

硬度试验科学及其应用

【美】J. H. 韦斯特布鲁克 H. 康拉德 编

李承欧 朱元珩 王福成

译

丁洪太 周培贤 孟荣祥

孟繁杰 校

中国计量出版社

内 容 提 要

本书是根据近年来各国发表的有关论述硬度试验本质的论文辑成的一本专著。书中分析了材料在硬度试验过程中所发生的宏观和微观变化,利用硬度试验结果来判定材料机械性能的方法,讨论了硬度与材料塑性流变之间的关系,硬度试验中的各向异性、表面状态以及试验温度、过程时间和环境因素对试验结果的影响等。

本书可供硬度计量、材料测试、金属物理、材料科学、冶金和机械等专业的科技工作者及大专院校有关专业的师生参考。

The Science of Hardness Testing and Its Research Applications

J. H. Westbrook and H. Conrad

American Society for Metals 1973

硬度试验科学及其应用

〔美〕 J. H. 韦斯特布鲁克 H. 康拉德 编
李承欧 朱元珩 王福成 译
丁洪太 周培贤 孟荣祥
孟繁杰 校

—*

中国计量出版社出版

(北京和平门内大街112号)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*

开本 787×1092 1/16 印张 21.5

字数 515 千字 印数 1—8 000

1987年8月第1版 1987年8月第1次印刷

统一书号 15210·759

定价 5.00 元

译 者 序

本书系根据美国 J.H. Westbrook 和 H. Conrad 编写的《硬度试验科学及其应用》(The Science of Hardness Testing and Its Research Applications) 一书译成。与一般硬度试验方面的书不同, 此书是从理论上阐明硬度试验本质的一本专著, 主要根据美国金属学会的一次学术讨论会上的论文写成, 并参考了近千种文献资料, 全面反映了近年来硬度试验方面的理论研究成果及进展情况。书中综合分析了材料在试验过程中所发生的宏观及微观变化, 深入探讨了硬度与其它机械性能之间的关系, 系统讨论了硬度试验过程中材料的塑性流变、各向异性和表面状态以及试验温度、过程时间及环境因素对试验结果的影响等。本书从理论上, 并通过大量试验结果为硬度试验提供了理论基础, 对今后硬度试验的理论研究和生产应用都有很大的参考价值。目前国内还未见到这样完整的一本硬度试验理论方面的专著。特将该书译出, 以弥补这方面的不足。

本书由李承欧(第 27~34 章)、朱元珩(第 4~15 章)、王福成(第 16~18 章)、丁洪太(第 19~21 章)、周培贤(第 22~26 章)和孟荣祥(第 1~3 章)等同志翻译。全书由孟繁杰同志审校。由于我们水平有限, 错误和不妥之处在所难免, 恳切希望读者提出批评指正。

译 者

1986 年 3 月

前 言

硬度是首先被人仔细相互比较和半定量评价的材料性能之一，甚至在金属时代和陶器时代之前，人们就因为硬度小，易于切割而选择皂石制作器皿和装饰品，因硬度大、强度高、可保持尖锐刃口而选择燧石制造刀剑、工具和武器等。人们能够从天然存在的，颜色、密度和其它更明显的属性十分相似的许多材料中进行这种选择的事实，就意味着他们能有意识地用划痕，刻伤或其它方法进行了硬度试验。但是，经过了几万年之后，人们才试图建立一种硬度值标度。有关这方面的最早记载是 Reaumur 在 1722 年的论文，其中曾描述了利用一系列矿石刻划金属的方法，这比 Mohs 几乎早一个世纪。

今天，虽然已有大量高度先进的测定材料机械性能的方法，但硬度试验的应用仍比其它任何一种试验方法都要广泛。为什么会这样呢？仅因为这种试验对新石器时代的人的诱惑力——简单、方便、无损和直接与工作性能有关等特点，对生活在今天空间时代的人并未减少。当然，硬度试验所以能在材料科学研究中仍然保持其位置还有其它原因，如象硬度试验容易在特殊的温度、压力和化学介质的条件下进行。此外，硬度试验可大大减缩试验规模，这就给利用硬度作为强度的显微探针提供了多种机会 (Gilman)。硬度试验可以施行于很小的试件，能用来检查材料化学和组织结构上的不均匀性，如扩散梯度、沉淀物、共晶组织，枝晶以及晶界等；它还可用来探测磁场、辐照或环境介质对材料表面机械特性的影响。

材料的硬度尽管有这些诱人之处和大约 300 年对其性质和技术不断进行科学研究，但至今对它的了解还十分不够，这是因为它不是一种单纯的性能，而是许多机械性能的一种整体综合指标，同时是材料本质结合力的度量标准。由于上述种种原因，硬度试验仍继续被广泛地应用于科学技术工作，处理问题的种类和完善化一天比一天增强。有鉴于此，编者曾组织了一组有关的论文提交 1971 年在 Detroit 市举行的材料工程大会，后将提交会上的论文在其原来编写基础上加以扩充，并增补了部分讨论结果和当时在 Detroit 市因种种原因未能收集到的少量短文，成为目前的这本书。

