
金属塑性变形

第一卷

中国工业出版社

01

1

金属塑性变形

· 1 ·

金属塑性变形

第一卷

塑性变形的物理-力学基础

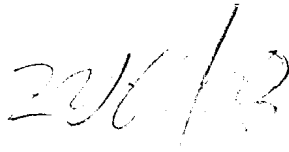
C.И.古勃金 著

张恣译 聶国珊校

中国工业出版社

“金属塑性变形”一书分三卷出版。本册是第一卷“塑性变形的物理-力学基础”。书中叙述了塑性变形的一般概念、固体的应力状态、变形状态和塑性状态的理論。

本书供科学工作者和工程技术人员参考，也可供冶金和机器制造高等工业院校的师生阅读。



С.И. Губкин
ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ
МЕТАЛЛОВ

Том I

Металлургиздат 1960

* * *

金属塑性变形

第一卷

塑性变形的物理-力学基础

张恣译 聶国珊校

*

冶金工业部科学技术情报产品标准研究所

书刊编辑室编辑（北京灯市口71号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $11^{1/16}$ · 插页2 · 字数 293,000

1963年12月北京第一版 · 1965年7月北京第二次印刷

印数2,041—4,900 · 定价（科五）1.60元

*

统一书号：15165 · 2400（冶金-398）

序

С.И. 古勃金的专著“金属塑性变形”包括三卷：第一卷“塑性变形的物理-力学基础”、第二卷“塑性的物理-化学理论”和第三卷“金属塑性加工理论”。

С.И. 古勃金还在 1946 年就开始编写的这一专著，是作者在塑性理论和塑性变形实践领域内多年工作的总结。本专著是现代科学知识的广泛概括，这种概括是建立在作者及其同事和学生集体创造的丰富的实验资料和理论资料的基础上的。

本专著的特点是综合地叙述了塑性问题，融合了塑性变形科学中各派的原则性方面，并确立了一个新部门——塑性的物理-化学理论。

С.И. 古勃金在 1955 年 8 月就完成了自己的渊博著作的原稿，但是并没有来得及最后整理付印。读者应该考虑到这种情况。

在整理本书原稿时，由于没有图书目录和插图，曾发生了很大困难。对于原稿中的大多数引文，已经能指出它们的来源。插图的选择更为困难，因为 С.И. 古勃金打算引入大量独创的插图。这些插图不得不遵照本书原文和作者的其他著作绘制出来。

在原稿的整理方面，特别是在参考文献来源和插图的选择方面，С.И. 古勃金的学生——白俄罗斯工业学院的同事们 М.А. 巴兰诺夫斯基、С.М. 巴舍耶夫、Е.И. 别里斯基、В.Н. 布拉赫、Н.Ф. 柯林尼雅柯、С.С. 柯斯丘凯维奇、Н.И. 密茨凯维奇、И.П. 莫洛萨耶夫、А.В. 莫洛奇柯夫、Р.И. 托密林、В.А. 恰依卡、Н.А. 尤尔克什托维奇，以及白俄罗斯科学院物理-技术研究所的同事们，都曾给予很大帮助。

