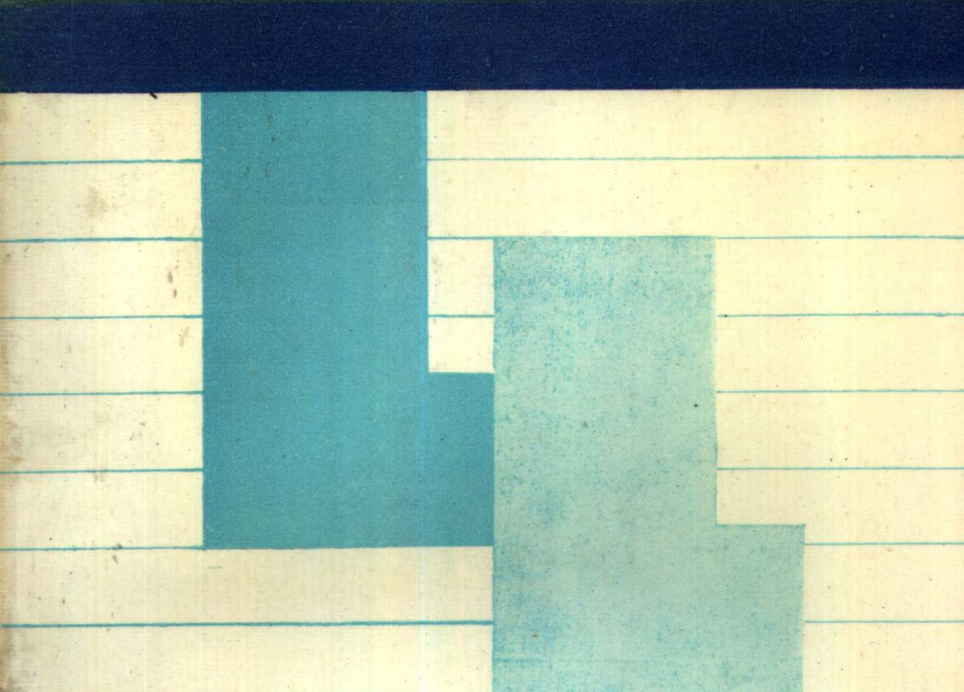




BAN LIAO CHENG XING SU XING LI LUN

板料成形塑性理论

梁炳文 胡世光 编著

机械工业出版社

板料成形塑性理论

梁炳文 胡世光 编著



机械工业出版社

内 容 简 介

本书是一本理论性较强的专著，全书共分两大部分，前一部分结合板料成形的特点，介绍了塑性加工的基本理论，尤其在应力应变状态、厚向异性的屈服准则、应力应变关系、解题方法等方面作了系统的论述。后一部分介绍了板料成形各工序的成形理论，以及国内外有关板料成形工序理论分析的文献资料。本书中的有些内容则是国内、外文献中很少涉及的，作者根据自己的研究成果作了补充。并附有习题与解答，便于学习掌握。

本书可供大专院校师生、研究生及科研人员参考。

板 料 成 形 塑 性 理 论

梁炳文 胡世光 编著

责任编辑：刘彩英

封面设计：刘 代

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

北京景山学校印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $20^{3/8}$ · 字数 449千字

1987年12月北京第一版，1987年12月北京第一次印刷

印数 0,001—2,390 · 定价：5.00元

统一书号：15033 · 6881

前 言

塑性加工大体包括以下三种类型：（1）坯料成材：如板料的轧制，管、棒及型材等的拉拔、挤压等；（2）板金加工：由板、管、型材等原材料再成形为各种金属制品；（3）锻造：由毛坯体积成形，加工成各种锻件。

塑性加工原理，对以上三种加工内容，都是共同的，但对从事具体工作的工程技术人员来说，因其工作范围基本上是按以上三种不同类型来划分的，实际上形成了各有特点的三个专业。

目前，塑性加工原理一类的书籍，国内外都已经相当多了，但很少是按以上三类专业各自的需要来编写的，板金加工尤其如此。因此对于从事板金加工的工程技术人员来说，往往感到书中与自己专业无关的内容谈的太多，而与本专业有关的内容又太少了。编者有鉴于此，搜集、筛选了与板金专业有关的各种成形问题，编纂成书。

