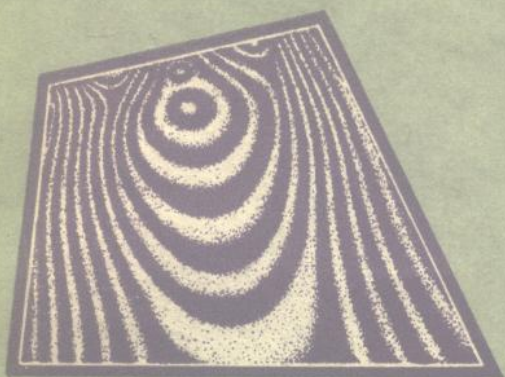




E. II. 翁克索夫

塑性的工程理论

科学出版社

塑性的工程理论

E. II. 翁克索夫 著

秦 开 宗 译

3457/32

科学出版社

1963

Е. П. УНКСОВ
ИНЖЕНЕРНАЯ ТЕОРИЯ
ПЛАСТИЧНОСТИ

Машгиз
1959

內 容 簡 介

塑性力学在工程上的实际应用,至今还是一門比較年輕的学科。主要的問題是缺乏一种既能普遍应用,又不嫌計算过于繁复的計算公式。

本书是 Е. П. 翁克索夫(Унксoв)总结了以前的理論和經驗公式,結合他本人的研究成果写出的。书中对金属压力加工各种基本变形状态的計算有詳尽的論述和新穎的見解。

第一至三章敘述塑性变形的物理基础及其影响,第四、五两章論述了塑性力学的基本原理,以下各章是塑性力学在各种基本变形形式上的应用,其中列举并比較了各种計算方法、实验研究方法和研究成果,并得出了切合实际情形的計算公式。

本书可作为鍛压生产方面的工程技术人员和研究工作者,以及金属压力加工专业教师和学生的参考书。

塑 性 的 工 程 理 论

Е. П. 翁克索夫 著
秦 开 宗 譯

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可證出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

1963 年 2 月第 一 版

1963 年 2 月第一次印刷

(京) 0001—2,300

书号: 2683 字数: 287,000

开本: 850×1168 1/32

印张: 10 7/8

定价: 1.80 元

目 录

前言.....	1
引言.....	3
第一章 金属的塑性变形(物理基础).....	6
金属的组织.....	6
变形.....	12
回复与重结晶.....	25
金属的蠕变.....	29
应力的张弛.....	31
结论.....	33
第二章 影响塑性变形进行的主要因素.....	35
应力状态图.....	35
变形温度.....	37
变形速度.....	42
外摩擦.....	48
第三章 变形金属,它的组织与机械性能.....	60
热塑性变形对金属的组织与机械性能的影响.....	60
冷变形对金属的组织与机械性能的影响.....	71
金属的疲劳.....	76
冷变形(冷作硬化)是提高强度的潜在能力.....	78
经过变形的金属在退火后的软化.....	81
第四章 金属的应力状态.....	83
立体应力与立体变形的普遍情形.....	83
平面应力状态.....	95
平面变形状态.....	97
綫性应力状态.....	97

平衡微分方程·····	98
近似平衡方程·····	103
第五章 塑性理論·····	111
最大切应力不变条件·····	111
变形能不变条件·····	113
塑性条件的实验鉴定·····	115
塑性的近似方程(条件)·····	120
确定变形力的实际问题的解法·····	124
关于相似定律在高变形速度下的金属热压力加工中 应用的一些意見·····	139
第六章 直角坐标中的平面問題·····	146
在压力机上鍛粗金属·····	146
在平面变形条件下在平行平板間鍛粗金属·····	147
用实验方法測定接触应力·····	152
在平面变形状态条件下鍛粗的理論分析和确定变 形力及单位压力的計算公式的推导·····	176
理論解与实验数据的比較·····	199
延伸·····	204
确定在平抵鉄上延伸时的变形力·····	215
第七章 极坐标中的平面問題·····	219
楔形鍛件在不光滑的傾斜平垫板上的鍛粗·····	219
測定接触应力的分布曲綫图·····	221
鍛粗楔形体的力学状态的分析研究·····	229
无增寬的輻压·····	243
第八章 圆柱坐标中的軸对称問題·····	248
在平面平行垫板上鍛粗圆柱形鍛件·····	248
用实验方法測定鍛粗时接触面上的应力·····	258
圆柱体鍛件鍛粗时变形力和单位压力的确定·····	266
第九章 圆柱坐标中的平面軸对称問題·····	277
在內压作用下的厚壁环內的应力和变形·····	277

