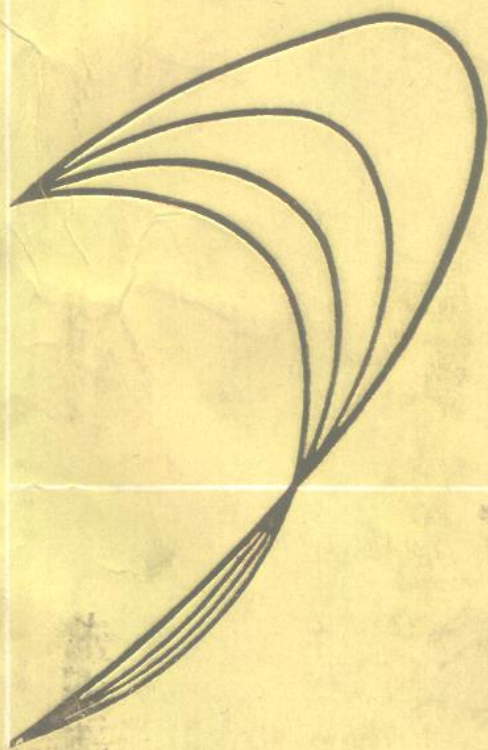


金属成形过程的 工程塑性理论

H. 李普曼 主编
乔端 刘宝珩等 译
乔端 校



冶金工业出版社

76 301

313203

L 31

金属成形过程 的工程塑性理论

H. 李普曼 主编

乔 端 刘宝珩 等译

乔 端 校

冶金工业出版社

DV57/5

内 容 提 要

本书是根据1975年9月国际机械科学中心在意大利乌迪内举办的金属塑性加工成形力学讲座的讲稿翻译的。书中反映了这个领域的最新成就,对一些基本理论和概念作了简单叙述,对现代的加工工艺和设备、实验方法作了概括的介绍,内容有:变分原理在金属成形过程分析中的应用、金属成形过程的应力分析、应用特雷斯加屈服准则的金属成形简化理论、平面应变条件下成形的上、下限法和滑移线场等。

金属成形过程的工程塑性理论

H. 李普曼 主编

刘宝珩 等译

乔 端 校

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 13 1/8 字数348千字

1988年7月第一版 1988年7月第一次印刷

印数00,001~3,000册

ISBN 7-5024-0136-9

TF·43 定价 3.90 元

译者前言

1975年9月，国际机械科学中心（CISM）在意大利的乌迪内（Udine）举办了一次关于金属塑性加工成形力学方面的讲座，约请了国际上从事这方面研究的知名学者担任讲授。后由西德慕尼黑工业大学的李普曼（H.Lippmann）教授任主编，将讲授内容汇编成书出版。该书包括了讲授者本人以及其他一些学者近期的主要研究成果，反映了当前在金属塑性加工成形力学方面的最新成就，对一些基本理论和概念也有简单叙述。此外，对现代新的加工工艺和设备以及实验方法等进行了概括性介绍。文后附有大量的参考文献和书目可供进一步参考。可以说，本书是介绍当前金属塑性加工成形力学理论的最新研究成果以及概括地总结新的加工工艺和实验方法的一本有价值的著作。

由于全书是由几位讲授者分别纂写的，在写作的风格，名词术语的使用以及章节、插图、公式的编排上都不完全相同。为了阅读方便，在翻译时做了一些变更。

本书的翻译工作，按章节次序分别由北京钢铁学院的乔端，刘宝珩，茹铮，赵以相，贺毓辛和钱仁根诸同志共同完成。由乔端同志总校阅，并对全书的名词术语，章节次序等进行了适当的编排，整理和统一。另外，陈肖梅，赵素炎等同志参加了誊写工作。

限于译者水平，在译文中一定存在错误和不妥之处，恳请读者提出批评和指正。

译者于北京钢铁学院

1982年12月

序

约在十年前，当弹性理论几乎全部为数学家所垄断时，本书作者之一，现正在英国剑桥（Cambridge）大学任教的W. 约翰逊教授，在曼彻斯特（Manchester）大学时曾指出，塑性理论应该是物理学家、工程师和数学家共同研究的领域。虽然，当时塑性理论通常是作为连续体力学的一部分，而且这样的连续体力学课题完全只是数学的课题。但我认为，W. 约翰逊教授的看法至今仍然是近于事实的。如果塑性理论旨在应用于金属成形技术，因而必须考虑到比在土建工程中所表现出来的大得多的那些应变时，这种独特见解显然是适用的。

