

金属加工力学

〔日〕 臼井英治 著
白樫高洋

廉元国 徐东安 陈振孟 译
任世钟 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书论述了金属的塑性加工、切削加工、磨削加工、游离磨料加工和冲击加工方面的力学问题。还论述了温度-应变速度效应、摩擦特性方面的问题以及综合性加工机理的模拟问题。全书内容丰富、深入浅出,可作为大专院校金属加工专业学生技术基础课的参考书,也可供金属加工专业的工程技术人员参考。

加工の力学

白井英治 著
白樫高洋

朝倉書店, 1974年

*

金属加工力学

【日】 白井英治 著
白樫高洋

廉元国 徐东安 陈振孟 译
任世钟 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $10\frac{1}{2}$ 276千字

1984年5月第一版 1984年5月第一次印刷 印数: 00,001—10,500册

统一书号: 15034·2673 定价: 1.55元

译 者 的 话

《金属加工力学》一书是日本谷口·修、森·康夫两位教授主编的 12 卷《机械工学基础丛书》中的第三卷。原书书名为《加工力学》(《加工の力学》), 为了更明确地表达书中的内容, 译本取名《金属加工力学》。本书是根据朝倉书店 1974 年初版本译出。

金属加工, 包括了金属塑性加工和金属切削加工。关于金属加工的理论方面的问题, 各国学者仍在从不同的角度进行深入的研究, 到目前为止, 对机械加工的力学分析, 还不可能把各种因素引起的影响全部考虑进去。作为丛书中的一本, 本书作者是从加工理论的共同基础——塑性力学和断裂力学出发, 论述各种金属加工的力学问题的。本书取材较广, 除塑性力学外, 还包括了加工力学的广泛内容, 为便于大专院校学生学习, 避免与其它课程重复并提高学生的学习兴趣, 本书在塑性力学方面并以研究有限变形问题为主, 以作和应力集中、突变的入门的目的。

本书内容广泛, 分析深入。限于我们的水平, 会有许多缺点和错误的地方, 恳请读者批评指正, 提出宝贵意见。

译 者

原 书 序

本书是为大学二年级下学期到三年级的学生、短期工业大学以及高等专科学校的学生编写的教科书。使学生更好地学习塑性力学、断裂力学的基础知识,以及各种机械加工力学的主要特性。

本书在编写当中,特别注意了以下两点:第一,不仅局限在塑性力学方面,还包括了加工力学范畴更为广泛的内容。目前许多大学按塑性理论-塑性加工,切削理论-切削加工,磨粒加工理论-磨削加工分别成套地编写了讲义,但是,加工理论的共同基础离不开塑性力学和断裂力学,只要掌握了这个基础,就可以有效地学习各种加工方法的基础知识。因此,本书不仅取材于塑性加工力学,还积极引用了切削加工、磨削加工、游离磨粒加工和冲击加工方面的题材;不仅涉及到必要的温度-应变速度效应、摩擦特性方面的问题,还进一步叙述了综合性加工机理的模拟问题。

第二,尽可能把它写成一本“简明的”教科书。首先希望本书的读者是已经学过初等材料力学的,但根据著者的经验,在这个阶段的学生往往还未确切地掌握应力、应变的概念。因此,虽然不免多少有些赘述,也还是要浅近地从应力、应变的概念讲起。又因以往的讲义都是按初等材料力学、弹性学、弹塑性学、塑性学的顺序编写的,以致多数学生在学《弹性学》时兴趣索然,而学《塑性学》时又有所厌烦。由于省略了弹性应变的有限变形之塑性力学容易入门,因此,本书决定省略许多弹塑性问题,主要是研究有限变形问题,亦即加工问题。基于上述之两点,作者称本书为“金属加工力学”。省略弹塑性问题,也是为了避免与材料力学讲义内容重复。为使内容通俗起见,本书的前六章均系对理想塑性体进行分析。我们认为,就联系实际问题来说,虽然尚有不满意的地方,但本书逻辑上的连贯性是好的,作为基础讲义,