在原稿整理付印时，曾尽力消除了原文的个别模糊和重复之处，并补充了评阅者的某些修正和建议。

С.И. 古勃金的这一专著对塑性科学和金属压力加工实践的进一步发展具有很大意义，并且对于工程技术人员和科学工作者

來說也是一部有價值的參考書。

M.B. 斯特羅惹夫

* * *

按照我已故的丈夫謝爾蓋·依萬諾維奇·古勃金在去世之前不久所表示的意願，把他的著作“金屬塑性變形”的原稿交給了 M.B. 斯特羅惹夫，以便最後完成。

M.B. 斯特羅惹夫擔任了這項巨大而繁重的工作，並完成了校訂原稿、編寫圖書目錄和訂正插圖等基本工作。大量插圖都是由他直接完成的。

我僅向保證本書有可能出版的 M.B. 斯特羅惹夫，以及編輯 B.C. 斯米爾諾夫和評閱者 И.Я. 皮爾林致以深深的衷心的感謝。

此外，並向前面提到的 С.И. 古勃金的學生，以 Н.А. 尤爾柯什托維奇和 М.А. 巴蘭諾夫斯基為首的白俄羅斯工業學院的同事們致以衷心的謝意。

E.A. 古勃金娜

目 录

緒論	1
参考文献	25

第一章 应力状态

1. 塑性流动	27
2. 应力状态的一般概念	30
3. 应力状态种类图	52

第二章 变形状态

4. 均匀变形状态	73
5. 均匀变形的几何特点	85
6. 体积不变条件	91
7. 小形变阶段上的变形	98
8. 变形特征	107
9. 变形状态张量的二次不变量	121
10. 不均匀变形状态	139
11. 物体形状的变化程度	152
12. 自由形变理論	160
13. 速度状态	182

第三章 塑性状态

14. 塑性条件	192
15. 确定塑性流动时的应力的解析方法	209
16. 确定塑性流动时的应力的实验方法	259
17. 塑性稳定性	296
18. 金属塑性变形的局部化	304

19. 附加应力定律	310
20. 塑性变形位能	316
21. 变形-外力图	327
22. 塑性变形过程的模拟	331
参 考 文 献	346

緒 論

物质的塑性現象常常出現于自然界，并且应用在技术中。

很久以来，人类就在实际应用中利用塑性，即固体在某些条件下改变自己形状而不破坏的能力。同时，塑性科学又是一个比較年輕的科学学术部門。在这个領域內，第一批科学著作出現在上一世紀七十年代之初。物质的塑性状态已經成为数学家、力学家、物理学家和化学家的研究对象。目前，正把塑性学說用来研究各种不同学科中的相应問題，例如地质学、地球物理学、岩石力学、机器零件和建筑物强度的設計和計算理論、合金理論、金属压力加工和切削加工理論、金属陶制理論、物理-化学分析、高分子化学和有机物质的化学工艺問題。

我們来簡略地研究一些最重要的問題，这些問題是各种科学和技术領域向塑性学說提出的。大家知道，金属压力加工需要很大的能量消耗、需要大批技术熟练的干部和昂貴的强力机器。

目前，用于鍛造的鋼錠重量已达 300 吨。若能建造超强力压机时，鋼錠的重量还可以大大增加，这就要求改进其他炼制操作。

在設計和使用現代金属压力加工車間时，正确地选择设备的功率，是很重要的。这就要求熟知各种加工条件下金属的变形抗力，并善于正确地計算变形力和变形功。

此外，为了改善金属的性能，必須最大限度地利用塑性变形。

解决上述問題是有可能的，因为塑性变形伴随有金属組織和性能的变化发生。

研究工作指出，切削过程理論需要建立在关于金属塑性变形的現有概念的基础上。这就可以改进切削制度，改善金属表面质量。

为了改善已制成零件的表面质量以提高其寿命，也可以利用

塑性变形。这时可以利用例如噴弹加工或用輓子冷軋表面。

已經确定，为了改进焊接和金属粉末制件的制造（金属陶制），必須采用塑性学說。

在現代技术的发展条件下，塑性物质在国民經济中的作用正不断增长着。塑性物质包括有，瀝青的、賽璐珞的、酪素的、纖維质的塑料，以及用天然树脂和合成树脂制成的塑料，这种塑料的弹性模数大于 10,000 公斤/厘米²，而断裂时的伸长率不小于 25%。

具有不同用途的塑料零件，其制造工艺在大多数情况下，与塑性变形的应用有关。在塑料变形过程中，与金属一样，形成了零件的形状，并保証一定的性能。

这就要求熟知温度、速度和变形方法对塑料物理性能的变化影响。

当对塑料进行压力加工时，可以采用在压模中挤压这样的体积模压、用压出法挤压、平板的軋制、板料的冲压和軋制，其中包括冲裁和用压出法模压。在压模中挤压是一种应用最广的塑料压力加工过程。