全书共二十四章，前几章结合板料成形的特点，介绍了塑性加工的基本理论，以后各章按工序性质介绍了与板金专业有关的各种专题，其中有些国内、外文献很少涉及的内容，则是根据编者自己的研究结果补充的。书的最后并附有习题与解答。读者学习本书，除了要注意各种成形工序中材料的变形规律和主要结论外，更应注意运用塑性加工的一般原理分析板料成形具体问题的处理方法。

本书经郑可镗同志审校，在此表示感谢。

由于编者水平及篇幅有限，虽极力求全、求精，但选材的深度及广度均有不足。挂一漏万及谬误之处，在所难免，敬希读者指正。

编 者

目 录

第一章 应力状态分析	1
第一节 点的应力状态	1
第二节 任意斜面上应力的确定	6
第三节 主应力	8
第四节 主剪应力	12
第五节 八面体应力	15
第六节 应力强度	17
第七节 应力张量的分解——球形张量与偏斜张量	18
第八节 应力状态的图解分析	21
第九节 板料成形时的应力状态特点	30
第十节 微体的静力平衡方程式	33
第十一节 轴对称变形板料的微分平衡方程式	36
第二章 应变状态分析	42
第一节 微体的应变状态	42
第二节 过已知点任意线素的应变	49
第三节 主应变	51
第四节 主剪应变	56
第五节 八面体应变	59
第六节 应变强度	60
第七节 应变张量的分解——球形张量与偏斜张量	62
第八节 塑性变形应变状态的图解分析	64
第九节 板料成形时应变状态的特点	72
第三章 金属的屈服条件	77
第一节 屈斯加准则——最大剪应力理论	78
第二节 米塞斯准则——常数形变能量理论	80

第三节	屈斯加与米塞斯准则的几何图形——屈服表面与屈服轨迹	83
第四节	两种屈服准则的比较	87
第五节	屈服准则的实验验证	89
第六节	各向异性材料及厚向异性板的屈服条件	92
第四章	金属塑性变形的应力应变关系	97
第一节	弹性变形的应力应变关系	97
第二节	塑性变形应力应变关系的特点	101
第三节	塑性变形的应力应变关系理论	107
第四节	塑性变形的应力应变关系与屈服条件的相关性	112
第五节	厚向异性板的应力应变关系	118
第六节	应力应变关系理论的实验验证	126
第七节	板料的一般性应力应变关系 $-\sigma_i = f(\epsilon_i)$ 曲线	129
第五章	板料成形问题的求解方法	143
第一节	切取微体法	144
第二节	塑性材料力学法	155
第六章	滑移线场理论	161
第一节	平面应变状态的基本方程	162
第二节	滑移线与汉基积分	164
第三节	滑移线场的几何性质——汉基定理	170
第四节	特征线与基本边值问题	174
第五节	滑移线场的确定——数值算法与作图法	178
第六节	滑移线场的全解——拼合法	185
第七节	沿滑移线速度的分布——速度场	198
第七章	求解变形力的近似能量法——上、下限原理	208
第一节	基本概念	208
第二节	虚功原理及最大塑性功原理	209
第三节	上、下限原理	213
第四节	上限原理应用举例	217

第八章	板料轴对称问题的参数解	223
第一节	以参数表示的塑性方程及变形区的划分	223
第二节	板料轴对称塑性变形的的基本方程及求解过程	226
第三节	应用举例	229
第九章	板料塑性变形的稳定性	235
第一节	板料塑性变形的压缩失稳	235
第二节	板料塑性变形的拉伸失稳	252
第十章	冲裁	272
第一节	影响冲裁力的因素	272
第二节	根据极限强度求冲裁力的计算式	278
第三节	根据最大冲裁力到达时刻的计算式	283
第四节	用滑移线法求冲裁力	288
第五节	脱料力	293
第六节	推(顶)件力	311
第七节	其他问题	322
第十一章	板的弯曲	327
第一节	无应变刚板的立体纯塑性弯曲	327
第二节	有应变刚板的纯塑性弯曲	338
第三节	回弹	343
第四节	马尔柯威兹公式	346
第十二章	梁与板的滚弯	349
第一节	有关塑性弯曲理论	349
第二节	滚弯过程与几何关系	353
第三节	弯曲功与受力分析	357
第十三章	管子弯曲与滚弯	362
第一节	管子弯曲	362
第二节	管子滚弯	365
第三节	管子弯曲产生的椭圆度	372
第十四章	板料的滚拉校平	384

