

鋼結構脆性破坏的防止

GANGJIEGOU CUIXIENG POHUAI DE FANGZHI

〔美〕 M. E. 香 克 主編

机械工业出版社

81.511
411

鋼結構脆性破坏的防止

〔美〕 M. E. 香 克 主編

凌 川 譯

机械工业出版社

本书从材料、制造和設計三个方面簡要地分析討論了各种因素对脆性破坏的影响，并且提供了較多的实际数据和应用实例。

本书可供从事焊接結構的設置、制造和檢驗工作的工程技术人员参考；也可供从事焊接結構强度研究的工程技术人员和高等学校焊接专业的师生参考。

M. E. Shank

**CONTROL OF STEEL CONSTRUCTION
TO AVOID BRITTLE FAILURE**

Welding Research Council, New York, 1957

(根据美国焊接研究委员会 1957 年版譯出)

* * *

[美]M. E. 香克 主編

鋼結構脆性破坏的防止

凌 川 譯

*

机械工业出版社出版 (北京阜成門外南礼士路北口)

(北京市书刊出版业营业許可証出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印張 5 · 字数 125 千字

1966年 6 月北京第一版 · 1966年 6 月北京第一次印刷

印数 0,001— 4,300 · 定价(科六) 0.75 元

*

統一书号: 15033 · 3965

原 序

编纂一本由许多本行业中著名的工程师和冶金学家共同编写●的书不是一件容易承担的工作，尤其是当主题牵涉到近年来引人注意而且有热烈争论的课题之一的脆性破坏的时候。看来，脆性破坏仍属于在工程意义上还没有完全解决的问题；虽然，从力学上研究，这一问题似乎已有相当的进展。现在已有大量的关于脆性破坏的文献。这些文献涉及到材料、设计、制造和课题的基本研究等方面。其中有些是互相矛盾的，而各处发表的文献数目又多得只有专家才有能力进行合理的概括。因此，从事实际工作的工程人员、制造人员和设计人员就要求有一本能有效地评述文献、清楚地说明各个重要因素、能作一般参考用而且能指导他们在结构领域内工作的简要的书籍。由于这些原因，编者深感到编纂本书的工作的必要性和重要性。

当然，必须看到在钢材的脆性破坏领域内的研究工作和裂缝扩展领域内的研究工作还在继续进行。例如，最近的研究表明，某些航空合金中的突然性的裂缝扩展的基本情况在许多地方是与钢材的脆性破坏相类似的；虽然，这类合金是在通常所谓的塑性状态下破坏的。因此，整个情况还在发展着。可以预期，在不久的将来，通过设计、制造的改进，特别是采用更佳的材料，可以进一步改善避免钢结构的脆性破坏的技术。

同时，我们认为本书在现有知识的基础上集中了钢铁工业、制造和焊接工业中有经验的人员的意见；因此，也是比较切合实际的。

M. E. 香克

1956年9月6日 麻省理工学院

● 本书系由焊接研究学会塑性委员会全体成員集体编写的。——譯者

引 言

大多数已有的室外的钢结构是在弹性状态假设的基础上设计出来的，在这些结构中，二次应力，尤其是在由于设计或是制造过程所造成的应力集中处的应力，是无法计算的。大家习惯地认为，假如环境要求的话，这些材料会通过局部屈服[●]而表现出塑性来。过去一直是这样假设的：具有良好的由拉伸试验时的延伸率和断面收缩所代表的静载塑性的材料，由于它的局部塑性行为，是能够成功地满足实际工作中的条件的。

一般情况下，通常方法（弹性状态假设）所设计出来的结构，是能够满意地工作的。但偶尔也有这样的情况，即在像桥梁、船只、压力容器和贮存器等大的铆接或焊接钢结构中发生了破坏[⊙]，而不是局部屈服。往往这种破坏是脆性的；破坏时的塑性变形很小甚或没有，破坏时吸收的能量也几乎等于零。这种破坏的速度很高，常常达到每秒钟几千呎。

虽然钢结构的脆性破坏并不是一个新的现象，但第二次世界大战时某些焊接船只的破坏，使扩大在约束条件下的钢的行为的知识显得更为需要了。从那时起，积累了不少这方面的资料。本书的目的就是分析并评述这些资料，并加以整理，使之能用于通常的设计中。

