

金属塑性成型力学导论

〔波兰〕 沃·什彻平斯基 著

徐秉业、刘信声、孙学伟 译



机械工业出版社

本书系统地阐述了利用特征线方程研究金属塑性成型规律的方法。书中介绍了数学塑性流动理论的基本内容以及近年来研究的新成就；给出了金属塑性成型工序中的压入、镦粗、拉拔、挤压、冲孔、模锻、复合挤压和冲孔的解，讨论了轴对称壳体成型、具有任意双向曲率的薄壁壳的拉拔和拉伸成型，研究了圆管拉拔的动力解。书中主要内容是作者自己的研究成果，这些结果在工程实际中具有应用价值。本书可供机械、航空、造船、力学等专业的大学生、研究生作为参考书，也可供上述专业工程技术人员参考。

**Introduction to the mechanics of
plastic forming of metals**

Wojciech Szczepiński

PWN-Polish Scientific Publishers

Sijthoff & Noordhoff International Publishers

1979

* * *

金属塑性成型力学导论

〔波兰〕沃·什彻平斯基 著

徐秉业、刘信声、孙学伟 译

*

责任编辑：孙祥根

封面设计：方芬

*

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证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 $1/32$ ·印张 10 $7/8$ ·字数 284 千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 0,001—2,800·定价：3.40元

*

统一书号：15033·6977

译者的话

由波兰科学院通讯院士沃·什彻平斯基所编著的《金属塑性成型力学导论》是一本很有特色的专著。

这本书用精炼的文字介绍了应用于塑性成型方面的有关塑性力学的基本理论，并介绍了作者在塑性本构关系方面的研究工作中所取得的一些新结果。

这本书用清晰的文字阐述了一个精确的方法，用于分析金属在塑性变形过程中应力和应变速度分布的规律。由于数学塑性流动理论的发展，可以使塑性成型过程的分析建立在更可靠的基础上。书中没有讨论那些在一般专著中可以找到的近似方法，而是详细地讨论了压入、压缩，发生在平面流动和轴对称情况下的拉拔、穿孔以及板料成型过程中的完全解。

这本书详尽地给出了广义平面应力状态的理论分析，并用大量新的结果说明了理论的实际意义，其中包括圆管的缩孔和扩孔、双向曲率薄壳塑性成型以及考虑材料强化效应和管壁厚度变化等新问题的新解。

沃·什彻平斯基多年从事塑性成型的研究工作，撰写了大量的科学论文和专著，他的许多研究成果不仅具有理论意义，而且有着极其重要的应用价值。本书的翻译出版对于我国读者了解他的学术思想以及近年来在这一领域中研究的新成果都是有益的。

本书的翻译分工如下：徐秉业，一、五、六、八章；刘信声，二、三、四、七章；孙学伟，九、十、十一章以及附录。译稿由译者进行了互校，最后由刘信声进行了文字上的统稿。

由于译者水平所限，不妥之处请读者指正。

前 言

金属塑性成型是工艺学的一个分支，由于收集了长期实践经验所得到的资料而取得了很大的进展。在这些进展中，理论分析所作的贡献不大。一般认为这种分析过于困难，甚至往往是不可能的。然而，在工业生产中，冷加工过程越来越重要，而对这些过程进行自动控制方面的进展，则需要掌握各种参数影响的广泛知识，并且根据改进冷加工部件的力学性质的需要，都已无疑地证实，要求更好地了解塑性成型过程的理论。这种总的趋势在近年来的最近专著中已经变得明确起来，虽然这些专著中阐述的仅仅是对于理论分析的工程近似研究。

在数学塑性理论方面的最近重要进展，使得能够在更坚实的基础上进行塑性成型过程的分析。特别是在塑性理论中已经发展了图解法，依靠这些方法对于平面应变问题和轴对称问题已经构造了滑移线和速度端图网格。这些图解法不仅能够得出所需求的力，而且也能得到塑性变形的模式，甚至于对复杂的问题也是如此。如果利用数字计算机技术，数值方法也会给出良好的结果。

本书的目的在于尽可能简单地介绍数学塑性理论的那些方法，它们能够应用于塑性成型过程的分析。在这些分析中给出了最新成就，包括某些新颖的理论结果及其实验验证。

由于本书涉及了范围很大的问题，因而没有篇幅容纳许多在工程实践中能够直接应用的表格和图。我们将尽力对应用于塑性成型过程分析的现代方法给予系统的阐述，并且希望本书对于机械工程专业的毕业生们和对于关心理论知识的机械工程师们将是有益的。

