

高等学校教材

塑性加工变形物理场

张 强 著

东北工学院出版社

塑性加工变形物理场

张 强

东北工学院出版社

内 容 简 介

本书总结了近 30 年来关于塑性加工变形区中各种物理参量与现象的分布场。全书共分矢量场、标量场、系数场、状态场以及综合场等 5 章。内容涉及变形力学及变形金属学两大方面,以及由这两方面结合的各种参数与现象在变形过程中的变化与分布。全书特点在于侧重介绍研究思路、方法和结论的分析,而对计算不做详尽地推导。

本书主要适用于高等院校金属压力加工专业教师、研究生、本科生以及金属压力加工专业工程技术人员,也可供应力学、金属材料等专业的师生与工程技术人员参考。

塑性加工变形物理场

张 强 著

东北工学院出版社出版发行
(沈阳·南湖)

东北工学院印刷厂印刷
(辽新出许字 89084 号)

开本: 787×1092 毫米 1/16
1990 年 9 月第 1 版

印张: 21.50

字数: 537 千字

1990 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1~1000 册

责任编辑: 王国栋 刘长仁

责任校对: 郭爱民

封面设计: 唐敏智

ISBN 7-81006-113-5/TG·2

定价: 4.59 元

前 言

发生物理现象的空间部分，称为物理场。根据这个定义，我们把塑性加工或称压力加工的变形区称为塑性加工变形物理场。

金属材料塑性变形之后，与变形前的情况对比，不仅是形状与尺寸发生了变化，其组织与性能也发生变化。为什么产生这些变化？为什么有这样的变化程度？只有把变形物理场中的矢量参数（位移、变形、应力或速度等有方向、有量纲的物理量）、标量参数（温度、主体相或剩余相的尺寸、显微硬度、密度等无方向、而有量纲的物理量）、各种系数（变形系数、性能系数、速度比值系数、内摩擦或外摩擦系数等无方向、无量纲的物理量）、与状态（应力状态、质点流向、主体相或剩余相的形状等无定量的现象描述）等的分布规律与变化规律搞清楚，才能确切地找到原因，即只有把变化过程与相应变化的量或趋向了解清楚，才能确切地知道所产生后果与相应程度的原因。所以，从塑性加工变形物理场的角度看，确切地研究了矢量场、或标量场、或系数场、或状态场、或这些场组合的综合场之后，产生相应现象的原因，也就随之判断清楚了。

此外，在选择优化的变形制度，设计最佳的轧辊孔型、辊型以及各种压力加工模具时，也非常需要变形物理场的实验基础与理论基础。

研究塑性加工变形物理场的目的在于，掌握各种变形条件下场内各类参数与状态的变化规律以及它们之间的相互关系；确定优化的工艺制度，生产优质、高产、低耗的产品；形成各部分结构有相互联系的塑性加工或金属压力加工这门边缘学科的新体系，改变长期以来金属压力加工学科中变形力学部分与组织性能部分分割而无有机联系的局面。

随着生产发展的需要，塑性加工理论研究发展的深入与开拓，变形物理场研究的重要性逐渐被认识。但是约在 20 世纪 60 年代以前，由于测试装置满足不了要求，以及所用的计算工具计算速度慢、计算工作量不能过大的限制，使变形物理场的研究局限于平面场的研究，并且多数是定性的，大部分属于变形、应力、速度等矢量的平面场的研究。20 世纪 60 年代以来，随着测试装置的完善和测试技术的发展，以及适应三维变形场的复杂计算和大量数据处理需要的计算机日益发展，关于三维变形物理场的研究日益增多。不仅三维矢量场的研究在扩大、深入，在三维标量场及状态场等方面的研究也有了良好的开端。更为可喜的是，综合场的研究，也已开始。目前，关于三维变形物理场研究不足之处在于，各类变量物理场定量规律的研究还处于初始阶段，特别是接近或符合实际的定量规律的理论数学模型，还需在进一步研究中予以解决；各类变形物理场的参数相互关系的研究还处于起步的阶段。

本书汇编了近年来国内外与我们自己关于塑性加工变形物理场的科研成果，并进行了系统整理。着重于研究思路、方法、结论的分析，而不详尽地推导计算所应用的方程。

本书分为矢量场、标量场、系数场、状态场、综合场等五章。由于各类变形物理场研究进展的广度、深度以及数量不同，各章内容的篇幅和分量也不相同，有关矢量场的内容

更多一些，其它各章内容则少一些。

本书是经过使用后修改编写的，由于这是第一本关于塑性加工变形物理场方面的专著，加上我们的水平有限，书中缺点与错误在所难免，恳切希望读者给予批评与指正。

编 者
1990年3月

目 录

前 言

1. 矢量场	(1)
1-1 矢量场的测定方法	(1)
1-1-1 印记法	(1)
1-1-2 用压针法测定接触表面上的单位压力分布	(10)
1-1-3 光学法	(14)
1-2 矢量场的计算	(40)
1-2-1 接触表面上单位压力分布场的计算	(40)
1-2-2 变形区断面上矢量场的计算方法	(60)
2. 标量场	(195)
2-1 温度场	(195)
2-1-1 用差分法计算温度场	(195)
2-1-2 利用变分-差分法, 考虑速度场与应力-应变场, 求解温度场	(200)
2-1-3 利用有限元法计算温度场	(203)
2-1-4 利用保角映射法求解温度场	(226)
2-2 硬度场与显微硬度场	(231)
2-2-1 墩粗压缩过程的硬度场	(231)
2-2-2 轧制过程的显微硬度场	(241)
2-3 变形区中晶粒尺寸分布场	(257)
2-3-1 冷轧低碳钢的变形区内晶粒尺寸分布场	(257)
2-3-2 1Cr13 静叶片钢热轧变形区中铁素体尺寸分布三维场	(269)
2-4 变形区中的密度场	(270)
3. 系数场	(277)
3-1 变形系数场	(277)
3-2 晶粒轴比场	(280)
3-3 金属组织中相的含量分布场	(281)
3-4 速度比值系数场	(282)
3-4-1 轧制过程中变形区各点纵向流动速度 v_z 与进入变形区的纵向速度 v_0 的比值 (v_z/v_0) 场	(284)
3-4-2 金属陶瓷材料挤压过程中的轴向速度 v_x 以及径向速度 v_r 与挤压杆推进速度 v_0 的比值 (v_x/v_0 及 v_r/v_0) 场	(287)