这样的深度还是合适的。另外，凭作者的经验，稍作省略，即可在一学期（半年）内讲完前七章讲义。

著者才疏学浅，加之本书的特点，又不得不作跨专业的讲述，因此难免有许多武断和错误之处，望读者批评指正。

本书的出版曾得到各方面的许多帮助：东京工业大学益子正巳教授为本书提出书名（和内容）设想，森康夫教授也曾为本书执笔，坂田勝副教授则对书中的破坏法则部分提了许多中肯的意见，这里谨对他们三位先生表示深切的谢意。在实际工作中，还承蒙著者所在研究室的広田明彦助手和朝倉书店诸君的帮助，谨记数语，聊表谢意。

1974年盛夏于大岡山

著 者

目 录

第一章 绪论	1
第二章 基本关系	4
2-1 应力和应变	4
2-1.1 应力、莫尔应力圆	4
2-1.2 应变、应变增量	13
2-2 不可压缩性	23
2-3 平衡条件	24
习题	27
第三章 塑性变形和破坏法则	29
3-1 屈服条件	29
3-2 塑性变形法则	35
3-3 破坏法则	40
3-3.1 脆性破坏	41
3-3.2 延性破坏	54
习题	57
第四章 各种机械加工的近似分析	58
4-1 平面应变问题和轴对称问题	59
4-1.1 平面应变问题	59
4-1.2 轴对称问题	62
4-2 理想塑性体	65
4-3 成形加工	68
4-3.1 弯曲加工	68
4-3.2 锻造加工	79
4-3.3 挤压加工、拉拔加工	91
4-3.4 轧制加工 (rolling)	103
4-3.5 深拉加工	110
4-4 剪切加工	118
4-4.1 剪切加工机理	120
4-4.2 精密剪切加工	124
4-5 切削加工	126
4-5.1 二维切削	126

4-5.2 三维切削	144
4-6 磨料加工	167
4-6.1 磨削加工	168
4-6.2 游离磨料加工	178
习题	186
第五章 滑移线理论及其应用	189
5-1 滑移线理论	189
5-1.1 滑移线的几何性质和应力场	190
5-1.2 滑移线速度场和速矢端迹	196
5-1.3 滑移线场解的构成	201
5-2 滑移线理论分析实例(刚性理想塑性体)	202
5-2.1 锻造加工	202
5-2.2 拉伸和挤压加工	212
5-2.3 切削加工	220
习题	228
第六章 上限、下限定理及其应用	230
6-1 塑性势、最大塑性功原理	230
6-2 上限定理、下限定理	234
6-3 上限定理的应用举例	237
习题	245
第七章 材料物性的引入	246
7-1 加工硬化	246
7-1.1 塑性功的等效性	246
7-1.2 加工硬化的修正	250
7-1.3 理想的应力-应变关系	253
7-1.4 格子线分析法	255
7-2 温度、应变速度效应	261
7-2.1 应变速度修正温度	261
7-2.2 考虑了应变速度滞后的实验公式	262
7-2.3 温度效应、应变速度效应的修正	265
7-3 摩擦特性	266
7-3.1 滑动摩擦、粘着摩擦	267
7-3.2 摩擦特性的表示	268
7-4 各向异性	271
7-4.1 具有正交各向异性材料的屈服和流动	272
7-4.2 变形中各向异性的变化	274
习题	275

第八章 加工过程的模拟	277
8-1 模拟和有限元法	277
8-2 切削过程的模拟	283
8-2.1 逻辑框图	283
8-2.2 温度分布的数值计算	285
8-2.3 模拟的结果	287
习题	289
第九章 动态塑性加工	290
9-1 应力、变形的传播	291
9-1.1 基本方程式及其性质	291
9-1.2 应力波的传播和应力-应变曲线	294
9-1.3 应力波的干涉	297
9-2 冲击压缩加工	301
9-2.1 杆末端的应力波状况	301
9-2.2 杆的单轴压缩	303
习题	306
参考书目	306
附录	307
习题答案和提示	312