美国金属学会出版的论述硬度这个题目的前一本书，是 Williams 的专题论文集，1942 年出版，包括有将近 2000 种涉及以前文献的参考资料。从那以后，各处又出版了一些讨论硬度的论文，其中最重要的有以下诸人的著作：Tabor (1951)、Mott (1956)、Bückle (1960)、Glazov 和 Vigdorovich (1971)。每个作者都有自己的特殊观点，但都未认真尝试对全部文献加以回顾。鉴于当前硬度性能及其试验技术重新引起了科学界的重视，编者决定将该工作安排到日程上，即对硬度试验及其研究应用方面的工作进展情况进行综合讨论和估价。我们决定分八部分增补这一领域的内容，选入一些新的研究论文。根据这一计划写成的本书，包括来自法国、联邦德国、加拿大、澳大利亚、英国和苏联等国的论文资料，也包括来自美国的资料。它可以适当地反映出比美国更早、更引人注意的这方面的内容。书中涉及到大约 1000 种参考文献。

书中提供了许多崭新的、值得注意的结果，在此只能将其中的少数单独提出来加以特别说明。Weiler 根据由 12 种不同试验方法所获得的大量数据证明，对各种硬度标度之间可以

系统的、精确的、相互变换的想法是徒劳的。Böcklen 指出, 由锥体压入试验结果来度量材料的韧性是可能的, 当临时需要对小件或破碎件测定其韧性时, 这是一种可行的简便方法。有些作者曾就极硬材料(包括金刚石)的压痕变形问题提出了报告, 他们能够提出这类变形确实是真正塑性变形的证据。根据试验和计算, Gilman 要大家注意, 在载荷压头所产生的极高压力作用下很有可能发生晶体结构转变。NaCl 结构的化合物与面心立方的金属相比, 其硬度与屈服强度之比呈异常现象, 对此, Gilman 也给了一种合理的解释, 此种现象早在 15 年之前 Westbrook 就曾提到过。Atkin 证明, 对几种重要工程材料, 有效滑移系温度的变化, 化学成分配比的偏差, 都显著影响其硬度与温度的关系。一组六篇论文从硬度测量方法上提高了人们评定材料各向异性的技能, 这种技术在 1949 年 Daniel 和 Dunn 的经典论文完成以后才获得成功。最后, 给出了立方氮化硼的常温硬度的新数据, 氮化硼是硬度几乎与金刚石相等的唯一材料而且在化学性能方面还常优于金刚石。Latanision 发现, 锌的显微硬度与施加的电压高低有关。

通过对本书内容的简介可以清楚地看出, 书中报导或评述的结果提出了许多问题有待进一步研究和阐明。Gane 利用一超显微压头在电镜上所作的著名试验, 至今尚无大家都认可的解释。是位于预先存在于试件缺陷之间的污染润滑油膜呢? 还是形成的小尺寸位错环呢? 它们会引起较高的表面硬度值。某些材料, 例如碳化钨、石英、正长石及立方氮化硼等, 它们的硬度值看来都异常地落在硬度对单位体积能量, 或硬度对体积弹性模量的经验曲线上。这是因为硬度数据和能量或弹性模量数据测得太马虎呢? 还是因为要建立的这种相互关系本身太片面呢? 一个相当长的时期以来, 大家已知道金属处在高温下, 或低载荷和活性环境介质中, 非金属处在低温下, 都会发生压痕蠕变现象。但是 Chen 和 Hendrickson 却发现银在低温和轻载荷下也发生压痕蠕变, 对此尚无满意的解释。Walker 发现, 极性溶质处于高载荷和低载荷下会发生相反的效应。许多不同的研究者都曾观察到光力学效应和电力学效应, 特别是在半导体中。对于为什么一些工作者还难以使这些现象重现, 至今还没有满意的模型, 也缺乏适当的解释。在大量的各种各样的材料中, 都已发现了晶界和表面硬化现象, 并已证明这种现象与溶质和空位梯度有关。但是对怎么会发生这样大的硬度变化, 我们仍然不理解其详细模型。同理, 表面硬度的环境效应已几乎可以肯定是电荷载体在邻近表面区中强制再分布的结果, 但是对结构不同的玻璃和晶体中的类似效应, 却仍然缺乏用以说明的详细模型。

希望读者能将本书视为一本简便的资料摘要和文献指南, 视为一剂兴奋剂, 用来激励大家去研究有关硬度试验本身的一些基本材料特性并研讨与这些特性有关的许多引人入胜的科学问题。

