

性 塑 光

С. И. 古勃金
С. И. 多布罗伏尔斯基
Б. Б. 鲍依科



科学出版社

2.55
160
0.2

性 塑 光

С. И. 古勃金
С. И. 多布罗伏尔斯基 著
Б. Б. 鮑依科

К. В. 高列夫 編

陈紹汀 俞茂鉉 譯

34549/5

科 学 出 版 社

1962

С. И. ГУБКИН

С. И. ДОБРОВОЛЬСКИЙ Б. Б. БОЙКО

ФОТОПЛАСТИЧНОСТЬ

Издательство Академии Наук Белорусской ССР

Минск

1957

內 容 簡 介

本书是一本研究塑性变形体内应力及变形分布的实验方法——光塑性方法——的专著。

全书共分六章。第一章中主要讨论了研究对象；第二章详细地介绍了光塑性方法所用的材料及某些材料的制造方法；第三章是讨论光塑性方法的一些试验技术问题，尤其是一些区别于光弹性法的一些特点；第四章研究光塑性的粘性流动问题；第五章中研究了金属压力加工中的三种主要加工工艺过程的典型例子（模锻、挤压和冲孔），作为光塑性方法的主要服务对象；第六章中叙述了光塑性方法的实际意义及远景。

本书供熟悉光弹性方法的力学、机械制造和地球物理等方面的科学研究工作者、工程技术人员以及高等学校有关专业的教师及研究生阅读。

光 塑 性

陈绍汀 俞茂铨 译

*

科学出版社出版（北京朝阳门大街117号）

北京市书刊出版业营业登记证出字第061号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

*

1962年2月第一版

书号：2463 字数：122,000

1962年2月第一次印刷

开本：850×1168 1/32

（京）00001—10,400

印张：4 3/4 插页：3

定价：0.85元

序

在1949年,本书著者之一С. И. 古勃金在白俄罗斯苏维埃社会主义共和国科学院物理技术研究所中建立了一个以研究光塑性方法为目的的实验室。

在这实验室里,С. И. 古勃金和С. И. 多布罗伏尔斯基进行了首批研究工作。部分研究结果曾发表于“苏联科学院院报”^[10,11]中。在1952年,Б. Б. 鲍伊科参加了实验室工作。

到1954年年底,已经可以作出结论,在实验室所进行的研究工作的总结上,初步解决了一个光塑性的基本问题:在粘性流动的条件下,用光塑性方法来确定应力状态。这一问题的解决说明了光塑性方法的基本特征,由此可以认为它在原则上能够作为解决有关光塑性力学问题的一个独立的研究方法。

为了最迅速地改进和运用这一有效的方法,白俄罗斯苏维埃社会主义共和国科学院物理技术研究所的学术委员会建议实验室出版了相应的专著。

所提出的工作总结了在白俄罗斯苏维埃社会主义共和国科学院院士С. И. 古勃金指导和参加下、在物理技术研究所所完成的关于光塑性方法的研究资料。

准备专著的出版工作,在作者们之间作了如下的分工:С. И. 古勃金编制了工作计划,编写第一章及第六章,并进行总校阅;Б. Б. 鲍伊科编写第四章和第五章的第二节;С. И. 多布罗伏尔斯基编写第二章和第三章以及第五章的第一和第三节。

这本著作可供熟悉光弹性方法的人阅读。

目 录

序.....	v
第一章 光塑性方法.....	1
§ 1. 光弹性.....	1
§ 2. 建立研究塑性变形时应力状态的实验方法的必要性.....	4
§ 3. 固体流变性能的分类.....	7
§ 4. 光塑性的基本任务.....	15
§ 5. 光塑性方法的基本特点.....	19
第二章 光塑性方法所用的材料.....	21
§ 1. 光弹性方法对材料的要求.....	21
§ 2. 光塑性方法对材料的要求.....	21
§ 3. 材料的分类.....	23
§ 4. 可变形材料的性质对应力分布特性的影响.....	35
第三章 实验技术的特点.....	38
§ 1. 光学装置和设备.....	38
§ 2. 模型的制作和加工.....	41
§ 3. 实验技术.....	47
§ 4. 等色线和等倾线的摄影.....	49
第四章 光塑性的粘性問題.....	51
§ 1. 粘性流动.....	51
§ 2. 在粘性流动条件下的光学各向异性.....	58
§ 3. 在粘性流动条件下平面問題的模拟的一些特点.....	72
§ 4. 最简单的粘性流动的平面問題.....	77
§ 5. 在模型边界上应力状态的特点和实验资料加工的一些方法.....	92
第五章 压力加工过程的模拟.....	98
§ 1. 模锻.....	98
§ 2. 挤压.....	116
§ 3. 冲头压入(冲孔).....	125