第一章 绪 论

机械加工的基本动作是加工工具顶住材料或工件。这可以有多种情况：像图 1-1(b) 那样，加工工具把部分材料包围加压，在不产生破坏的情况下使整个工件塑性变形，是其中的一种；而图 1-1(c) 所示是又一种情况，这时刀具顶住材料的某一局部，使之产生规定的（可控制的）塑性变形和破坏，等等。下面以图 1-1(a) 的情况为例，分析机械加工中所产生的现象。

当刀具顶压工件时，接触部位将首先发生弹性变形。继续增加顶压载荷，对于延性材料的工件，刀尖部位的大应力区将产生屈服而会出现塑性区。如工件是脆性材料的，在产生屈服的同时，脆性裂纹将会扩展，工件可能会立即断裂。这里首要的问题是在何种力学条件（屈服条件、破坏条件）下产生屈服或脆性破坏。进一步增大刀具的顶压力，原先包围在弹性区内很小的塑性区就扩大，并迅速扩展到刀具和工件的全部接触面上。

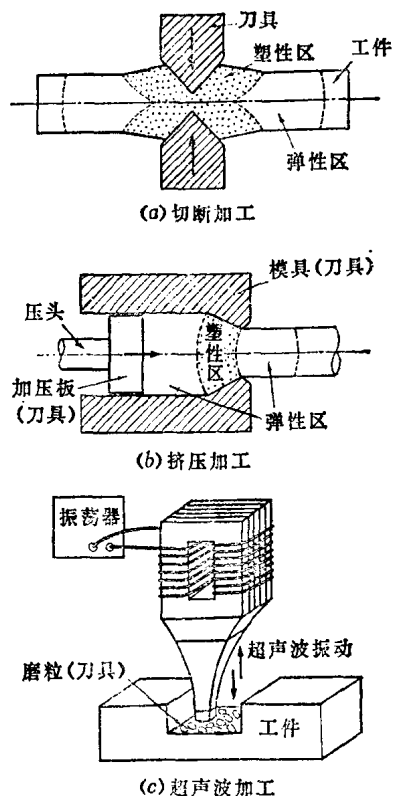


图1-1 机械加工的刀具和工件

这个过程中的变形称为弹塑性变形，或者称为受约束的塑性变形，而塑性区的应变和弹性区的应变是大致相同的。因此，在进行力学分析时，必须同时考虑这两个区域的特性。当刀具继续前顶，塑性区的变形就成为宏观的有限变形[●]，塑性区将扩大到整个板厚上（参看第五章）。如图所示，即使在这种状态下，塑性区周围仍然有弹性区存在，不过弹性区的应变要比塑性区应变小得多。此外，塑性区的应变是塑性应变和弹性应变之和（参看第三章），弹性应变比塑性应变小得多。因此，在分析塑性区的应力分布、计算加在刀具上的力和加工力时，可忽略弹性区的存在和弹性应变的影响。本书中所处理的问题多数就属于上述这种情况。上面只是简单地论及了塑性变形和塑性应变，接下去需要探究的问题就是塑性变形的规律。为此必须弄清大塑性应变的定义，及其如何与应力相联系而决定加工力。但麻烦的是，材料不能总是保持在最初的强度，在多数情况下，它会随着塑性变形而增大（加工硬化、应变硬化）；在不同的方向上，强度也会发生变化（各向异性），因此同样有必要对此加以研究。如图 1-1(b) 所示，一旦出现了塑性区就会保持这种状态，即材料将稳定地通过塑性区并被挤到外边去（稳定塑性流动、稳定加工）。在该图 (a) 的情况下，塑性区是随着刀具前进时刻变化的，且塑性变形状况也发生变化（非稳定塑性流动、非稳定加工）。当刀具继续前进，在两把刀的刀刃相碰之前，材料因其内部产生裂纹而被切断（延性破坏）。对于以切断为目的的加工来说，这当然是没有问题的。但如想在图示情况下，加工成较深的 V 形槽，必须防止发生延性破坏。对机械加工来说，有时期望它发生破坏（脆性破坏、延性破坏），有时却不要它发生破坏，因此是一个不好处理的问题。并且对于发生破坏的条件目前也还不十分清楚。