第一节	应力与应变分布	384
第二节	设备参数的确定	390
第三节	同径性	395
第十五章	拉弯	400
第一节	拉弯参数的确定	400
第二节	对拉力数值的选择	404
第十六章	板料拉伸	408
第一节	回弹	408
第二节	贴模表面的摩擦与应变	413
第十七章	压延	418
第一节	解析法 (一)	418
第二节	解析法 (二)	423
第三节	液垫压延	431
第四节	变薄压延	433
第十八章	弹性凹模深压延 压力—凸模行程 曲线的设置 (上限原理的应用)	440
第一节	简化假设与上限原理的应用	441
第二节	筒形件与半球件的变形分析	443
第三节	各种耗损功率的计算	446
第四节	单位压力 p 的确定	450
第十九章	局部成形	453
第一节	塑性区半径	452
第二节	应力分布	463
第三节	最大的面积增量	464
第四节	平头凸模的成形高度	467
第五节	圆头凸模的成形高度与通式	470
第六节	球面局部成形	472
第七节	硬模及弹性凸模成形试验	475
第八节	关于埃利可森试验	478

第二十章	极限压延系数, 压延力及宽凸缘	
	压延深度	481
第一节	前言	481
第二节	零件尺寸与 m_k 的关系	482
第三节	凸缘变形抵抗力达最大值的时刻——用线性 应力应变关系	488
第四节	凸缘变形抵抗力到达最大值的时刻——用 幂次应力应变关系	493
第五节	极限压延系数——根据线性应力应变关系	496
第六节	极限压延系数——根据幂次应力应变关系	499
第七节	极限压延系数——根据 $h=r_a+r_p$	501
第八节	最大压延力和极限压延系数的确定	505
第九节	对宽凸缘压延的分析	511
第十节	对宽凸缘压延深度的估算	514
第二十一章	翻边与缩口	523
第一节	圆孔翻边	523
第二节	圆管缩口	529
第二十二章	旋压	536
第一节	前言	536
第二节	旋压的切向分力	537
第三节	锥形件旋薄的切向力	542
第四节	筒形件旋薄的最大变薄量	546
第二十三章	胀形	550
第一节	对圆筒有轴向力胀形的全量应变分析	550
第二节	对圆筒有轴向力胀形的增量应变分析	557
第三节	圆板液压胀形	561
第四节	圆板超塑性胀形件壁厚变化的确定	570
第二十四章	求不规则压延件展开毛料的 电模拟法	575

第一节	模拟理论	576
第二节	模拟实验	584
第三节	对模拟实验的验证	591
附录 I	板料的机械性能与检测方法	597
附录 II	各种应力与应变分量符号	609
附录 III	坐标系之间的关系	611
习题与解答		613
参考文献		634

第一章 应力状态分析^[1~9, 11]

第一节 点的应力状态

在任一成形工序中，为了使毛料获得所需的变形，必须通过模具或其它方式，对材料施以外力，外力在材料内产生内力，单位面积上内力的大小称为应力。

假设从变形体内任意点 Q 处，取出一个无穷小的六面体素，体素的各个面与相应的坐标平面平行（图1-1a）。显然，在我们所取体素的六个面素上，有着大小不同方向不同的应力，设为 S_x, S_y, S_z 。足标 x, y, z 表示应力所作用的面素的法线方向。其中每一个应力又可分解为平行于坐标轴的三个分量（图1-1b）。如果用符号 σ 表示沿着面素法线方向的分量， τ 表示沿着切线方向的分量，并在 σ 与 τ 的右下角分别以两个足标表示应力作用面的法向和应力的方向；即以前一个足标表示作用面的法向，后一个足标表示应力本身的方向。则在法向为 x 的面素上，三个应力分量可以写作：

