

造船材料译丛第十二辑

断裂力学在 船舶工程中的应用

舰船材料编辑室

1975年10月

毛 主 席 語 录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

无产阶级必须在上层建筑领域其中包括各个文化领域中
对资产阶级实行全面专政。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来赶上和
超过世界先进水平。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的
历史时期内，把我国建设成为一个社会主义现代化的强国。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地
干工业，干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，
埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的
坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

前 言

断裂力学的发展，提出了断裂韧性的概念。材料的断裂韧性水平反映了它抵抗裂纹扩展的能力，是工程应用中衡量材料使用安全可靠的一项重要指标。因此，广泛被用于材料的研制、防断设计和预测结构的使用寿命等方面。目前，在国外，把断裂力学应用于船舶工程结构材料及其相关的各个领域中的研究，已进行了大量的研究工作，并取得了有效的进展。

随着我国造船工业的迅速发展，将会有越来越多的新的更高强度的金属及大截面尺寸的复杂构件大量用于船舶结构。为了保证船舶航行中的安全性，对船舶结构材料不仅要求具有较高的强度，而且还要求具有足够的韧性。为此，开展断裂力学应用于船舶工程结构材料的研究，必将成为发展的趋势。

这里，我们搜集了反映目前国外有关断裂力学在船舶结构材料（包括钢、铝合金、钛合金及玻璃钢层压材料等）断裂韧性中的应用情况，及低周疲劳、应力腐蚀开裂、电子显微断口金相学等方面的部分文章，汇编成文集。可供从事船舶结构设计和材料研究单位的人员、以及有关生产、使用及教学单位的人员参考。

由于我们的水平有限、编辑时间又比较仓促，错误之处在所难免，希读者批评指正。

編 者

目 录

金属结构防断設計諸分析程序的綜論	(1)
断裂韧性表征程序以及結構鋼防断設計中定量 判据的演进	(47)
大型焊接結構用材料的低周疲劳裂紋扩展抗力	(100)
用于 K_{ISCC} 环境試驗的修正的 WOL 試驗	(123)
三种高強鋼断裂扩展抗力 (R-曲線) 的特征	(144)
高于和低于 K_{ISCC} 时鋼的腐蝕疲劳裂紋增长率特性	(154)
高強度鋼和钛合金的应力腐蝕开裂	(170)
非脆性钛合金防断設計用的断裂扩展抗力 (R-曲線) 概念	(186)
厚截面钛合金的断裂抗力特征	(200)
3 吋厚鋁合金板及其焊接板的断裂韧性	(209)
三种薄板鋁合金的平面应力断裂韧性的比較	(229)
用却貝冲击試驗法研究鋁合金板的超低温断裂韧性	(235)
用却貝冲击試驗法研究鋁合金焊接接头 在超低温下的断裂韧性	(248)
用却貝冲击試驗法評定鋁合金及其焊接接头的 断裂韧性	(256)
聚合物結構和疲劳裂紋的扩展	(270)
玻璃纖維增強的聚酯树脂层压材料的 宏观断裂力学	(278)
电子断口学对破断理論的一些貢獻	(287)
电子显微断口金相簡介	(344)

金属结构防断设计诸分析程序的综论

W. S. 佩利尼

譯自 AD 723,190 1971 年 3 月

前 言

本报告的目的是企图把为工程师们所主要关心的资料汇集成一个连贯的体制，据此了解防断设计问题的全貌。

应用扩展断裂抗力—— R 参数概念把金属性能规格化，便统一了表面上看来是分散的诸因素。可以把得到公认的金属参数与断裂扩展力系统的结构力学概念联系起来。这两种因素之间的相互关系，以分析图的形式予以表达。

分析图程序上的简化，为在力学要求与金属性能之间迭代交叉参照提供了条件。因此，对于一般性工程应用来说，就可以采用折衷分析方法——防断设计实践中的基本方法。

最重要的是，我们根据科学知识的现状及对于工程现实性的充分了解，提出了一个实现防断设计现代化的方案。

术 語

CAT	罗伯逊裂纹终止温度
C_v	V型却贝试验
COD	裂纹张开位移
DT	动态撕裂试验(全尺寸)
DTE	标准试样动态撕裂的断裂功
DWT	落锤试验
E/A	动态撕裂试验中测得的单位断口面积上的功
ECST	爆炸裂纹源试验
FAD	断裂分析图
FM	断裂力学
FSD	防断设计
FTE	弹性断裂转变
FTP	塑性断裂转变
G	裂纹扩展中的应变能释放速率
G_{IC}	弹性断裂中的 G 临界值
IAD	失稳分析图
K, K_I	应力强度因子；角註 I 为张开型裂纹扩展 (千磅/吋 ² √吋)

