



塑性理论

—— 机械工程适用 ——

[英] W. 约翰逊 P. B. 梅乐 著

上海科学技术出版社

塑 性 理 論

机 械 工 程 适 用

〔英〕W. 約翰遜, P. B. 梅乐 著
王 則 明 譯

上 海 科 学 技 术 出 版 社

內 容 提 要

全书内容分为三个部分:第一部分討論应力、应变有关彈-塑性理論基本方程。第二部分介紹若干机械結構与零件的彈-塑性分析、温度影响与蠕滑。第三部分介紹金属成型及金工工艺中的塑性分析。另有附录,介紹晶体塑性的基本知識。此外还附有习题及題解。可供机械制造、冶金、力学工作者及高等工业学校有关专业师生閱讀。

PLASTICITY FOR MECHANICAL ENGINEERS

W. Johnson, P. B. Mellor

D. Van Nostrand Co., Ltd. 1962.

塑 性 理 论

机械工程适用

王 则 明 译

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

大东集成联合印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印张 12 24/32 插頁 2 排版字数 335,000

1965 年 11 月第 1 版 1965 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—2,800

統一书号 13119·667 定价(科六) 1.90 元

序

大約近二十年来，为了适应工程上更合理的設計与更經濟地使用材料，以及更好地控制諸如拉絲、冷軋、挤压等金工操作，在許多工程实际問題中，塑性理論已得到愈来愈广泛的应用。

本书主要是供綜合性大学与高等工业学校中机械工程、制造工程、冶金学等专业高年級学生与研究生之用。其中有許多問題，对从事与金属材料有关的工作人員來說，也将是感兴趣的。

书中論叙了塑性理論中的基本理論；而有关工程应用，則主要只选取机械制造及冶金工作者所最关切的問題。根据这一原則，对桁架結構的塑性設計等，仅作很簡略的介紹。所有問題都从物理概念提出，数学演算保持尽可能的簡單。

前几章討論应力与应变的定义，以及塑性理論的基本概念。一般讀者不要以为在进行閱讀本书其他章节以前，必須透彻了解第二与第三章的全部內容。事实上，对于一个学过材料力学課程的人，无需参考上述章节，也能理解书中的大部分內容。唯一例外的，乃是第五章中所广泛使用的切应变一詞，其定义的完整解釋应參閱第三章。

书中所考慮的問題，按慣例分为两类，一类为塑性应变微小和彈性应变有同样量級；一类为塑性应变足够大，可以略去彈性应变而无影响。前一类主要指在彈性状态下工作的結構設計，后一类則指工艺成型过程。所有問題，都尽可能地将理論解答和最新的实验資料加以比較。

W. 約翰遜, P. B. 梅乐

目 录

序

第一章 引論	1
1.1 塑性理論的唯象学性质	1
1.2 简单拉伸下的載荷-伸長图	1
1.3 在简单拉伸中的真应力-应变图	3
1.4 应力-应变曲綫的某些偏离	5
1.5 应变速率、周围温度、水压力对材料流动与断裂的影响	7
1.6 各向同性固体中的彈性理論	11
1.7 塑性理論	12
1.8 应力-应变曲綫的經驗方程	14
第二章 应力	18
2.1 定义	18
2.2 力的平衡方程	20
2.3 力偶平衡	22
2.4 三向应力状态	23
2.5 三向应力状态的摩尔圓	28
2.6 摩尔圓用于三向应力状态的缺点	33
第三章 应变	34
3.1 作为位移函数的无限小应变	34
3.2 应变張量符号	38
3.3 应变的几何	39
第四章 金属的屈服准則	42
4.1 概述	42
4.2 屈服准則在应力空間的表达	44
4.3 有关屈雷斯加与米塞斯屈服准則的實驗資料	49
4.4 剪切彈性能与体积彈性能	52
4.5 各向同性变形硬化材料	53