平面应力状态的情形.....	279
平面变形状态的情形.....	283
开口冲孔.....	289
确定开口冲孔时的变形力及单位压力.....	294
第十章 球坐标中的轴对称问题.....	298
金属的挤出(挤压).....	298
确定从锥形凹模中(或锥形容器中)挤出金属时的变 形力和单位压力.....	305
第十一章 工程方法在解决某些实际问题上的应用.....	313
体积热模锻的基本原理.....	313
飞边对锻模模腔的充满及所需的模锻单位压力数值 的影响.....	322
结束语.....	336
参考文献.....	337

前 言

由于金属压力加工的发展，就需要有简单而方便的工艺过程计算方法。

作者在本书中所要解决的问题，就是利用确定金属平衡条件和塑性条件的近似简化方程，拟订和用实验证明所谓变形力的“工程”计算方法。

列出近似方程以确定变形力的方法早已广泛运用了。但是，有些作者并非经常考虑到近似方程的适用范围有局限性，因而常常得出不正确的结论。结果就产生了根本否定利用近似方程这个方法的合理性的观点，和将它与所谓“准确的”平衡方程与塑性方程的近似解法对立起来的观点。

本书能够证明，正确利用工程方法所得的结果，将为实验证明是正确的，而且实际上与准确方程计算的结果相符。

作者在开始修订“金属压力加工变形力的工程计算方法”这本书的第二版时，认识到这个名称没能准确地反映本书的实质。

实际上，不仅叙述变形力的计算方法是十分必要的，而且还应该叙述塑性变形机构的物理基础，以便证明有可能将各向同性连续介质的某些力学原理应用于象真实金属那样的不均匀和各向异性的物质。

此外，以前所采用的书名似乎使作者研究拟定的工程计算方法与其他各种也是用来解决上面所提问题的方法形成对立。

最后，必须指出，1955年出版的书中的材料经过了重大的修订：取消了某些章节，补充了一些章节。

根据上述理由，采用新的书名是合理的，它更确切地反映了本书的内容。

在编写本书时，作者得到了技术科学副博士 M. B. 斯德罗捷

夫(Сторожов), 技术科学博士 А. Д. 朵姆列諾夫(Томленов), 技术科学博士 И. Л. 彼尔林(Перлин)教授和其他同志提供的許多寶貴意見和建議。

引 言

近年来,我国在金属的强度和塑性方面的科学获得了巨大成就。

Н. Н. 达维琴柯夫 (Давиденков), И. А. 奥琴格 (Одинг), Я. Б. 富里特孟 (Фридман), П. О. 巴西柯夫 (Пашков), С. Т. 基西金 (Кишкин) 关于强度和塑性问题的著作; А. А. 依留辛 (Ильюшин), В. В. 索科洛夫斯基 (Соколовский), А. Ю. 依西林斯基 (Ишлинский) 在塑性的数学理论方面所作的贡献; С. И. 古勃金 (Губкин), Г. А. 斯米尔诺夫-阿良也夫 (Смирнов-Аляев), А. И. 采里柯夫 (Целиков) 等关于塑性变形的实用理论的著作,使苏联科学在强度和塑性领域内,在世界上获得了崇高的地位。

但是,当小塑性变形理论已经在解决工业建筑物的稳定性和复杂结构的强度问题上获得了广泛应用的时候,变形量较大的有限塑性变形理论却还研究得很不够,而已经得到的理论结果在金属压力加工工艺中的实际应用更是极为有限。

严格的理论解法的形式常常是很复杂的,要在生产条件下实际应用,是繁复而不方便的。因此,直到现在,在金属压力加工的实践中还应用着经验公式,而有时候这些经验公式的根据是不足的。

塑性理论的物理-金相学派和数学-力学派应该在紧密配合下综合发展,可是一直到现在,这两个学派之间还存在着一定程度的脱节现象。

某些物理-金相学派的拥护者根本否认在真实的不均匀的金属中有可能确定应力和变形之间的量的规律性,而只限于定性地研究金属变形时所发生的过程。同样,有些数学-力学派的拥护者,却简单地对对均匀和各向同性的介质的变形发生作用的规律,