论文集协调人和编辑

J. H. Westbrook 和 H. Conrad

目 录

译者序

前言	(1)
第一部分 硬度试验基础	(1)
第一章 硬度试验的基本原理	(1)
原理	(3)
压头夹角	(7)
讨论	(8)
参考文献	(10)
第二章 硬度值是数量呢还是特性?	(11)
测量及测量结果	(12)
参考文献	(14)
第三章 利用硬度试验研究单晶体的塑性变形	(15)
硬度试验	(15)
硬度试验在不同机械特性材料上的应用	(16)
用来研究韧性材料	(16)
用来研究半脆性材料	(17)
应用于研究脆性材料	(22)
参考文献	(32)
第二部分 硬度和流变的关系	(36)
第四章 硬度——一种强度的显微探针	(36)
压入过程的某些复杂性	(36)
决定硬度值的基本因素	(40)
作为研究工具的硬度(动态屈服)	(46)
对于进一步工作的建议	(48)
讨论	(48)
参考文献	(50)
第五章 用压痕硬度法实际测定流变曲线	(51)
目前情况及方法 1	(52)
用方程式 1 结合已知的变形定律确定 C_0 和 e_0 ——方法 2	(53)
就弹性效应而论在不同强度水平的硬度相关性——方法 3	(56)
求 C_0 和 e_0 的其它方法	(56)
总结	(60)
讨论	(60)
参考文献	(61)
第六章 热加工金属的室温硬度与流变应力的关系	(62)
实验方法和结果	(62)

讨论	(63)
结论	(65)
参考文献	(66)
第七章 球化钢的压痕硬度测定	(66)
实验方法	(67)
结果和讨论	(67)
结论	(71)
参考文献	(72)
第八章 由 100° 的圆锥压痕判断韧性的简单方法	(73)
讨论	(77)
参考文献	(77)
第九章 陶瓷的力学效应与硬度的关系	(77)
硬度与机械加工效应的关系	(78)
硬度与单晶体强度的关系	(80)
硬度与抗拉强度的 Petch 截距值的关系	(81)
硬度与抗压强度的关系	(82)
讨论	(86)
概要与结论	(87)
参考文献	(88)
第十章 单晶体硬度中的尺寸效应	(89)
讨论	(95)
参考文献	(97)
第三部分 各向异性	(98)
第十一章 用硬度压痕法研究各向异性材料的塑性	(98)
压入试验的一些特点	(98)
塑性研究情况	(100)
实验观察和讨论	(104)
概要和结论	(109)
讨论	(109)
参考文献	(110)
第十二章 努氏硬度的各向异性理论	(111)
分析	(111)
结果和讨论	(112)
结论	(113)
讨论	(114)
参考文献	(114)
第十三章 晶体显微硬度的各向异性	(114)
KHN 和 DPHN 各向异性	(115)
MgO 的显微硬度各向异性	(118)
概要	(121)
讨论	(121)

参考文献	(123)
第十四章 由努氏硬度试验确定的钨的{110}和{112}系滑移与温度的关系	(123)
实验方法	(123)
实验结果	(124)
结果分析	(125)
讨论	(127)
结论	(127)
附录1 确定真实努氏硬度的简单方法	(128)
附录2 (110)压入面上具有最大有效 Schmid 因子 (ESF) 的滑移系	(129)
参考文献	(131)
第十五章 晶态固体的硬度各向异性	(132)
氟化钙	(135)
氧化铝	(136)
立方过渡金属碳化物	(137)
金刚石	(138)
结论	(139)
参考文献	(140)
第十六章 由显微硬度分析鉴定铁单晶体中变形带的特征	(141)
实验	(141)
结果和讨论	(141)
结论	(147)
参考文献	(147)
第四部分 温度和时间的关系	(149)
第十七章 高温硬度和蠕变	(149)
相互压入	(150)
压痕硬度和蠕变	(152)
结果	(155)
参考文献	(160)
第十八章 铀-钎陶瓷材料的高温硬度试验	(160)
材料	(161)
设备	(162)
结果和讨论	(163)
参考文献	(166)
第十九章 常用耐磨材料在 20—1300℃ 范围内的显微硬度与温度的关系	(167)
参考文献	(172)
第二十章 低对应温度下的压痕蠕变	(172)
金属	(172)
非金属晶体	(174)
概要	(182)
参考文献	(183)
第二十一章 银中的显微硬度现象	(184)

实验方法.....	(184)
结果和讨论.....	(185)
结论.....	(192)
讨论.....	(193)
参考文献.....	(194)
第五部分 试验技术	(195)
第二十二章 在载荷作用下测定维氏硬度——一种研究塑料粘弹性的方法	(195)
初步意见.....	(195)
计量学的解决方法.....	(196)
在载荷作用下和卸载后对压痕的观测.....	(196)
在材料试验科学和工艺领域中的应用.....	(198)
摘要.....	(199)
参考文献.....	(200)
第二十三章 冲击硬度试验的理论和应用	(200)
设备及方法.....	(200)
动态冲击压痕理论.....	(201)
试验结果和讨论.....	(202)
讨论概要.....	(205)
几项研究应用.....	(206)
结论.....	(206)
参考文献.....	(207)
第二十四章 测定矿物显微硬度的最佳条件	(207)
第二十五章 测量邻近金属表面处机械性能所用的一种V型槽切割技术	(208)
第二十六章 钢球连续压入试验——研究压头直径、压痕大小和材料晶粒度与硬度的关系	(211)
连续硬度试验.....	(212)
讨论.....	(216)
摘要.....	(218)
参考文献.....	(218)
第六部分 表面及环境的影响	(219)
第二十七章 晶界和自由表面的影响	(219)
显微硬度试验的基本特点.....	(219)
晶界效应.....	(222)
表面效应.....	(239)
简要结束语.....	(246)
参考文献.....	(247)
第二十八章 非金属的环境敏感硬度	(250)
环境对晶体硬度的影响.....	(250)
影响非金属晶体硬度的环境效应机理.....	(254)
环境对玻璃硬度的影响.....	(262)
Rebinder 效应的实际应用.....	(267)