4.6 各向异性屈服准则	55
第 五 章 应力-应变关系	57
5.1 弹性应力-应变关系	57
5.2 普朗陀-劳斯方程	58
5.3 利威-米塞斯方程	60
5.4 冷作硬化	61
5.5 完全的应力-应变关系	64
5.6 全量应变理论	65
5.7 利威-罗德参数	66
5.8 塑性势、流动规律、最大功假说	67
第 六 章 确定变形硬化诸特征的方法	72
6.1 引言	72
6.2 简单拉伸	75
6.3 均衡的两向拉伸	75
6.4 辗压与简单拉伸	77
6.5 简单压缩	79
6.6 平面应变压缩	82
6.7 简单扭转	84
第 七 章 梁塑性弯曲的基本分析	89
7.1 引言	89
7.2 塑性弯曲的简单理论	90
7.3 残余应力分布	95
7.4 简单结构的毁损载荷	96
7.5 弯曲与拉伸的复合:应用屈服不等式的例子	101
7.6 有初始曲率宽板的弹-塑性弯曲	105
第 八 章 非圆截面直杆的扭转	110
8.1 弹性分析	110
8.2 直杆中的塑性屈服	128
8.3 在塑性扭转轴中的残余应力	133
第 九 章 球面对称或柱面对称的弹-塑性问题	138
9.1 引言	138
9.2 厚壁球壳	139

9.3	厚壁圓筒	152
9.4	只經受恒定状态徑向温度梯度的圓环	161
9.5	旋轉圓盘	162
第 十 章 塑性不稳定		169
10.1	理想柱翹曲概述	169
10.2	翹曲:双模数公式	172
10.3	切綫模数公式	174
10.4	从一矩形截面柱比較塑性翹曲的两种解	174
10.5	拉伸塑性失穩概述	176
10.6	承受內压薄壁管筒的塑性失穩	179
10.7	承受內压球壳的塑性失穩	182
10.8	金属圓膜的失穩	183
10.9	在靜水压下薄壁壳与圓膜的强度极限	186
10.10	表达应力-应变曲綫的經驗方程	191
第十一章 金属成型力学(一)		194
11.1	引言	194
11.2	薄壁管的拉拔概述	194
11.3	无摩擦的拉管	198
11.4	有摩擦的拉管	199
11.5	拉管理論应力与实验应力的比較	201
11.6	在冷拉管中残余应力的測量与探測	203
11.7	圓板坯的拉深概述	205
11.8	純徑向拉拔	212
11.9	减薄拉拔	218
11.10	杯的再拉深	219
11.11	在拉深中法兰的皺褶	222
11.12	拉絲	226
11.13	挤压概述	232
11.14	挤压压力的决定	235
11.15	帶板的冷輾压	238
11.16	金属輾压的某些实况	246
第十二章 滑移綫場理論与平面塑性应变問題		252

12.1	概述	252
12.2	应力方程	256
12.3	速度方程	258
12.4	挤压通过一完全光滑半角 α 的楔形模, 縮減比 $r = 2 \sin \alpha / (1 + 2 \sin \alpha)$ 的滑移綫場	259
12.5	块坯在刚性粗糙台板間的压缩, 台板寬度較材料厚度大	262
12.6	有心扇形場	271
12.7	应用有心扇形场的例子	272
附:	滑移綫場理論的补充——譯者	278
第十三章 載荷的界限		283
13.1	引言	283
13.2	下限原理	284
13.3	上限原理	285
13.4	在平面应变中的上限原理: 簡明的論証	287
13.5	界限原理应用举例	289
13.6	摩擦	303
13.7	鍛压	303
13.8	通过曲模的挤压	304
13.9	由于快速加工在挤压中的温度分布	305
13.10	在特快加工金属中的温度分布	306
第十四章 金属成型力学(二)		310
14.1	引言	310
14.2	切削	310
14.3	直边模的压印与鍛压	318
14.4	用平頂冲头的压印与鍛压	322
14.5	相向压印: 鍛压与切割	325
14.6	关于鍛压的其他論著	327
第十五章 蠕滑		329
15.1	引言	329
15.2	蠕滑阶段	330
15.3	蠕滑的数据	333
15.4	复杂应力状态: 在不变温度, 第二期蠕滑中蠕滑应变率与应	

力的关系	334
15.5 构架的简单蠕滑计算	336
15.6 弯曲: 框架的蠕滑	338
15.7 受内压厚壁筒的蠕滑	340
附录 晶体塑性理论	343
习题	359
题解	369
人名汉英对照表	390
名词汉英对照索引	394