3-4-3	正反挤压过程中变形区内纵向速度 v_z 与高向速度 v_r 的比值 (v_z/v_r) 分布场	(288)
3-5	应力状态系数场	(290)
3-5-1	冷挤压铜坯料时截面上的应力状态系数等值线场	(291)
3-5-2	热挤压铝钛合金时的塑性指数场	(292)
3-5-3	径向冷锻 45 号碳钢时变形区内塑性指数场	(292)
4.	状态场	(294)
4-1	金属质点流向场	(294)
4-1-1	矩形断面试料压缩与拉伸时金属质点流向场	(294)
4-1-2	轧制过程时金属质点流向场	(299)
4-1-3	挤压过程的速度方向场与流向场	(308)
4-1-4	考虑弹性区与塑性区共存时变形区中的流向场	(309)
4-2	应力状态场	(309)
4-2-1	利用不均匀变形状态及试验测定应力状态场	(309)
4-2-2	利用解析计算方法确定应力状态场	(311)
4-3	变形区中塑性区的扩展	(315)
4-4	变形场中的断裂轨迹	(319)
5.	综合场	(321)
5-1	两种物理场结合的综合场	(321)
5-1-1	矢量场与标量场的综合场	(321)
5-1-2	矢量场与系数场的综合场	(327)
5-1-3	矢量场与状态场的综合场	(329)
5-1-4	标量场与系数场的综合场	(329)
5-1-5	标量场与状态场的综合场	(329)
5-1-6	系数场与状态场的综合场	(330)
5-2	三种物理场结合的综合场	(330)
5-2-1	矢量场、标量场以及系数场的综合场	(330)
5-2-2	矢量场、标量场以及状态场的综合场	(331)
5-3	矢量场、标量场、系数场以及状态场的综合场	(331)
	参考文献	(333)

1. 矢量场

矢量场的研究方法可以分为矢量场的测定方法与矢量场的计算方法两类。

1-1 矢量场的测定方法

测定矢量场的方法中，常用的有印记法（网格法，刻痕法，空眼法等），测定接触表面单位压力与单位摩擦力的压针法以及光学方法（光塑性方法，光敏材料表面覆层法，云纹法与全息法等）等三类。印记法是利用坐标系中网格或刻痕或空眼变形前后尺寸的对比，求得位移、变形等应变矢量参数，而后再用已知的弹塑性力学中的应力-应变关系式求应力。压针法是在变形工具内装有压针，针尖伸出接触表面 $1\sim 3\mu\text{m}$ ，变形过程中压针的针尖压于变形材料的接触表面上而受力，通过贴于压针上的传感器反映出单位压力与单位摩擦力的信息。光学方法是利用光的干涉产生的条纹以及光导程与应力的关系，求得位移或变形或应力，再由应力-应变关系式求对应的应力或变形。

在印记法中最常用的是网格法，光学方法中最常用的是云纹法。

1-1-1 印记法

印记法是将变形前的金属材料或试件，用机械加工方法或光学腐蚀方法，在接触表面或某个截面上加工制作网格或刻痕，或按规定部位加工空眼作为印记，而后测定变形前后单元印记的尺寸。由变形前后单元印记的尺寸，计算出位移、变形、变形速度，得到变形区中的位移场、变形场、变形速度场。需要求解对应的应力场时，可以利用应力-应变关系式进行计算。

印记法是一种古老的方法。虽有一些明显的缺点，例如：1) 制作的印记破坏了金属材料或试件的完整性，测得的数据必然与完整的情况有出入；2) 变形量较大时，印记痕迹变粗，测定困难，且影响精度。但印记法比较简单，并且比较直观，不需要用模拟材料来代替研究材料，所以印记法沿用至今。

一、用网格法测定矢量场

根据需要，可以将网格刻于试料的任意部位。

图 1-1 中 a) 是仅在表面有网格的试料。网格可以刻在上下表面，也可以刻在两个侧面或端面。总之，根据需要，可以将网格刻在任意的研究表面。

图 1-1 中 b) ~ h) 是组合试料，而不是象 a) 所示的试料那样是整体的。

组合试料 b), c), d), h) 的材质如果是铅，那么在试片刻好网格之后，在试片之间覆以薄层低熔点的武德合金，于 $70\sim 100^\circ\text{C}$ 轻轻压合。变形后，将组合试料置于 $70\sim 100^\circ\text{C}$ 的热水中分离。如果试料的材质是钢或难熔金属等 (Mo, W 等)，则在刻好网格后，相应地用碳钢或不锈钢带作包套，包好组合试料，变形后用机械加工方法进行剥离。近年来，由于化学粘结剂的发展，组合试料的试片可以用粘结剂粘结，变形后用相应的溶剂溶解粘结剂，分开试片，但在使用时，应注意粘结有效温度与粘结强度能满足实验条件要求。

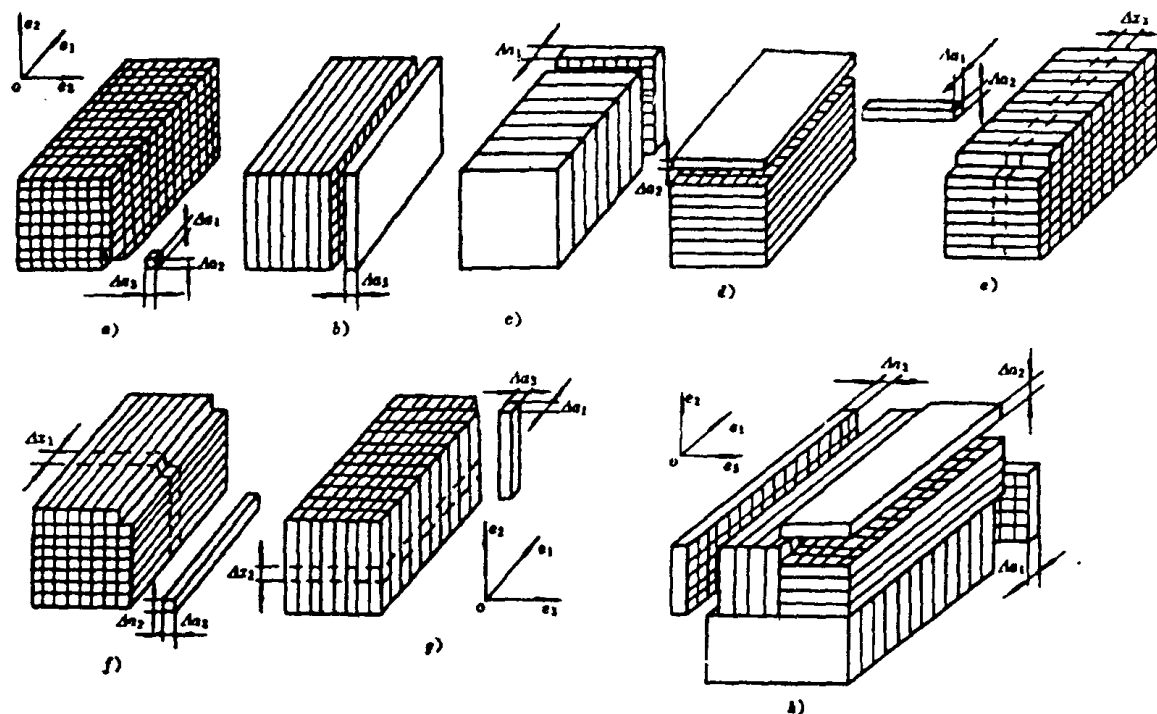


图 1-1 有网格的试料

制备网格的方法较多，常见的有机械加工方法、光刻法、腐刻法等。机械加工得到的网格条纹较粗，宽度一般大于 0.1mm，光刻法与腐刻法所得的网格条纹较细，条纹宽度可达 0.002mm。变形前后网格尺寸的测定，均是用工具显微镜进行。