由于在金属成形过程中，实验数据的不确定性，再结合经常不容忽视的变化大的边界影响，使得至今还没有一个同时对解决各种类型实际问题都有用的普遍的理论。目前代替理论分析的是逐项地选定工艺规程。后来的论文都是它们的大量应用，没有任何使它们趋于完善的工作。例如，全部有关机械设备、金属成形模具和纯冶金学的研究都没有被考虑。我们希望读者如同在乌迪内的听课者一样，对塑性理论在金属成形过程的应用这一领域的现状有一个清楚的印象。

本书的次序安排与作者们在国际机械科学中心讲课时的次序相同，只是W. 约翰逊教授的第一和第三讲（在本书中是与马马利斯合写的），考虑到篇幅，在第二卷中列为两个独立的内容。非常遗憾的是，由于出版合同的限制，最后，施切潘斯基（Szczepinski）教授没能把他讲的第七讲——平面应力条件下金属塑性成形理论的讲稿提供给我们。

国际机械科学中心和其主要负责人奥尔萨克（Olszak）教授为此书的顺利出版给予了协作和关心。对此，我们深表感谢。

李普曼于乌迪内

1975年9月

讲授者简历

W. 约翰逊

理学博士，教授，英国剑桥大学工程学系。

1942年毕业于曼彻斯特大学理工学院(UMIST)，1952~1956年任谢菲尔德(Sheffield)大学讲师，1956~1960年任曼彻斯特大学高级讲师，1960~1975年任曼彻斯特大学教授，1975年任剑桥大学教授。发表过三本著作。并任国际机械科学杂志(International Journal of the Mechanical Sciences)主编。

小林史郎

理学博士，教授，美国加利福尼亚(California)大学机械工程系。

1946年毕业于东京大学，获理学士学位，于1957年获伯克利(Berkeley)大学硕士学位，1960年获该校理学博士学位，现任伯克利大学机械工程系教授。发表过一本著作。

E. H. 李

理学博士，教授，美国加利福尼亚州斯坦福(Stanford)大学应用力学部。

1937年毕业于英国剑桥大学，获文学士学位，1940年与铁木申柯(S. Timoshenko)一起在斯坦福大学获理学博士学位，1941~1946年为英国武器研究部的实验工作人员，1946~1948年任美国原子能委员会机械工程部部长助理，1948~1952^①年任布朗(Brown)大学应用数学教授，1953~1958年任应用数学部主任，1962年以后任斯坦福大学应用力学教授，1975年以来为美国国家工程学院成员。

H. 李普曼

教授，慕尼黑(München)工业大学。

①原文误为1948~1962年。——译者

1953年毕业于格赖夫斯瓦尔德(Greifswald)大学数学系, 1955年获博士学位, 1953~1954年任格赖夫斯瓦尔德大学科学助理, 1954~1957年为兹维克(Zwickau)金属成形研究院的研究人员, 1957~1962年任科学助理和助理主任, 1961~1965年在该研究院取得教授资格后成为正式成员。1969~1971年在汉诺威(Hannover)工业大学机械系任教(工程力学正教授), 1970~1971年任布伦瑞克(Braunschweig)工业大学机械工程学院院长, 1971~1975年在卡尔斯鲁厄(Karlsruhe)大学, 1975年到慕尼黑工业大学, 1971~1975年与奥尔萨克、奥尼斯库(Onicescu)或布劳斯(Brousse)分别为国际机械科学中心负责人并与勃利(Boley)共同任《力学研究通讯》(Mechanics Research Communications)主编。

P.B.梅勒

英国布雷德福(Bradford)大学机械系教授, 理学博士。

1951年毕业于谢菲尔德大学, 获学士学位, 1954年获理学博士学位, 1954~1956年任工业工程师, 1956~1964年任利物浦(Liverpool)大学讲师, 1964~1972年任伯明翰(Birmingham)大学工程塑性力学教授, 从1972年以来任布雷德福大学机械工程教授, 金属成形工业工程顾问。发表过一本著作。

W.施切潘斯基

波兰科学院基础技术研究所, 教授。

1947~1954年任华沙电话公司工具设计师。1954年毕业于华沙工业大学, 1960年获理学博士学位。1954~1964年在华沙工业大学任助教, 以后升为教授, 1963年取得教授会会员资格, 从1964年开始为波兰科学院基础技术研究所教授。发表过三本著作。