第一章 引 論

1.1 塑性理論的唯象学性质

彈性理論与塑性理論是研究大多数工程固体变形的力学。当应用于金属与合金时，所根据的便是简单载荷下多晶堆聚体应力-应变关系的实验研究。所以在本质上是属于宏观尺寸的唯一象学范围，至今还很少涉及金属结构方面的知识。但是，为了要弄清在此情况下这两理论的应用范围，对于主要只关心设计与制造的工程师，也必须具备一些金属结构的知識；这样，也有利于从金属物理工作者了解关于断裂的解释，或向冶金工作者商讨应如何試制新品种的材料，以胜任越来越艰巨的工作条件。反之，冶金工作者若要了解工程师的需求，也必须具备一些塑性理論的知識。在本章里，我們將考虑金属的宏观性态，至于塑性的微观方面，則在附录中略加討論，詳見附录所附文献。

1.2 简单拉伸下的載荷-伸长图

退火軟鋼棒的简单拉伸試驗，为彈性及塑性变形最常見的例子。我們將一軟鋼棒在室温下置于材料試驗机中拉伸，应变速率大約維持每秒 2×10^{-3} ，注意記錄載荷与伸长的每一讀数。基本要点是把加工了的試件，准确地安装在試驗机中，并有一削弱的中部区段，在整个中央計量长度內确保均匀軸向应力分布。軟鋼典型的載荷-伸长图，如图 1.1 所示。

在初始阶段，載荷与伸长的关系基本上是綫性的，即图中曲綫的 OA 部分，其中 A 点称为比

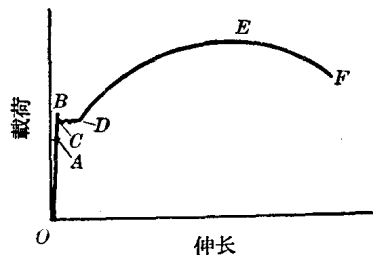


图 1.1 軟鋼載荷-伸长图

例极限。进一步变形, 载荷与伸长間将不再維持直綫关系, 但仍然是彈性的; 这就是說, 当载荷卸去, 試件能回复到它原来的长度; 不致产生永久变形的最大载荷, 便用以决定彈性极限。通常, 比例极限 A 与彈性极限 B 之間的差距是微小的, 两极限的确定均与所用测量仪器的灵敏度, 以及試驗技术的某些細节有密切关系。 B 点标志純彈性变形的終結, 也标志塑性变形的开始, 称为高屈服点; 在这点的载荷, 除以試件初始截面面积, 即称为高屈服应力。在屈服点每单位計量长度的伸长为 10^{-3} 的量級。

更进一步变形时, 载荷将突然降低, 然后在差不多是常载荷下繼續伸长。伸长度 CD 对于单位計量长度來說为 10^{-2} 量級, 故对于一有 8 吋計量长度的試件, 用一两脚規跨量在計量长度上, 就足以观察到它的伸长。在 CD 綫段的载荷除以初始截面面积, 即称为低屈服应力。

在 D 点以后, 载荷随着变形的进行而增加; 这种在截面面积均匀縮小的情况下, 材料仍能承担愈来愈大的载荷的作用, 称为变形硬化, 或冷作硬化。棒中眞应力可将施加载荷除以即时的截面面积而得到。在 E 点, 变形硬化率的效应开始赶不上截面減縮率的效应, 因而出現载荷的极大值, 随后发生局部应变 (試棒出現細頸), 終于在 F 点引起断裂。最大载荷值除以初始截面面积, 即称为拉伸强度极限应力 (或拉伸最后强度), 也就是具有单位截面面积的試棒在拉伸中所能承担的最大载荷。强度极限并非材料固有抗力的一种量度, 它仅标志着在拉伸試驗中一种不稳定情况 (均匀应变的終結和細頸的初現), 以后还要詳細地專門加以討論。

在最大载荷后, 細頸的形成导致了三向拉应力状态的出現。所以簡單拉伸試驗不能认为到断裂时才到达它的界限, 而是在最大载荷下就已抵达它的界限。从不稳定点一直到断裂, 試棒是在連續改变着的复杂的三向拉应力作用下变形, 且集中地发生在細頸附近。

大多数金属与合金, 一般并不和退火軟鋼一样显示有鮮明的初始屈服。从純彈性变形到彈塑性变形, 其改变是逐渐过渡的; 除

此以外, 載荷-伸長圖基本上都相同。見圖 1.2。對於這種情況, 在工程規範中, 採用“法定應力”作為屈服應力。所謂法定應力, 就是特定某一定大小的永久變形(用初始計量長度的百分比表示), 產生此特定大小永久變形時的應力(載荷除以初始橫截面面積), 即法定應力。在數學塑性理論中, 一般不涉及法定應力。