应该指出，网格法除了适用于金属材料试料外，也适用于塑料条组合的网格试料，如图 1-1 中 e)、f)、g) 所示。塑料条可以用挤压的方法来制备。变形前后塑料组合试料网格尺寸的测定，也是利用工具显微镜进行。使用塑料组合试料进行矢量场的测定时，应注意温度的影响以及切削作用力对变形后试料网格尺寸的影响。

下面列举几个例子，说明网格法的应用，以及用网格法研究矢量场所解决的问题。

(一) 利用试料侧面网格研究轧卡与正常轧制时侧面上 e_x , e_y , e_z 分布差异

许多研究中，用轧卡方法研究轧制的变形过程，但这与轧辊不中断转动的正常轧制是有区别的，而且这种区别是明显的。O. Г. Музалевский 等⁽²⁾利用网格法研究了这两种情况的三个主方向变形 e_x , e_y , e_z 的数值与沿变形区纵向上的分布，证实存在着差异。

他们所用的材料为铝，试料尺寸为 20×20×150mm。试料侧面刻有网格。为了分析正常轧制与轧卡两种情况变形的差异，试验进行过程中，利用高速摄影，拍摄出侧面各个网格的形状、尺寸变化的经历。轧辊直径为 120mm，轧制速度为 4cm/s，相对压下量为 20%。轧制之前将试料加热到 480℃，而后送往轧机进行轧制。

利用工具显微镜测量拍摄照片上的网格尺寸，计算出实际变形区中的纵变形 e_x ，高向变形 e_y 。横变形 e_z 是按单元体积不变条件计算得到的。根据测定与计算，绘制正常轧制试料与轧卡试料侧面三个主方向的相对变形沿变形区纵向的增长曲线。为了区别，用 e_x , e_y , e_z 表示正常轧制情况的相对主变形，用 e'_x , e'_y , e'_z 表示轧卡情况的主变形。用符号 I 表示侧面接触层、II 与 III 表示中间层、IV 表示中心层。

用测定与计算的数据，绘制成图 1-2 所示的相对主变形分布曲线。其中，实线表示正常轧制情况，虚线表示轧卡情况。通过对比可以明显地看出，在这两种情况下变形的分布规律和变化规律以及数值大小均不同。例如，测得距入口面 5mm 处的高向主变形分别如表 1-1；

表 1-1 不同情况与不同层次的 ϵ_r 值

情 况	层 次		
	I	II	III
轧卡情况 ϵ_r , %	17.5	6.5	4.5
正常情况 ϵ_r , %	8	4.5	2

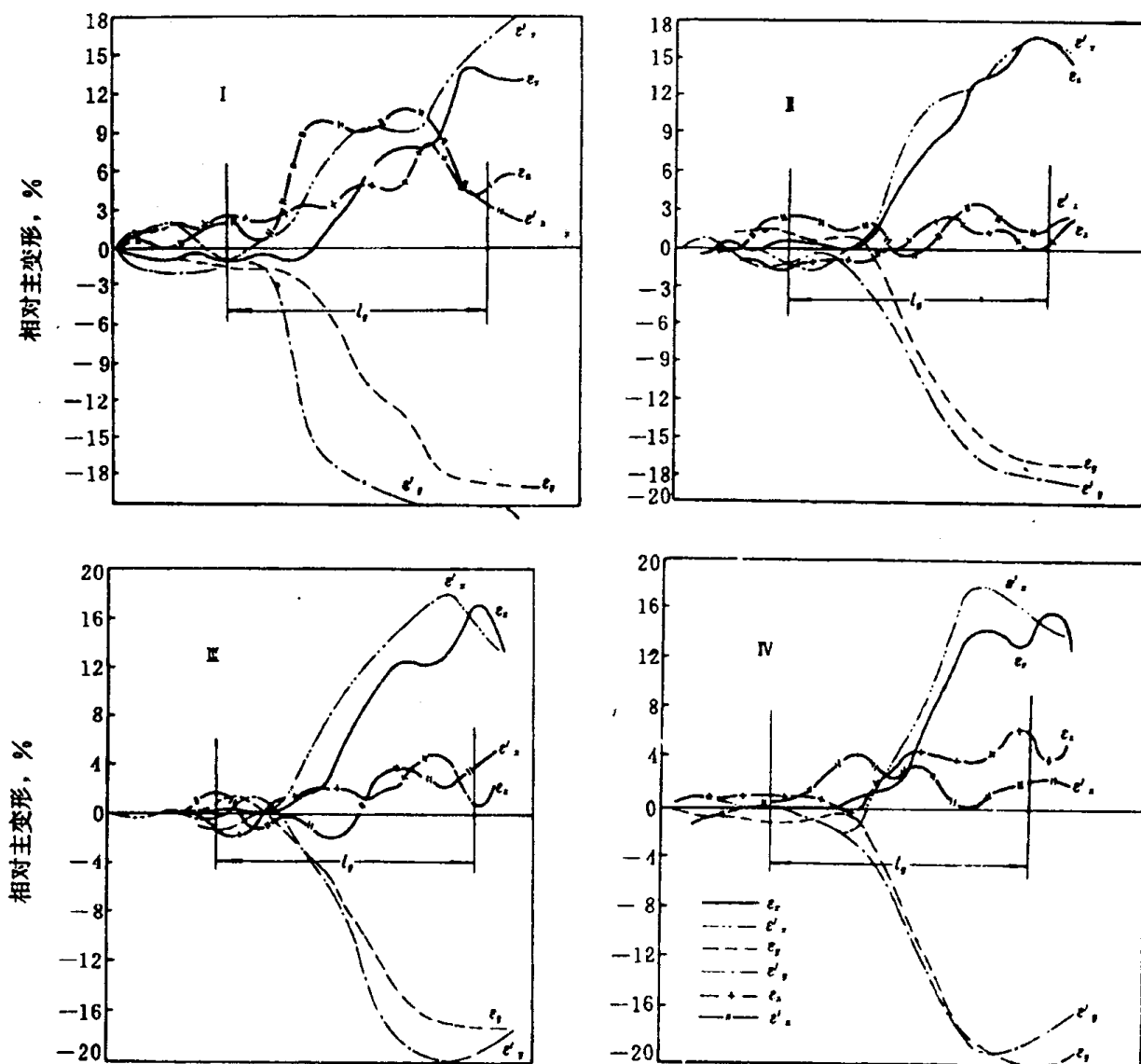


图 1-2 正常轧制与轧卡试样主变形沿变形区纵向的分布

他们还利用测定与计算的数据，绘制了在变形区不同纵截面上主变形沿高向的分布，如图 1-3 所示。从图 1-3 也可以明显地看出两种情况主变形数值与分布特征上的差别，特别是变形区前半部纵变形与高向变形的差别。