K_{IC}	缓慢加载(静态)平面应变断裂韧性 (千磅/吋 ² √吋)
K_{ID}	动态加载平面应变断裂韧性 (千磅/吋 ² √吋)
K_{ISCC}	在应力腐蚀环境中, 裂纹缓慢扩展的 K 的最低临界值
NDT	由 DWT 测定的, 或由 DT 试验表征的无塑性转变温度
PWE	断裂的塑性功
R	断裂扩展抗力
RAD	比值分析图
SCC	应力腐蚀开裂
ΔK	疲劳裂纹扩展中的 K 值增量
σ 或 σ_n	外加应力(磅/吋 ² 或千磅/吋 ²)
σ_{yd}	动态屈服强度(磅/吋 ² 或千磅/吋 ²)
σ_{ys}	静态屈服强度(磅/吋 ² 或千磅/吋 ²)
包围区	涉及穿厚屈服(塑性状态)和在裂纹前沿形成珠状波纹的裂纹扩展状态
塑性区	局限于裂纹顶端一个小塑性容积内的断裂扩展状态
比值	指 K_{IC}/σ_{ys} 或 K_{IC}/σ_{yd}
平台	在温度导致的转变完成处所得之最高的延性水平
强度转变	强度增加所导致的断裂抗力的减小

一、引 言

在过去的十年间, 结构设计领域中业已取得了引人注目的进展。为众所熟知的进展是采用了计算机, 从而使得结构的外形最佳化。这一进展已被称为设计的合理化。那是因为它周密地考虑了整个应力系统——主要应力、次要应力和峰值应力之间的相互作用。同样地引人注目的进展是发展了防断设计(FSD)的新的工程原理——与以往实践的差别也就在于它充分地修正了 FSD 合理化的概念。

从五十年代可资利用的知识范围来看, 过去的作法是合理的。当时, 进行防断设计的唯一依据就是按规则和规范的规定, 把应力限制为屈服强度的某一低分数值。从目前的可资利用的资料来看, 过去的做法便不能认为是合理的了——这是因为它缺乏有效的科学根据, 而且又不能可靠地保证防断。

我们所介绍的合理 FSD 做法, 有其完善的科学根据, 因而确实能肯定地保证使用的可靠性。因为这种新的作法是以科学知识的进展为基础的, 所以必须把这一论题理解为专业职责的问题。

这一论题的实质可以简明地归纳如下:

FSD 意味着, 并也要求对结构作全面的考虑; 这同根据结构力学诸原理来考察结构时是一样的。它并非是断裂力学研究的一个分支, 而只是在存在缺陷的结构的情况下断裂力学方法的独立体制。在实用上, FSD 也包括在充分考虑冶金水平的条件下, 选用合乎结构要求的金属。

现代 FSD 程序应取代把强度作为主要因素的传统设计观念, 这样, 断裂参数便成为继发的问题。用这些作法所产生的问题, 既基本上出现在先进系统的全新结构中, 也出现在普

通结构中。已记录到下列不幸经历:

(1) 对于重量受到限制的结构, 根据可能达到的极高强度水平进行的设计 对此, 我们可援引火箭壳体发展计划中出现的破坏事故(图1)。在所有的这类事故中, 关于 *FSD* 诸因素的考虑, 在设计中最初乃根据极高的金属强度水平。我们还可援引飞机结构的类似经历。所有这一类事故, 其错误的根源均可追溯为设计方面的问题。