05740

• iii •

第六章 光塑性方法的实际意义和远景.....	136
§ 1. 光塑性方法的实际意义.....	136
§ 2. 光塑性方法的远景.....	140
参考文献.....	144

第一章 光塑性方法

§ 1. 光弹性

在目前没有一个技术部門不牵涉到弹性和塑性的应力和应变問題。研究弹性变形体的应力分布并确定这些应力的数值是现代力学中最重要的一問題之一。要从弹性理論得到这些問題的解析解答，通常就联系到解复杂的偏微分方程和寻求边界条件时的困难。尤其是在物体外形不規則以及載荷分布复杂时会出现很大的困难。在許多情况下，解决最有实际意义的一些問題上恰好引起极大的困难，例如与工作在重复和交变載荷下的零件的应力集中状态相联系的一些問題。

在上一世紀的四十年代，涅依曼 (Ф. Нейман) 从力学平衡方程式推导出“在压缩和不均匀加热的非晶体中”光綫的双折射理論，后来麦克斯韦又发展了这个理論，这个理論为建立用实验方法研究弹性介质內的应力状态奠定了基础。

上一世紀末，法国学者列日 (Леже) 在用实验方法研究弹性介质內应力的初步研究方面进行了重要的研究，这种实验方法后来被称为光弹性方法 (即得到介质在弹性变形时的应力状态图象的方法)。我国同胞，金相学的奠基者切尔諾夫 (Д. К. Чернов) 在他 1884 年 3 月 10 日的一篇题为“关于鋼鉄加工时某些新发现的总结”^[1]的报告中，对这个工作給予了很高的评价。

1912 年，按照基尔比契夫 (В. Л. Кирпичев) 教授提出的任务，扎伊采夫 (А. К. Зайцев) 設計并制造了第一台国产的用光弹性方法研究透明模型中应力的装置。这个装置曾經建立在現在的列宁格勒工学院的应用力学实验室。这种方法的詳細历史概述登載在“研究应力的光学方法会议文集”^[2]中。

光弹性方法的实质如下：由透明的光学灵敏材料制成的光学各向同性平板在不均匀的弹性变形状态下，其光学性质就变为各向异性，在引起薄板弹性变形的载荷还作用着，则此性质一直保留着。因此偏振的白光或单色光在通过承受载荷的平板时就显示出双折射效应。这种效应在于光线分解为二个在相互垂直平面上振动的光波，并且在介质中以不同的速度传播。由于速度的差别产生了光程差，其值按公式

$$R = cd(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

确定，此处 R ——光程差； d ——平板的厚度； c ——常数，称为应力光学系数，其数值与材料性质有关； σ_1 和 σ_2 ——在该点的主应力。

应当指出，最大切应力

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}.$$

在单色的圆偏振光的情形下，放置在偏振镜范围内的承受载荷的平板由于双折射效应，在板上出现了暗色条纹族，这种条纹族称为等色线（图1）。这些条纹族中的每一条条纹都是具有相同最大切应力值的点的几何轨迹。这时切应力的大小由材料的条纹值和条