通常设计程序所包括的应力分析，即在既定载荷条件下的应力计算，能判断结构或只是结构的一部分是否会在弹性失稳、塑性破坏或疲劳的一定条件下发生破坏或失效。在复杂的结构中必须依靠判断，并辅之以已有的类似结构的工作经验。通常是在材料的抗拉性能及疲劳性能的基础上采取某一个安全系数，作为结构中的设计（计算）应力所不应超越的强度的安全界限。但是，

● 在本书中屈服、流动和塑性变形是意义完全相同的，可以互相取代使用的三个名词。——译者

⊙ 在本书中，“破坏”及“失效”是作为同义词使用的。——译者

事实上，这种方法是不能考虑到脆性破坏的。

即使在最佳的实际设计中，也是会存在缺口效应的。此外，在制造技能上也总会有不完善之处。当存在有缺口时，结构的强度，更重要的是它究竟将在脆性状态还是塑性状态下破坏，将取决于载荷增加时在结构中某些危险缺口的根部处材料的局部屈服的能力。目前还没有什么数学方法能使结构材料在破坏前所能经受的局部屈服的能力在常用的设计公式中反映出来。但是，研究结果使我们对于结构钢中能不能进行局部屈服的条件（缺口敏感性）方面的工程知识有了很大的增长。本书就是企图对有关结构钢的缺口敏感性的研究加以分析，并就其设计和构造中的作用的资料和数据加以整理和综合。我们希望，这种努力能对充实现有的知识和实践以尽量减少脆性破坏有所效益。

本书共分为三篇。第一篇材料——介绍了有关缺口脆性的概念和机理，并讨论了对结构材料的局部塑性行为有不利影响的有关的力学和冶金因素。不同因素的影响尽可能以综合的形式或图表来表示。若数据还不足以得出结论和不能用简明形式来表示时，则力求阐明其可应用的范围。第二篇制造——是有关构件构造的一些问题。这里将说明通常的制造过程对结构材料的缺口塑性有什么影响。第三篇设计——试图将前两篇的内容从有助于设计人员选择及制订最适宜的材料和制造过程的角度加以综合。同时，从缺口脆性出发，对通常的设计程序的局限性加以评述，并对如何应用可资利用的缺口脆性试验的数据所提出的某些建议加以评述。

本书最后包括有关钢结构及缺口脆性研究方面的一些术语的简解，同时也附录了进一步在（1）理论，（2）研究、制造、材料和设计，（3）结构实际工作情况方面阅读用的建议性的文献单。

最后应该说明的是：本书是为从事实际工作的设计人员和制造人员编写的，所以是从经济角度和结构要求的角度来进行阐述的。在可能的条件下，作者力图说明旨在防止钢结构脆性破坏的各种可能的处理方案的经济效果或损失。

目 次

原序

引言

第一篇 材料	1
一、引言	1
二、缺口韧性行为	1
1 塑性及脆性	1
2 脆性破坏时晶体的行为	2
3 应力的三维性	5
4 脆性强度的概念	7
5 变形速度的影响	10
6 关于脆性破坏时的能量吸收的理论	10
7 脆性破坏的必要条件的综述	11
8 通过试验方法确定转化温度	12
9 试验确定的转化(温度)指标的实际意义	14
10 疲劳载荷对转化温度的影响	19
11 结构的转化温度的确定	20
三、尺寸效应	21
四、影响脆性的冶金因素	24
1 综述	24
2 成分	26
3 冶炼方法	26
4 脱氧处理	27
5 化学元素对钢的抗拉性能的影响	27
6 晶粒大小	28
7 化学元素对钢的塑性和韧性的影响	29
8 正火	31
9 结构实际工作性能的对照关系	32

