门专业基础理论课。为了适应“材料成型原理”课程改革的需要，编者在参考国内外该领域已经出版的教材以及学者的科学研究成果的基础上，补充了编者自己的研究成果，编写出版了本书。

材料是人类用于制造物品、器件、构件、装备等产品的物质，包括金属（含合金，下同）材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料等。材料（固态或液态）经过适当的工艺技术发生永久的形状改变而且内部组织不发生破坏的过程，称为材料成型。材料成型方法包括塑性成形、液态成形、连接成型三大类。材料成型原理研究的是金属材料在成型过程中的基本规律和基本理论。

本书包括三部分内容，即“塑性成形原理”“液态成形原理”和“焊接成型原理”。其中，“塑性成形原理”部分包括塑性变形力学方程、主应力法原理及其应用、滑移线理论及其应用、其他塑性变形理论与方法等内容。“液态成形原理”部分包括液态金属凝固基础、金属凝固过程中的传输问题、单相合金与多相合金的凝固、铸件的凝固组织、铸件凝固缺陷与控制等内容。“焊接成型原理”部分包括焊接接头及其组织与性能、焊接化学冶金、焊接缺欠及其控制等内容。

本书“塑性成形原理”部分由沈阳理工大学王忠堂、梁海成编写；“液态成形原理”部分由沈阳理工大学张玉妥、马明，大连科技学院董淑婧编写；“焊接成型原理”部分由沈阳理工大学刘爱国编写。

本书的读者对象包括大学生、研究生、大学教师及工程技术研究人员等。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，望读者批评指正。

编 者
2019年1月

目 录

绪 论	1
(1) 材料成型的基本方法	1
(2) 材料成型技术的发展趋势	1

第一篇 塑性成形原理

第 1 章 塑性变形力学方程	7
1.1 塑性变形金属学	7
1.1.1 塑性变形基本概念	7
1.1.2 塑性变形方法	8
1.1.3 塑性变形机制	8
1.1.4 位错及位错运动	10
1.1.5 影响材料塑性的因素	11
1.1.6 金属材料的超塑性	12
1.2 应力与应变分析	13
1.2.1 应力分量	13
1.2.2 主应力	15
1.2.3 主剪应力	19
1.2.4 等效应力	21
1.2.5 主应力求解实例	22
1.2.6 应力莫尔圆	24
1.2.7 应力平衡微分方程	24
1.2.8 平面应力状态和轴对称应力状态	26
1.3 应变分析	28
1.3.1 应变分量	28
1.3.2 等效应变	32
1.3.3 位移场	32
1.3.4 变形连续方程	34
1.3.5 平面变形和轴对称变形	35
1.4 屈服准则	37
1.4.1 屈服准则的基本概念	37

1.4.2	屈服准则的几何表达	39
1.4.3	中间主应力的影响	41
1.4.4	屈服准则的简化	42
1.5	塑性变形时的应力与应变	43
1.5.1	弹性变形时应力与应变的关系	44
1.5.2	塑性变形时应力与应变的特点	45
1.6	应力与应变的顺序关系	48
第2章	主应力法原理及其应用	49
2.1	主应力法的实质	49
2.2	平面压缩变形问题	50
2.3	轴对称墩粗变形问题	52
2.4	墩粗的变形特点及力能参数计算	53
2.5	板料拉延工艺	56
2.6	受内压的厚壁筒变形	57
2.7	球形壳体液压胀形工艺	58
第3章	滑移线法原理及其应用	60
3.1	滑移线的基本概念	60
3.2	汉基 (Hencky) 应力方程	63
3.3	滑移线的几何性质	64
3.4	塑性变形区的应力边界	66
3.5	格林盖尔速度方程	68
3.6	滑移线法应用举例	69
3.6.1	平面压缩工艺	69
3.6.2	平面挤压工艺	71
3.6.3	圆筒件拉延工艺	72
3.6.4	厚壁筒受内压变形	73
3.6.5	长条形锻件开式模锻	74
第4章	其他塑性变形理论与方法	76
4.1	上限法原理及应用	76
4.1.1	上限法原理	76
4.1.2	上限法应用举例	77
4.2	微分方程求解法	80
4.3	功率平衡法	83
4.4	管材挤压变形力计算模型	86
4.5	关于屈服准则应用的探讨	88
4.6	滑移线法中 ω 角确定原则	90