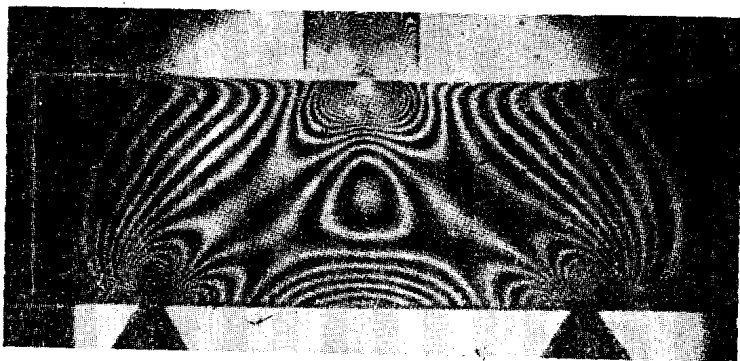


图1. 弹性的光学灵敏材料在偏振光照射下出现的暗色条纹族（等色线）

纹级数来确定。条纹级数 n 用由光的波长来表示的光程差来度量。条纹值按公式

$$\tau_0 = \frac{\tau_{\max} \cdot d}{n} \quad (2)$$

确定。确定条纹值是有一些适当的方法的。

在采用白光时,观察到的等切应力条纹有各种不同的颜色,这种颜色与最大切应力的数值有关(图2,见30页后的插页)。实践证明,在定量地确定条纹级数时,应用单色光较为方便,而在进行观察时则应用白色光,此时可得到应力分布的彩色图形。

采用平面偏振光时,在条纹图的同一底面上我们可以观察到,附加的暗色线条或区域,这些暗色线条或区域称为等倾线。等倾线是主应力方向彼此平行的点的几何轨迹,其中一个主应力的方向与偏振平面的方向一致。有了等倾线就可以作出主应力迹线网。

知道了每一点最大切应力的数值和主应力的方向以及边界条件,就可利用弹性理论的方法来确定弹性变形体内每一点的应力张量。

光弹性方法在最近几年得到了特别巨大的发展。许多科学机构的多年的工作在创立这个方法上,使它达到很完善的地步,高水平的实验技术在模型边缘上可以得到没有畸变的应力图象。这就为研究应力集中开辟了广泛的可能性,在最近积累起来的有关应力集中系数的丰富资料,已有可能说明疲劳破坏的原因,并且在许多情况下拟定消除它的方法。这些资料主要是根据光弹性方法的研究得到的。

在现代,没有其他的方法能够在时间和资金耗费较少的条件下对于应力状态进行这样极其完整和准确的研究。

在最近提出的解决三维问题的一些方法,为光弹性方法打开了更加广阔的前景。

苏联物理学家史捷班诺夫(A. B. Степанов)的研究工作对进一步发展光弹性方法有着特别巨大的意义,由于这些研究:

a) 阐明了在同一载荷条件下,各向同性和各向异性弹性介质内应力分布的不同特点^[3],对这些特点的分析可以得出结论:甚至

在所謂亞各向同性介質中（一切多晶体金属均属于这类介質），应力的分布有时也与各向同性介質內的分布有本質上的差別。因此用各向同性材料制成的模型来模拟金属零件中的应力分布时，我們并不是永远能够得到这些零件中应力实际分布的精确概念；

6) 发现了一类各向异性的結晶物質，其机械性質和結晶結構均与金属类似^[4]。卤化銀和卤化鉍以及以它們作为基础的各种合金都属于这类物質。这些物質約在 1935 年为 A. B. 史捷班諾夫所发现，他并在 1944 年苏联科学院的七月常会中发表了关于研究弹性介質內应力的一种新方法，这个方法与用透明晶体結構材料制造模型的普通光弹性方法不同。A. B. 史捷班諾夫首先建議用“透明金属”作为模型材料，他把氯化銀¹⁾、其他的銀和鉍的卤化盐以及以它們为基础的各种合金称为透明金属。

A. B. 史捷班諾夫的建議使我們可以用由“透明金属”制成的模型来模拟金属零件的弹性加载，此时比用各向同性材料制成的模型来模拟同样加载可以获得更为正确的应力分布。采用这一建議將使現在的光弹性方法得到极大的改进。

在目前工程师的創造上已經意識到光弹性方法是研究員和設計師应掌握的一种可靠而又完善的工具，在很多情况下，它能迅速而准确地解决最困难的实际問題，同时又可用来証实数学弹性理論的解答，这种証实增加了理論本身的价值。因此，在最近几年中，在光弹性方面出現了許多基本的著作，建立了許多用光弹性实验方法研究应力状态的实验室，并且为进一步的改进这个直观的方法进行了大量的工作。由于应用了这一方法，就符合了 A. K. 扎伊采夫公正的說法：使得“不可見的成为可見的”^[5]。

§ 2. 建立研究塑性变形时应力状态的 实验方法的必要性

用分析方法确定塑性变形体的应力状态时，必須应用一些数

1) A. B. 史捷班諾夫，1936 年 6 月 31 日的著者証明书 № 47829.