86501

10 合金結構鋼	34
五、材料标准	38
1 綜述	38
2 船舶用結構鋼的标准	39
3 非船舶結構用鋼	51
4 試驗要求	54
第二篇 制造	60
一、引言	60
二、冷工及形变时效的影响	60
1 綜述	60
2 局部严重冷工的脆化作用	64
3 冲孔	65
4 剪切边缘	67
5 焊缝的锤击	67
6 校直时水淬的影响	70
三、工艺缺口的影响	71
四、焊接工艺过程	71
1 預热及焊后加热的作用	74
2 低氢焊条和普通的軟鋼焊条以及用 EXX15-16 焊条 代替預热	81
3 接头细节	85
4 偏析的影响	88
5 焊接电流、电压及速度	88
6 管理及檢驗	89
7 焊件的缺口韌性	90
8 殘留应力	94
9 焊接結構在工作中破坏的实例	96
第三篇 设计	102
一、引言	102
二、总的问题	103
1 普通的設計程序的不足之处	103
2 应力水平	104

VI

3 影响屈服能力的力学因素	104
4 鉚接結構	105
5 結構尺寸对破坏抗力的影响	105
三、设计	106
1 設計程序	106
2 材料的選擇	108
3 在一个結構中应用不同的鋼材	113
4 檢驗方法的選擇	115
5 結構尺寸的三維連續性的影响	116
6 特殊零件的設計	119
四、焊接	124
1 綜述	124
2 間断焊縫及連續焊縫	125
3 搭接焊縫及对接焊縫	125
五、疲劳	126
总结	127
建议阅读的书目	131
有关术语和试件的簡解	133

第一篇 材 料

一、引 言

设计工作者习惯于用作材料选择的基础的、通常所测得的结构钢的机械性能，如强度极限、屈服强度及延伸率，并不总能保证结构在冬季低温时不发生破坏，尤其是在大尺寸的室外结构中。甚至在载荷并没有超过设计载荷时，也是这样的情况。要保证安全工作，钢材在各种工作条件下，对裂缝的产生和扩展应有足够的抗力。这种抗力就是通常所称的“缺口韧性”或“缺口塑性”。构件的缺口韧性不仅与所采用的钢材的固有特性有关，也与制造过程、操作技能和设计有关。

本篇主要是讨论关于钢材本身的固有性质。首先讨论钢材的缺口敏感性和脆性破坏的基本原因及条件。其次讨论“转化”指标的实际意义、尺寸效应和冶金因素。最后是有关材料标准的问题。

二、缺口韧性行为

1 塑性及脆性

所谓塑性，通常是指在拉伸应力下材料破坏前所能产生的永久变形。但相对于缺口韧性来说，塑性的真正意义应该是金属在约束及局部高应力条件下，如在缺口的根部，产生塑性变形的能力。金属不能进行塑性变形时就称为缺口脆性。

当一材料在某种应用条件下，在破坏前只能吸收很有限的能量（主要由弹性变形来吸收）时，这材料就被称为处于脆性状态。当这材料能吸收相当数量的能量（由于塑性变形）时，则称为处

于塑性状态。然而，没有一个简单的试验能够定性地衡量一个较大截面的材料的塑性或脆性。正是因为塑性或脆性与试验条件有很大的关系，很多试验只能相对地来说明塑性及脆性。通常是用拉伸试验、弯曲试验及缺口弯曲试验来试验某种材料在不同的载荷和应力条件下的塑性的。这些试验方法对材料在应用条件下的可用性的意义将是我们讨论的重要部分。往往有这样的情况，一种钢在通常的拉伸试验时是塑性的，但在有缺口时，却是脆性的。对工程人员来说，脆性破坏的特出的特点是，它是在没有过载的、通常认为安全载荷下发生的。但是，随后再进行的简单拉伸试验往往又发现，这些材料完全能满足一般标准所规定的抗拉强度及延伸率的要求，甚至还要更好些。

一个结构是处于塑性还是脆性状态，取决于温度、机械条件以及所承受的应力条件。根据目前的认识，影响结构处于塑性或脆性状态的因素是：（1）材料；（2）温度；（3）变形速度（局部变形率将由于缺口的存在而增大）；（4）应力状态。其中第四个因素，最难正确估量。

2 脆性破坏时晶体的行为

劈裂破坏可以在任何铁素体的铁或钢中，例如普通的结构钢中发生。所谓劈裂就是金属晶体的突然的裂开。这时是没有总体的塑性变形的，但是劈裂破坏并不是脆性破坏的同义词；因为后者在某些情况下，可以吸收足够的能量（关于这问题，我们将在以后加以讨论）。另外一方面，劈裂所引起的结构钢的低溫脆断吸收的能量很少，可以略去不计。下面我们就讨论这种情况。