结论.....	(275)
参考文献.....	(275)
第二十九章 赫兹试验中的环境影响.....	(278)
断裂力学.....	(278)
实验.....	(281)
环境的干扰.....	(283)
简要结束语.....	(285)
参考文献.....	(285)
第三十章 外加电势对锌单晶电极显微硬度的影响: 电毛细现象.....	(286)
电毛细现象.....	(286)
实验.....	(288)
结果与讨论.....	(288)
简要结束语.....	(290)
参考文献.....	(290)
第三十一章 用显微硬度法综合研究光力学效应和电力学效应.....	(291)
参考文献.....	(294)
第三十二章 硅的光力学效应.....	(294)
实验方法.....	(294)
实验结果.....	(295)
讨论和结果.....	(297)
简要结束语.....	(298)
参考文献.....	(298)
第七部分 在材料其它性质方面的应用.....	(299)
第三十三章 硬度试验在测定材料其它性质方面的应用.....	(299)
与组织无关的一些基本概念.....	(300)
组织因素——单个压痕.....	(303)
组织因素——增大载荷.....	(307)
恒定载荷.....	(311)
结束语.....	(318)
讨论.....	(319)
参考文献.....	(321)
第三十四章 材料机械加工时磨料与工件之间的相互作用.....	(325)
参考文献.....	(330)

第一部分 硬度试验基础

第一章 硬度试验的基本原理

M.C. Shaw

硬度一词对不同专业的人有不同的含义。对冶金工作者来说它是对压入作用的抵抗力；对润滑工程师来说，它是耐磨损力；对设计工程师来说，它是形变应力的量度；对矿物工作者来说它是抗划伤力；对机械加工工作者来说它是切割抗力。尽管上述这几种作用看来在性质上有很大的差别，但是它们都与材料的塑性流变应力 (Y) 有关。

已经广泛应用的各种硬度试验法可以分类如下：

1 静压入试验 在这种试验中将一个球、圆锥体或角锥体强力压入一平面内，以压痕单位面积上的载荷作为硬度的度量标准。布氏硬度试验、维氏硬度试验、洛氏硬度试验，努氏硬度试验和 Monotron 硬度试验均属这类型式。

2 划痕试验 在这种试验中，只是观察一种材料是否能被另一种材料划痕。莫氏硬度试验和锉刀硬度试验属这一类。

3 犁槽试验 在这种试验中将一钝头元件（通常为金刚石）在一定载荷和相似条件下划过表面，以划痕宽度作为硬度的度量标准。Bierbaum 硬度试验属这一类。

4 回跳试验 在这种试验中使一标准质量和尺寸的物体由试验表面弹回，取回跳高度作为硬度的度量标准。肖氏硬度计就属这类试验用的一种仪器。

5 阻尼试验 在这种试验中，使一摆锤的坚硬支点支持在试验表面上，以其摆动幅度的变化大小作为硬度的度量标准。Herbert 摆式硬度试验属这一类。

6 切割试验 在这种试验中用具有一定几何形状的锐利工具切割下标准尺寸的切屑。

7 磨损试验 在这种试验中，将试样压在一正在转动的圆盘上，以磨耗率作为硬度的度量标准。

8 冲蚀试验 这种试验是在标准条件下将河沙或其它磨料冲射到试验表面上，以在一定时间内损失的材料重量作为硬度的度量标准，砂轮的硬度常采用这种方法试验。

关于大多数硬度试验目前所用的设备和详细试验条件可参阅文献[1—4]。在本章中仅对静压入硬度试验的某些基本方面予以讨论。

将一长度与直径之比约等于 2 的圆柱试件夹在两平行平面之间并施加一定载荷〔图 1 (a)〕，当试件变成完全塑性状态时的平均应力称为单轴向流变应力 (Y)。如果将一球体压入一无限大的平面内直到产生一塑性压痕为止〔图 1 (b)〕，则压痕上的平均应力约等于 $3Y$ ，此平均应力称为硬度。

在布氏硬度试验中^[5]，用来计算平均应力的面积为接触面积 (A_0)，而不是表面上的平面面积 (A)。因而布氏硬度为，

$$H_B = \frac{W}{A_0} = \frac{2W}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad (1)$$