上述研究的结果可以说明，利用网格法可以研究不同变形条件下的变形场并显示出它

们的区别。

(二)利用轧件不同宽度处纵断面上的网格，研究窄、宽轧件变形分布、变形梯度与变形发展方向

O. I. Музалевский⁽³⁾使用宽度为 B 的试料通过在 $B/2$ 、 $B/4$ 与 B 的纵断面上刻网格的方法，研究了窄、宽轧件上述断面高向各层主变形沿变形区纵向的分布、变形梯度与变形发展方向。试料的组合形式，如图 1-1 中 b) 所示。

研究结果表明，主变形沿变形区纵向的分布如图 1-4 所示。从图中看出，宽轧件的 $B/2$ 处纵断面上的 ε_x 、 ε_y 、 ε_z 沿变形区纵向的彼此差值远比 $B/4$ 、 B 处情况的小，可以认为是处于近似均匀变形。而 $B/4$ 、 B 处纵断面上的各向主变形的差值较大，特别是 B 处的情况，纵断面上

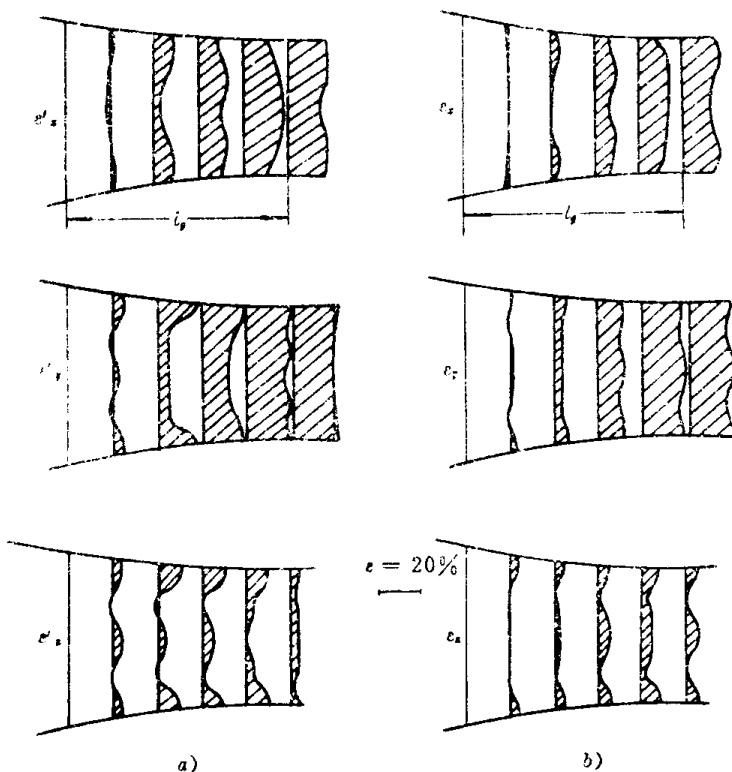


图 1-3 轧卡 a) 与正常轧制 b) 两种情况相对主变形沿高向的分布

有明显的横变形，由此可了解轧制理论中关于宽轧件属于平面变形的假设，与实际有较大的出入。因而，不论是窄轧件或是宽轧件，它们的变形实际上都属于三维变形。不存在平面变形。

为了研究变形发展的特点，明确变形的增长方向与变化率，可以利用变形梯度说明。变形梯度是由 xoy 、 xoz 坐标面上变形等值线上各点引矢量 $\left\{ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\}$ 与 $\left\{ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right\}$ 作成的。依据这种方法制得的窄、宽轧件的相对变形梯度投影，如图 1-5 及图 1-6 所示。从图中可以看出，变形区中各处各相对主变形梯度值彼此是有差异的，这说明变形增长变化率是有差异的，与此对应，变形发展方向也是有差异的，如图 1-7 所示。

从上述的研究可以看出，利用网格法能显示关于变形的一些假设与实际的出入，例如假设宽轧件的变形为平面变形，而实际为三维变形。此外，还可以看出，利用网格法可说明变形梯度，表明变形沿某个方向的变化率与发展方向。

(三)利用网格法研究轧制变形区中的位移场与速度场

B. K. Воронцов 等^(4,5)利用网格法研究了方轧件在椭圆孔型中轧制时变形区内的位移场与速度场。

他们利用尺寸为 $300 \times 64 \times 8\text{mm}$ 的铅铋合金片组合成 $300 \times 64 \times 64\text{mm}$ 的组合试料。在每片料的表面上刻 7 条纵条痕，条沟宽 0.5mm ，深 0.75mm ，条痕间距为 8mm ，精度为 0.04mm 。刻好条痕后，表面上覆一层武德合金。每个试料，由 8 枚合金片组合而成，并于 $70 \sim 100^\circ\text{C}$ 加压使合金片彼此粘焊。

试料的轧制是在半工业性二辊式 $\phi 370$ 轧机上进行的。椭圆孔型高 40mm ，宽 100mm ，辊

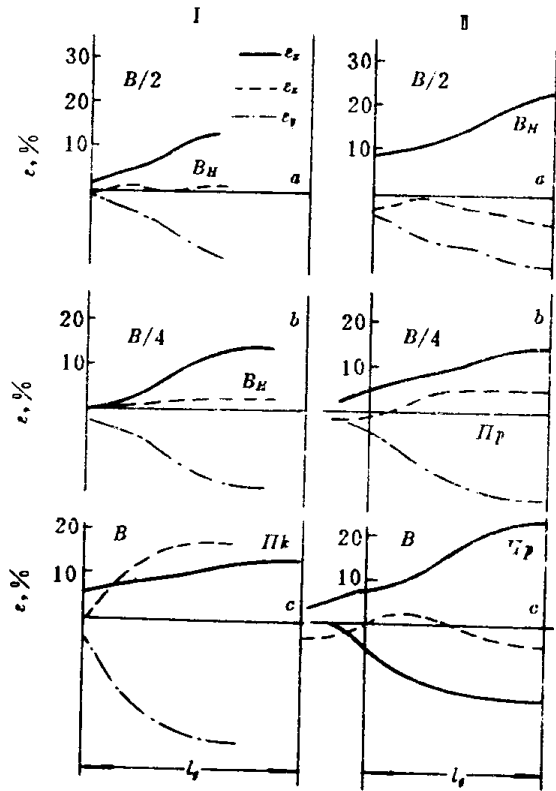


图 1-4 纵断面 $B/2$, $B/4$, B 处接触层 (ΠK)、中间层 (ΠP) 与中心层 (BH) 的纵变形 (ϵ_x)、高向变形 (ϵ_y) 与横变形 (ϵ_z) 沿变形区纵向的分布与变化