劈裂可以在纯度很高的铁中产生，也可以在某些在工程上一般不用的金属中产生。后者我们将不予讨论。在像金、银、铜及铝等纯金属中，即使温度接近绝对零度并有缺口存在，也没有听说过发生劈裂的情况。普通的奥氏体钢[●]也是对低溫劈裂破坏“免

● 奥氏体钢在高温蠕变条件下发生的脆性与缺口脆性是不同的两件事情。

疫”的。

图 1-1 是铁晶体的原子排列的示意图。由图可见，任何铁晶体的基本组成单元是呈立方体形排列的原子。在这立方体中，每个角上有一铁原子，立方体的中心也有一个铁原子。这种结构称为“体心立方体”。每一个铁晶体是由几百万个在同一方向排列的这样的单元体所组成的。

塑性变形是通过沿立方体的任一对角线平面的滑移而发生的，发生滑移的真正的平面是不固定的，并不能由几何结晶平面来表示。劈裂则是任意立方体平面在没有宏观塑性变形情况下的分离。派克及其同事提出了一个很生动的证明。

他们用低碳钢试件在室温及液态空气温度进行抗拉试验。然后，试件被截开、抛光和用稀硝酸腐蚀。这样，在各晶体中，就形成了蚀坑。蚀坑的边是与各个晶体的劈裂面相平行的，也即与滑移平面差不多形成 45° 角度。图 1-2 所示系室温试验的试件的破坏情况。这试件中凡有显著的塑性变形，而破坏表面是与蚀坑边互成倾斜的。图1-3(a)

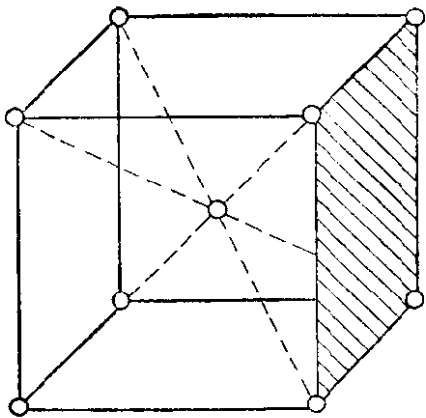


图1-1 体心立方的铁晶体的示意图。

劈裂发生在立方体平面(如有阴影线的平面)，滑移发生在任一对角线平面上。

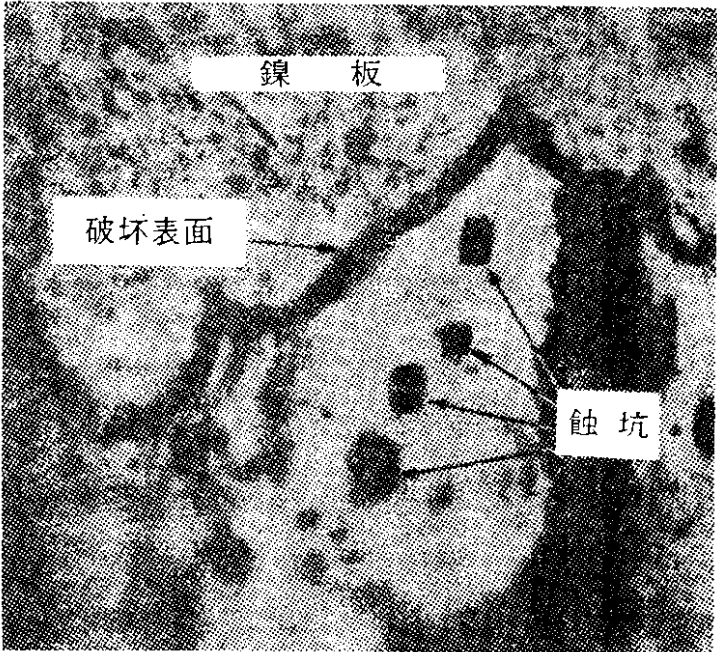


图1-2 垂直于塑性破坏表面的截面的照片。照片系取自试件的中心部。该处在室温抗拉试验时，经明显的塑性变形后，开始发生破坏。铁素体晶体中蚀坑边与滑移平面及晶体内破坏的路径相倾斜约 45° ，故破坏为剪切性质。就原子范围而言，破坏路径还不很清楚。(按派克方法)