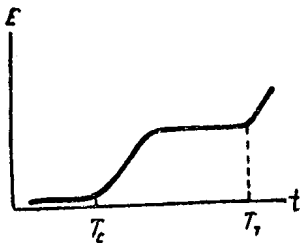


图 1 在不变载荷下变形量 E 与温度 t 的关系曲线

T_g —玻璃化温度； T_r —屈服温度

从图 1 可以看出，在一定的温度范围内，塑料表现为脆性体和弹性-脆性体。随着温度的上升，塑料变成弹性体，亦即具有进行弹性变形而不破坏的能力的物体。材料通常在压模中加热，而且其中的温度可以用温度调节器来调节。在某些情况下，在电恒温器中，在用高频电流或红外线预热的装置中，以及在用新蒸汽来加热的

装置中把挤压材料预热，是合适的。

挤压过程本身与金属在压床上的体积模鍛相似，但具有下述挤压过程所固有的特点，这个过程使金属粉末得到金属陶制零件的形状。把压成錠状的材料或粉末状的材料放在压模中，然后用

冲头对材料施加压力。在填满压模空腔后，冲头上升，拆开压模取出零件，然后清理压模。所用的压模不同于在压床上进行体积模锻时使用的锻模，也不同于挤压金属粉末时使用的压模。

在对塑料进行压力加工时，挤压的压力和最佳温度通常用试验来确定。但是，到目前为止，还没有一种专门方法能确定挤压的最佳温度以及最佳压力〔1〕。尽管塑料的压力加工不同于金属的压力加工，但在两种生产的工艺方面却有許多共同处。因此，熟悉压力加工工艺过程的方法和被用在上述两种生产中时过程本身的特点，对这两种生产的发展会是大有好处的。

塑性变形也出现在加工高弹性材料时，包括橡胶在内。这些材料的弹性模数通常不超过 200 公斤/厘米²，因此它们属于这类物体：它们的弹性变形以百分之几百来计量。弹性这样高是因为，形状的弹性变化不仅决定于物体分子间距离的变化，而且还决定于分子本身的弹性变形，这些分子好象是鏈子，它们在非应力状态下是卷曲着的，而在应力状态条件下则象是弹性地伸展开来。

在个别情况下，必须要涉及到冻胶的变形。这些冻胶中的某些种也属于高弹性体。在胶态离子结构下，高弹性变形依靠其本身的弹性变形来实现。在变形速度很小时会出现塑性流动过程，与此同时，大概由于胶态离子彼此间的相对位移，使冻胶形状发生了不可逆变化。这样的变形机理就象高温下金属的晶粒间变形一样。

值得指出的是，高弹性材料发生破坏时，可能没有塑性变形的几何标志。但是并不能把这样的破坏看成是脆性破坏，正象材料不能认为是脆性材料一样。

物质的塑性变形理论还与制取高级优质油漆有关。

油漆应当很容易从刷子上流下，但同时又不能从所涂的垂直表面上流下。为了满足这些要求，油漆应当具有能表现出来的剪切屈服极限。油漆的流变行为可以用下列方程式来表示：

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma};$$

式中 τ —— 剪切抗力；
 τ_0 —— 剪切屈服极限；
 η —— 粘度；
 r —— 剪切速度。

制取高級优质紡織材料同样与物质的塑性变形理論有关。

人造纖維的强度取决于分子的取向程度（图 2）。如果把非晶物质压过窄孔来得到半成品的塑性变形，就可以造成分子的取向。在纏繞时，纖維受到附加的拉伸，因此卷曲着的鏈子就在塑性变形过程中被矫直并且取向。結果，提高了强度和弛豫時間，而残余伸长的可能性則減小了。

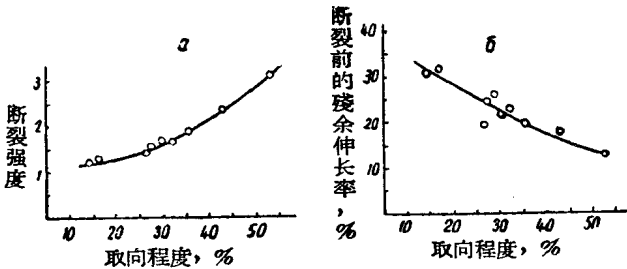


图 2 粘胶人造絲的机械强度 σ_p (a) 和断裂前的残余伸长率 (b) 与取向程度的关系曲线 (按照梅耶尔)