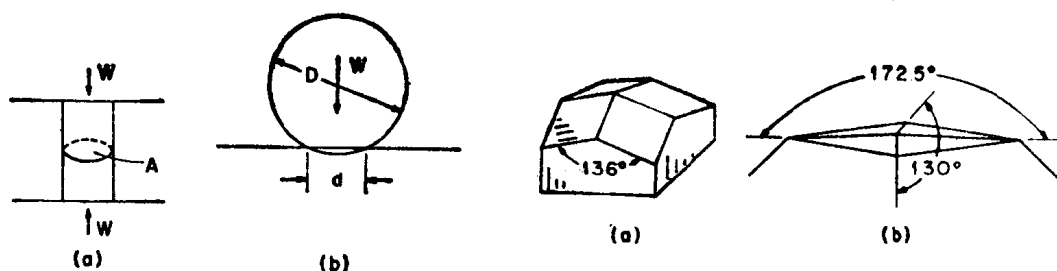


图1 (a)单轴压缩试验;(b)布氏硬度试验的对比

图2 (a)维氏硬度压头;(b)努氏硬度压头

式中， W 表示最大施加载荷； D 表示球直径； d 表示在原表面平面上所测得的压痕直径。

为了得到代表硬度的正确数值，必须保持以下条件：

- 1 将载荷调整得使 d/D 值处在 0.3—0.5 之间。
- 2 至少应将载荷保持 30 s 的时间。
- 3 压头硬度至少应为试件硬度的 2.5 倍。
- 4 压痕至试件边缘和至其底面的距离应为压痕直径的数倍。

计算 Meyer 硬度 (H_M)^[6] 根据的是表面平面上的投影面积，所以概念比较简单，

$$H_M = \frac{W}{A} = \frac{4W}{\pi d^2} \quad (2)$$

Smith 和 Sandland^[7]提出，用一角锥体代换球体，以便在不同载荷值下提供几何相似性 [图2(a)]。他们所用的压头顶角为 136° ，这是 $d/D = 0.375$ 时球的压痕边缘处两切线所夹的角。维氏硬度 (H_V) 可由载荷除以接触面积 (A_0) 求得

$$H_V = \frac{W}{A_0} = \frac{2W \sin\left(\frac{136}{2}\right)^*}{d_1^2} \quad (3)$$

式中， d_1 为表面上压痕对角线的平均长度。

努氏硬度压头^[8]的几何形状见图 2(b)，它可使压痕长对角线的长度等于短对角线的 7 倍，此种压头比维氏硬度压头钝一些，因而所产生的压痕深度比较小。这在测量脆性材料或薄件的显微硬度时是一种重要特性。努氏硬度与布氏硬度和维氏硬度不同，是以压痕的投影面积表示，不是用接触面积，

* 原书为 $\frac{0.2W}{d_1^2 \sin\left(\frac{136}{2}\right)}$ ，恐系排印之误——译者

$$H_k = \frac{W}{A_0} = \frac{2W}{d^2 \cot \frac{172.5}{2} \times \tan \frac{130}{2}} \quad (4)$$

式中, d 表示长对角线的长度。

用这些方法中的任何一种方法所求得的硬度值, 都可以表示成 CY , 其中 C 称为限制因子, Y 为单轴流变应力。常数 C 取决于压头的几何形状及以后提到的其他因子。但对所讨论的各种压头都近似地等于 3, 因为这些压头都比较钝。限制因子 C 的来源和特性是在压入硬度试验中最值得重视的一个问题。

原 理

Pandtl^[9] 首先阐明限制因子 C 的来源。他把工程上应用的钝硬度压头比作一个平冲头, 计算冲头下方刚开始发生塑性流变时冲头上的平均应力。他假设在冲头下方存在有可满足运动学条件的流变花样, 在此花样内假定材料以平面应变方式作塑性流变而在花样外侧可视是刚性的。Pandtl 的流变花样如图 3(a) 所示, 由它可求得的限制因子为 $1 + (\pi/2) = 2.57$ 。

Hill^[10] 曾将 Pandtl 对硬度问题的研究归纳为现在人所共知的滑移线场理论。在滑移线场的研究中不需要满足平衡条件, 因而不能得到单值解, 对每一种运动学上允许的流变花样, 都可求得一上限解。Hill 曾提出了如图 3(b) 所示的滑移线解, 这可导致与 Prandtl 花样相同的 C 值 (即 $C = 2.57$)。

根据这些理论, 被冲头置换的材料可以其发生向上流变来解释。从滑移线场的观点来看, 限制因子 C 可以称为流变限制因子。

计算值 2.57 是相当好地接近于观察值 3, 特别当考虑到这一事实时, 即计算是就二维压头进行的, 而实际压头是轴线对称的。Shield^[11] 曾将 Hill 的这种平面应变滑移线场解扩展到一种轴线对称的平头冲头 (图 4)。在这种情况下, 作用在冲头上的压力不是 Hill 解中的常数, 求得的 C 值为 2.82。

由于作用在硬度压头上的合力的实测值和计算值十分一致, 所以广泛采用 C 的滑移线场解释。但是当将一球形压头压在一带方格子的大块材料的中央平面时, 将得到一如图 5 所