图1 高强度钢火箭壳体在验证试验中的破坏实况

断口表面中心处的黑色区域便是裂纹(焊缝内的), 脆性断裂就是由此裂纹开始的。这种尺寸的裂纹, 即使使用最好的无损检验方法也是无法检查出来的

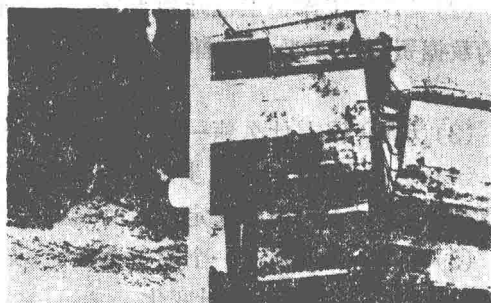


图2 在 350°C (2°C) 气温下, 由于角状柱托架角焊缝趾部引弧处的小裂纹所引起的船舶断裂——此乃二次大战中船舶发生脆性断裂的典型

断裂总是发生在低于钢料的 *NDT* 温度的情况下(在图示例子中为 50°F (10°C)). 而开始断裂的部位总是与由几何或者残余应力效应所引起的屈服应力加载区的小裂纹有关

(2) 根据在尽可能低的金属成本下, 所能得到的普通强度水平进行的设计 我们援引了选用转变温度性能不合适的低成本钢所造成的各种各样的破坏事例(图2)。所有这些事故, 其错误的根源同样均可追溯为设计方面的问题。

高强度金属的冶金发展, 业已受到设计要求中的错误观念的严重影响。在把金属的强度作为决定其竞作新用途的主要因素这种前提条件下, 新的金属在冶金上加以配制(显微组织等)以便获得尽可能的最高的强度。鉴于屈服强度的提高和结构断裂强度的可靠性之间呈反比关系, 遂导致: 一方面设计人员陷于纸上谈兵, 另一方面冶金学家困于炉旁。

总的来看, 凡是源自把强度观念作为选取金属的主要因素的设计自信心, 都使金属在新的和最先进的工程应用中蒙受损失。今天, 受到过这种错误的设计自信心的不幸影响的工程团体, 都已成为 *FSD* 的最内行的专家。此外, 这些工程团体所采用的特定的 *FSD* 作法, 正被一般工程界公认为最先进的, 因而也是最好的作法。

我们要特别强调一下, 必须视特定的结构问题的情况特别制定 *FSD* 作法。适用于用高强度金属制造的火箭壳体和宇航构件的作法, 可能就不适用于由常用钢制造的厚壁压力容器、船舶、桥梁等情况。

在先进工程结构的合理演进中, 首要的问题断然在于设计工作领域。包括金属性能特征、金属的改良、非破坏性检查等等在内的所有的其它要求, 都是源出于设计观念。因此, 设计工作中所出现的任何缺点, 都会给这些要求带来错误的规定。

在进行全新结构系统的工程研制时, 设计工作的错误就影响到金属的研究和发展、金属

的选用、金属的规格、金属的质量控制、金属使用期间的检查要求等要求的全局。

远 景

只有统观了各部分的相互关系，方能了解到复杂论题的全貌。为了适当而全面地展示 FSD 规划远景，应该了解一下下列诸因素：

(1) FSD 程序是专用于包含缺陷的结构的结构力学设计方法。就从经典结构力学进化而来的其它任何一种设计方式而论，主要考虑的是结构外形及其承载时的表现。

(2) FSD 工作是工程师的本分，而不是断裂研究专家的职责。断裂研究则参与推断基本的数据资料、试验用试样及准则。而如何应用这种数据资料的问题，则是结构力学的问题。

(3) FSD 没有什么独一无二的程序；然而，可以获得一些适于各种要求的特定的程序。

(4) 进行 FSD 的第一步是分析潜在断裂问题的性质。合适的 FSD 程序的选定必须依据这类分析。FSD 程序选定方面的错误，会使其后的任何步骤复杂化或无法进行。

(5) FSD 必须要有一个储备系数，以便对付对缺陷尺寸、应力水平进行估算中所出现的偏差以及金属性能的统计变化。

(6) 由于强制性地附加了这一重要的储备系数，就简化了 FSD 的过程。消除了因为要求精确地预计裂纹尺寸——应力数值所带来的复杂性。

(7) 在确保工程安全的前提下进行的 FSD 工作，可归结为选定一种具有大的断裂抗力储备的金属。只要按力学因素确定了要求，那么解决的途径必定是属冶金学性质的。

二、FSD 程序合理化的演变

具有科学根据的完善的防断设计原理的发展及其工程应用的步伐是极其迅速的。防断设计的起点可追溯为 1950 年的首次尝试：引入了包括断裂抗力参数在内的设计因子。在此之前，唯一可用的程序是把设计应力限制于低值。