在解决其他材料的工艺方面的问题时，也有必要引用塑性变形理論。例如在加工泥煤时，必須要知道它的塑性变形抗力和各种因素对这一抗力的影响。已經确定，泥煤的剪切抗力与变形时产生的靜水压力值有关。順便指出，靜水压力对泥煤剪切抗力的影响程度取决于泥煤的湿度。C.C. 奥甫 欽尼柯夫曾經推定，湿度提高了的泥煤的剪切抗力实际上不由靜水压力决定，因为在这种情况下，水的薄膜包围了泥煤质点，因此破坏了它們之間的直接接触。結果，对于湿度正常的泥煤和湿度提高了的泥煤，出现了不同的变形机理。在后一种情况下，泥煤的流变行为极其接近于简单的（低分子的）非晶物质的流变行为。

研究土壤的不可逆变形，是有很大实际意义的，因为这样就

有可能比較正确地設計和使用在农业和林业中采用的各种机器。上述机器中的某些机器的用途是切开土壤或采伐各种植物。目前已經証明，在許多情况下，固体的切割过程在某种程度上伴随有塑性变形发生，而后者对过程本身会产生重大影响。因此，为了創造最合理的切割条件，研究被切割物质的塑性行为是有益的。

在各种机器的重要摩擦部件中应用固体潤滑剂，就可以最合理地使用机器。固体潤滑剂是肥皂的假冻胶，它是具有弹性-塑性性能的易变形固体。肥皂的假冻胶属于瀰散系統。潤滑剂的瀰散相由带状晶粒組成。潤滑剂的塑性变形依靠晶粒間位移来实现，并且与在高温范围内变形的多晶体金属的塑性变形有許多共同处。

Г.В. 維諾格拉多夫曾經詳細地研究过固体潤滑剂的流变行为〔2〕。这种研究不仅确定了潤滑剂的流变性能与它在机器摩擦部件中的行为的联系，而且还使我們关于塑性变形的概念更加全面，并且一般地說，对瀰散系統的物理化学也是有意义的。

塑性学說和破坏学說也引起了医学界的注意。例如，Я.В. 弗利德曼在描述金属的断裂破坏和剪切破坏的基本情况时，就曾利用过一篇医学文献做为参考資料之一〔3〕。

晶体的塑性变形通常要使其强度增加而使塑性降低。这样的变化会影响到这些晶体的电学的、磁学的和化学的性能。結晶物质的密度取决于变形条件，可能增加也可能降低。

在个别情况下，变形会改变物质的聚集状态。例如在靜止状态下表现为固体的某些冻胶（細质粘土、金属氧化物等等），受到机械的激发时就轉变为溶胶，亦即轉变为流体状态。冻胶轉变为溶胶的可逆过程，叫作触变性。

塑性变形可能引起非晶高聚合物的結晶。假如使沒有橫向鍵的橡胶承受很大的拉伸应力，它将緩慢地开始流动直到最后破坏。如果拉伸应力增加，那么流动速度也将增大，并在非晶物质开始結晶的应力下达到最大值。随后，橡胶試样就进行結晶并发生硬化。在室溫下經過变形的橡胶，当其应力状态消除后，已形

成的晶粒就要熔化。

拉伸过冷的非晶聚氯乙烯时，情况稍有不同。在室温下，这种聚合物的塑性流动过程伴随有快速结晶同时发生，并且形成稳定的结晶相，该相在应力状态消除后仍会保留下来。在这种情况下，应力状态加速了结晶过程。毛織物有不同型式的横向键，它们也可能结晶，在变形时，毛織物内有相变发生〔4〕。