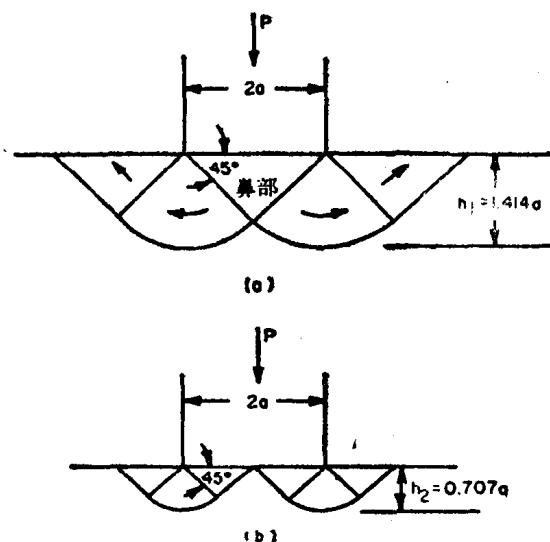


图 3 平面二维冲头的滑移线场解
(a) Pandtl^[9], (b) Hill^[10]

* 原书为 $\frac{W}{A_0} = \frac{2W}{d^2 (\cot \frac{172.5}{2} + \tan \frac{130}{2})}$, 恐排印误——译者

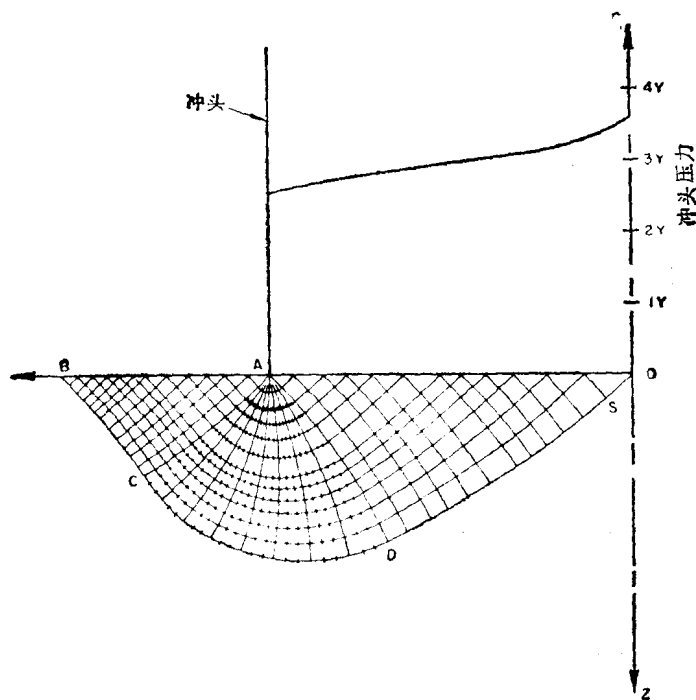


图4 轴对称平头冲头的滑移线场解, Shield^[11]

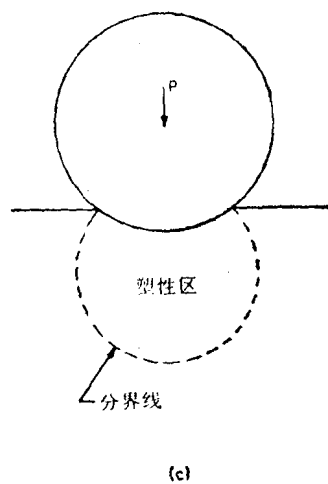
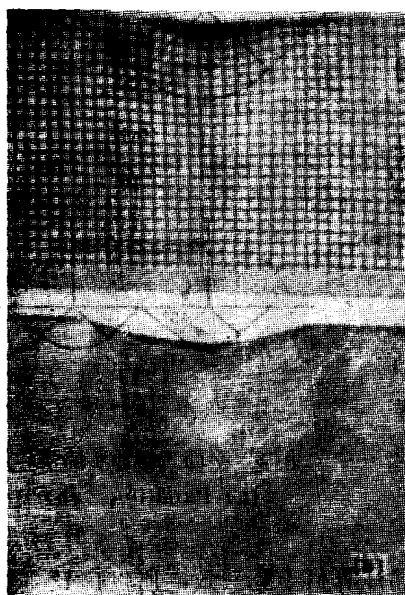


图5 布氏硬度试验时子午面上的变形格子花样。(a) 制模粘土,
(b) 软钢, (c) 图 (a) 和图 (b) 的说明

示的流变花样。这类花样与 Prandtl、Hill 或 Shield 的花样完全不同。完全发生塑性流变区的范围可以用沿变形格子描绘的曲线精确确定。这样就得到了图 5(c)所示的曲线, 此线可

将弹性区和完全塑性区分隔。

图 5(c) 中的虚线类似于 Hertz^[12] 弹性解的常定最大切应力线之一，这类弹性解属于一半径很大的刚性球压在一个无限大的弹性体上的情况。图 6 表明，球的交面为一平面，并且最大切应力线上的 M' 值等于最大切应力与冲头上平均应力的比。

可以看出，图 5 中的弹性塑性分界线与图 6 中 $M' = 0.18$ 的虚线严格对应。若根据最大剪力理论假设此线上的最大剪应力等于 $(Y/2)$ ，则冲头上的平均应力将等于 $(Y/Z) \times (M') = 2.8$ 。这相当于限制因子 C 等于 2.8，与试验值十分一致。