无条件地推广到物理上和化学上不均匀的，并且在变形过程中性能变化的真实金属中去。

消除塑性理論的物理学派和力学学派之間目前存在的脱节現象，消除日益發展的理論和落后的压力加工工藝过程的实用計算法之間的不相称現象，是一个十分重要的課題。

塑性的实用理論的主要任务之一是确定各种金属压力加工工藝过程中变形力的真实数值。

这个問題之所以具有头等重要的意义，是因为苏联生产的大約 90% 的鋼都要經過压力加工——輾压，鍛造，冲压。巨型軋鋼設備和鍛压联合机的重量达到了几千吨。

正确确定变形力对于机器設計師和使用金属压力加工設備的工藝师來說，是同样重要的。

在准确計算变形力的基础上，設計師才有可能創造輕便而堅固的机器，不致葬送掉大量的金属。

假如能正确地計算出机器在生产时的載荷，工藝师就能促使該机器組制造出尽可能多的产品，而不会让机器发生能增加它的磨損和产生事故的过载現象。

因此，准确地确定变形力这个問題是与節約金属和提高劳动生产率的問題密切联系的。

作者试图在本书中詳細研究，并用实验来論証适用于金属压力加工基本工藝过程的变形力的工程計算方法。

这本书并不企求論述得十分完整。有一些工藝过程，其中如冷冲压，在本书中就没有加以討論。它們應該是独立研究的对象。

如果没有关于金属变形机构的正确概念，就不可能正确地运用确定变形力的計算公式，所以在本书中列入了最初三章，其中叙述了塑性变形的物理基础，分析了影响塑性变形过程的进行和影响变形金属的組織及其机械性能的主要因素。

书中大量利用了作者多年来在中央机器制造与工艺科学研究所(ЦНИИТМАШ)所进行的科学研究的成果。

在研究某些問題时，技术科学副博士 B. M. 扎瓦尔采娃

(Заварцева)和技术科学副博士 Б. Н. 巴得高夫 (Батагов) 参加了工作。

实验装置是由工程师 Н. Ф. 朋基里斯基 (Понгильский) 设计的, 而由机械师 П. Ф. 察符柯 (Цавко) 制造。

第一章 金屬的塑性变形(物理基础)

金屬的組織

無論在自然界中,無論在生产实际中,我們都不会遇到也不可能获得物理-机械性能完全一致的絕對純粹的金屬。所有工业上用的金屬都毫无例外地是合金,包含着或多或少可溶和不可溶的杂质。

只是在最近,由于采用了特殊的方法——所謂金屬的多次分区熔炼,或者金屬的多次蒸发,才成功地获得了一些最純粹的金屬,在这些金屬的一千万个基体金屬原子中含杂质原子不超过一个。

但是,我們还没有精确地了解絕對純粹的金屬的物理-机械性能,而只能借助于研究基体金屬在可溶杂质的数量逐渐减少时的性能,用推算方法把它们近似地计算出来。

研究最純粹的金屬(但不是絕對純粹的金屬)使得有根据断定,化学上絕對純粹的金屬的物理-机械性能与工业上用的金屬大不相同,即使当金屬中可溶杂质的数量微不足道时。

例如,錫在鋅中的含量从 0.5% 降低到 0.0005% 时,鋅的临界滑动应力就从 0.8 公斤/毫米²降低到 0.049 公斤/毫米²,即降低至原来的 1/16 以下。不溶杂质的影响就小得多。

現在已經了解得很清楚,絕對純金屬所具有的阻抗外力作用的能力实际上是极小的,因此不适于制造要承受很大载荷的机器零件。另一方面,大家知道,含杂质数量极少的金屬具有一系列有价值的物理-化学性能,例如抗蚀稳定性高,在酸中的溶解度低,导热与导电性能高等等。

下面凡是用到术语“金屬”或“工业金屬”,我們都是指或多或

少含有可溶杂质与不可溶杂质的金属。

所有的工业金属都是多晶体组织,即是机械、物理和化学性能各向异性的、形状不规则的互相紧紧联结在一起的微晶——晶粒的组合物。不溶杂质,常常是氧化物和硅酸盐,分布在晶粒解理的边缘,形成所谓晶体间物质。当熔融的金属在正常生产条件下冷凝时,自然就得到金属的这种存在形式。