4.7 材料本构关系模型	93
4.7.1 一般形式	93
4.7.2 双曲正弦本构关系模型	95
4.7.3 AZ31 镁合金本构关系模型	96
习题	99
参考文献	103

第二篇 液态成形原理

第5章 液态金属凝固基础	109
5.1 液态金属的结构与性质	109
5.1.1 金属的膨胀与熔化	109
5.1.2 液态金属的结构	111
5.1.3 液态金属的性质	115
5.2 晶体的形核	123
5.2.1 晶体生长的热力学条件	123
5.2.2 均质形核	125
5.2.3 异质形核	127
5.2.4 形核控制	130
5.3 晶体的生长	131
5.3.1 固-液界面的微观结构	131
5.3.2 晶体生长方式和生长速度	132
5.3.3 晶体的生长方向和生长表面	135
第6章 金属凝固过程中的传输问题	136
6.1 液态金属的充型能力与流动性	136
6.1.1 充型能力与流动性的基本概念	136
6.1.2 液态金属的停止流动机理	137
6.1.3 液态金属充型能力的计算	138
6.1.4 影响充型能力的因素及促进措施	141
6.2 凝固过程中的液体流动	146
6.2.1 凝固过程中液体流动的分类	146
6.2.2 凝固过程中液相区的液体流动	147
6.2.3 液态金属在枝晶间的流动	149
6.3 凝固过程中的热量传输	150
6.3.1 铸件凝固传热的数学模型	150
6.3.2 铸件凝固温度场	150
6.3.3 铸件凝固时间	155

6.4	凝固过程中的传质	157
6.4.1	凝固过程的溶质再分配	157
6.4.2	平衡凝固时的溶质再分配	159
6.4.3	近平衡凝固时的溶质再分配	161
第7章	单相合金与多相合金的凝固	168
7.1	纯金属的凝固	168
7.1.1	纯金属凝固过程的温度变化	168
7.1.2	温度梯度的影响	168
7.2	单相合金的凝固	170
7.2.1	成分过冷形成的条件与判据	170
7.2.2	成分过冷的过冷度	173
7.2.3	成分过冷对单相合金凝固过程的影响	175
7.3	多相合金的凝固	180
7.3.1	共晶合金的凝固	180
7.3.2	偏晶合金的凝固	190
7.3.3	包晶合金的凝固	192
第8章	铸件的凝固组织	194
8.1	铸件凝固组织的形成	194
8.1.1	铸件宏观凝固组织的特征	194
8.1.2	凝固过程中的晶粒游离	195
8.1.3	铸件凝固组织的形成机理	198
8.1.4	影响铸件宏观凝固组织形成的因素	201
8.2	铸件凝固组织的控制	203
8.2.1	铸件凝固组织对铸件性能的影响	203
8.2.2	等轴晶组织的获得和细化	204
8.2.3	等轴晶枝晶间距的控制	210
8.3	定向凝固条件下的组织与控制	210
8.3.1	定向凝固方法	210
8.3.2	柱状晶和单晶的生长与控制	212
第9章	铸件凝固缺陷与控制	215
9.1	偏析	215
9.1.1	偏析的概念及分类	215
9.1.2	微观偏析	215
9.1.3	宏观偏析	220
9.1.4	偏析的影响因素及工艺性防止措施	226
9.1.5	低偏析技术	229