Shaw 和 Desalvo^[13] 曾经证明，若试件在压头各方向的尺寸大于 $10d$ (d 为压痕直径)，则被置换的体积可以用弹性减缩的体积来解释。这样一来，就不需要材料向上流变，弹性理论将完全符合于图 5。在这种情况下的限制因子称为弹性限制因子，因为被置换的材料体积可由体积的弹性压缩所补偿，而不是象滑移线场方法那样部分材料向上流变。

滑移线场理论与弹性理论的基本不同之点是对塑性区周围材料变化过程的假设。滑移线场理论假设这部分金属是刚性的，而弹性理论则假设这部分是弹性的。由图 5 可以看出，一钝头压头作用在一个无限大的物体时的流变花样，不同于采用塑性-刚性假设所导出的花样 (图 3)。但是钝头压头试验也可以设计得可得出 Pandt 和 Hill 的花样。将一层厚 $h_1 = 1.414a$ (a 为冲头宽度的一半) 的可塑体 (制模粘土) 压在一钢质衬底上，即可认为已具备了塑性-刚性假设条件 [见图 3(a)]。如图 7 所示的方法，即可求得类似 Pandt 滑移线场解

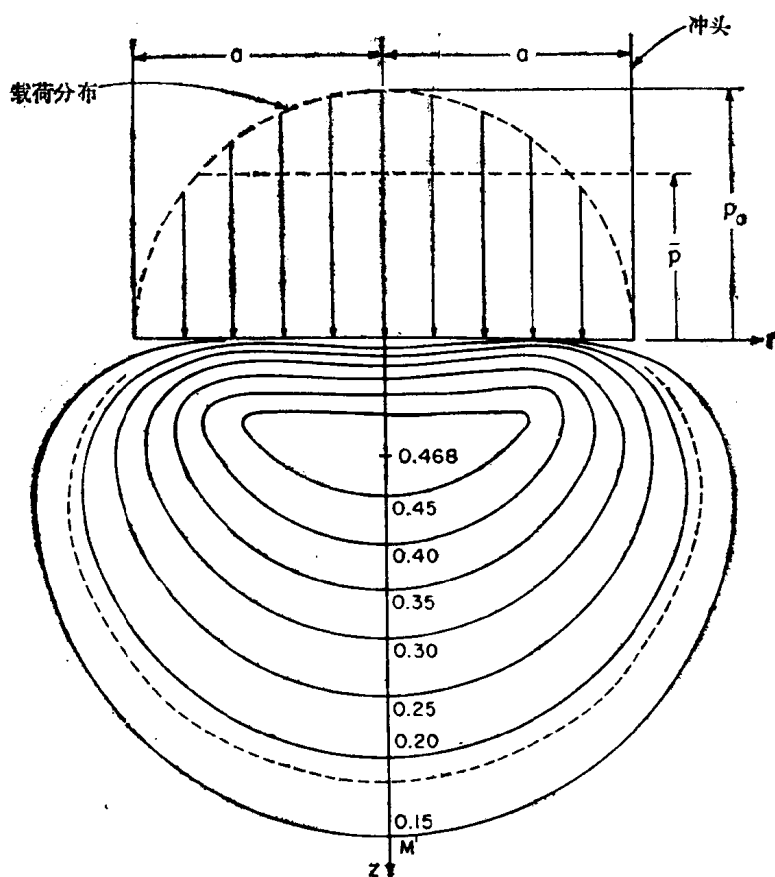


图 6 无摩擦球形压头的常定最大切应力的 Hertz 线, $M' = \tau_{\max}/\bar{p}$

的花样。同理，当将一层较薄的制模粘土〔在图 3(b)中， $h_2 = 0.707a$ 〕压在一刚性极大的钢质衬底上时，则平顶冲头可产生一个十分类似 Hill 花样的流变花样〔图 7(c)〕。

图 5 是采用钝头压头时对硬度弹性理论的直接证明。进一步的证明就是抛丸强化的情况，抛丸强化可产生残余压应力，对材料的疲劳寿命起重要作用。只要这种压应力符合弹性理论〔13〕，它就不包括在滑移线场理论中。

根据弹性理论，当一钝头压头压入一平面时，将产生无向上流变的塑性动作，弹性应力

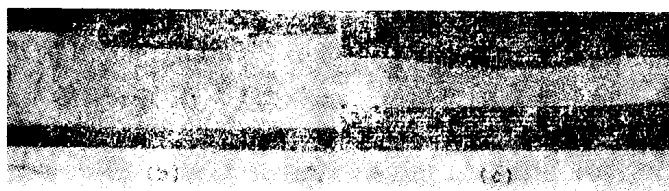
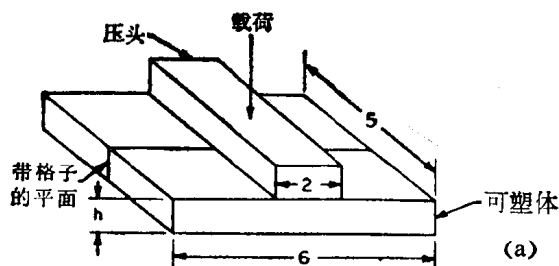