单独一个微晶或者许多微晶的集合体的方向性可以是完全任意的。但是铸模,包括钢锭模,在浇铸钢锭时的温度比被熔化的金属低得多,它对于微晶——晶粒的第一级方向有很大的影响。大家知道,金属的结晶是从钢锭模或铸模的表面开始的。直接靠近铸模(钢锭模)表面的金属层,由于传热很快,所以就以极快的速度结晶(图1),因而这一层金属得到了细晶组织1。传热主要是在模(钢锭模)壁的法线方向上进行的,所以在以后的2层中,小微晶的轴的方向垂直于模(钢锭模)壁。

自从由凝结在靠近钢锭模壁上的金属形成了这种外壳之后,结晶过程的速度慢下来了,新形成的微晶的尺寸逐渐增大。但结晶过程的方向仍如前——从四周向中心形成大的六方树枝状结晶层3,然后又形成大树枝状结晶层4,但其轴线已稍与钢锭模壁倾斜。现在,由新形成的晶体中传出热量的表面是凝固了的微晶的周壁所形成的极不光滑的内表面了。因此,新形成的晶

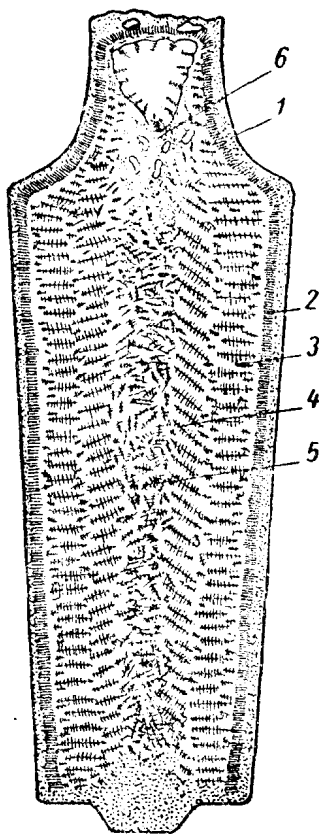


图1 钢锭的组织图[根据 Н. А. 明开维奇 (Минкевич)]

体軸綫的方向垂直于已凝固金属晶体的表面，于是微晶軸綫的方向就是任意的了(5)。

在树枝状結晶中，首先結晶的是熔液中熔点較高的成分。在树枝状結晶軸的中間結晶的是熔液中熔点較低的成分。熔化温度最低的杂质分布在鋼錠(或鑄成的零件)的冒口以下部分，由于金属在熔炼过程中所饱和的气体在这一区域的扩散作用，就形成了所謂偏析区和縮孔6。这种凝固的特点决定了金属在鋼錠或鑄件中的不同晶粒在化学成分和組織上的不均匀性。

还应该适时指出，鑄造組織有很大的疏松度，它含有大量分布在晶粒边界与微晶内部的宏观与显微空穴(气孔之类)。

組成晶粒的金属物質具有晶体組織。这就是說，金属的原子是按一定的次序分布的，并形成空間的原子格架。根据現代的观点，原子是由作为質子与中子的綜合体的原子核和圍繞原子核沿橢圓形軌道旋轉的电子羣組成的。質子是氫原子的原子核，带正电荷 1.6×10^{-19} 庫伦(取为一个单位)。

中子是不带电荷的質点，其質量与質子的質量相同。带一个单位电荷的負电質点称为电子。

不同金属的原子有不同数量的电子(因而，有不同的电子軌道)及与它数量相等的决定原子核电荷的質子。金属的物理-化学性能完全决定于形成圍繞原子核的电子云的电子軌道数¹⁾。还应该指出，原子核的直径大致为形成“电子云”的电子軌道直径的 10^{-5} 。

形式最簡單的原子空間格架是：1)面心立方格架；2)体心立方格架；3)紧密六方格架；4)四面体格架与5)斜方六面体格架。正如名称本身所表明的，前两种格架的基面是作为立方体的一面的正方形，第三种格架的基面是六方形，最后二种格架的基面是三角形和菱形。

在用于机器制造业的金属中，下列金属具有面心立方格架：銅， γ 鉄， α 鈷，鎳，鋁，鉛等。

1) 中子的数目并不总是与質子的数目相符。換言之，可能有带相同电荷而質量不同的原子核。这种被称为同位素的原子核的化学性質是一样的。

因此，原子直径之比从 0 到 0.59 的范围是对于形成插入固溶体最有利的范围；而原子直径之比从 0.85 到 1 的范围是对形成混合固溶体最有利的范围。比值在 0.59 到 0.85 的范围内一般不利于形成合金。