I—宽轧件轧制情况 ($H=42\text{mm}$, $B=70\text{mm}$, $e=15.5\%$); II—窄轧件轧制情况 ($H=50\text{mm}$, $B=30\text{mm}$, $e=7.8\%$); H —变形前轧件高度

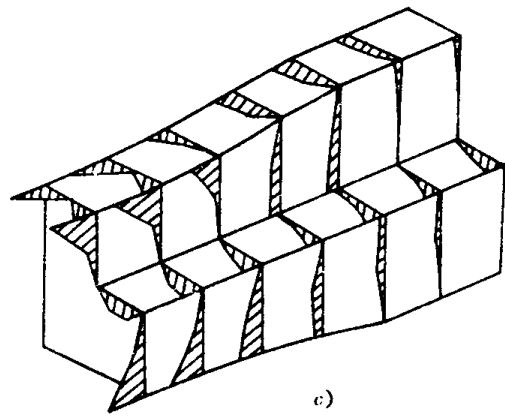
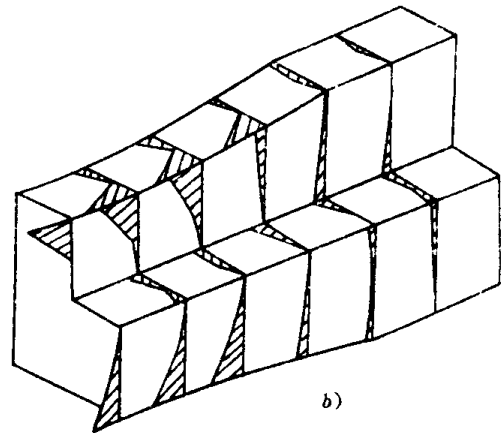
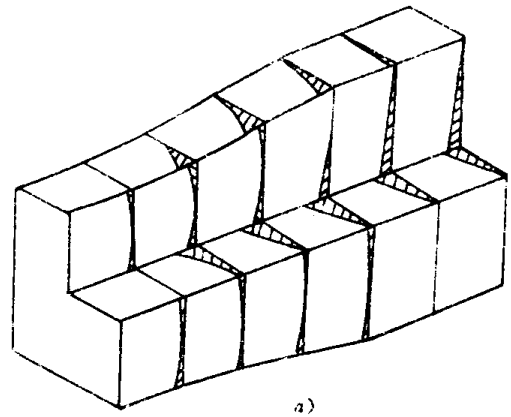


图 1-5 宽轧件变形区中相对纵变形梯度 a)、高向变形梯度 b) 及横变形梯度 c) 的空间投影图

缝为 3mm, 孔型的轧槽底处的轧辊直径为 280mm。在轧机上轧卡之后, 取下试料, 沿变形区纵向按间距 8mm 切片, 得到如图 1-8 所示的变形前 a)、变形后 b) ~ f) 横断面试片及网格的变形情况。图中, x 表示纵向坐标, $x=-16\text{mm}$ 与 $x=32\text{mm}$ 断面图上的 Y, Z 与

y, z 分别表示序号为 14 的节点变形前后的高向坐标 (Y 与 y) 及横向坐标 (Z 与 z)。

变形后用工具显微镜测量各点的坐标, 测量精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ 。

利用欧拉-拉格朗日混合坐标系表示各点变形前后的坐标关系:

$$\left. \begin{aligned} y &= f(x, Y, Z) \\ z &= \varphi(x, Y, Z) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中, X, Y, Z 与 x, y, z 分别表示原始的与变形后轧件断面上点的坐标。于是各点在垂直方向的位移为:

$$u_y = y - Y \quad (1-2)$$

横向位移为:

$$u_x = z - Z \quad (1-3)$$

依据测得的位移值，绘制了纵向横切试片表面上各点的高向位移变化与横向位移变化图，如图 1-9 与图 1-10 所示。从图中可以看出，位移场分布有明显的均匀性。

他们还利用测得的位移数据，绘制了高向、横向位移等值线场，如图 1-11 所示，由图除了可以看清位移的分布与趋向外，还可以判断出位移大的部位对位移小的部位作用有附加拉应力的区域，如图 1-11 中所示的 II、III 区域。这种判断，已在 1952 年由 Я. С. Галлай 等完成的关于孔型中轧制时的纵向拉应力的研究中，被实验结果所证实^[6]。

依据位移关系坐标求偏导数得到速度的关系，将测得的位移数据变换为速度，绘制出图 1-12~图 1-15。从图中可以看出，速度场分布也与位移场一样，有明显的均匀性。同样，可由速度场等值线判断出断面上存在附加拉应力的部位。

从上述研究可以看出，利用网格法，能求得实际变形区内的位移场与速度场，还可以判断发生附加拉应力的部位。

(四) 利用坐标网格法确定位移速度、变形速度与应力

利用网格法测得变形区中各点的三个主方向的位移 u_x, u_y, u_z ，当这些位移是单位时间的位移时，称为位移速度。由位移速度对坐标求偏导数时，可得变形速度 $\xi_{ij}(i, j = x, y, z)$ ：

$$\left. \begin{aligned} \xi_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} & \xi_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \\ \xi_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y} & \xi_{yz} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \\ \xi_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z} & \xi_{zx} &= \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \end{aligned} \right\} (1-4)$$

而后根据偏差塑性变形速度与偏差应力和切应力成正比的关系，则有：

$$\frac{\sigma_{xx} - \sigma_m}{\xi_{xx}} = \frac{\sigma_{yy} - \sigma_m}{\xi_{yy}} = \frac{\sigma_{zz} - \sigma_m}{\xi_{zz}} = \frac{2\sigma_{xy}}{\xi_{xy}} = \frac{2\sigma_{yz}}{\xi_{yz}} = \frac{2\sigma_{zx}}{\xi_{zx}} = \lambda \quad (1-5)$$

式中， $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 为对应于坐标轴 x, y, z 三个主方向的法向应力， $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$ 为切应力， σ_m 为平均应力， λ 为正的比例系数。