为了保持本书的一致性，在书中将不论及理论分析的近似方法，虽然这些近似方法由于其简单而在当今被广泛地应用于工程实践。关于这些近似方法的叙述，可以在书末所附作为参考资料的许多名著中找到。

目 录

第一章 金属的力学性质	1
§ 1.1 金属的塑性性质	1
§ 1.2 金属对于变形抗力的应变率效应	7
§ 1.3 理想应力-应变曲线	9
第二章 应力、应变以及流动速度	11
§ 2.1 应力状态	11
§ 2.2 应变状态	18
§ 2.3 应变率	21
§ 2.4 运动方程和平衡方程	23
第三章 屈服条件和流动法则	26
§ 3.1 概述	26
§ 3.2 Huber-Mises屈服条件	27
§ 3.3 Tresca屈服条件	29
§ 3.4 屈服条件的实验验证	31
§ 3.5 塑性变形对屈服条件的影响	34
§ 3.6 应变强化假设	40
§ 3.7 应力-应变率关系	47
§ 3.8 Drucker公设, 屈服面的外凸性	45
§ 3.9 塑性极值原理	52
§ 3.10 小结, 三维塑性流动方程	56
第四章 平面塑性流动理论	58
§ 4.1 基本关系	58
§ 4.2 应力场的确定	62
§ 4.3 滑移线的性质	66
§ 4.4 基本滑移线网格	68
§ 4.5 基本边值问题	72
§ 4.6 滑移线网格的图解法	79

§ 4.7	速度场的确定	80
§ 4.8	应力和速度间断	85
§ 4.9	速度端图	90
§ 4.10	内能耗散率非负的条件	92
第五章	压入和压缩工序	94
§ 5.1	概述	94
§ 5.2	平面冲头压入半无限空间	95
§ 5.3	两个相对的窄冲头对塑性块体的压入	102
§ 5.4	塑性块体在两块粗糙平板之间的压缩	112
§ 5.5	块体在部分粗糙平板之间的压缩	120
§ 5.6	楔体挤压	122
§ 5.7	用刀具对板条的切割	128
§ 5.8	塑性楔体受平板的压缩	131
第六章	二维稳态工序	137
§ 6.1	概述	137
§ 6.2	通过一个光滑楔形模具对平板的拉拔	137
§ 6.3	通过粗糙模具的拉拔	145
§ 6.4	具有小厚度缩减比的平板拉拔	148
§ 6.5	平板拉拔时的动力效应	150
§ 6.6	通过曲线模具的拉拔	154
§ 6.7	挤压工序	159
§ 6.8	冲轧	166
第七章	某些二维非稳态工序	171
§ 7.1	概述	171
§ 7.2	模锻	171
§ 7.3	复合挤压和冲孔	182
第八章	轴对称塑性流动	184
§ 8.1	概述	184
§ 8.2	基本关系	184
§ 8.3	应力的确定	189
§ 8.4	速度的确定	195
§ 8.5	平圆形冲头在塑性半空间的压入	197

§ 8.6	刚性锥的压入; 洛氏硬度试验	204
§ 8.7	轴对称单元的墩粗和锻压	209
§ 8.8	轴对称流动的专门问题	212
第九章	平面应力	214
§ 9.1	一般关系	214
§ 9.2	采用Huber-Mises屈服条件的平面应力方程的解	217
§ 9.3	与Huber-Mises屈服条件相关连的速度场	222
§ 9.4	速度间断	223
§ 9.5	Tresca屈服条件下平面应力方程的解	225
§ 9.6	轴对称平面应力问题	229
§ 9.7	扁平环的塑性变形	231
§ 9.8	轴对称平面应力问题的应变强化解	239
§ 9.9	圆坯料的杯形拉拔	244
第十章	平面应力条件下壳体塑性成型的轴对称问题	249
§ 10.1	概述	249
§ 10.2	稳态成型工序	251
§ 10.3	管子拉拔的动力解	260
§ 10.4	非稳态成型工序	263
§ 10.5	作为稳态过程最终阶段的非稳态过程	269
§ 10.6	从非稳态向稳态阶段过程的过渡	272
第十一章	具有任意双向曲率的薄壁壳的拉拔和 拉伸成型	276
§ 11.1	概述	276
§ 11.2	基本关系	281
§ 11.3	适用于Huber-Mises屈服准则的应力场的特征线	289
§ 11.4	与Huber-Mises屈服准则相关连的速度场的特征线	295
§ 11.5	适用于Tresca屈服准则的应力场的特征线	296
§ 11.6	与Tresca屈服准则相关连的速度场的特征线	298
§ 11.7	薄壁壳体的拉伸成型	300
§ 11.8	通过冲模的拉拔, Huber-Mises屈服条件	303
§ 11.9	通过冲模的拉拔, Tresca屈服条件	308
§ 11.10	通过冲模的拉拔, 冲模和板界面上摩擦力的影响	311