必須指出，碳原子直径与鉄原子直径之比等于 0.63。因此，鋼是一种过渡情况，可能鉄—碳相图的复杂性及各种同素异形的变化也就是由于这个原因。

如所周知，合金也可能是各种相的机械混合物。

假如在某一給定的温度下可以存在几种該合金的結晶形态，那末只有物質自由能是最小的一种才是稳定的形态。所有其他形态在所給定的温度下都是不稳定的——介稳定的，并且随着時間的推移（在有些情况下時間非常长），假如温度不变，必然要分解和轉变成稳定的形态。

在每一种既定的温度和外压力下，都相应有一种合金成分在另一种合金成分中的某一个一定的可溶范围，因此，饱和的固溶体在温度变化时就成为不稳定的了。例如，当温度降低时，一种成分在另一种成分中的可溶度可能降低，饱和的固溶体成了过饱和的了，于是多余的被固溶元素就分解出来，或者分解成純粹的元素，或者分解成化合物。高碳鋼冷却时（包括鍛造后的冷却）碳化鉄的析出，耐热合金鋼錠冷却时鎢与鈦的碳化物的析出等等，都可以作为这种过程的例子。

因此，单相組織（碳在鉄中的固溶体，或碳、鎢、鈦及其他合金元素在鉄中的固溶体）变成了二相組織（固溶体+碳化物）。

相反，提高温度并給以相当长時間的保温，即可使碳化物溶解，并使多余的元素扩散及均匀地分布在合金的晶粒中。

上面已經說过，在既定温度下最稳定的相是自由能最小的相。

但不能由此得出結論，一俟某一种現有的相成为不稳定时（即比稳定的相具有更大的空間格架自由能时），就馬上进行相变。有时完成相变过程的时间是如此之长，以至不能觉察出来。例如，在发掘古老的俄罗斯陵墓时，找到了在好几世紀之前就淬火成馬丁

体的宝剑,一直到现在还保持着这种不稳定的組織。

在一定体积中相变的速度决定于稳定相胚芽的产生与长大的速度。指出这一点是很有意思的,即当合金过冷到底于相变温度时,最初,胚芽产生的速度增加,但当以后繼續大大地过冷时,胚芽产生的速度就由于原子热振动的振幅减小而降低了。

假如能保証微晶有自由长大的可能,那末微晶的外部形状就将与空間格架的基元原子晶胞的外形一样。在真空中从过饱和溶液中培植出来的晶体証明了这一点。

分布在晶体表面的原子互相之間以另一种与内部原子不同的方式联系起来。这是因为在自由单晶体表面上的原子的外界面沒有相邻的原子,而多晶体的晶粒却受到相邻微晶的影响,这些相邻微晶的空間格架与晶体的主軸方向的指向都是各不相同的。微晶內层与外层原子之間的能量差,就是微晶的表面能量,一般以形成单位表面积的功来表示它。

因为在不同的晶向上微晶的性质是不同的(即微晶是各向异性的物体),所以微晶各面上的表面能量也不同。因此当結晶时晶体的形状應該是表面能量最小的。但在实际条件下,当熔融金属凝固时,一下子就出现了大量的結晶中心。原子圍繞着每一个这样的中心集結成空間格架,当圍繞着相邻的結晶中心长大起来的几个晶体的界面互相发生阻碍的时候,微晶的长大过程就终止了。因此这些微晶的界面形状是不規則的,与空間原子格架的基元晶胞和自由长大的单晶体的形状不同。因而,这时就不能保持微晶表面能量最小的原則,而在真实金属晶粒的界面上儲藏了一定量的表面能量。

真实微晶(或者甚至是在特殊条件下长大起来的单晶体)空間格架的内部組織不是理想的。譬如說,由于在某些結点上少了原子或者在基体金属空間格架的結点之間存在着某种化学元素杂质的原子,或者,还由于熔融金属不均匀冷却时产生的热力性质的应力,格架的某些部分就可能歪曲。不管怎样,在真实晶体中,这种被称为脫节的微晶空間格架的原始缺陷是存在的,并且它們互