用网格法测定矢量场不仅适用于轧制过程，也适用于锻压、拉拔或挤压等其他压力加工变形过程。

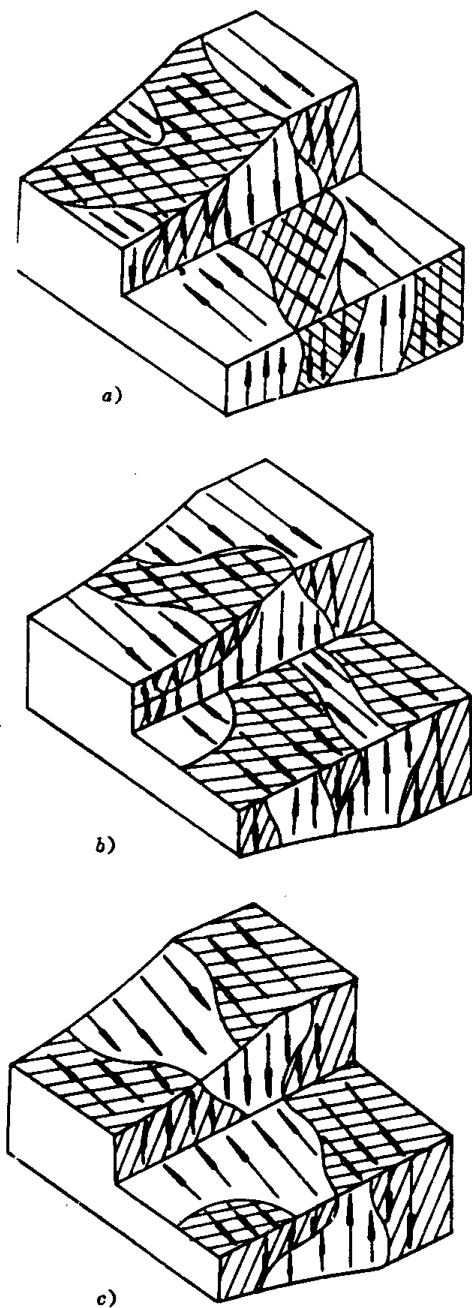


图 1-6 宽轧件变形区中，正值（向中心的箭头）与负值（阴线，箭头向周边）相对变形梯度投影范围
a) 纵变形梯度投影； b) 高向变形梯度投影；
c) 横变形梯度投影

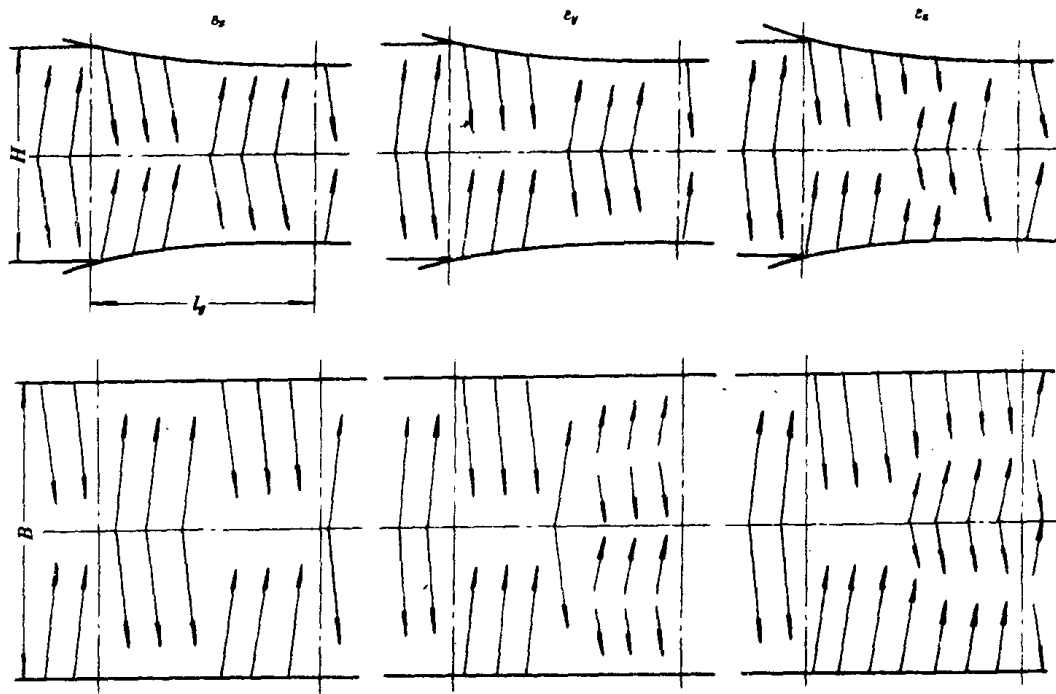


图 1-7 宽轧件变形区中，纵断面与水平断面上的纵变形 (ϵ_x)、高向变形 (ϵ_y) 与横变形 (ϵ_z) 发展方向图

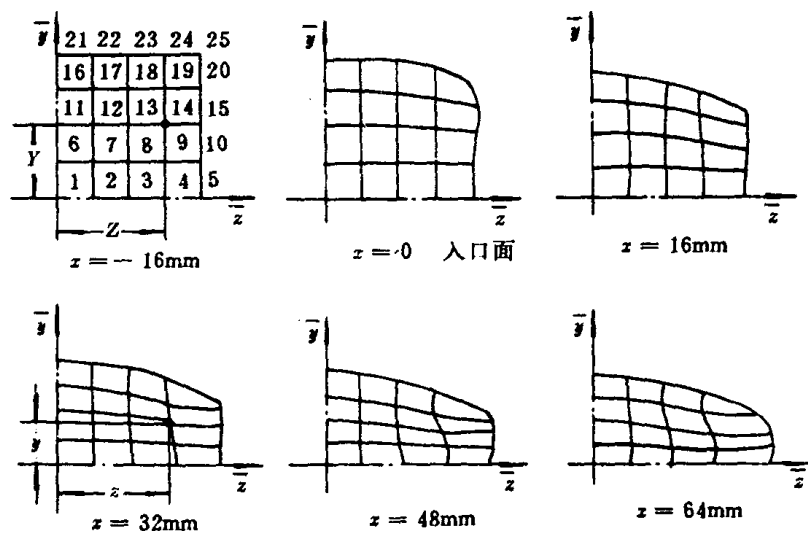


图 1-8 按间距 $\Delta x = 8\text{mm}$ 切取的断面上坐标网格的变形情况

二、用孔眼法测定矢量场

将轧制试料沿纵向每隔一定间距，在高向不同层次钻制贯穿试料全宽的孔眼。轧制时，从试料的侧面进行同步照相，可以得到纵向 (x 方向) 与高向 (y 方向) 的变形景象。同步照相不仅可以决定在变形区压缩过程中轧件的高度与运动速度的变化，还可以决定距接触表面不同距离的各层的高向厚度、由侧面观察到的宽向宽度与运动速度的变化。