法应力 σ_{xx} ：作用在法向为 x 的面素上，应力方向为 x 的应力，简作 σ_x 。

剪应力 τ_{xy} ：作用在法向为 x 的面素上，应力方向为 y 的应力。

剪应力 τ_{xz} ：作用在法向为 x 的面素上，应力方向为 z 的应力。

同理，在法向为 y 的面素上，三个应力分量为： $\sigma_y, \tau_{yx}, \tau_{yz}$ 。

在法向为 z 的面素上，三个应力分量为： $\sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ 。

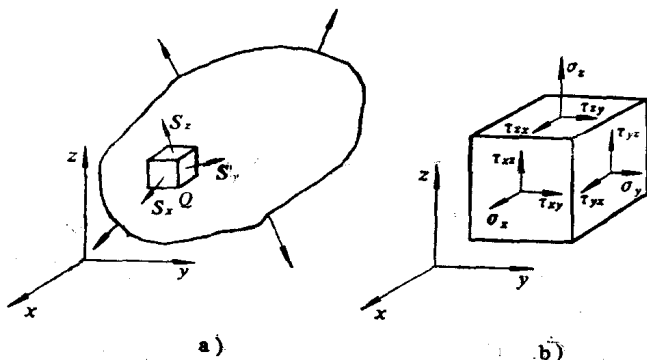


图 1-1 体素的应力状态

图1-1b中，我们标示了三个面素上的各个应力分量。如果我们取出的体素为一无限小的六面体，那么在每一对互相平行的面素上，应力的各个分量之间只差一个无限小的数值，可以近似地认为它们彼此互等，因此其余三个面素上的应力分量也可同样地标示出来。由此可见，无论变形物体的受力状态如何，为了确定物体内部任意点处的应力状态，只需知道九个应力分量（三个法应力，六个剪应力）就够了。

法应力与剪应力的正、负号取法，规定如下：

首先规定应力作用面素的“正”、“负”：当面素的外法向与坐标轴的方向一致时，此面素称为正面；相反时，称为负面。

凡正面上作用的应力，其方向与坐标轴的方向一致时取正号，相反时取负号；凡负面上作用的应力，其方向与坐标轴的方向相反时取正号，相同时取负号。

由此可见，对于法应力而言，拉为正，压为负；对于剪应力而言，则不能一概而论。读者应该注意这种规定与“材

料力学”中规定的区别。

按照以上规定，可见：

图1-1b中所有的应力分量，皆为正值。

由于我们所取的体素处于平衡状态，绕体素各轴的力矩相等，因此剪应力互等：

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}.$$

于是，确定变形体内，任意一点的应力状态，实际上只需知道六个分量就够了。

如果我们把一个点所有的应力分量，排列成下列的简明表格——矩阵，并以符号 (σ_{ij}) 表示，则：

$$(\sigma_{ij}) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{matrix} \boxed{x} \\ \boxed{y} \\ \boxed{z} \end{matrix}$$

$\begin{matrix} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow \\ x & y & z \end{matrix}$

表中第一列排列的是所有方向与 x 轴平行的应力分量，第二列是方向与 y 轴平行的应力分量，第三列是方向与 z 轴平行的应力分量。

第一行是所有作用在法向为 x 的面素上的应力分量，第二行是法向为 y 的面素上的应力分量，第三行是法向为 z 的面素上的应力分量。

表中，剪应力排列在法应力的对角线两侧，对应相等，因此上述表格又可简作以下的形式：

$$(\sigma_{ij}) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \cdot & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \cdot & \cdot & \sigma_z \end{bmatrix}$$

以上表格称为应力张量，而应力张量又是一种对称张

量。

所谓张量，是研究对象各分量的一种有规则的集合，其中各分量的数值取决于坐标系的选择。但是，随着坐标系的转换，各分量数值的变化，必须遵守一定的规则。

应力张量包含六个分量，这六个分量的数值，取决于我们所取的坐标系。

以单向拉伸为例，假如坐标系统取为图1-2所示的情况，则物体内某点的应力张量应该写作：

$$(\sigma_{ij}) = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & 0 \end{bmatrix}$$