学工具以及有关物体机械性质的资料，前者在现在可以由数学塑性理论提供给我们，后者则由近代实验技术提供给我们来处理。但解决塑性理论问题，也象弹性理论一样，涉及解极复杂的偏微分方程，且寻找边界条件很困难。

但是在关于变形科学的现代情况下，解决塑性理论问题比解决弹性理论问题具有无可比拟的更大的困难。

这些困难可用下列情况说明之：

1. 数学塑性理论比弹性理论研究得较少，首先这是因为塑性理论还是一门比较年轻的科学，相比之下，弹性理论已是相当成熟了；其次是因为对塑性过程的物理本质的研究还不够充分。

2. 在一般情况下，寻找塑性问题的边界条件比弹性问题的要困难得多。

求解有接触摩擦的塑性变形问题^[6]会产生特别巨大的困难。因为接触摩擦无论对变形体的应力分布特性或对产生变形的力的大小都有极大的影响。在许多情形下，对于力的大小的影响与其说是由于决定金属塑性变形抗力的机械性质，不如说是由于接触摩擦的条件。正如实验指出，在各个不同情况下，用改变接触摩擦条件的方法可以使变形力减小五分之四以上。

虽然接触条件有很大的影响，但到目前为止，塑性变形时的接触摩擦规律还不很清楚。对很多实际的变形情况说，单位摩擦力是一个复杂的函数：

$$\tau_m = F(N, \tau_m, W, t_n^0), \quad (3)$$

式中 τ_m ——单位摩擦力； N ——法向压力； τ_m ——靠近接触表面处的表面层在剪切时的屈服极限； W ——表面层材料微粒的滑移速度； t_n^0 ——接触层的温度（它可以与变形体的温度不同）。

用实验来确定函数（3）有时会碰到极大的困难。

3. 描述塑性变形体的机械性能要比描述弹性变形体的更困难。

说明各向同性弹性体的机械性能只要用杨氏模数和泊松系数二个常数就可完全确定，但塑性变形体的机械性能在一般情况下，

只有用下面的复杂的函数形式才能表达：

$$\sigma_{sq} = \varphi(t^0, q, v, \sigma, x, c). \quad (4)$$

式中 σ_{sq} ——材料对变形的抗力； t^0 ——温度， $^{\circ}\text{C}$ ； q ——变形程度； v ——变形速度； σ ——平均应力； x ——化学成分； c ——变形材料的结构，一般它在塑性变形过程中会发生改变。

因此描述物体的塑性性能就不能用描述同一物体的弹性性能的完全确定的常数，而要用复杂的函数来代替，这样就使问题的解大为复杂。同时，实验技术有很大的可能来最精确地确定表示物体弹性性能的二个常数，但对准确地找出(4)式的函数形式，则还不够完善。

4. 塑性过程的本质还没有充分地研究，这就不可能考虑到随塑性变形过程中产生的并且影响到应力分布的某些现象，以致降低了准确性。

因此，关于塑性的学識在很大程度上就比关于弹性的学識更需要建立与光弹性方法类似的研究应力的实验方法。这不但在解决许多重要的塑性问题时，对节约资金和时间是必须的，而且对于塑性科学本身，特别是它的数学理论的进一步发展也是必须的。研究在塑性变形时的应力的实验方法可用来校核已有的数学生塑性理论方法，并使它更精确和完善。此外这种方法还可以丰富我们关于塑性变形本质的概念。