附录	316
一	316
二	318
文献	322
补充文献	329
著者索引	330
名词索引	333

第一章 金属的力学性质

§ 1.1 金属的塑性性质

工业上大多数承受塑性成型加工的金属都具有多晶结构。也就是说这些金属是由大量的在空间随机排列的、相对很小的晶体颗粒所组成。每个晶体的颗粒按其结晶方向而表现出各向异性的力学性质。然而，多晶金属在退火情况下，由于大量细小晶粒的随机排列而表现为近似的各向同性。通常，多晶体较单晶体对变形有更大的抗力。例如，图 1 所给出的锌的应力-应变曲线特别能说明这一现象〔4〕。很多因素被认为是造成单晶及多晶金属成型性差别的原因，但多晶集体中晶粒边界有关的复合效应是起主要作用的。

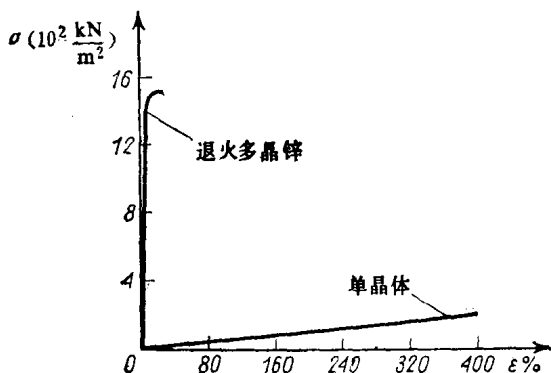


图 1 锌的应力-应变曲线(引自 C. F. Elam, 见〔4〕)

使用单向拉伸的标准试件是最常用的测试金属力学性质的方法。而对相对短的实心圆柱的压缩以及对薄壁圆管试件的扭转也都是在实际中常用的方法。根据拉伸试验，可以由加载力 P 与伸

长 Δl 的曲线图得到应力-应变曲线。通常使用两种应变的度量方法。如果拉伸试件的长度由 l_0 增长至 l ，则变形量可用名义应变度量， $e = (l - l_0)/l_0$ ，或用对数(自然)应变度量，而后者是按试件瞬时长度所得到应变增量的相加而得到的， $\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} =$

$\ln(l/l_0)$ 。这两种度量方法之间存在一个简单的关系： $\varepsilon = \ln(1 + e)$ 。通常取加载力 P 除以试件的初始横截面积作为应力的量度，即 $\sigma_0 = P/A_0$ 。这样的应力计量方法并不能反映真实的应力，因为实际上横截面积在逐步减小。在试验的最后阶段，当试件的某一区段发生局部颈缩时其横断面积将减小特别多，颈缩时伴有名义应力 $\sigma_0 = P/A_0$ 的典型降低。然而，假如取加载力 P 除以即时最小横截面积 A_{min} 的商作为计量应力 $\sigma_r = P/A_{min}$ ，则应力-应变曲线将继续增加直至发生断裂(图2)。通常，在颈缩形成之后， σ_r -曲线的斜率增加，这与在颈缩区域所产生的三维应力状态有关。

在有关材料试验的专著中(见[92])给出了这一现象的详尽分析。因为它对于金属成型理论并不太重要，所以这里不阐述它。如果在颈缩时，将应力状态的三维性计算在内，就可以得到表示变形材料特性的正确的 σ 曲线。