图 7 一平头压头压入制模粘土试样使其发生平面应变后试件横截面上的格子花样照片。(a) 试验装置；(b) 图 3 (a) 中 $h_1 = 1.414a$ 时所得到的花样；(c) 图 3 (b) 中 $h_2 = 0.707a$ 时的花样。在两种情况下，试件都用钢板衬底；与制模粘土相比钢板可被认为是刚性的

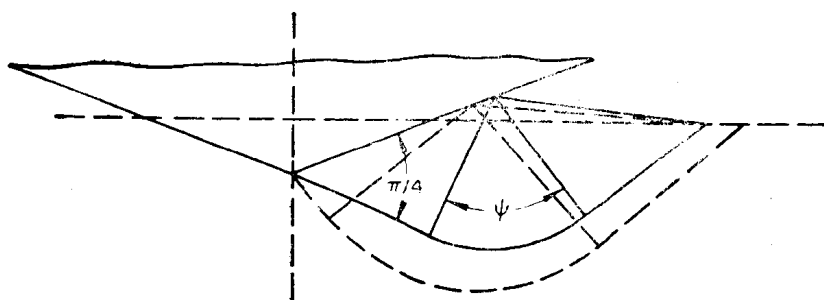


图 8 $\theta = 70^\circ$ 的二维楔形体的滑移线场解。实线相当无摩擦情况，虚线表示有摩擦情况。作用在退火材料的无摩擦压头的花样也类似虚线花样

场则与无塑性流变时相同。当除去载荷时，将在较小体积内产生二次塑性动作，此体积较加载荷时所发生的起始塑性流变体积为小，塑性流变方向也与之相反〔13〕。除去载荷之后，与自由表面平行的平面内的二轴残余压应力仍然存在。

弹性理论表明，应变硬化倾向和作用在压头表面上的摩擦力不会影响限制因子 C 。另一

方面，滑移线场理论却指出，增加作用在压头上的摩擦力将使 C 值增大^[14]。图 8 中的实线相当于压头（维氏硬度）摩擦力等于零的滑移线场解，虚线则为具有摩擦力的情况。在两种情况下，限制因子都将是 $1 + \psi$ ，显然存在摩擦力时 C 值较大。当试件材料趋向于加工硬化时，滑移线花样也会发生类似的转移。因此，滑移线场理论表明，随材料的加工硬化和摩擦力的增大，限制因子 C 也将增大。

压 头 夹 角

压头的有效夹角在硬度试验中起极其重要的作用。Dugdale^[15,16,17]曾广泛地研究了很大范围的锥角与限制因子的关系，其研究结果归纳如图 9。可以看出，对于尖锐的和粗钝的压头，限制因子表现的性质不同。对于一个半锥角为 40° 的尖头压头， C 值将随摩擦力和应变硬化倾向的增加而急剧增大。低摩擦力压头作用于充分加工硬化的材料时，将使得 C 值仅稍大于 1。这种特性对塑性流变限制表现得十分清楚，而对弹性限制状态则否。

当锥角增大时， C 的最小值也增大，而摩擦力的影响和其前的应变硬化作用却随之减小。最小 C 值的曲线与相当于 $C = 3$ 的线（根据弹性解，在图 9 中用虚线表示）相交于点 A，而对应各种半锥角值的弹性解则处于点 A 左方。适用于弹性理论的压头称为钝头压头，这种压头所具的半锥角 θ 随压头摩擦力的大小不同而大于 70° 或 80° 。

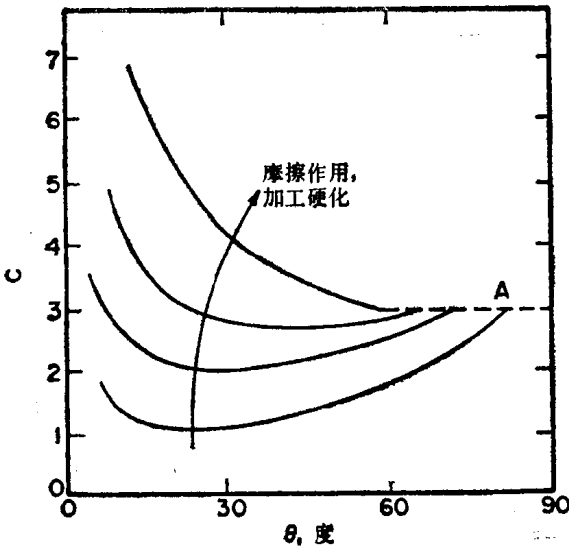


图 9 对于加工硬化到不同程度的金属和作用在压头表面上的不同摩擦力，限制因子 $C = \bar{p}/Y$ 与锥角 θ 的关系

在工程实践中所用大多数压头几乎全都是钝头型的，而且主要是弹性限制。在参考文献 14 中，计算了布氏硬度、维氏硬度和努氏硬度压头的有效半锥角，所得之值如下：

压头型式	$\theta(^{\circ})$
布氏 ($d/D = 0.4$)	66
维氏	70
努氏	72