9.2 缩孔与疏松	232
9.2.1 铸件的收缩及分类	232
9.2.2 铸件凝固过程中的缩孔	235
9.2.3 铸件凝固过程中的疏松	239
9.2.4 缩孔与疏松的影响因素及工艺性防止措施	240
9.3 铸造裂纹	247
9.3.1 铸件的热裂及其形成机理	247
9.3.2 铸件中热裂形成的主要影响因素及防止措施	251
9.3.3 铸件冷却过程中产生的应力及影响因素	255
9.3.4 铸件的冷裂及防止措施	259
9.4 铸件中的气体	261
9.4.1 铸件中气体的形态与来源	261
9.4.2 金属中气体的溶解与析出	262
9.4.3 析出性气孔的形成及改善措施	265
9.4.4 反应性气孔的成因及防止措施	268
9.5 铸件中的非金属夹杂物	271
9.5.1 铸件中非金属夹杂物的形成与分类	271
9.5.2 铸件中非金属夹杂物的形态及分布	274
9.5.3 非金属夹杂物对铸件质量及力学性能的影响	276
9.5.4 铸件中非金属夹杂物的控制	278
习题	280
参考文献	284

第三篇 焊接成型原理

第 10 章 焊接接头及其组织性能	289
10.1 焊接接头的形成	289
10.1.1 焊接的基本概念	289
10.1.2 焊接接头的形成过程	291
10.2 焊接热过程	292
10.2.1 焊接热源	292
10.2.2 焊接热循环	295
10.2.3 焊接温度场	296
10.3 焊缝的组织与性能	298
10.3.1 焊接熔池凝固的特点	298
10.3.2 焊缝的结晶	298
10.3.3 焊缝的组织与性能	301

10.4	焊接热影响区的组织与性能	304
10.4.1	焊接热影响区组织转变的特点	304
10.4.2	不易淬火钢焊接热影响区的组织与性能	305
10.4.3	易淬火钢焊接热影响区的组织与性能	307
第11章	焊接化学冶金	309
11.1	焊接过程中对焊接区金属的保护	309
11.2	焊接化学冶金体系构成及焊接化学冶金反应区	314
11.3	焊接区内气体和金属的作用	316
11.3.1	焊接区内气体的种类和来源	316
11.3.2	气体在铁中的溶解	317
11.3.3	氮的危害及控制	318
11.3.4	氢的危害及控制	319
11.3.5	氧的危害及控制	322
11.4	焊接熔渣和金属的作用	324
11.5	焊缝金属脱氧	325
11.6	焊缝中硫磷的危害及控制	327
11.6.1	焊缝中硫的危害及控制	327
11.6.2	焊缝中磷的危害及控制	328
11.7	焊缝金属合金化	329
第12章	焊接缺欠及其控制	334
12.1	焊接缺欠的含义与分类	334
12.2	焊接裂纹	334
12.2.1	焊接裂纹的分类	335
12.2.2	焊接裂纹的特征	335
12.2.3	焊接裂纹形成的影响因素	338
12.2.4	结晶裂纹的形成与控制	340
12.2.5	延迟裂纹的形成与控制	344
12.2.6	其他裂纹的控制	349
12.3	气孔	351
12.4	夹杂	355
12.5	其他焊接缺欠	356
	习题	358
	参考文献	360

绪 论

(1) 材料成型的基本方法

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器等产品的物质，包括金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料等。材料（固态或液态）经过适当的工艺技术发生永久的形状改变而且内部组织不发生破坏的过程，称为材料成型。材料成型方法包括塑性成形、液态成形、焊接成型三大类。材料成型原理研究的是材料在成型过程中的基本规律和基本理论。按照专业方向分类，材料成型技术包括塑性成形技术、液态成形技术、焊接成型技术。

塑性成形技术是指固态材料在外力作用下，其形状发生永久改变的技术，也称为塑性加工技术或压力加工技术。塑性成形后，材料的性能可能发生改变，也可能不发生改变。使材料性能发生改变的塑性成形技术也称为形变处理。金属材料的塑性是指在外力作用下，金属材料的形状发生永久改变而不发生破坏（断裂或裂纹）的能力。金属材料进行塑性成形的优点包括以下几个方面：①组织、性能好；②材料利用率高，流线分布合理；③尺寸精度高，不少塑性成形方法已达到少切削或无切削的要求；④生产效率高，适于大批量生产。塑性成形技术可分为体积成形（包括自由锻、模锻、挤压、拉拔、轧制）、板材成形（包括冲裁、弯曲、拉延、翻边、胀形）、特种成形（包括旋压、电磁成形、爆炸成形等）以及塑料成形（包括注塑成形、吹塑成形）。