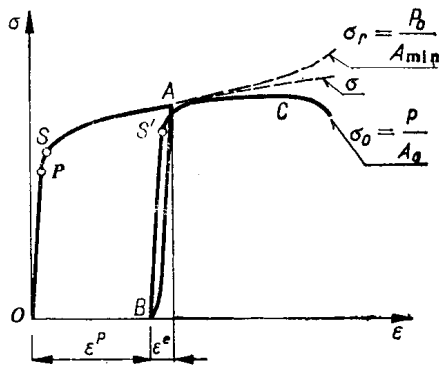


图2 金属的应力-应变曲线

现在我们来分析 σ , ε 坐标系中拉伸曲线的主要性质。曲线的起始部分 OP 是线性的。这一部分的终点 P 代表着称之为**比例极限**的应力。在这一范围内，变形是弹性的，当卸掉载荷时，变形将消失。当弹性变形稍微超出 OP 后，便开始出现塑性(永久性)变形。这时的应力大于比例极限。这一应力相当于拉伸曲线

上的 S 点，其纵坐标决定弹性极限。精确测定弹性极限是相当困难的，并且测量要取决于量测装置的精度。为了清晰起见，已经引入了名义弹性极限的概念。名义弹性极限表示伴有某一很小的永久变形的应力水平，永久变形通常等于 0.01% 或 0.02%。因此名义弹性极限分别表示为 $\sigma_{0.01}$ 或 $\sigma_{0.02}$ 。要进一步增加塑性变形必须增大载荷。这一非常重要的效应称为材料的应变强化。这一部分应力-应变曲线的斜率 $c_1 = d\sigma/d\varepsilon$ 被称为强化模量。只要研究一下对预先已变形至某一定点 A 的试件进行卸载并重新加载，则这个术语的物理意义是很明确的。在由 A 向 B 卸载期间，某一小部分变形消失，它代表应变的弹性部分 ε' 。其余的应变构成应变的塑性部分 ε'' 。假如再对试件加载，直到某一点 S' 的变形为弹性的。由于对应于 S' 的应力水平比对应于 S 处的应力高，故已产生过塑性变形的材料其弹性极限将增高。在稍微增大加载力时，材料又开始塑性变形。要注意到在短的急弯过渡段之后，曲线变成一条与卸载前所得到的应力-应变曲线起始部分的延长线。假如在达到点 A 后连续不间断地加载，这两条线实际上是重合的。

有些金属，例如软钢、某些铝合金、多晶钨和多晶钨显示某种特殊的应力-应变图（图 3）。应力在达到 G 点后突然下降，应力 σ_u 称为上屈服点。然后材料几乎是在恒定应力值 σ_l 下产生塑性变形， σ_l 称为下屈服点。曲线的其余部分与图 2 相似。上屈服点的大小主要取决于进行拉伸试验的条件，而下屈服点则为一固定值。

对于拉伸曲线如图 2 所示类型的材料，确定其屈服点将产生某些困难。在工程实践中，常应用名义屈服点 $\sigma_{0.2}$ ，它等于产生 0.2% 的永久变形时的应力。

通常，金属在压缩时，与被拉

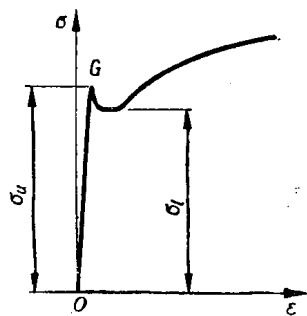


图 3 低碳钢、某些铝合金、多晶钨及多晶钨的应力-应变曲线

伸时一样具有同样的应力-应变曲线，只是改变了应力和应变的符号。然而假如对预先产生过拉伸塑性变形的材料，进行压缩，则材料表现出不同的性质。拉伸加载至点 A (图 4)，卸载至点 B 后压缩，引起试件的缩短。假如现在将 BC 段移动至 BC' 的位置，则可看出它在拉伸曲线 OAE 的下面。而更明显的是点 S'' 的纵坐标与预先拉伸后再拉伸时所对应的点 (图 2) 的纵坐标的区别。这种现象称为 Bauschinger 效应，它也可以在一些塑性预应变金属材料的可逆扭转试验和其它复杂加载试验中观察到。这种效应对于阐述应变强化假说是很重要的，在第三章里对此将进行详细讨论。