所有这些例子都可以导出下述结论：变形后物质的组织和性能与它在变形前的组织和性能有本质上的区别。试验和理论指出，只有把对材料流变行为的分析和对塑性变形引起的组织变化的深入研究结合起来，才可能使材料在化学成分一定时得到良好的性能。这时不要忘记，塑性变形乃是物质的运动形式之一。物质的动力学单位（原子、分子、胶态离子、部分分子）在克服位垒的同时，从一个平衡位置转移到另一个平衡位置。这种位移只有在存在着位能梯度时才是可能的，位能可以具有不同的本质（化学的、电学的或变形的）。

在研究塑性变形引起的组织变化时，根据化学定律，最后可以导出某种理论基础来说明：材料的化学成分及其组织，怎样才能保证一定的性能，因此，在创造新材料时，就可以从通常没有基本理论计算的现行的广泛探索性研究方式，转到以预先的理论计算为基础的实验上。这将大大节省资金和时间，并促进技术的进展。

节省材料以及改进结构、建筑物和机器的必要性，对强度计算提出了更高的要求。工程师采用以弹性理论为基础的一般强度计算时，照例要使用所谓安全系数，这将使结构、建筑物和机器的重量过度增加。同时，经验证明，在许多情况下，出现不大的塑性变形是完全允许的。而且许多结构、建筑物和机器零件都承受着重复载荷，在大多数情况下是交变载荷的作用，或者不变载荷的作用。不变载荷作用的结果，可能出现蠕变破坏，而重复载荷作用的结果，则可能发生疲劳破坏。

由此可见，强度计算的新方法应当不仅以弹性变形规律为基

础，而且还以塑性变形规律为基础。

塑性学说也可以成功地应用在地质学中。作为岩层特征的剪切变形，是岩层内出现断层的原因（图3）。剪切变形也与背斜折皱、向斜折皱和伏卧褶曲的形成有关。如果用剪切变形理论来研究这些地质现象时，就可以作出关于作用力的方向、岩层的运动方向及其变形程度的结论。

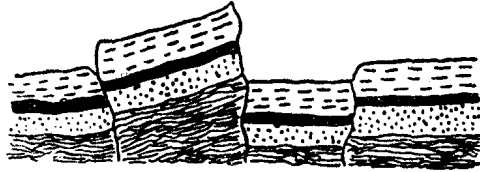


图3 岩层中出现的断层

例如，如果假设岩层在成层的开始阶段具有某一厚度，并且平行地分布着，那么该区域的地质断面就能给出岩层的形变特性和形变程度的概念。

在从地面到地心的方向上，不仅温度不断增加，而且岩石的压力也不断增高。地球物理学家找出了压力随深度变化而改变的规律。计算指出，和地球半径比较起来，甚至在到地面的不大的距离上，亦即在几十公里的距离上，压力就需以几万大气压来计量。如果这时考虑到岩石是不均匀的，那么在到地面的某一距离上，它们就处在各向不均匀压缩应力状态的条件。卡尔曼还在1912年的试验中就曾指出，象砂石和大理石这样的材料，在以几千大气压来计量各向压力时，就变成塑性材料了。

M.B. 拉斯切加耶夫在作者指导下进行工作后曾经指出，在各向不均匀压缩的条件下，可以把大理石试样压缩到大约其原始高度的80%而不破坏。由此可见，在到地面的某一距离上，岩石永远可能依靠本身的塑性流动而运动。

尤其可能的是：随着到地面的距离的增加，温度上升，因此岩石的屈服极限降低而塑性增高。化学家和地质学家观察到的盐

层的塑性流动就是上述事实的证明。这种流动正能说明盐穹的形成原因。

如果在表面地层内分布着强度比周围岩石低的比较疏松的岩石，那么处于塑性运动状态下的盐就要克服这些疏松岩石的抗力，使岩石稍微升高，并且在疏松区域内堆积起来。因此就形成了盐穹（图4）。