以上的说明，是以没有明确的条件下所进行的静态加工为前

● 相对于弹性区的微小变形而言（参看第二章）。

提的。当加工速度和塑性变形速度都加大时，又会如何呢？这个问题可以分为两种情况来加以说明：第一种情况是图 1-1(b) 所示的稳定加工。这时，只是变形速度加大，冲击和材料单元的惯性力可忽略。材料强度随变形的应变速度增大而提高（应变速度硬化），并随应变速度的滞后而变化。另一方面，因塑性变形是非可逆过程，所作的塑性功转换成热，使材料的温度上升并使其软化（热软化）。因此，在考虑了前述加工硬化的因素外，还必须考虑应变速度硬化和热软化的影响。第二种情况就是图 1-1(a)、(c) 的非稳定加工情况，这就是刀具或磨粒冲击工件时的情况。这时，刀具或磨粒的速度是随时间而变化的，冲击力也是随时间变化的，并且不是瞬时就传递到整个工件，因此，在刀具和工件内将产生应力波传播的过渡状态。由于弹性应力和塑性应力的应力波传播速度各不相同，尤其是还会产生波的反射和叠加问题，更使情况变得复杂（参看第九章）。因此可以预料，如果想把上述的加工硬化、温度-应变速度效应，各向异性、破坏条件等各种问题全都综合起来后进行确切的解析，将是一件相当困难的事。

因此，目前所进行的机械加工的力学分析，应该说还不可能把上述各种效应全部都考虑进去。尽管如此，当您读完本书后，却仍会感到有所受益。下面就上述各项内容由浅入深逐项进行说明和分析。

第二章 基本关系

2-1 应力和应变

2-1.1 应力、莫尔应力圆

现在分析一下在等截面的细长物体（密度 ρ 、截面积 A ）上，如图 2-1(a) 所示作用着一平衡力 F 时的情况。鉴于刚体并非工程材料，可把上述物体看作是可变形的连续固体（变形体）。设物体变形以抵抗外力，从而处于静止状态。如果在任意位置 x 处的轴截面上，将物体分成两部分，则上下物体在截面处作用着相等的力 F 。外力除了作用在物体表面上的力外，还有直接作用在物体单元上的重力

和离心力等体积力。

例如，在考虑了物体的自重后如图 2-1(b) 所示。此时，杆上两端面的力虽然不同，但任意轴截面的上下两部分物体相互作用的力却必然是平衡的。以上是外力相互平衡的情况。下面再看不平衡力按图 2-1(c) 所示样子作用的情况。如果物体是刚体，那么力是即刻传递的，物体各部

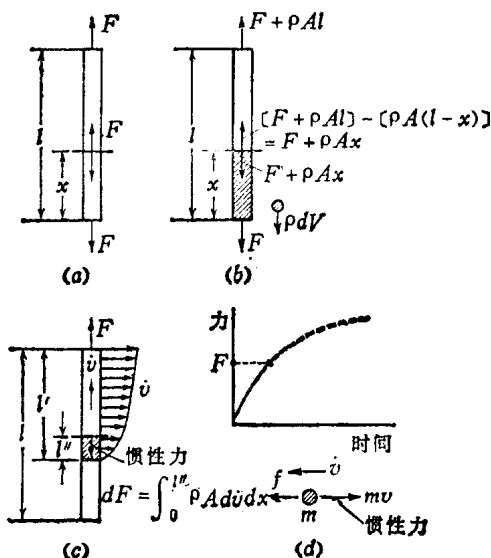


图2-1 作用在截面上的力的平衡

分的加速度都一样；对变形体来说，力却不是即刻传递的。在工程问题上，力不是在一瞬间以一定值的形式表现出来，而是如该图（d）所示，或多或少地以随时间而变化的形式表现出来的。因此当端面上的作用力为 F 时，物体内部将产生如该图（c）所示的加速度场 $\dot{v}$ 。如果力的传递区域为 l' ，则 $F = \int_0^{l'} \rho A \dot{v} dx$ 。