目 录

序	V
讲授者简历	VI
第一卷	1
I. 一般塑性理论简介 H.李普曼	1
摘要	1
文字记号说明	1
1. 应力	3
2. 应变速率, 应变	7
3. 功率	8
4. 屈服准则	9
5. 例题	14
6. 极值定理	18
参考文献	19
I. 变分原理在金属成形过程分析中的应用 小林史郎 (S.Kobayashi)	20
摘要	20
1. 希尔 (Hill) 的一般分析方法	20
参考文献	31
2. 刚塑性分析中的矩阵法	32
参考文献	49
3. 无限制稳态过程理论	51
参考文献	61
II. 金属成形过程的应力分析 李 (E.H.Lee)	63
1. 关于金属成形分析方法的评述	63
参考文献	69
2. 弹塑性定律的基础	70
参考文献	84

IV. 金属成形问题分析的初等理论	H.李普曼	85
1. 引论		85
2. 应用		85
3. 证明		100
4. 推广		102
参考文献		109
V. 各向异性金属板带的成形	梅勒 (P.B.Mellor)	
		111
1. 引论		111
参考文献		120
2. 各向异性理论的有效性		121
参考文献		130
3. 深冲成形		131
参考文献		141
4. 拉延成形		143
参考文献		152
VI. 应用特雷斯加 (Tresca) 屈服准则的金属成形		
简化理论	H.李普曼	153
1. 引论		153
2. 应用		157
3. 轴对称各向同性流动的一般分析		177
参考文献		179
第二卷		183
引论		183
VII. 某些古老的和新的金属成形方法	约翰逊 (W. Johnson), 马马利斯 (A.G.Mamalis)	184
1. 准静态一般成形过程的最新成就		184
参考文献		198
2. 静液成形和超塑性		207
参考文献		211

3. 高速成形.....	212
参考文献.....	223
Ⅶ. 平面应变条件下金属成形的上下限法和滑移线场	
W. 约翰逊 A.G. 马马利斯)	226
1. 平面应变条件下金属流动的上下限法.....	226
2. 平面塑性应变条件下的滑移线场理论和例题.....	282
3. 剪平面法.....	346
4. 混合问题.....	353
5. 各向异性.....	365
6. 残余应力.....	378
参考文献.....	378
书目.....	380
Ⅷ. 关于金属变形过程实验研究的概况 W. 约翰逊,	
A.G. 马马利斯	381
1. 挤压力计算结果的实验验证.....	381
参考文献.....	389
2. 研究金属加工成形过程材料流动的方法.....	389
参考文献.....	403
中译人名索引	406

第 一 卷

I. 一般塑性理论简介

(H. 李普曼)

摘 要

虽然读者已经熟悉了应力和应变速率的基本概念,但为了便于回忆起它们的一些重要关系,我们不仅对上述内容作一简短总结而且还规定了一些标准记号。这些记号在本书中是自始至终使用的。其次,将以屈服准则(外凸的屈服曲面)以及与之相关连的流动法则为基础,对处理刚塑性材料的一般理论方法作概括性叙述。一些证明或冗长的说明都被省略了。这些内容可以在一般的教科书中找到^[1,6]。

文字记号说明

仅应用于坐标系的下标,如

i, k, l, p , 等 变动下标

x, y, z 或 ξ, η, ζ , 或 $1, 2, 3$, 等固定下标,

$J, K, \dots$ 等或 I, II, III , 对应于主轴时的下标。

对各种定义逐项作进一步说明的上标,如

0 初值

' 偏量

* 运动许可的

s 静力许可的

一般的和几何的量

x, y, z , 或 x_i, x_k 等 直角坐标

ξ, η, ζ , 或 ξ_j, ξ_k 等 曲线坐标

e_j, e_k 等 定义于局部坐标系中的单位矢量

e (一般的)单位矢量

n, n_j 法向矢量与其坐标值

t, t_j 切向矢量与其坐标值
 l 长度
 ψ, α 角度
 V 体积
 S 表面积
 S^D 发生不连续现象的交界面
 δ_{jk} 克罗内克尔 (Kronecker) 记号
 t 时间
 $\cdot = d/dt$ 对时间 t 微分^①
0, 1 零张量与单位张量