由于介质弹性变形而产生的双折射效应是光弹性方法的基础。但是塑性变形只能在可弹性变形的介质中才能产生和发展，这一现象是塑性变形的一个最重要的规律。由此可得出在塑性变形时也能观察到双折射效应的结论。因此就有可能建立研究塑性变形时的应力的实验方法。这种方法的基础和光弹性方法一样，是由弹性变形，亦即由于任何塑性形状改变过程所伴生的物质应力单位(原子，分子，大分子)的可逆位移而引起的双折射效应。因此这个方法和光弹性方法相似，可以称为光塑性方法(在介质塑性变形时得到应力状态图象的方法)。

光塑性方法虽然和光弹性方法以同一物理现象作为基础，但

它与光弹性方法有原則上的差別，因此是完全独立的方法。关于这点将在以后詳述。

光弹性方法是模拟弹性变形过程，并且解决在模型应力不超过弹性极限时的应力状态問題。因此模型的机械性能可用虎克定律来描述，此定律对于各向同性模型只包括二个常数——楊氏模数和泊松系数。

光塑性方法模拟塑性变形过程并解决在模型应力超过弹性极限时的应力状态問題。在这种情况下，所用模型的机械性能用塑性規律来描述。塑性規律有各种形式，它与变形材料的性質及变形条件有关。这样在光塑性方法中所用模型的机械性質可以是不相同的。因此，这个方法必須在解决与固体流变性質相适应的各种典型問題方面加以发展。

§ 3. 固体流变性能的分类

对物質在一定温度下的流变性質有充分的認識，并同时考虑到平均应力和物質破坏特征的影响，就可給出剪切抗力与变形速度、变形程度之間的关系的特性。在这种情况下，所有的固体物質可按变形特征来区分，并可提出几种流变物体，属于这一类的物体首先有：

1. 脆性物体 理想脆性物体在极微小的弹性变形下即发生破裂，并无任何流动的迹象。所謂极微小的变形应了解为小于0.001%的变形（弹性极限的技术规范之一）。如果在具有流动特征或者在0.001~1%左右的小弹性变形下破坏时，残余变形处在和弹性变形同一量級范围内，則物体是脆性的。

2. 弹性物体 理想弹性物体可以有无限大的弹性变形而没有任何流动和破坏的象征。可在大弹性变形下破坏而沒有塑性变形象征的物体称为弹性体。大弹性变形是指测量出的变形至少有百分之几十。应力和变形間的关系可以是綫性的，也可以是非綫性的。弹性物体也可以与脆性物体結合在一起，因此这可能产生弹性-脆性物体。但是，破坏如果是由于大弹性变形而引起的，則

这种破坏不能当作是脆性的。大弹性变形已经是弹性物体所固有的特殊破坏形式。

3. 粘性物体 粘性物体的主要特性如下：

a) 粘性物体的剪切抗力决定于变形速度而与其变形程度无关；

b) 在粘性物体的流动过程中，它的结构和性质没有残留的改变；

в) 粘性物体在达到某一速度之前（此速度决定于这粘性物体的本性和温度）可以有无限大的塑性变形，而没有任何整体破坏的象征。在达到这一特定的速度后，粘性物体就转化为弹性物体或转化为脆性物体。

柯别柯（П. П. Кобеко）在自己著名的著作中引用了柯尔菲里特（Корнфельд）和雷夫金（Рывкин）的有意义的实验，实验时使液体流受到与其流动方向垂直的高速冲击载荷的作用，并拍下在冲击时液体流的照片^[7]。当冲击速度为每秒 19 米时，液体流就象一个整体一样产生塑性弯曲；当冲击速度为每秒 23 米时，液体流就象脆玻璃那样发生折断，飞散为各个小块，如图 3 所清晰地指出那样。

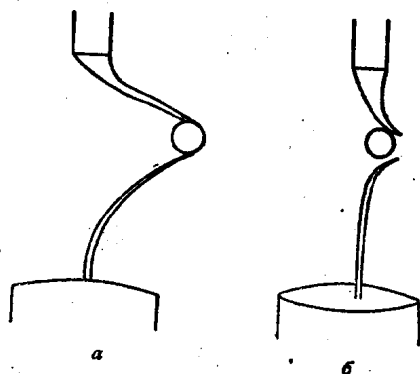


图 3. (a) 粘度为 5000 泊的液体流在畅流后受到速度为 19 米/秒的冲击时的液体流形式；
(б) 同一液体流，但冲击速度为 23 米/秒（根据柯尔菲里特和雷夫金）。