我们阐述一下只基于应力限来进行防断设计的有关问题，以作为继续讨论的起点。新的程序在根本上背离于先前的作法。

1. 只基于应力限来进行防断设计的有关问题

结构中所存在的应力大小和分布，取决于外形细部的设计质量(图 3)；也取决于外加载荷的性质及向量。对于普通结构中复杂部位处的工作应力，只能在很宽的界限内加以预计。每当必须在窄的界限内确定工作应力时，就总是一定要采用实验应力分析方法。这就意味着要建立模型，并在关键部位贴上应变片。采用了这些程序，可使设计得最好的结构物尽善尽美。

“许用应力”或“极限应力”一词，是指

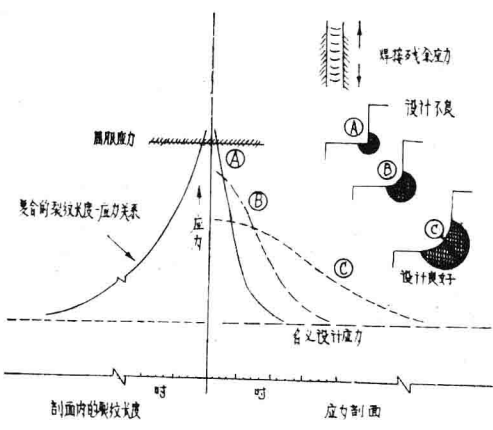


图 3 局部应力的大小与外形变化部位设计质量间的关系。应力的大小和处在高应力区内的裂纹尺寸之间具有一种复杂的关系。小的裂纹可能处在焊缝中达到了屈服水平的残余应力区内。图 2 所示的船舶破损，就是由于弧击的部位处在角焊缝的残余应力区内

计算出来的(或为实验所证实的)最大允许工作应力,并要得到在该特定结构领域中工作的专家的认可方予确立。这个应力值通常是指简单的几何形状而言的。其极限值由规范和准则加以规定,因而具有半合法的地位。

安全系数乃是通用性准则的一种过时的形式。下列引自手册的安全系数,便是清楚地说明设计工程师对断裂安全问题的长期关切的例证。

(1) 对于承受静载的,具有高拉伸延性的金属,相对于屈服强度,其安全系数最少为3。

(2) 当加载的部位为可变的时候,安全系数应不小于4。

(3) 当施加交变应力时,安全系数应不小于6。

(4) 当施加反复冲击载荷时,安全系数应不小于10。

回顾这些,可以认为安全系数概念是 *FSD* 的最初形式。规格和准则的演进,使设计和加工“质量”不断提高,随之,安全系数便降为3~5,我们可以把这种作法视为最初的 *FSD* 的第二代。

可惜,这些作法未能合理地确保不产生断裂性质的破坏。大量的、有完善记载的工程事故证实了这种说法。在第二次世界大战期间,按许用设计应力具有4~5的安全系数的船舶设计的船舶,出现了大量的破坏(图4)。而按照安全系数取3~5的规范设计的压力容器,其破坏也不是罕见的。

对于安全系数通常取为10~20的脆性铸铁,有着完善的安全使用记载。虽然这一经验为采用限制应力法解决 *FSD* 问题提供了一条线索,然而,由于一些实际原因,未能被接受。很清楚,防止断裂的唯一合乎逻辑的途径是采用以金属的抗断裂性能为根据的设计方法。现代的准则和规范正迅速地改造为包含有下面所述的 *FSD* 合理化程序。

2. *FSD* 的演变

合理 *FSD* 程序的演变过程示于图5。“台阶”给出了每一代 *FSD* 的第一篇文献的出版日期。所介绍的每一代,对于其提出时期企图适用目的都没有什么不足之处。我们应该把 *FSD* 的各代看成为在其所能解决的问题(如缺陷状态、金属类型和结构类型)的广度方面的不断进步。事实上,每一代都是在考虑当时最严重和最普遍的问题中产生出来的。

第一代是关于软钢的,主要是转变温度问题(图4)。船舶的破坏问题,是由于初次大规模采用焊接工艺,即引进了整体结构设计所造成的。以后的各代是由于大量采用了高强度金属而产生的,它与新的工程系统有着密切的关系。