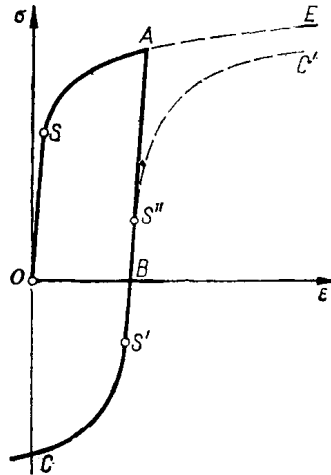


图 4 Bauschinger 效应示意图。曲线 BC 移至 BC' 位置

应力应变曲线与试验温度密切相关。当温度升得足够高时，可以得到相当低的屈服点和相当低的曲线本身。这种现象被广泛地应用到金属塑性成形的实践中。图 5 表示低碳钢在不同温度下的拉伸曲线。在 100°C 和 200°C 的温度下，观察到屈服点稍有上升，但从 300°C 开始，屈服点明显下降。如图 6 所示，铜产生塑性变形时所需要的应力总是随着温度的增加而降低。

对各种塑性成型的理论分析需要了解金属的塑性质，而利用拉伸试验的方法确定这些性质并不是很理想的，这种试验的主要缺点是在相对小的塑性变形下即能发生颈缩而失去稳定性。颈缩时应力状态的三维性质，增加了问题的复杂性因而难于解释试验结果。虽然应力-应变曲线的结束部分都可以用各自的计算方法〔21, 12〕进行修正，因而应力状态的三维性质可以被忽略，然而在相对小的变形下试件断裂仍然是拉伸试验的主要弱点。试

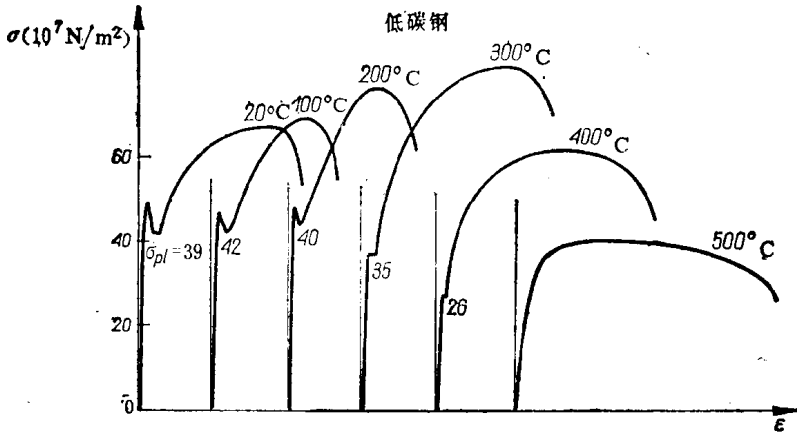


图 5 低碳钢在不同温度下的拉伸曲线

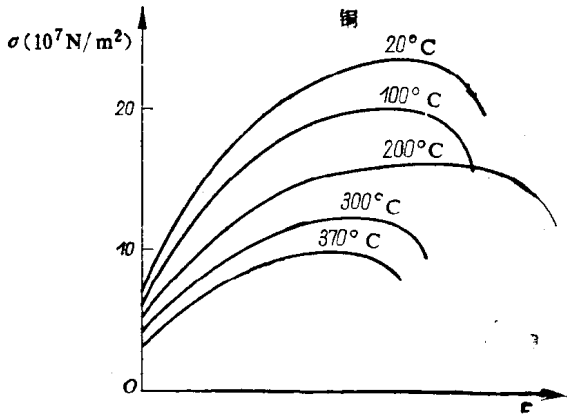


图 6 铜在不同温度下的拉伸曲线

件总的伸长大部分集中在颈缩区域，因而在颈缩开始形成之前所达到的所谓**均匀变形**，其大小通常不超过百分之几。在塑性成型过程中，在多数情况下，尤其是在压应力占优势时，变形显著地大。由于这一原因，那些能得到应变尽可能大的应力-应变曲线的材料试验方法具有很大的实际意义。

限于篇幅，我们不可能在这里叙述所有的多种多样的试验方法，它们可以在一些专著中找到。然而，有两种方法由于其特别

灵巧简便所以简述如下。文献[35]中采用扁平圆环试件，试件如图7的下部所示，在两个冲头之间扭转试件。此外试件还在两个冲头之间受到沿试验装置轴向作用力的压缩作用。用一内部的芯轴和外圆环以防止材料沿径向流动。在两个冲头的接触面上，制有很多刻纹以防止在试件与冲头结合面上相互滑动。在开始扭转之前，试件受到一个大的轴向力的压缩。然后两个冲头开始以相反的方向缓慢旋转，扭转压在冲头之间的试件，在试验时，自动记录扭矩与角度的曲线。如压缩力选择得合适，可以得到高达百分之几千的很大的剪应变。因为所涉及的变形如此之大，人们能够推测到，由于很大压应力而出现的直接结合，而连续发生局部内聚力减小的过程。图8给出了铜的扭矩与变形的曲线。可以清楚地看到在超过某一变形值后，材料没有显示出任何的应变强化效应，它的性质就象理想塑性材料一样。