A. 纳达伊指出：一种硅化合物（聚硅氧），做成小球的形式，在自重的作用下会逐渐流散；但如将小球从 1—2 米高处抛下，则它会象理想弹性材料那样发生弹性回跳^[8]。但是弹性状态看来是可以转变的，如果增加变形速度，则小球就变为脆性物体。作者的观察也得到同样的结果，某些冻胶在极小

的速度下成为弹性-粘性体，而在超过一定速度后就成为弹性体。

粘性体的剪切抗力在同一变形速度下，很明显地与流体静压力有关。这一关系可用公式表示为

$$\tau_{\sigma} = \tau_n \cdot e^{-\alpha\sigma}, \quad (5)$$

此处 σ ——平均应力； τ_n ——当 $\sigma = 0$ 时的剪切抗力； τ_{σ} ——当平均应力为 σ 时的剪切抗力； α ——与分子量有关的函数。

公式 (5) 的表达式类似于大家熟知的粘度系数与流体静压力的关系的公式。

有必要区别出二类粘性体：液态粘性体和固态粘性体。液态粘性体的屈服极限很小，因此在自重作用下，经过一些时间后，就变成和盛它的容器一样的形状了。固态粘性体的屈服极限的大小使它在自重作用下不会变成和容器一样的形状。

粘性体的流变曲线表示在图 4 上。

4. 塑性物体 塑性体具

有下列特点：

a) 剪切抗力与变形速度无关，但与变形程度有关；

b) 在塑性变形过程中，物体会发生结构和性质的变化。

必须区别不会破坏的和会破坏的二种塑性体。不会破坏的塑性体可以有无限大的塑性变形，而没有任何整体破坏的象征；会破坏的塑性体在塑性变形的影响下脆化，并在变形达到某一程度后发生破坏。塑性脆化的物体(非塑性物体)应当与脆性物体区别开，前者可

象脆性物那样，在极小的弹性变形时破坏，而没有任何明显的塑性变形的几何象征；它与脆性体不同之处在于：只是由于预加的塑性变形才能产生破坏状态，而脆性物体在沒有预先的塑性变形下即发生

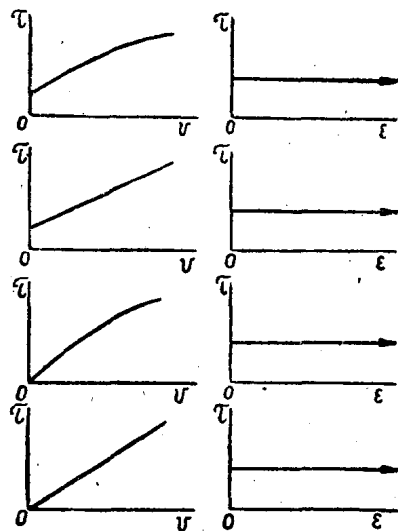


图 4. 粘性体的流变曲线
 τ ——应力； v ——变形速度； ε ——变形程度； $\rightarrow$ 无限大的塑性变形。

破坏。脆化物体和脆性物体也可由破坏特性来区分，脆化物体的破坏通常称为粘性破坏，而脆性物体的破坏则称为脆性破坏。

对不会破坏的塑性物体来说，平均应力实际上不影响其剪切抗力。对会破坏的塑性物体说，在塑性变形过程中脆化得愈厉害，则平均应力的影响就愈显著。

在图 5 中繪出了对塑性物体有代表性的流变曲线。

图 5(a) 表示不会破坏的物体的流变曲线。在初始阶段，材料的强化最强烈，随着变形程度的增加，强化程度逐渐减少，终于强化终止了，其结果使流变曲线变为平行于横坐标轴的直线。图 5(б) 的直线表示用预加塑性变形的办法而强化过的材料的性能，