液态成形技术是指液态材料在模具或砂型中凝固后，形成一定形状的零件的技术。凝固成型（铸造）技术的特点包括以下几个方面：①适应性强，液态成形几乎不受零件大小、厚薄以及复杂程度的限制；②适用材料范围广泛，包括金属材料、陶瓷、有机高分子、复合材料等；③成本低，铸件的形状及尺寸与零件非常接近，因此可减少材料消耗和后续加工量。凝固成型（铸造）技术包括砂型铸造、压力铸造、熔模铸造（又称失蜡法、消失模铸造）、金属型铸造、低压铸造、离心铸造、真空铸造及连续铸造等。

焊接成型技术是利用连接件之间的金属分子在高温下互相渗透或用填充材料而结合成整体的一种金属结构构件连接方法。焊接成型技术的特点包括以下几个方面：①连接性能好，可以方便地将板材、型材或铸（锻）件根据需要进行组合焊接，对于大型装备和结构具有重要意义；②焊接结构刚度大、整体性好，特别适合制造高强度、大刚度的中空结构；③焊接方法种类多、焊接工艺适应性广，可适应不同要求及批量的生产；④易于实现自动化生产，由于焊接规范参数的电信号容易控制，所以焊接自动化比较容易实现。焊接成型技术方法包括手工弧焊、埋弧自动焊、气体保护焊、点焊、缝焊和对焊、钎焊、激光焊、电子束焊、摩擦焊接、氩弧焊等。

(2) 材料成型技术的发展趋势

随着社会进步和科学技术发展的需求，对传统的材料成型技术也提出了新的要求，一些

材料成型新技术也逐渐被开发和利用。材料成型新技术包括塑性成形新技术、凝固成型新技术、焊接成型新技术。

塑性成形新技术的研究内容包括以下几个方面。

①特种塑性成形技术，目前特种塑性成形技术的研究热点主要包括薄板零件液压成形、管料的内高压成形、无模成形、多点成形、橡胶模成形与超塑性成形等。

②微细塑性成形技术，是指成形零件尺寸至少有两维在毫米以下的塑性加工技术，包括微锻造、微冲压等金属微细塑性成形技术。对微细塑性成形工艺的研究主要包括微细塑性成形工艺的制定、微成形模具设计与制造、微成形装置、微成形模具和零件的测量与检验。

③多尺度数值模拟技术，是指对变形过程在宏观、介观、微观尺度范围内进行数值模拟从而优化工艺参数的技术。多尺度数值模拟技术是一种低成本、高效率的工程设计方法，通过多尺度数值模拟技术优化工艺，可以解决采用实验方法无法解决的重大工程难题，为科学研究或实际生产带来巨大的经济效益。

④镁合金塑性加工技术，其研究主要包括镁合金板材制备、冲压、锻造以及镁合金管件成形等。

⑤近净成形技术，是指零件成形后仅需少量加工或不再加工，就可用作机械构件的成形技术。它是建立在新材料、新能源、机电一体化、精密模具技术、计算机技术、自动化技术、数值分析和模拟技术等多学科的高新技术成果基础上的，是一种优质、高效、高精度、轻量化、低成本的成形技术。

⑥复合材料加工成形，是指将不同种类的材料或塑性成形方法组合起来，或将其他材料成形方法和塑性成形方法相结合，获得所需形状、结构、尺寸和性能的制品的加工方法。这种方法是针对采用常规成形方法无法生产的特殊产品而研发出来的特种塑性成形方法。如多层材料的轧制复合变形技术、多层材料的包覆挤压复合变形技术、多层材料的拉拔复合变形技术等。

⑦金属等温成形，其研究主要包括材料的等温成形、等温成形时的润滑、等温成形用模具材料、等温成形用设备、等温成形工艺的应用。

⑧粉末冶金新技术新工艺，其研究主要包括雾化制粉技术、机械合金化制粉技术、超微粉末制备技术、粉末注射成形技术、温压成形技术、热压成形技术、等静压成形技术、场活化烧结技术。