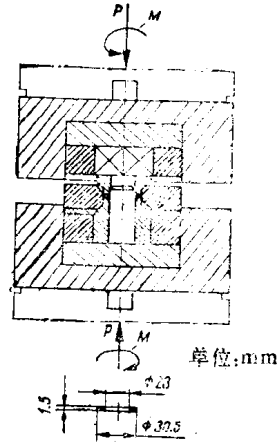


图7 扁圆环试件的扭转试验装置（引自 S. Erbel[35]）

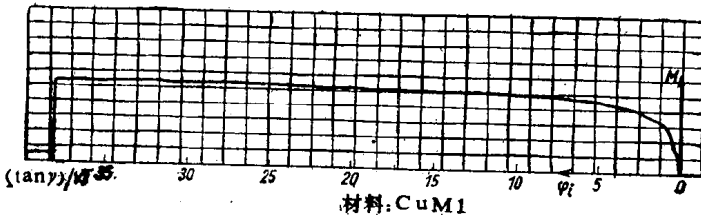


图8 扭矩-剪切角曲线（引自 S. Erbel[35]）

文献[83]中所用方法是扭转一个外径为70mm，内径为16mm的薄圆盘。将圆盘的内、外缘夹持住。当两个夹具以相反方向缓慢旋转时，画在试件表面上的径向直线开始弯曲。对于一

个给定的扭矩值，其应力沿半径呈线性分布。因此根据在试件表面所得到的曲线，即可确定应力应变关系。图 9 给出了变形前、后试样上线条的照片。

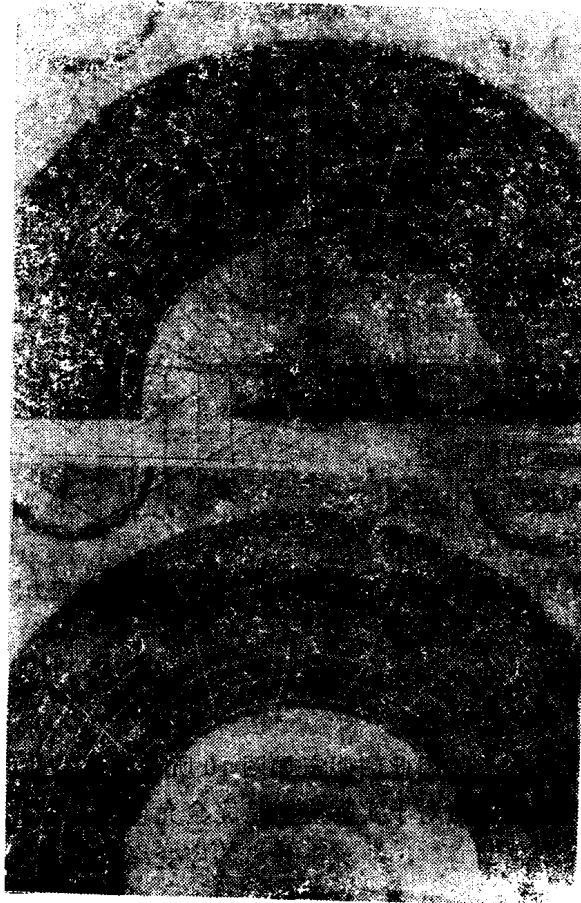


图 9 受扭圆盘的变形（引自Z. Marciniak[83]）

§ 1.2 金属对于变形抗力的应变率效应

应变率对应力-应变曲线的效应是研究塑性成型过程的重要因素之一。在多数的实用塑性成型加工中，室温下的这种效应是不太重要的。然而在高能成型时，首先是在爆破成型过程中，应

变率效应有很大的实际意义。

近来，许多著作中已经研究了应变率对于变形抗力的影响。J. F. Bell 所著的书〔5〕中对这一问题给出了极好的论述。图 10 为文献〔86〕中所给出的以不同速度压缩低碳钢试件的试验结果。用代表某一固定应变率的平面，在图 10 所示方块 \ominus 上所截出的应力-应变曲线与从以固定应变率所进行的试验所得的应力-应变曲线是一致的。