船舶的破坏问题引导着人们注意到,通过限制应力的方法来进行防断设计是不恰当的。虽然在大规模采用焊接工艺之前,这些问题已经暴露了出来,然而,愈益明显的是,焊接结构的性质决定了断裂有可能连续地扩展,并最终可能引起整体破坏。原先的铆接结构经验表

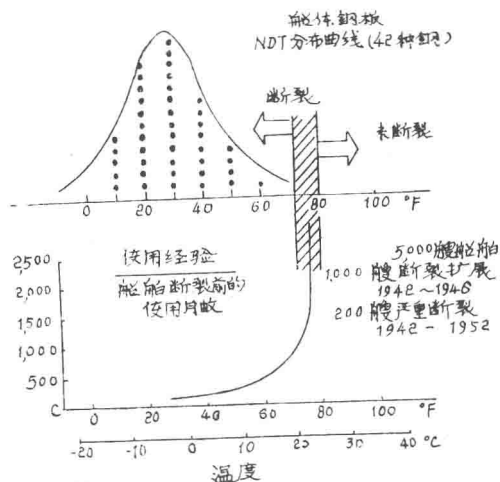


图4 船舶的破坏经验——在一个窄的低温范围内,事故的比率有惊人的增加

使用经验清楚说明,事故是与由 *NDT* 出现率分佈曲线所表示的船体钢的断裂特征有关

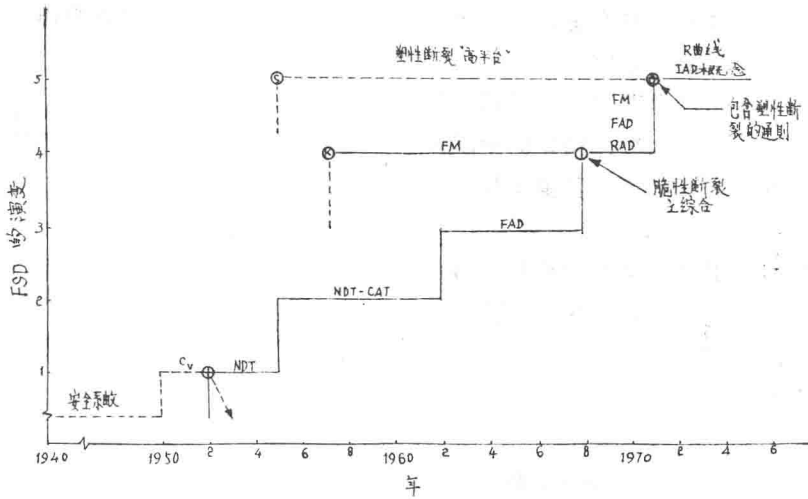


图 5 FSD 的演变次序

示出了实际解决脆性和塑性断裂问题的一般化过程

明，其断裂通常限于个别板材。因此，在四十年代以前，并不迫切需要解决 FSD 中的不恰当性问题。

根据金属的断裂性能做出的第一个 FSD 程序据信是在 1950 年；这是采用了包括当时所用的常规实验室试样进行十年广泛的研究之后得出的。这就是断裂能为 15 呎-磅的 V 型缺口却贝 (C_v) 试验标准，它是根据船舶断裂而得到的相关因素 (图 6)。此相关因素表明，在 15

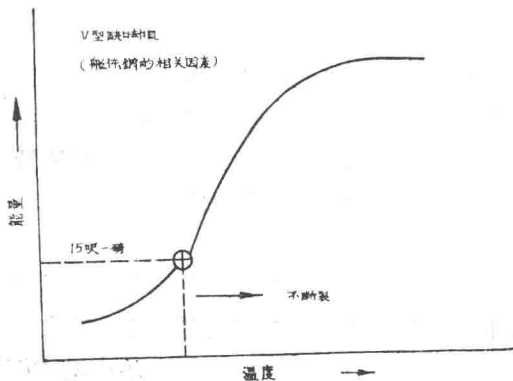


图 6 C_v 试验能量与船舶不致断裂的临界温度间的关系

图中标示点不适用于其它钢种

呎-磅 C_v 能温度以上的温度下，船舶不会发生断裂。船体钢是以轧制状态使用的，并具有较高的 C/M_n 比。由此可见，这是一种为铆接结构而研制的低质廉价金属。当时，这一标准的应用是普遍的；然而，在 1952 年左右，此标准便不用于 C/M_n 比不同的其它钢种，或者即使是相同的钢种，但采用了铝脱氧和正火热处理工艺的情况。