为在液态空气温度下破坏的试件的破坏情况。破坏性质是劈裂破坏。这时,发现不出塑性变形;同时,破坏线是与蚀坑边相平行的。

图 1-3(*b*) 表示了对于原子结构来说,劈裂发生的情况。多晶粒铁素体钢中的脆断的另一重要特征是: 裂缝扩展的速度很高,往往达到每秒钟 6000 呎以上; 而且往往表现为不连续的裂缝。很明显,假如每个晶体的破坏是立方体平面的劈裂时,由于所有晶体的立方体平面不是位于同一方向,因此裂缝在由一个晶体扩向另一晶体时一定改变方向。所以劈裂可在几个相邻的晶粒中同时开始,然后由于晶界的塑性变形,汇合成不连续的裂缝。这情况表明,在脆性状态下

破坏的钢中,在主要破坏区域的邻近可以观察到不连续的显微裂

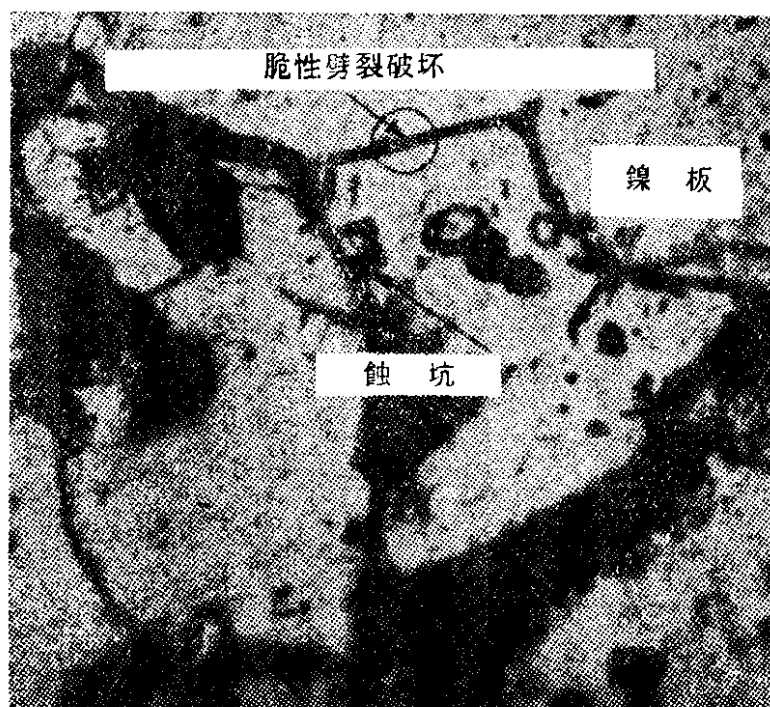


图1-3(*a*) 垂直于劈裂破坏表面的截面的照片。抗拉试件在液化空气温度下破坏。铁素体晶体中的蚀坑边与劈裂平面及晶体内破坏的路径相平行。(按派克方法)