根据达朗贝尔原理把等式右边看作惯性力，则上式就是体积力，因此与该图（b）的例子一样，把物体看作是处于平衡状态，用图示方法可以求出任意截面上的力。在不同的时刻，以各种不同的速度，几种力作用到一般形状的物体上时，其情况将是十分复杂的，但从原理上讲，它是图 2-1 几个例子的组合。如果考虑惯性力，可按平衡状态的问题处理（参阅第 9 章）。

根据以上的概念，分析一下图 2-2 中受到包括体积力在内的许多个力的物体（一般的连续变形体）。如该图（a）所示，分析微小平面单元 δS 可知，在 δS 的左侧作用着来自物体 A 部分的力 δP_A ，在右侧作用着来自 B 部分的力 δP_B 。考虑惯性力时，由于物体处于平衡状态，因此 δP_A 和 δP_B 也相互平衡。亦即有

$$\delta P_A = \delta P_B \quad (2-1)$$

现写成

$$\delta P_A = \delta P_B = \delta P \quad \text{则}$$

$$\lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{\delta P}{\delta S} \quad (2-2)$$

可称为作用在平面单元 δS 上的合应力（resultant stress）。再进一步把 δP 分成如该图（b）所示平面单元的法向分量 δN 和切向分量 δT ，由

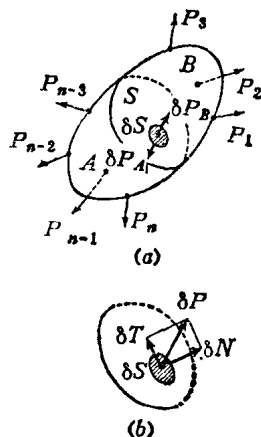
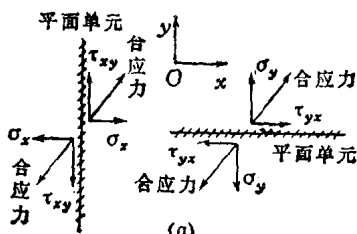


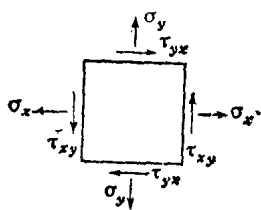
图2-2 作用在微小平面单元上的力

$$\sigma = \lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{\delta N}{\delta S} \quad \text{和} \quad \tau = \lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{\delta T}{\delta S} \quad (2-3)$$

定义的 σ 和 τ 分别称为平面单元 δS 的法向应力 (normal stress) 和剪切应力 (shear stress)。从以上的定义和式 (2-1) 的性质可知, 对所考虑的平面单元来说, 如图 2-3(a) 所示, 应力必然成对地出现。当考虑尺寸为无限小的方形单元时, 作为图 2-3(a) 两种情况的组合, 则应力状态如该图 (b) 所示。把这种分析方法进一步一般化, 那末物体内部某处的应力状态, 可在以该点为中心、尺寸无限小的立方体上, 按图 2-4 的样式表示各个面的应力



(a)



(b)

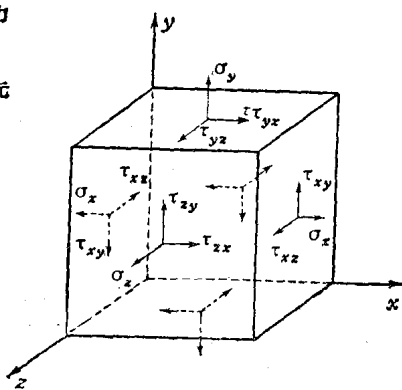


图2-3 应力的成“对”