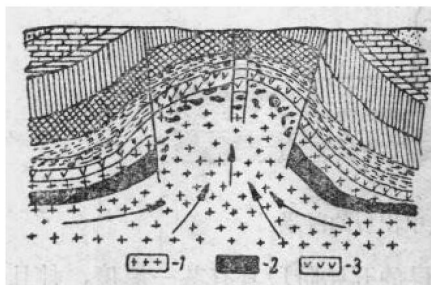


图4 奥津克盐穹的断面图
1—岩盐；2—钾盐；3—硬石膏。

看来，岩石的深成流会引起各种各样的地质上的变形现象。如果流动发生在距地面相当近的地方，正象在形成盐穹时那样，那么就可能出现表层的隆起和弯曲。在某些情况下，可以推测，塑性层流入较硬而脆的岩石，并且把这些岩石胀破而引起破坏。在另外一些情况下，塑性层可能从某些体积中流出，因此毗连着的岩石可能下沉。

除深处的塑性现象外，在地面上也会出现塑性现象：如上面提到的断层、表面岩石的各种蠕变现象、冰川的流动、火成岩和岩浆的流动。火成岩和岩浆的流动可以模拟（图5）。

在个别情况下，甚至可以对把火成岩压出所需的力的大小作

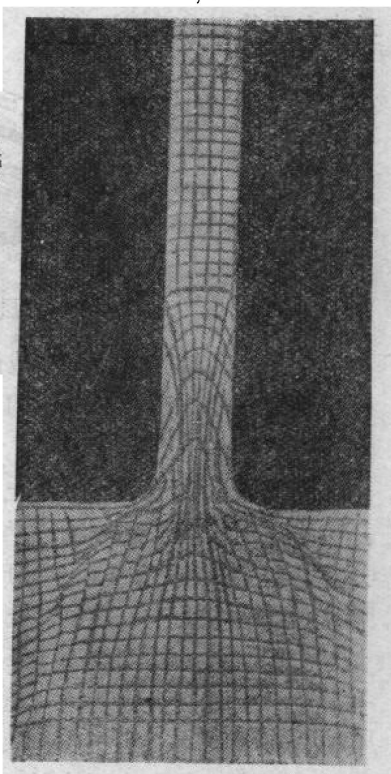


图5 火山口半流质岩石的流动模型

某种大致的推测。也可以大致描述这些岩石在流动时所承受的变形。

研究裂缝的形状和断面的形式，可以給研究者指明破坏的特性和作用力的方向。研究夹杂物的分布及其变形，可以給出所发生的变形及其方向的概念，有时甚至可以給出作用力方向的概念。我們假设，在岩石中发现有某种矿物的变形化石，并且已知它的形状；那么对化石的几何上的研究将給出变形程度和变形方向的概念。在某些情况下，甚至可以对引起变形的力的方向及其性质（拉伸、压缩）作出结论。研究夹杂物的分布情况及其形状也会得出同样结果。这可以解释某个时候所发生的物理-化学过程。这时，结晶岩石的组织具有特殊的意义。再结晶组织或带显著结构的组织的存在，能表征发生过的变形过程，从而給出对引起变形的地质现象作结论时使用的资料。因为结构的特性与变形种类有关，有时就可以按结构来确定变形种类。看组织中是否存在有再结晶痕迹，就能够使我们得到发生变形时的温度的资料。

伴随着地质现象发生的塑性变形，在动力地质学中应当看作不断改变地壳的基本因素之一，就象海洋、风等的作用这样一些因素一样。

根据岩石力学的一般原理所要解决的实际问题之一，是如何控制井下巷道中的岩石压力。现在，这个问题基本上是从弹性理论的观点来研究的。但是，有一切可能性根据塑性理论来研究它。为了解决某些问题，可以成功地引用塑性理论中的这样一些分支：如在孔周围塑性区域内的应力分布、塑性条形的压缩、塑性楔的平面平衡、塑性物质在刚性平板间的平面平衡和轴对称平衡、散粒体的平面极限平衡[5,6,7]。

索柯洛夫斯基曾经取这样一个条件作为岩石平衡方程式的基础，这个条件规定：在所研究的一点，材料的流动沿两个滑移面发生，而作用在这些平面内的法向应力值 σ 和切向应力值 τ 用下列关系联系起来：

$$|\tau| = \varphi(\sigma)。$$