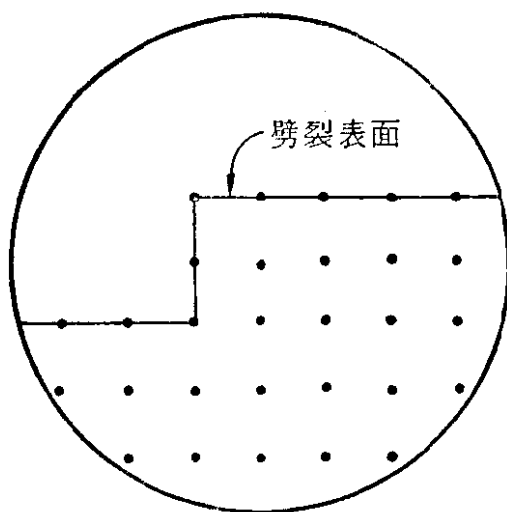


图1-3(*b*) 劈裂破坏的理想示意图。破坏沿平行于立方体平面(諸 100 平面)的平面发生。黑点代表单位晶格角上的原子。

缝，实际情况也证明了这一点。

尽管在晶界上有撕裂变形，但在脆性破坏表面上总的说来是观察不到塑性变形的，如图 1-4 所示。但是，脆性破坏时由于塑性变形而吸收的能量，是可以用某些方法测出来的。但总的数字大约为每平方吋破坏表面 1 呎-磅左右。这与塑性破坏所需要的能量相比是很小很小的。因此，脆性裂缝所以能传播得这样快，而且脆性裂缝所以是十分危险的原因，就很明显了。脆性裂缝传播时简直不需要什么能量。

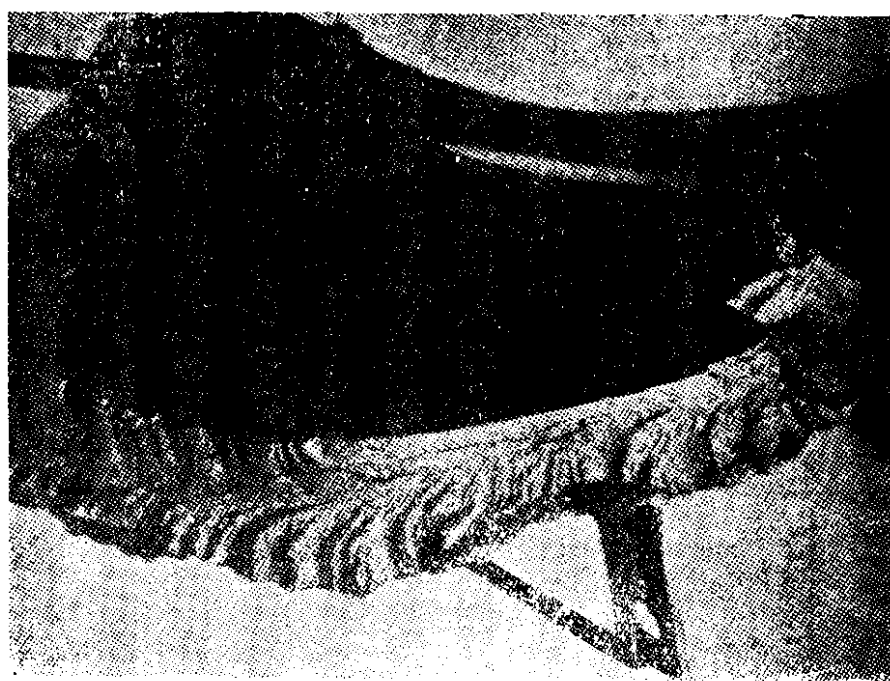


图1-4 鼓輪的卒片。注意有光澤的有紋路的表面及人字型紋路。人字形紋路的頂尖指向破坏的起源点。

3 应力的三維性

最早研究脆性破坏时，是用以冲击载荷来揭示脆性的方法来进行的。这样似乎支持了直到现在还广泛存在着的一种意见——钢中的脆性破坏只有在冲击载荷下才会发生。事实上，假如一个试件中包含有一个又尖又深的缺口的话，即使在靜拉伸或靜弯曲下，也会发生脆性破坏。A. 麦斯纳格根据这种观察结果，在 1906 年，提出了三向拉伸是缺口脆性的成因之一的理论。麦斯纳格的

文章在当时没有得到广泛的注意。在1923年,路特威克又提出了相似的理论。

让我们用最简单的表达方法来考察一下一块板中的一个缺口或尖锐裂缝的影响。假如板材在垂直裂缝的方向(轴向)作用有平均应力 σ_y 平均,则在裂缝的根部将作用有高得多的轴向应力 σ_y 和横向应力 σ_x ——见图1-5(a)。在裂缝根部,由于缺口的存在,它的应力状态将是双向(二维)的。但在离开裂缝根部一定距离处,应力将又为平均应力。假如在裂缝根部处产生塑性流动的话,由于材料要保持其体积不变——这是塑性流动的必要条件,必然会有横向收缩(在厚度方向上)。而与此同时,在裂缝根部以外的地方,大量的应力水平低的材料,则阻止这个横向收缩。因此,当发生塑性流动时,就产生了一个三向(三维)应力状态;这时,第三个应力是与板材平面相垂直的——厚度方向的拉伸应力。第三个应力在板材一半厚度处具有最大值,而在板材表面上,其值