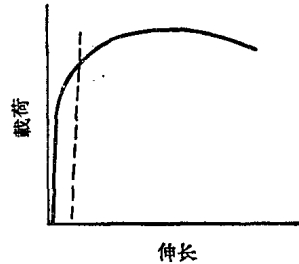


圖 1.2 无明显初始屈服金属或合金的載荷-伸長圖

在試件的伸長過程中, 法倫與泰羅^[10]發現僅有所作功的 85~90% 表現為熱能, 其餘的能量則貯存在變形硬化棒的變形晶格中。

1.3 在簡單拉伸中的真應力-應變圖

名義應力的定義是載荷除以試棒的初始截面面積, 習慣的或工程的應變為每初始單位長度的伸長。這樣, 名義應力-應變曲線不過是對具有單位初始截面面積與單位計量長度試棒所作的載荷-伸長圖。

真應力-應變曲線用於表達塑性, 是一能顯示更多內容的圖形。真應力是載荷除以即時截面面積, 在同一瞬間測量載荷與即時的試棒直徑即能得到。在進行繪制時, 我們也可以從拉伸試驗中略去所發生的微小體積改變而得到。這樣, 材料假定是不可壓縮的,

$$Xl = X_0 l_0 \quad (1.1)$$

其中 X 是即時截面面積, 而 l 是即時計量長度, 公式右邊腳標表示初始尺寸。

若 P 是即時載荷, 而 σ 表示真應力, 則

$$P = \sigma X \quad (1.2)$$

或

$$\sigma = \frac{P}{X_0} \frac{l}{l_0} = \sigma_0 (1 + e) \quad (1.3)$$

其中 σ_0 為名義應力, 而 $e = (l - l_0) / l_0$ 為工程應變。

在最大载荷 $dP=0$, 应用式(1.2)得

$$\sigma dX + X d\sigma = 0 \quad (1.4)$$

又从不可压缩条件(1.1)

$$l dX + X dl = 0 \quad (1.5)$$

从式(1.4)与(1.5), 发生塑性不稳定情况的真应力由下式给出

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dl}{l} = d\varepsilon \quad (1.6)$$

自然应变或对数应变, 系按下面式子来定义:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1+e) \quad (1.7)$$

所以, 在最大载荷有

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{1} \quad \text{或} \quad \frac{d\sigma}{de} = \frac{\sigma}{1+e} = \sigma_0 \quad (1.8)$$

图 1.3 a 示在真应力 σ 与对数应变 ε 的曲线上, 画一切线, 使得沿应变轴的次切线长度等于一单位, 如此所得的切点即代表不稳定情况的真应力与应变。在图 1.3 b 中, 则从 (σ, e) 曲线用相仿的图解法, 求出不稳定时应变 e_0 。

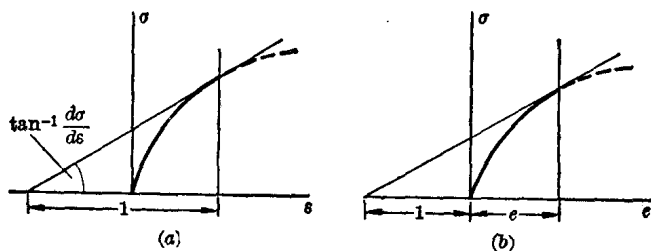


图 1.3 在简单拉伸中的应力-应变曲线, 示确定不稳点的图解法

对数应变的定义是刘德威克^[14]所提出。对于微小的伸长, 工程应变 e (柯西首先提出) 近似地等于对数应变 ε 。采用应变的对数定义有两大优点:

(a) 对数应变可应用加法, 而工程应变则不能, 这点可从定义

看出;但我們也可从一简单例子而得到說明:一計量长度为 l_1 的試棒,在軸向应力作用下,长度变到 l_2 ,这时应变 $\varepsilon_1 = \ln(l_2/l_1)$;若以后試棒繼續从 l_2 伸长到 l_3 ,后一阶段的应变为 $\varepsilon_2 = \ln(l_3/l_2)$,于是总应变 $\varepsilon = \ln(l_2/l_1) + \ln(l_3/l_2) = \ln(l_3/l_1)$ 。