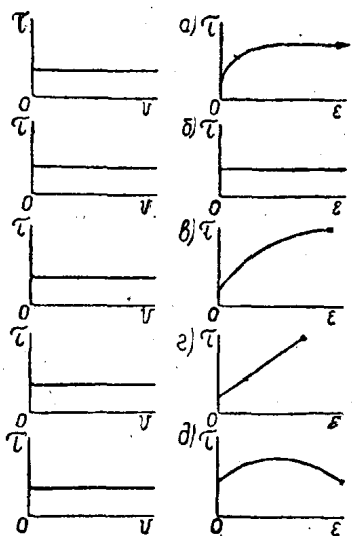


图 5. 塑性体的流变曲线

符号→表示无限大塑性变形；×表示破坏。

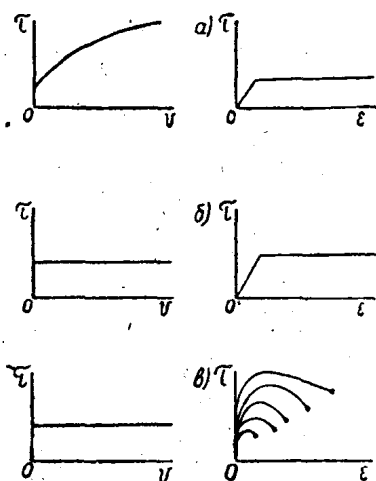


图 6. 复合体流变曲线

或者表示有屈服范围的某些强化材料在最初变形阶段的性能。具有类似于这种力学流变性能的材料常称为理想塑性体^[8]。图 5(б) 上的曲线是由于在塑性变形过程中脆化而引起破坏的塑性材料的典型性能曲线。某些个别情况下，在变形的某种阶段上可以足够精确地用图 5(а) 上的直线来代替实际流变曲线的相应部分。图

5(0) 的曲綫表示在变形过程中有急剧脆化的材料的特征。在大多数的情况下,这条曲綫表明:在这些形状改变条件下,晶間联系逐渐破坏时所产生的晶間变形是流动的主要机理¹⁾。

很明显,在自然界中,存在有各种流变物体的复合体。因此,可以恰当地說明下列各种复合体的性能:(1) 塑性-粘性的;(2) 塑性-脆性的;(3) 弹性-塑性的;(4) 弹性-粘性的;(5) 弹性-脆性的;(6) 粘性-塑性-脆性的;(7) 弹性-粘性-塑性的;(8) 弹性-塑性-脆性的;(9) 弹性-粘性-塑性-脆性的。

复合物体相应地也具有那些形成复合体的各基本流变物体的組合性能。复合物体的流变曲綫也反映出基本物体的流变曲綫的組合(見图 6)。

应当指出:弹性是自然界所有物体或多或少地所具有的;此外,流动过程只能在弹性变形物体中产生。但在很多場合中,为了簡化計算和說明物体的性能,略去弹性是合理的。譬如,在描述大多数粘性物体的性能时,弹性可以忽略不計。能否略去粘性物体的弹性甚至是区别它属于固体或液体的最重要的特征之一。例如在上面提到过的柯尔菲里特和雷夫金的实验中,曾研究过在矿物油中的松香溶液液流的性能。这种物质的粘度为 $\eta = 5 \times 10^3$ 泊,按照它的性能的所有特征的綜合,它只能被看作为液体。作者也曾处理过用松香油塑化的松香,但所用百分比与上述实验不同。这种物质的粘度为 $\eta = 2.5 \times 10^8$ 泊;因为屈服极限很小,故不能用普通的方法确定。所述物体的流变性能与图 38 中所示的图表相符。同时,按外部特征来说,这是一种固体,在力的緩慢作用下能很好地塑性变形;而在力的冲击作用下,就象脆性物体那样飞散成許多小块。上述物体可用压力加工的方法得到任何形状,但它仅经过几个月的時間就走样了。因此,按所有考虑过的特点来说,这种物体接近于固态的粘性物体。具有这样显著的弹性的物体,

1) “机理”原文为“механизм”,它的意思是指形成任何一种物理、化学以及其他等等現象的諸过程和状态的总和。——譯者注