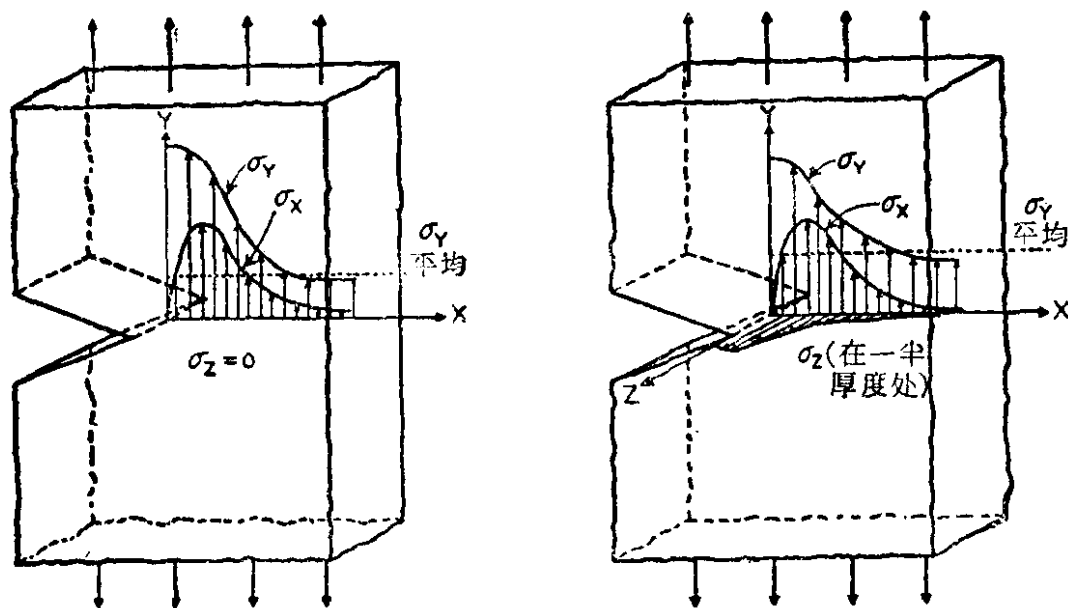


图1-5(a) 包含有缺口的板材中的弹性应力分布示意图。在裂缝根部的紧邻处轴向应力 σ_y 有应力集中。在缺口根部处,由于缺口所造成的不连续性,应力状态是双向的。

图1-5(b) 包含有缺口的板材中,在局部塑性变形发生后的应力分布示意图。应力状态为三向应力状态,缺口根部产生横向收缩,应力 σ_z 在一半厚度处为最大值,而在板材表面上为零。

为零（见图 1-5 b）。另外一个后果是，当产生流动时，缺口根部处的轴向应力 σ_y ① 将超过材料的单向应力的屈服应力 Y 而达到某一数值 Y_n 。这就是塑性约束（与弹性应力集中相对立的）的缘由。 Y_n 对 Y 的比值即所谓“约束因素”。

直到最近，还有人认为：当缺口具有可能的最大的尖锐度和深度时，缺口尖端或根部的应力及塑性约束因素 ② 将为无穷大。用塑性流动的古典数学理论可以证明，在一圆试件中若存在有一个理想的尖而深的圆形缺口时，最大的约束因素的最大数值约为 3。在一平板存在有一个缺口的情况下，约束因素大致也是这样的数值。综上所述，可以看到：当一承受应力的板材中存在有一个尖锐裂缝时，在塑性流动得以进行时，裂缝尖端的应力将升高为正常的单向屈服应力的三倍左右 ③。