这样，由大规模地研究第二次世界大战期间焊接船舶的破断所作出的唯一的 FSD 程序，两年之内便失去效用了。这项研究的主要成果就是引导人们把注意力集中：采用固有锐裂纹的试验方法；以及涉及研究转变温度敏感的钢种的断裂问题所用的动载条件。

这种看法是在 1952 年出现的评定零塑性转变 (NDT) 温度的落锤试验 (DWT) 标准的基础。 DWT 使 15 呎-磅的 C_v 标准失去了作一般应用的效能，而用 NDT 标准代之成为主要的标准。

为了起一个引导的作用，下面介绍一下图 5 所列演变次序中各代的主要特点；至于更为

详细的说明, 将在以后的章节中提出。

(1) 第一代(*NDT*)

此代 *FSD* 程序的含义是: 取钢材 *NDT* 温度以上的具有某个适宜的增量的温度作为最低使用温度(图 7(G1))。此法适用于在转变温度范围内使用的低强度钢或中等强度钢。这就避免了在承受小于或等于屈服水平的动载应力时因小裂纹(< 1 吋)的存在所招致的断裂发生。这项程序解决了复杂设计的焊接结构的大量破坏问题(图 4)。

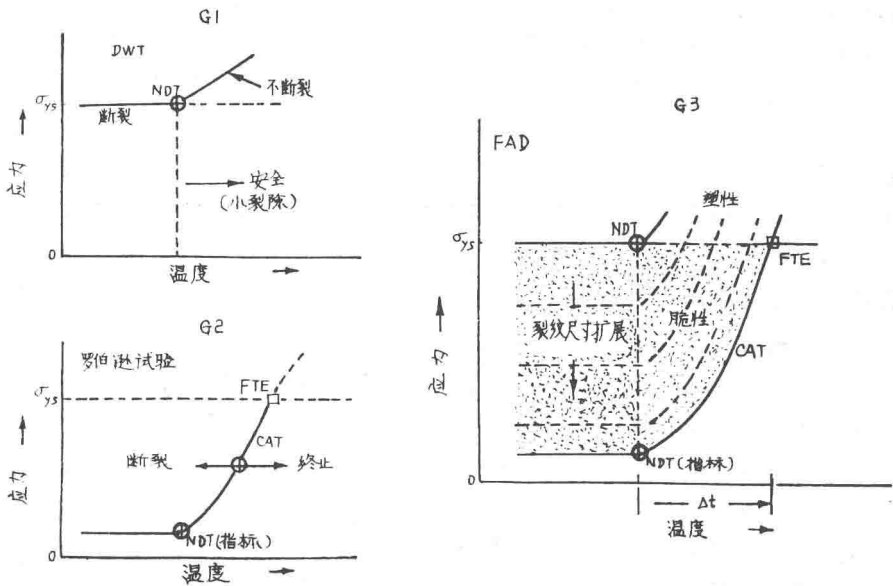


图 7 *FAD* 发展中的演变步骤

NDT' 指标表示这样的温度, 高于此温度断裂抗力将急剧升高(转变)。这样, 在高于此温度时, *FAD* 的所有曲线必定急剧上升

(2) 第二代(*NDT-CAT*)

此代 *FAD* 程序的含义是: 按照 *NDT* 标点在温度坐标上的位置, 在裂纹终止温度(*CAT*) 曲线上方取一个适宜的增量, 定为最低使用温度(图 7(G2))。此程序可确保: 在特定的名义弹性应力小于或等于屈服水平的情况下, 不论缺陷的尺寸如何, 都不会出现脆性断裂的扩展。*CAT* 程序不是条件防断程序, 就是说, 它不取决于缺陷的尺寸。

(3) 第三代(*FAD*)

断裂分析各程序通过定义一个对应于广泛范围的裂纹尺寸的发生应力概念的附加特征[图 7(G3)] 综合了 *NDT*₁ · *CAT* 的考虑方法。其参考点是 *NDT* 温度以及由 Δt 温度增量所规定的其它指标。断裂分析图是第一个也是最广泛采用的分析图程序。在求解钢的转变温度方面, 这个断裂分析图具有很大的灵活性。例如, 他为采用有条件的(缺陷尺寸)或是无条件的(防止断裂扩展)防断设计方法提供了选择余地。