O. Г. Музалевский⁽⁸⁾ 利用上述方法，研究了变形场，绘制在宽度 b 为 $b = b, b/4, b/2$ 的

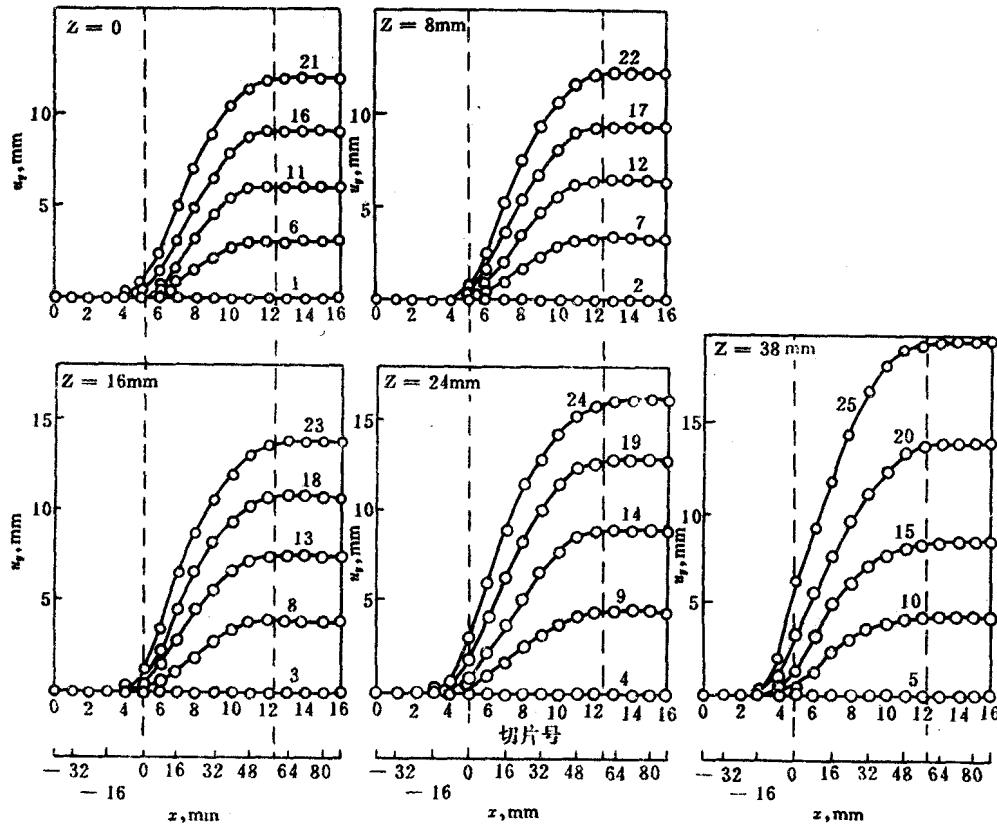


图 1-9 试料断面上各点 (曲线上数字为图 1-8 所示的点号) 沿实际变形区长向的垂直位移变化

变形区纵断面上的变形 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 等值线场。

采用流经各层相邻断面的秒体积相等条件, 有:

$$h_n b_n v_n = h_{n+1} b_{n+1} v_{n+1} \quad (1-6)$$

利用式 (1-6) 求得横变形系数 β :

$$\beta = \frac{h_n v_n}{h_{n+1} v_{n+1}} = \frac{b_{n+1}}{b_n} \quad (1-7)$$

他按上述方法, 得到图 1-16 所示的 $b, b/4, b/2$ 断面上的 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 等值线图。

三、刻痕法

刻痕法是在试料表面上刻制纵向或横向条纹, 也可在试料内部某个研究面上刻制条纹, 而后粘合成组合试料。测定变形前后条纹的变化, 便可求出位移、变形、变形速度、滑动速度等矢量参数与它们的分布场。此外, 还可以通过变形与应力的关系, 计算应力与绘制应力等值线。

这里只讨论用刻痕法测定挤压过程的位移和速度。

И. И. Полухин 等⁽⁹⁾利用刻痕法研究了难熔合金 Mo, W 及不锈钢等挤压过程的位移与变形速度的分布。

将直径 75mm 的试样, 顺轴切成两半, 并研磨两个切面, 而后在一个半块试料的切面上刻制纵线, 间距为 3mm; 在另一个半块试料的切面上刻横线, 间距也是 3mm。间距误差为