以后还要指出,在不同应力状态下所得到的諸应力应变曲綫,能在对数应变的基础上,作相互比較;而在工程应变的基础上則不能。

(b) 实验指出,对于大塑性变形,如在金属成型过程中所出現的,材料可认为是不可压缩的。对此体积不变条件,用工程主应变表达为

$$(1+e_1)(1+e_2)(1+e_3)=1 \quad (1.9)$$

用对数应变来表达,就可以更简单,

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (1.10)$$

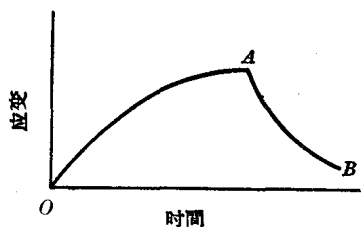
上列两式对于任何应变值都是真实的。对于无穷小应变(象在金属彈性变形中所处理的),式(1.9)可以略去应变乘积項,簡化为

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0 \quad (1.11)$$

1.4 应力-应变曲綫的某些偏离

以前我們所考虑金属棒的性态,一直认为載荷是緩慢地、連續地施加。事实上,任何金属在給定的冶炼条件下,变形与断裂的形式,除其他原因外,与应变速率、温度、所經受的应力状态等等均大有关系,这点必須加以注意。

試棒在简单拉伸的彈性变形中,若采用一灵敏的拉伸仪,将可发现不管施加载荷如何小,在載荷卸去后一短時間內,試棒总殘留有永久变形。当載荷施加时,应变按指数規律沿着图 1.4 的 OA



达到其最后值,当載荷卸去时,应变回复也按指数規律沿着 AB 趋

近于零。这种应变相对于应力关系的落后或迟滞,对承受周期载荷的结构,最后导致疲劳破坏,是很重要的。

还有一种情况,差不多不管什么样的温度,在常应力作用下,总存在着一些非弹性变形,以非常缓慢的速率进行着,这就是所谓蠕滑问题。大多数工程材料在室温下承受“弹性”载荷时,蠕滑效应可略去不计,但对于较高的温度,如在蒸汽或燃气轮机中所发生的,则蠕滑现象的研究将变成首要问题。

这些微小非弹性变形的一般性讨论,不属本书范围,若要进一步研究,可参阅文献[11]、[27]。但需着重指出,数学塑性理论是不考虑这些微小非弹性变形的,而是和弹性理论一样,应变分量是认为与时间无关。但是,这样仍可在数学表达式中,描写稳定状态的蠕滑过程;尽管在严格的意义上,这个依赖于时间的过程,一般并不认为属于数学塑性理论的范围。但考虑到蠕滑对工程师来说是很重要的,所以将它包括在本书内(第十五章)。

若在简单拉伸试验中,在超过屈服应力后卸载然后再加载,这

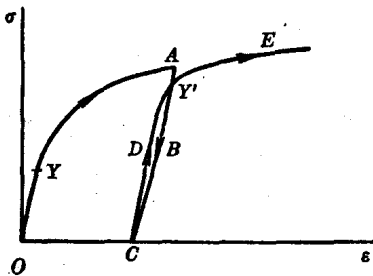


图 1.5 迟滞效应

样就要形成一迟滞回线。从图 1.5 的 A 点卸载,从 C 点再加载,曲线 ABC 与 CDE 几乎是和初始弹性载荷线相平行。图中所示迟滞回线是极度夸张了的,所以在不考虑连续性周期加载的情况下,这卸载与再加载的变形可假定为弹性,杨氏弹性模数不因已

发生塑性变形而改变。OC 为从 A 点完全卸载后所残留于试棒的永久(塑性)变形。

从 C 点起试棒再加载,这时再加载线可看作线性的,在 Y' 点屈服(此屈服应力高于初始屈服应力 Y),而曲线 Y'E 实际上就是 YA 曲线的延续。应当指出,超过 Y 后,在连续曲线上任一点,都是屈服点。

需要提出的,还有两种现象——各向异性与包兴格效应。

当金属加载而发生塑性变形时，每一晶粒的结晶方向逐渐转向一在载荷诱导下的公共轴，这样就产生了一优势方向，特别是当金属晶粒在初始时紊乱排列（各向同性），塑性变形使得它变成各向异性体，这时金属的屈服应力与延展性，会随着所测量方向的不同而不同。例如，柯克^[6]曾指出，黄铜在强烈的冷辗后，在辗压横向的屈服应力较沿辗压方向的屈服应力，要高出百分之十之多。