4 脆性强度的概念

在缺口脆性中的三向应力的早期理论中，塑性降低的现象已经得到了解释；也引入了破坏时应力形变特性曲线（与塑性流动相对应）的概念。但是，当时对于纤维状（塑性）破坏及脆性（劈裂）破坏间的显著的性质上的差别，却没有能得到说明。后来的补充理论，则认识到了存在有这二种根本上不同的破坏机理。由此就提出了破坏的二种应力形变特性曲线：一种是塑性破坏的，一种是脆性破坏的。那时也懂得了：由于存在有许多因素的缘故，塑性 ④ 破坏并不是在完全由已发生的塑性形变所决定的应力值时发生破坏。同时，许多实例证实了纯铁体钢的脆性破坏特性曲线的概念。

根据应力三维性的理论、最大约束因素为 3 以及脆性强度的

① 原文为“ Y ”，为免误解及与图文对应起见，改为“ σ_y ”。——译者

② 塑性约束因素即前文中的约束因素。——译者

③ 弹性应力集中（在发生屈服前）可达到很高的数值。弹性应力集中因素是没有理论上限的。

④ 原文为塑性，疑为脆性之误。——译者

概念，可作出如图 1-6 所示的定性的图形。这个图形可以解释在较高温度时的塑性行为转化为在较低温度时的脆性行为的现象。

在图 1-6 中，脆性强度 B 、屈服强度 Y 及三倍屈服强度 $3Y$ （即有缺口时的流动应力）是温度的函数。实验证明，随着温度的下降，屈服强度提高。可以认为，脆性强度也是随着温度的下降而提高的，但是梯度没有这么大。

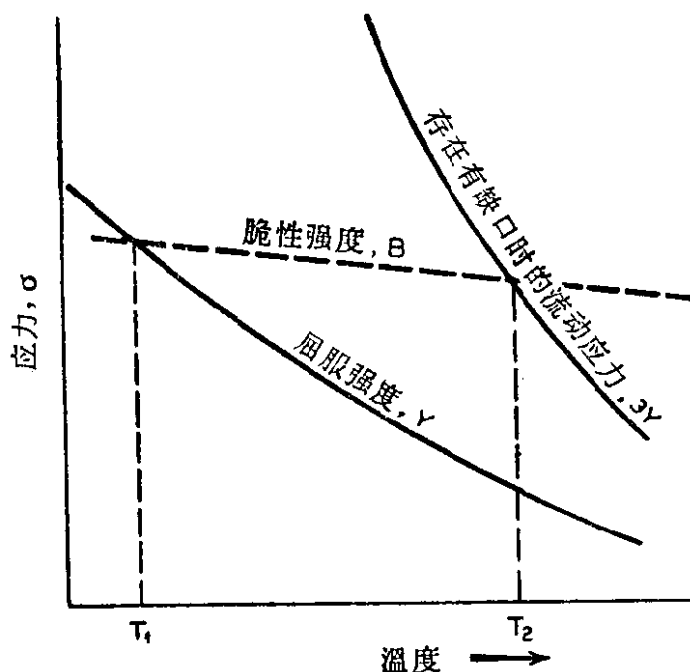


图1-6 说明缺口脆性材料的转化温度的应力-温度图形。在温度高于 T_2 时，材料完全是塑性的，在低于 T_1 的温度时，材料完全是脆性的， T_1 及 T_2 间的温度区间，则是转化区域。（E·奥洛汶）

图 1-6 表示，在高于脆性强度曲线与三倍屈服强度曲线相交的温度 T_2 时，不论是有缺口还是没有缺口，材料

都将是完全塑性的。在低于脆性强度曲线与屈服强度曲线相交的温度 T_1 时，材料总是在脆性状态下发生破坏。这二个温度之间的温度区间，就是缺口脆性区域。当材料受的是单向应力作用时，其行为将为塑性性质；但当存在有缺口时，则在应力达到 $3Y$ （即产生显著塑性流动的应力）以前，材料就会发生脆性破坏。实际上，在有缺口时，由完全塑性转变为完全脆性的转化并不是发生在一个特定的温度，而是发生在一个温度区间内。在“恰沛”（Charpy）冲击试验中就是这样的情况。

直到最近，脆性强度的特性曲线始终没有能为实验所证实。只是在 1951 年 10 月，爱尔汀和柯林斯发表了一篇关于在接近绝对零度（ 12°K 或 -438°F ）至 185°K （ -126°F ）的温度区间内的 1020 钢的破坏应力和屈服应力的研究的文章。试件是在单向应力