然而，更进一步的研究表明〔15, 16, 77〕，应力值不是唯一地由应变和应变率的实际值所确定，而且还与变形过程中应变率变化的历史有关。在用恒定应变率所进行的一系列试验中，即使是应变率突然由很低的值变为很高值时试验所得曲面的偏差都不大于百分之十。因此，假定如图 10 所示的那类曲面可以确定所有情况下的应力对于实际应用是完全允许的。

对于高能成型方法，研究十分高的应变率对应力-应变曲线的影响特别具有实际意义。在文献〔17〕中，对碳钢进行了这样的一些研究。其结果示于图 11 中。该图给出比例极限和破坏应力与应变率的关系曲线。当应变率超过 80s^{-1} 时，比例极限较在低应变率下所测比例极限大一倍。在高应变率时两条曲线重合，这表明应力-应变曲线是水平的，或换句话说，没有应变强化。

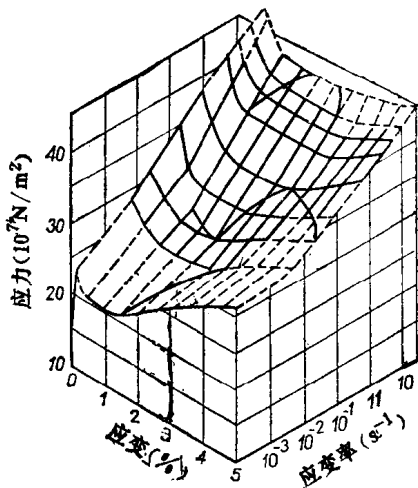


图 10 低碳钢的屈服应力随应变和应变率的变化

(引自 K. J. Marsh and J. D. Campbell〔86〕)

\ominus 这里所指的方块是由应力、应变和应变率三个互相垂直的轴线所组成的立方体。——译者注

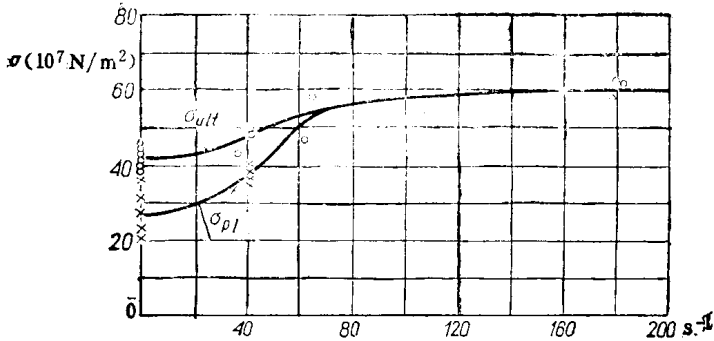


图11 低碳钢的屈服点随着应变率的变化

(引自D. S. Clark、P. E. Duwez[17])

在较高温度下，变形的金属应变率效应明显地比室温下要强烈些。对于镍钢在温度为 $500^{\circ}C$ 尽管使用的是标准塑性成型的应变率值，变形阻力的增加也是十分明显的。因此在这种情况下，在理论分析时不能忽略这种效应。

§ 1.3 理想应力-应变曲线

在塑性成型理论的很多问题中，对真实的应力-应变关系进行计算，将导致数学上十分复杂的解。由于这一原因，作出简化的应力-应变曲线是普遍采用的作法。这种简化一方面把材料的性质理想化，另一方面又能获得有效的解答。最普通的简化方法是忽略弹性变形。因为在大多数的塑性成型过程中，塑性变形较弹性变形大两个数量级，所以这种作法对物理真实性的偏离不会太远。更进一步的简化则和应力-应变曲线的塑性范围有关。最粗略的简化是假定一理想刚塑性材料（图 12 a）。对于材料的这种理想化模型，拉伸试件在轴向应力等于 σ_{pl} 以前完全是刚性的，在应力达到 σ_{pl} 时，材料在不变的应力下流动。图 12 a 中所示的方框图表明，对于这种材料模型，没有应变率效应对变形抗力的影响。如果除去载荷，材料不会回弹。因此全部应变为永久应变。刚塑性材料模型在实际应用中是很有用的，可用以求解