⑨复合变形技术，如连续铸轧、连续挤压、连续铸挤、等温成形等金属材料液态和固态加工技术交叉的成型技术。

液态成形新技术的研究内容包括以下几个方面。

①造型生产线和造型新方法，包括将工艺流程中的各种设备联结起来，组成机械化或自动化的铸造系统。湿砂型铸造法是造型生产线上使用最广、最方便的铸造方法，湿砂造型可采用多触头高压造型、气压造型、微震压实造型等多种造型方法。

②半固态金属铸造工艺（搅动铸造），采用该技术的产品具有高质量、高性能和高合金化的特点，该技术除用于军事装备外，开始集中用于自动车的关键部件上。

③可视化铸造技术，包括计算机辅助设计（CAD）、铸造中的计算机辅助工程（CAE）、铸造中的计算机辅助制造（CAM）、数值模拟技术。

④绿色铸造生产技术，该技术是指合理使用资源（尽量少用）或使用可再生材料和能

源进行清洁加工。使用这种技术有生产现场及环境安全、清洁、舒适、宁静、产生的排放物少害无毒等优点。

⑤铸造检测技术，其研究重点在于无损检测技术，如荧光磁粉检测表面裂纹、超声波或音频检测球铁的球化率、涡流检测铸件的基体组织（珠光体含量）等。

⑥快速凝固，其研究重点在于实现快速凝固的条件、线材快速凝固成型、带材快速凝固成型、块材快速凝固成型。

⑦定向凝固，其研究重点在于定向凝固理论基础、定向凝固工艺、特种定向凝固技术。

⑧金属半固态加工，其研究重点在于半固态金属的组织特征、半固态浆料制备、触变成形、流变成形。

⑨复合铸造，其研究重点在于水平磁场制动复合连铸法、包覆层连续铸造法、电渣包覆铸造法、反向凝固连铸复合法等。

焊接成型新技术的研究内容包括以下几个方面。

①特殊焊接技术，新兴工业的发展促使焊接技术不断前进，如微电子工业的发展促进了微型连接工艺和设备的发展；陶瓷材料和复合材料的发展促进了真空钎焊、真空扩散焊、喷涂以及粘接工艺的发展。

②新焊接能源研究，其可概括为3个方面：首先是对现有热源的改善，使其更为有效、方便、经济适用，如电子束和激光束焊接的发展较显著；其次是开发更好、更有效的热源；最后是节能技术开发，由于焊接所消耗的能源很大，所以人们开发了不少以节能为目标的新技术，如太阳能焊、电阻点焊、螺柱焊机中利用电子技术的发展来提高焊机的功率因数等。

③计算机在焊接中的应用，如弧焊设备微机控制系统，其可对焊接电流、焊接速度、弧长等多项参数进行分析和控制，对焊接操作程序和参数变化等做出显示和数据保留，从而给出焊接质量的确切信息、提高焊接生产率。

④焊接机器人和智能化，焊接机器人是焊接自动化的革命性成果，它突破了焊接刚性自动化的传统方式，开拓了一种焊接柔性自动化的新方式。智能化焊接有利于提高焊接过程的自动化程度，可以实时控制焊接参数，保证良好的焊接质量。智能化焊接的第一个发展重点在视觉系统，其关键技术是传感器技术。虽然目前智能化焊接还处在初级阶段，但其有着广阔前景，是一个重要的发展方向。

⑤真空电弧焊接技术，这是一种可以对不锈钢、钛合金和高温合金等金属进行熔化焊及对小试件进行快速高效的局部加热钎焊的最新技术。这种技术可以应用在航空发动机的焊接中。使用真空电弧进行涡轮叶片的修复、钛合金气瓶的焊接，可以有效地解决材料氧化、软化、热裂、抗氧化性能降低等问题。

⑥窄间隙熔化极气体保护电弧焊技术，它具有比其他窄间隙焊接工艺更多的优势，使用这种技术在任意位置都能得到高质量的焊缝，其还具有节能、焊接成本低、生产效率高、适用范围广等特点。