图2-4 应力在各坐标轴上的分量

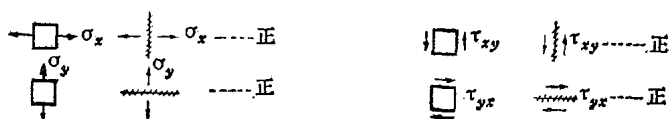
值[●]。也就是根据下列 9 个分量即可决定该点的应力状态。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

式中 τ_{ij} 的下标 i 表示作用在垂直于 i 轴面上的应力, 而下标 j

● 在这个立方体内不必考虑体积力。与平面单元 δS 的无限小相对应, 体积力应是高阶无限小。

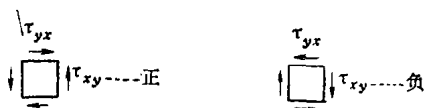
表示作用在 j 轴方向的应力，并规定图示箭头方向的应力为正。例如取垂直于 z 轴的截面，则



这里的应力正值同后述的应变正值对应。因为应力是在包括惯性力的情况下定义的，而且物体又处于平衡状态，因此图 2-4 的单元也处于平衡状态，根据力矩平衡条件，可得

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2-5)$$

这样对剪切应力来说，就不能单独考虑诸如 τ_{xy} 和 τ_{yx} ，而是如下图所示，通常是同时考虑这 4 个矢量。要想用式(2-5)决定一点的应力状态，用 6 个应力分量 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 和 τ_{zx} 就可以了。



根据以上讨论可知，要准确地指定图 2-2 所示物体任意平面单元的应力及其符号，必须重新设定相对于平面单元的坐标轴。例如把图 2-5(a) 所示平面单元的法向定为 x' 轴，再选定与之相垂直的 y' 、 z' 轴，那么平面单元的应力可指定为 $\sigma_{x'}$ 、 $\tau_{x'y'}$ 、 $\tau_{x'z'}$ 。对法向应力来说，可把拉伸应力取为正，压缩应力取为负。但对剪切应力来说，则如图 2-2(b) 所示，必须注意，随着坐标轴选定方法的不同，正负是会倒过来的。如已知平面单元位置上的 x 、 y 、 z 应力分量 (式 2-4)，就可根据应力坐标变换计算 $\sigma_{x'}$ 、 $\tau_{x'y'}$ 、 $\tau_{x'z'}$ 。一般性的论述将由其它书进行，这里仅论述二维的情况。

现设 Z 方向的应力分量 σ_z 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 为零的平面应力状态，或在 z 方向只有 σ_z 存在，而 $\tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ 的平面应变状态 (参阅 4-1.1 节)。所要着眼的无限小应力单元如图 2-6 所示。这里令

$\tau = \tau_{xy} = \tau_{yx}$ 并采用了记号 τ 。如要求与 y 轴成 θ 角的斜面 AB 上的应力 σ_n 和 τ_n , 必须把斜面 AB 作为 x' 轴或 y' 轴来定义应力。对两个轴的选择是任意的。在本书中, 把 AB 取作 x' 轴如图 2-6 所示。这样, 图示的 σ_n 、 τ_n 均为正。根据三角形 AOB 的平衡[⊗] 可得