静力学

$\mathbf{T}, T_j \dots$ 表面力矢量与其坐标值
 $\sigma, \sigma_{jk} \dots$ (物理的) 应力张量与其坐标值
 $\sigma_{jj} = \sigma_j \dots$ 正应力 σ
 $\sigma_{jk} = \tau_{jk} (j \neq k) \dots$, 剪应力 τ
 σ^m 平面的平均正应力
 $\tau^{\max}$ 最大剪应力
 σ^h, σ^h 静水压应力张量与其标量
 $\overline{\sigma}, \overline{\tau}$ 等效应力
 $b, b_j \dots$ 体力矢量与其坐标值
 $\mathbf{Q}, Q_j \dots$ 广义的应力矢量与其坐标值

运动学

$v, v_j \dots$ 一点的速度矢量与其坐标值
 $\lambda, \lambda_{jk} \dots$ 应变速率张量与其坐标值
 $\lambda_{jj} = \lambda_j \dots$, 线应变速率 (λ)
 $\lambda_{jk} = x_{jk} (j \neq k) \dots$, 剪应变速率 (x)
 λ^m 平面的平均线应变速率
 $x^{\max}$ 最大剪应变速率
 λ^v, λ^v 体胀速率张量与其标量
 $\overline{\lambda}, \overline{x}$ 等效应变速率

① 原文误为 (全) 微分。——译者

$a, a_j \cdots$ 一点的加速度矢量与其坐标值
 $q, q_j \cdots$ 广义的应变速率矢量^①与其坐标值
 $\varepsilon, \varepsilon_{jk} \cdots$ 应变张量与其坐标值
 $\varepsilon_{jj} = \varepsilon_j \cdots$, 对数应变 (ε)
 $\varepsilon_{jk} = \gamma_{jk} (j \neq k) \cdots$, 剪应变 (γ)
 $\overline{\varepsilon}, \overline{\gamma}$ 等效应变

功

Δ 功率密度, 耗散密度
 Δ^D 间断面内单位面积上的功率密度
 W^{in}, W^{ex} 总内功和总外功
 Φ 功密度

材料的一般性质和塑性性质

ρ 密度
 θ 温度
 $f(Q), f(\sigma_{jk}), f^P(Q), f^P(\sigma_{jk})$ 屈服准则
 κ, κ^P 屈服准则中的(可变)比例系数
 Y, k 拉压屈服应力和剪切屈服应力

1. 应 力

现在回忆一下 σ_{jk} (作用于单位面积上的力)的物理概念。在某一瞬时, 作用于任意连续体内一点的应力状态, 如图1-1所示。用记号 e_x, e_y, e_z , 或 e_1, e_2, e_3 等表示直角坐标系中的单位矢量; n 或 e_ξ 表示物体表面上一点处的外法线方向的单位矢量; t 或 e_η 表示切线方向的单位矢量。正应力 σ_{jj} 可用 σ_j 或 σ 来表示; 而剪应力则用 τ_{jk} 或 τ 来表示。

在如图1-1所示坐标系中, σ_{jk} 表示一个张量。其意义为, 在连续体内一点处, 对于(空间)转动后的新轴 e_ξ, e_η, e_ζ 存在下列变化关系

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\alpha\beta} &= \sum_{j,k} (e_\alpha, e_j)(e_\beta, e_k) \sigma_{jk} \\ (j, k &= x, y, z; \alpha, \beta = \xi, \eta, \zeta) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

① 原文误为广义的速率矢量。——译者

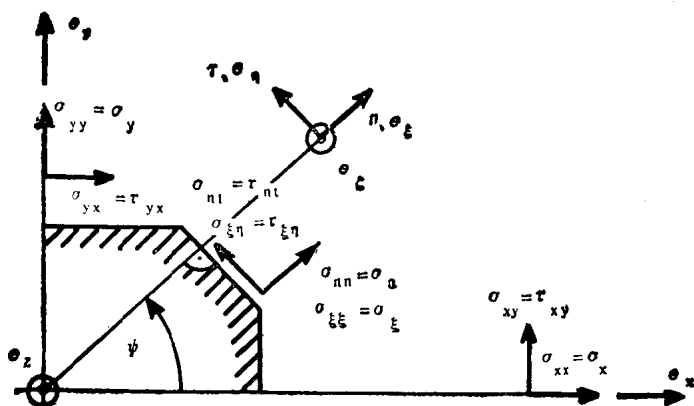


图 1-1 应力

当无剪应力作用时，即

$$\tau_{JK} = 0; (J, K = \text{I}, \text{II}, \text{III})$$

则称正交的坐标轴 e_I, e_{II}, e_{III} 为应力主轴。可以证明，在物体任一点均有主应力存在。当相应的主应力 $\sigma_j = \sigma_{jj}$ 不等时，它们是唯一的。在空间中，由任意二主轴确定的平面，称为主平面。