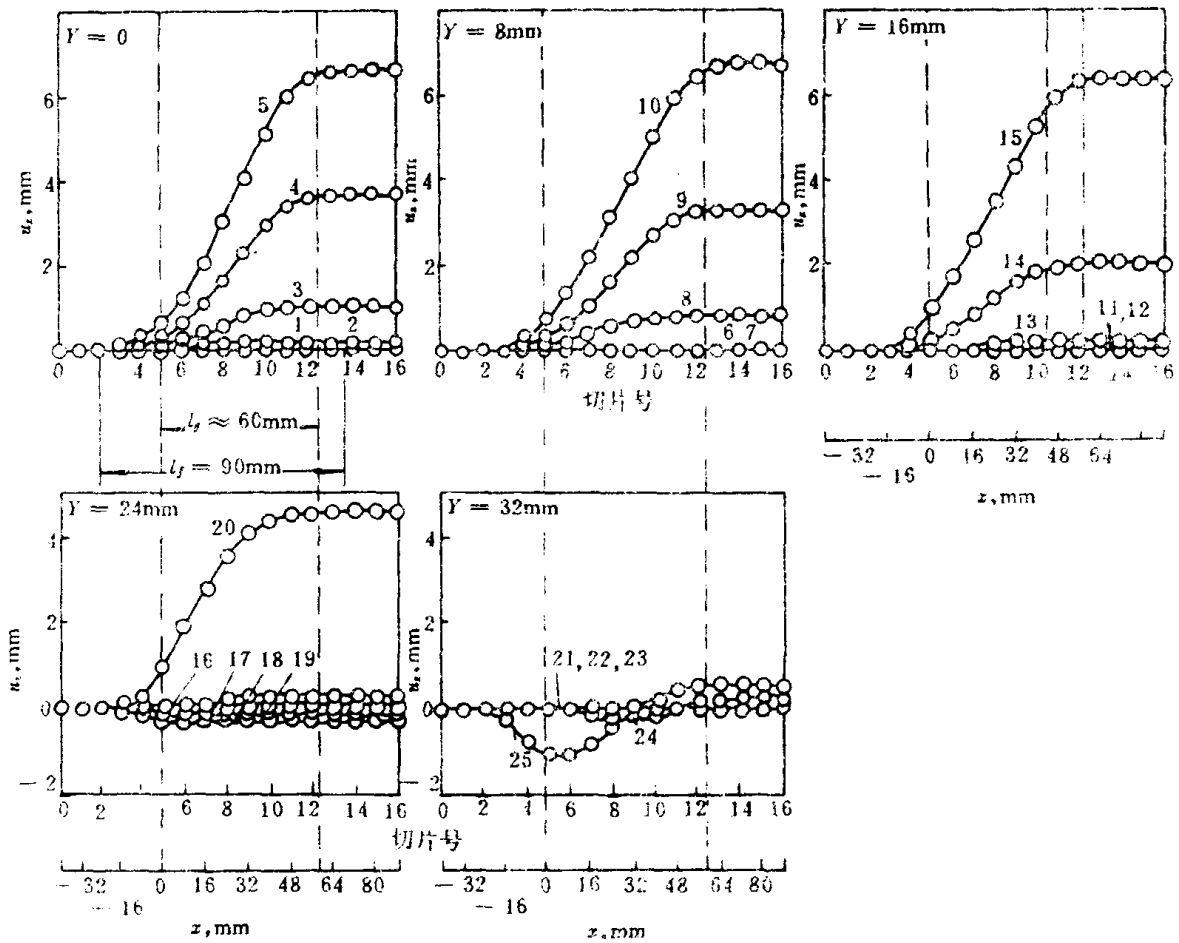


图 1-10 试料断面上各点沿实际变形区长向的横向位移（宽展方向位移）变化

±0.1mm。

试料刻线组合之前，切面之间介以厚 0.1mm 的软，以防止热态挤压时切面焊接。组合后置于不锈钢套管中。

不锈钢试料在加热之后，于大气气氛中挤压；而 Mo 试料分别按在大气气氛中（I）、真空中（II）以及在惰性气氛中（III）等三种方案进行挤压。

用 Z, R 表示变形前的线条间距，其中 Z 表示沿 Oz 轴方向， R 表示沿 Or 轴方向；用 z, r 表示变形后的线条间距。测定点的坐标用脚标 ij 表示，则 Oz 轴方向的位移为：

$$(u_z)_{ij} = z_{ij} - Z_{ij}$$

Or 轴方向的位移为：

$$(u_r)_{ij} = r_{ij} - R_{ij}$$

利用变形时的位移函数 $u_i = f(z)$ ，求得偏导数 $\frac{\partial u_i}{\partial z}$ ，而后求得沿 Oz 轴方向的变形速度 ξ_z 。

图 1-17 表示挤压变形时的线条变化。图 1-18 表示线条间距不变的实际位移沿变形区长向的变化；以及划分成 n 个断面、间距为 3mm 的线条间距变化情况位移沿变形区长向的分布。

图 1-19 表示不同气氛条件下的 Mo 与不锈钢挤压变形时，变形速度沿变形区长向的分

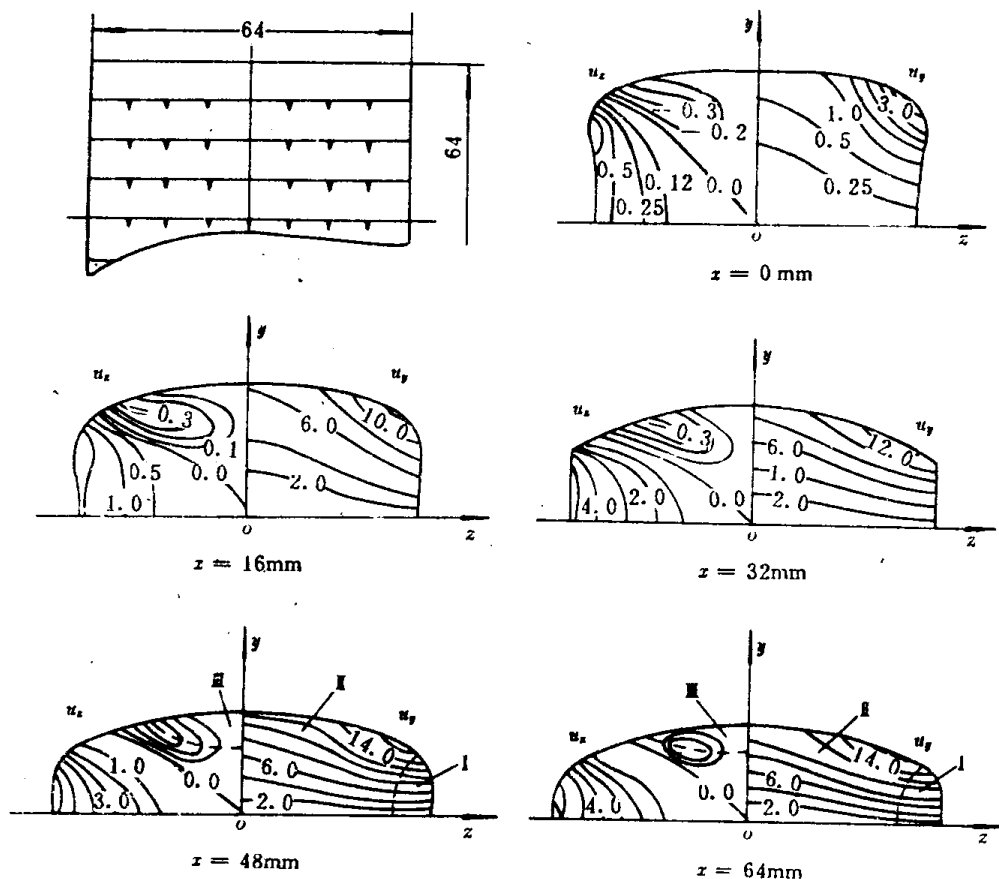


图 1-11 纵向不同位置切片的断面上，高向位移 (u_y) 与横向位移 (u_x) 等值线场

布。

可以看出，图 1-18，图 1-19 经过处理、按线条间距变化求得的一维平均位移、变形速度分布场。

产生图 1-18 与图 1-19 中曲线之间的差别的主要原因在于试料材质和气氛不同。

如果对切面上各点按 Oz 与 Or 坐标测定，则可得到位移或变形速度的平面分布场。

1-1-2 用压针法测定接触表面上的单位压力分布

通常用压针法测定接触表面上的单位压力与单位摩擦力。在这种情况下，使用的轧辊是由基体与扇形镶块组成的复合辊，压针置于镶块内，压针的尖端伸出辊面 $1\sim 3\mu\text{m}$ ，个别情况达到 $15\mu\text{m}$ 。处于轧辊横断面径向位置的压针用以测定单位压力；倾斜放置的压针用以测定单位摩擦力。

压针由针尖、一般用应变电阻丝制成的传感器、伸出量调节器、以及固定装置与支持装置等五个部分组成。

压针法测得的单位压力，实质上是被塑性加工的金属材料对压针的反作用力，这种力作用于压针使之发生弹性变形，导致传感器中电阻值发生变化。利用示波器记录这种电阻值的变化信息，经过处理以及参照事先标定的力与电阻信息变化的关系——标定曲线，换成单位压力。

压针法已应用相当久了，早在 1933 年，E. Siebel 与 W. Lueg 使用这种方法测定了冷轧时的单位压力，其中一例为图 1-20 所示的单位压力在接触表面上的分布场^[11]。