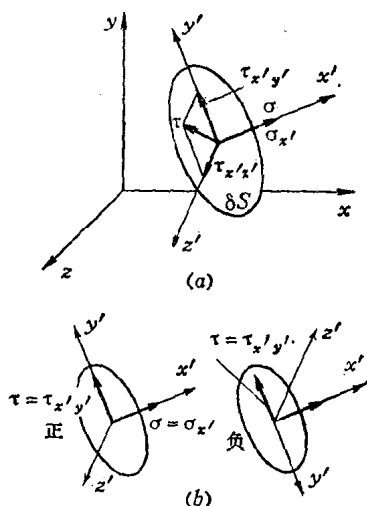


图2-5 作用在平面单元上的剪切应力及其正负

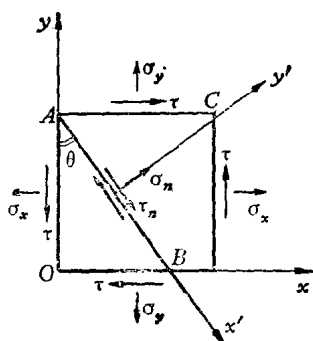


图2-6 斜面上的应力

$$\left. \begin{aligned} x \text{ 方向: } \sigma_x \cos \theta + \tau \sin \theta &= \sigma_n \cos \theta + \tau_n \sin \theta \\ y \text{ 方向: } \sigma_y \sin \theta + \tau \cos \theta + \tau_n \cos \theta &= \sigma_n \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

因而有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2 \tau \sin \theta \cos \theta \\ \tau_n &= (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

将公式

$$\begin{aligned} \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta &= \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta \\ \cos^2 \theta - \sin^2 \theta &= \cos 2\theta \end{aligned}$$

[⊗] 图2-6考虑的是无限小单元, 因此可不考虑体积力。如果考虑体积力作用于 y 轴上, 那末由于对置面的 σ_y 并不相等, 就要考虑成应力状态有变化的有限元。

代入式 (2-7), 可得下列变换公式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + \tau \sin 2\theta \\ \tau_n &= \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta - \tau \cos 2\theta \end{aligned} \right\} (2-8)$$

将上式的两边平方后相加, 消去 θ 得

$$\left[\sigma_n - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \right]^2 + \tau_n^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau^2 \quad (2-9)$$

这个式子表明, 当把 σ_n 、 τ_n 作为变量时, 它的几何图形是一个圆。如图 2-7 所示, 该圆的半径为 $\sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y)/2]^2 + \tau^2}$, 中心位置为 $(\sigma_x + \sigma_y)/2$ 。这个圆叫做莫尔应力圆 (Mohr's stress circle)。图 2-6 中具有任意夹角 θ 的斜面上的应力都可画在这个圆上。请注意式 (2-8) 的推导, 不管 θ 角如何, 图 2-6 的斜面 AB 总是取作 x' 轴, 且把图示顺时针方向的剪切应力 τ_n 取为正。鉴于

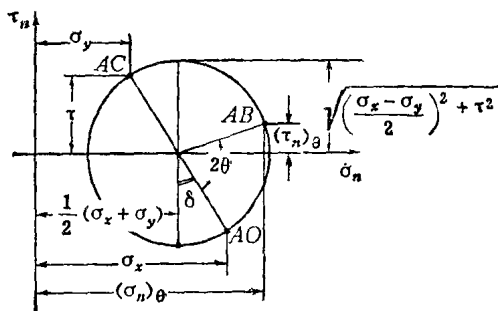


图2-7 莫尔应力圆

图 2-7 的莫尔圆是 σ_n 、 τ_n 的曲线, 因此与已述定义不同, 对莫尔圆采用了“把顺时针方向旋转的剪切应力取为正”的定义法[●]。例如根据式 (2-8) 有

$$\left. \begin{aligned} AO \text{ 面 } (\theta = 0) \quad \tau_n &= -\tau \text{ 负} \\ AC \text{ 面 } (\theta = \pi/2) \quad \tau_n &= \tau \text{ 正} \end{aligned} \right\} \text{莫尔圆} \quad \left. \begin{aligned} \tau &= \tau_{xy} \cdots \text{正} \\ \tau &= \tau_{yx} \cdots \text{正} \end{aligned} \right\} \text{图2-4}$$

● 这并没有违背定义, 仍然把斜面的法线作为 y' 轴的剪切应力画成曲线, 当然也是可以的。