如果在图1-1中，取 $e_x = e_I, e_y = e_{II}, e_z = e_{III}$ 为主轴，并且 $e_\xi = n, e_\eta = t$ 在 x, y 主平面内相对于 e_x, e_y 转过角 ψ ，则方程 (1-1) 可用莫尔 (Mohr) 圆说明如图1-2所示。圆心的位置和半径由下列两个“不变量” (即其数值与坐标系的选择无关) 来确定。

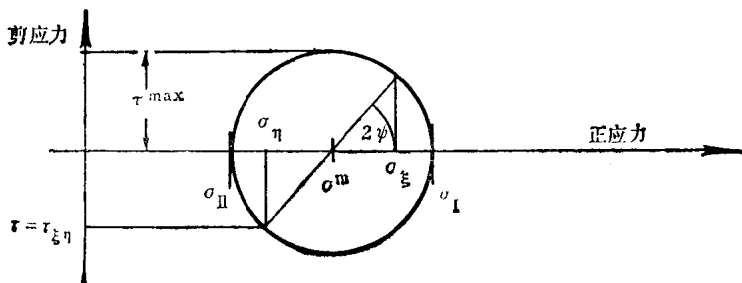


图 1-2 莫尔圆 ($\sigma_I \geq \sigma_{II}$)

$$\left. \begin{aligned} \sigma^m &= \frac{1}{2}(\sigma_I + \sigma_{II}) = \frac{1}{2}(\sigma_\xi + \sigma_\eta) \\ \tau^{\max} &= \frac{1}{2}|\sigma_I - \sigma_{II}| = \frac{1}{2}|\sqrt{(\sigma_\xi - \sigma_\eta)^2 + 4\tau^2}| \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

它们分别称作平面的平均正应力和最大剪应力。对于空间应力状态同样可以证明，当 $\sigma_I \geq \sigma_{II} \geq \sigma_{III}$ 时，最大剪应力为

$$\tau^{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_I - \sigma_{III}) \quad (1-3)$$

它作用于过中间应力 σ_{II} 轴，并二等分 $\mathbf{e}_I$ ， $\mathbf{e}_{III}$ 间所夹的直角的平面上（在图1-1和1-2中 $\psi = 45^\circ$ ）；而 $\tau^{\max}$ 的方向位于 I ， III 主平面内。

$$\text{如果} \quad \sigma_{jk} = \sigma_{kj} \quad \text{或} \quad \tau_{jk} = \tau_{kj} \quad (1-4)$$

则应力（张量）为对称的。这时只有6个独立应力分量，有时把这些应力分量看作为广义应力，形成应力矢量

$$\mathbf{Q} = (Q_1, \dots, Q_6) = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{31}) \quad (1-5)$$

另外，应力必须满足平衡条件

$$\left. \begin{aligned} \sum_j \sigma_{jk} n_j &= T_k, \quad (\text{在面 } S \text{ 上}) \\ \sum_j \frac{\partial \sigma_{jk}}{\partial x_j} + b_k &= 0, \quad (\text{在体积 } V \text{ 内}) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中， S 表示所研究物体的表面；而 V 为物体的体积，