⑦激光填料焊接，其是指在焊缝中预先填入特定焊接材料后用激光照射熔化或在激光照射的同时填入焊接材料以形成焊接接头的方法。广义的激光填料焊接应该包括激光对焊与激光熔覆两类。其中，激光熔覆是利用激光在工件表面熔覆一层金属、陶瓷或其他材料，以改善材料表面性能的一种工艺。激光填料焊接技术主要应用于异种材料焊接、有色及特种材料焊接和大型结构钢件焊接等激光直接对焊不能胜任的领域。

⑧高速焊接技术，包括快速电弧技术和快速熔化技术。由于高速焊接技术采用的焊接电流大，所以熔深大，一般不会产生未焊透和熔合不良等缺陷，其焊缝成形良好、焊缝金属与母材过渡平滑，有利于提高材料的疲劳强度。

⑨搅拌摩擦焊（FSW），作为一种固相连接手段，搅拌摩擦焊克服了熔焊的诸如气孔、裂纹、变形等缺陷，更使以往通过传统熔焊手段无法实现焊接的材料可以采用 FSW 实现焊接，被誉为“继激光焊后又一革命性的焊接技术”。

⑩激光-电弧复合热源焊接，复合焊接时，激光产生的等离子体有利于电弧的稳定，复合焊接可提高加工效率，可提高焊接性差的材料（铝合金、双相钢等）的焊接性，可增加焊接的稳定性和可靠性。

第一篇

塑性成形原理

第 1 章 塑性变形力学方程

1.1 塑性变形金属学

1.1.1 塑性变形基本概念

金属塑性成形是指金属材料在外力作用下，其形状发生永久改变而不发生破坏的过程，也称为塑性加工或压力加工。塑性变形后，金属材料的性能可能发生改变，也可能不发生改变。使材料性能发生改变的塑性成形技术也称为形变处理。金属的塑性是指在外力作用下，其形状发生永久改变而不发生破坏（断裂或裂纹）的能力。金属塑性成形的优点包括组织性能好、材料利用率高、流线分布合理、尺寸精度高，甚至可以实现少切削或无切削的要求，其生产效率高，适于大批量自动化生产。

金属材料塑性变形性能的高低需要一个参数来表征，称之为塑性指标。塑性指标是以材料开始破坏时的塑性变形量来表示，它可借助于各种实验方法来测定，如拉伸变形、压缩变形和扭转变形等实验方法。对应于拉伸实验的塑性指标，用伸长率或断面变化率来表示。

伸长率定义：材料拉伸实验时，拉伸试样长度的相对变化率。其表达式为

$$A = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中， A 为伸长率； L 为拉伸变形后试样长度； L_0 为试样初始长度。

断面变化率定义：材料拉伸实验时，拉伸试样断面面积的相对变化率。其表达式为

$$Z = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100\% \quad (1.2)$$

式中， Z 为断面变化率； F 为拉伸变形后试样断面面积； F_0 为试样初始断面面积。

塑性加工时，作用在工具表面单位面积上的变形力称为变形抗力（或单位流动压力），通常以 p 表示。单向拉伸或单向压缩时的变形抗力就等于真实应力 s （亦称流动应力）。

根据拉伸实验或压缩实验可以测得材料的真实应力-应变曲线，如图 1.1 所示。图中，I 区为弹性阶段，对应弹性力学；II 区为塑性阶段，对应塑性力学；III 区为断裂阶段，对应断裂力学。通过材料真实应力-应变曲线，可以测得材料的弹性极限、屈服强度、抗拉强度、伸长率等参数。

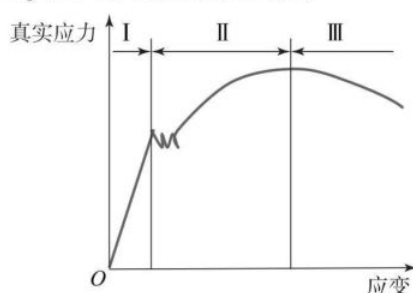


图 1.1 材料真实应力-应变曲线

金属材料在再结晶温度以下塑性变形时，其强度和硬度升高，而塑性和韧性降低的现象