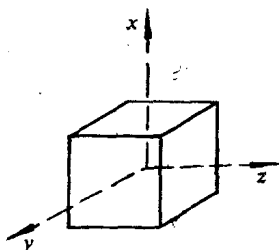


图 1-2 单向拉伸坐标轴的选取

如果将 xy 面绕 z 轴逆时针旋转 30° 后，在这种新坐标系下，应力张量变为：

$$(\sigma_{ij}) = \begin{bmatrix} \frac{3}{4}\sigma & \frac{\sqrt{3}}{4}\sigma & 0 \\ \cdot & \frac{1}{4}\sigma & 0 \\ \cdot & \cdot & 0 \end{bmatrix}$$

如果 xz 面再绕 y 轴逆时针旋转 30° ，则应力张量又变

为:

$$(\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \frac{9}{16}\sigma & \frac{3}{8}\sigma & -\frac{3\sqrt{3}}{16}\sigma \\ \cdot & \frac{1}{4}\sigma & -\frac{\sqrt{3}}{8}\sigma \\ \cdot & \cdot & \frac{3}{16}\sigma \end{pmatrix}$$

如果新坐标的 xyz 轴各转至与原坐标的 x 轴成相等倾角的位置时, 应力张量变为:

$$(\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \frac{\sigma}{3} & \frac{\sigma}{3} & \frac{\sigma}{3} \\ \cdot & \frac{\sigma}{3} & \frac{\sigma}{3} \\ \cdot & \cdot & \frac{\sigma}{3} \end{pmatrix}$$

这四种不同的应力张量, 都是表示的一种应力状态——单向拉伸。由此可见: 当坐标系变换时, 应力张量各个分量虽然随之改变, 但是点的应力状态是不会改变的。第三节中我们将证明: 在同一应力状态下, 无论坐标系如何变化, 应力分量之间的以下关系永远不变:

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = I_1 \quad (1-1)$$

$$(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) - (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = I_2 \quad (1-2)$$

$$(\sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}) - (\sigma_x \tau_{yz}^2 + \sigma_y \tau_{zx}^2 + \sigma_z \tau_{xy}^2) = I_3 \quad (1-3)$$

I_1 、 I_2 、 I_3 分别称为应力张量的第一、第二、第三不变量。对于一定的应力状态, I_1 、 I_2 、 I_3 永为定值。例如在上述单向拉伸的例子中, 无论选择哪一种坐标系, 利用哪一

种应力张量来表示这一应力状态，其 I_1 、 I_2 、 I_3 的数值均保持不变： $I_1 = \sigma$ ， $I_2 = I_3 = 0$ 。

不难想见：对于同样一种应力状态，由于坐标系统选择的差异，应力张量的繁简，差异极大，因而数学运算工作的复杂程度也差别很大。所以在研究塑性变形问题时，坐标系统的选择具有重要意义。

第二节 任意斜面上应力的确定

前已述及，如果已知某点的六个应力分量，那么此点的应力状态也就完全确定了。这就是说，如果已知某点的上述六个应力分量，那么我们就可计算出通过此点的任意斜面上的应力。方法如下：

假设某点 Q 的应力张量已知为：

$$(\sigma_{ij}) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \cdot & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \cdot & \cdot & \sigma_z \end{bmatrix}$$

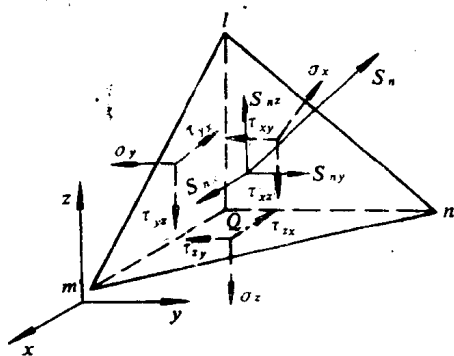


图 1-3 任意斜面上的应力