当金属塑性变形后卸载，在微观尺寸内将有残余应力遗留在材料中，这主要是在卸载前，各不同方向结晶具有不同的应力状态。若金属在均匀拉伸中塑性变形、卸载，然后承受与拉伸反向的均匀压缩，则由于残余应力的作用，可以看到它将在显然较小的应力值下屈服。这就是包兴格效应，在任何有应力反复的场合都要出现。

在应力连续反复的塑性变形过程中，包兴格效应是非常重要的而不容忽视的。在其他情况，包括应力应变曲线的实验确定，因为通常实验往往不多于一个应力反复，略去包兴格效应是安全的。在实用上，各向异性也常常略去；当然，如有可能，对于原材料中的各向异性，以及在实验过程中所发展的各向异性，能测取其数量，总是有益的。

残余应力以及由此而引起的包兴格效应，可以经过退火而差不多全部消除；但若要改变优势方向，则热处理温度应高于再结晶温度。

1.5 应变速率、周围温度、水压力对材料流动与断裂的影响

在拉伸试验中，应变速率[因应变为无因次量，所以应变速率的因次为(时间)⁻¹]与温度对软钢性质的影响，曼焦因^[18]曾加以研究。在他所进行的试验中，应变速率的范围是从每秒 10^{-6} 到 10^{-3} ，温度则从 25° 到 600°C 。在室温下，强度极限在很慢的应变速率下略有降低，随着应变速率增加而升高，而在最快应变速率时升高了40%；关于低屈服应力，则在这应变速率变动范围内一直升高，总共升高了170%。在通常短时间拉伸试验的应变速率范围内

(大約每秒 2×10^{-3})，强度极限与屈服点值实际上是恒定的。但是，某些金属成型过程是在高应变速率下进行的，这就非常需要得到在相仿条件下所作出的金属应力-应变曲线。

在判定脆性或延性材料时，一向是根据给定材料在简单拉伸试验中所表现的性态。据此，鑄鉄被认为脆性材料，因为它当变形很小时断裂，它的断裂面垂直于纵轴；另一面，常见的軟鋼試棒的錐杯形断裂面，则被认为延性材料的象征。但与此同时，也早已認識到，同一軟鋼試件在冲击载荷下会发生脆性断裂。

当考虑除鑄鉄以外的金属时，似乎认为材料有撕开型断裂 (cleavage-type fracture) 与剪切型断裂 (shear-type fracture) 两种不同形式的断裂，比认为材料可以按性质分为脆性与延性两类较为妥当。鑄鉄之所以例外地能称为脆性材料，则由于它含有自由石墨体，使得它的性态接近于某些非金属脆性材料。

前已指出，简单拉伸试验在到达最大载荷后，开始形成細頸，因而引起三向拉应力状态。从这时起直到断裂，是在复杂而連續改变着的三向拉应力作用下，大部变形发生在細頸。布雷吉曼^[3]、达維靖可夫等^[9]还指出，三向拉最大值发生在纵轴，最小值发生在周边。断裂首先在纵轴处出现，并垂直于纵轴，宏观观察可看出是属于撕开型断裂；靠近周边，则撕开型断裂变为剪切型断裂。可以注意，撕开型断裂能够发生在大塑性变形后。也可以注意，在室温下的标准拉伸试验中，断裂常常是撕开型与剪切型的混合。

降低试验时的温度，使撕开型断裂的傾向增加。帕尔克、戴維斯等^[21]指出，当温度足够低，軟鋼的錐杯形断裂能够变成撕开型断裂，而和在室温下鑄鉄的断裂相类似。自从 1939~1945 年以来，由于某些全焊接结构破坏的结果，加强了温度对断裂影响的研究。人們注意到，对于给定材料与给定大小的試件，以及给定应力状态与给定试验方法，存在一定的温度——过渡性温度，高于此温度呈延性，低于此温度呈脆性。梯伯^[24]对此低温脆性曾經总结过。大多数論著是关于軟鋼，但某些其他材料如鉛、鉻、錫也存在过渡性温度。在简单拉伸试验中，錫在各不同温度下的性态如图