$$\mathbf{n} = \sum_k n_k \mathbf{e}_k$$

为表面 S 外法向上的单位矢量； $\mathbf{T} = \sum_k T_k \mathbf{e}_k$ 为作用于 S 上的表

面力（单位面积上的力）矢量；和 $\mathbf{b} = \sum_k b_k \mathbf{e}_k$ 为作用于体积 V

内一点的体积力（单位体积内的力）矢量（图1-3）。

对于方程（1-6）中的第二式，假设应力状态是连续的，并对空间坐标系 $x_1 = x$ ， $x_2 = y$ ， $x_3 = z$ 是连续可微的。另外，我们

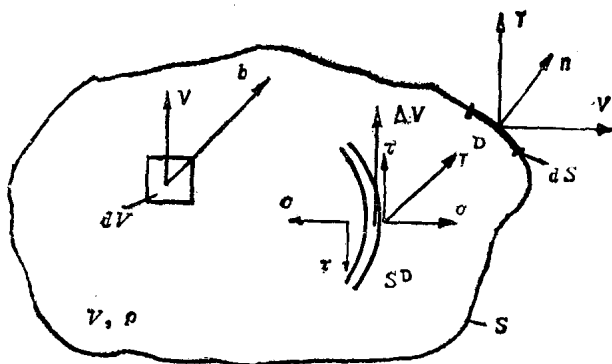


图 1-3 物体的瞬时形状

还必须考虑到不存在跨过间断面 S^D (图1-3) 的应力导数, 而至少作用于 S^D 面上的正应力 σ 和剪应力 τ 是连续的。如用曲线坐标系, 方程 (1-6) 的第二式将发生变化 (见参考文献[1])。体力为, 例如重力、电磁场, 或惯性。

$$\mathbf{b} = -\rho \mathbf{a} \quad (1-7)$$

式中, ρ 为密度; $\mathbf{a}$ 为一点的加速度。在绝大多数金属成形问题中, 体力可略去不计。

所谓各向同性塑性材料是由下列特性定义的: 物体在固定空间的应力场作用下, 当物体发生转动时, 真应力与应变间的关系不发生变化。此时静水压应力状态为

$$\sigma_{jk} = \sigma^h \delta_{jk} \quad (1-8)$$

$$\text{式中, } \delta_{jk} = \begin{cases} 1 & (\text{当 } j=k) \\ 0 & (\text{当 } j \neq k) \end{cases} \quad (1-9)$$

为克罗内克尔记号。在静水压应力作用下物体只发生体积的胀缩, 因此可以按下式从应力状态中分出

$$\sigma'_{jk} = \sigma_{jk} - \sigma^h \delta_{jk} \quad (1-10)$$

$$\sigma^h = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} \sum_k \sigma_{kk} \quad (1-11)$$

式中, 由于 $\sigma'^h = 0$, 而其余的应力偏量将使物体发生除体积改

变外的形状变化。

2. 应变速率, 应变

在直角坐标系中, 应变速率

$$\lambda_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_j}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_j} \right) \quad (1-12)$$

是由动点场中点的速度

$$v_j = \dot{x}_j(t) \quad (1-13)$$

定义的。式中的 t 表示时间, $\dot{} = d/dt$ 。因此, 我们假设 v_j 为连续的, 并且除一些不连续的分界面 S^D (图1-3) 外对 x_j 连续可微。矢量 $\mathbf{V}$ 跨过分界面可以发生突变 $\Delta \mathbf{V}$ 。对曲线坐标 ξ_j , 应变速率与速度的关系 (1-12) 式要加以修正 (见参考文献 [1])。

纵向应变速率 $\lambda_{jj} = \lambda_j$ (有时简写为 λ) 可以解释为边长为 dx_j 单元体的相对伸长速率 $(dx_j) \cdot / dt$; 而剪应变速率, 即当 $j \neq k$ 时, $\lambda_{jk} = \chi_{jk}$ (有时简写为 χ) 表示原来位于 $\mathbf{e}_j$ 或 $\mathbf{e}_k$ 方向的单元体相邻两边所夹直角 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 减小速率的一半 ($-\dot{\alpha}/2$) (图1-4)。

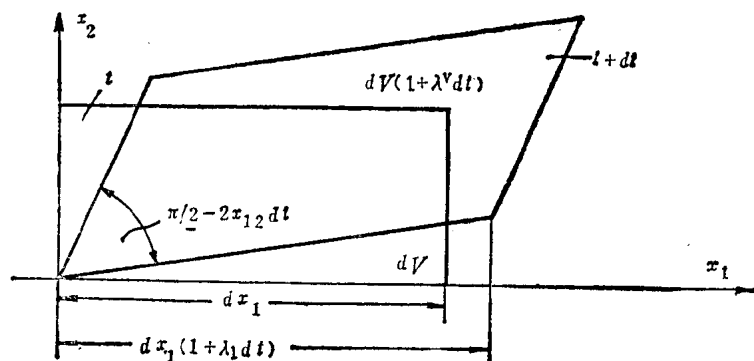


图 1-4 表示应变速率的简图

仅当单元体象刚体一样的运动时, 应变速率才为零。应变速率也与应力一样, 构成一对称张量。因此, 除 (1-4) 式以外, 变化公