(4) 第四代(*FM-FAD-RAD*)

这一代的开端, 可以追溯到由断裂力学理论引出的“*K*”值概念的诞生。断裂力学的企图是要得出一种完全通用的有条件的防断设计程序, 用以确定引起脆性断裂的缺陷尺寸-应力关系(与金属类型无关)(图20)。在下述意义上, 达到了第四代目标: 即, 它把转变温度程

序(FAD)与断裂力学综合起来。此外,发展了比值分析图,从而,简化了断裂力学对强度转变金属问题(不涉及温度效应)的应用。综合程序在解决脆性断裂问题时具有充分的灵活性。

(5) 第五代(R 曲线- IAD)

上述一些程序包含了关于延性金属断裂扩展的防断设计问题的初步考虑。这个问题的解决着重于“高平台”,即对塑性断裂的高抗力情况。确定金属的塑性断裂抗力的试验方法的新近发展(R -曲线),使发展包括延性断裂在内的设计方法迈出了重要的第一步(图 27)。塑性断裂的载荷特性曲线的结构力学特征是由一个新的程序来表示的,这个程序称为失稳分析图(IAD)(见图 28, 29)。随着达到了把 R 曲线参数同结构力学因素联系起来的目标,那么,既适用于脆性断裂问题,又适用于延性断裂问题的普遍适用的防断设计方法就成为现实可用的了。

3. 总 结

不能认为,上述防断设计问题的各代的发展就圆满完成了该领域内所需进行的全部研究工作。重要的是:我们要在学会防止所有类型断裂的灵活变通的设计方法的同时还要具有防止屈曲或其他过载破坏形式的本领。今后将继续进行补充研究,就象对于壳体稳定性、屈曲等等问题正在作的研究一样。

必须认为 FSD 是一种从设计草图就能“瞻望”防断设计要求的设计方法。设计结构,选择金属,着手制造然后又后顾到断裂可靠性问题,这样一个设计过程是极普遍的。瞻前的十分合理的设计,应该从构思和预设计阶段做起。只要在整个设计过程中,作出适当的工程分析,那么,正确的防断设计程序,金属的选择,质量控制、技术标准化这一些环节就都能合理地、有条理地开展了。

幸亏已经取得了上述进展。新近发生的事件,使得人们更加关心因潜在的技术事故所引起的危险问题,图 8 所示的就是一例。船舶、桥梁、飞机、商业交通系统(当载有有毒或易燃材料时),原子能电站等等的破损事故是不可允许的。制定规章的政府机关在这一领域内正变得有见识。公众事业的代表愈来愈多地参与条例和规格的制定。期望那些应该理解潜在的灾难的原因并进而防止其发生的人们肩负起共同的和事业性的职责。各代防断设计也能对追查由断裂所致的破损事故的原因作肯定的分析。



图 8 液化天然气储罐由于脆性断裂引起损坏的情况

三、防断设计中金属特性与结构力学特点的统一

企图把断裂研究学问与结构力学科学分开来的兴趣正在开始消逝,这是很幸运的事情。存在于以不同观点来从事断裂研究的人员中间的分歧,也正被消除。加速这一趋势是很重要的,这是因为,显然须要使不同的研究部门结合起来,以构成一个合理的研究体制。

在存在裂纹时,防断设计的实施必须把对断裂机理和结构响应($Structural\ response$)这两方面的考察紧密结合起来。结构响应规定了防断设计要求,而金属的固有断裂抗力特征则决

定了这些要求是否会被满足。设计过程就是处理这两个因素之间的平衡，因此，它抛弃了工程实践的传统作法。

必须在断裂研究领域和结构力学领域之间建立起紧密的经常不断的联系；同时还需要同冶金研究领域建立联系；只有这样做，才能研制出改进性能的金属，以满足结构要求（包括较高强度，较厚截面，较低的使用温度，改进了的可加工性，最低造价等）。

工程师应把大量断裂研究文献当作有助于防断设计程序的基准知识，但只需在极一般的意义上理解之即可。同样，工程师并不一定要理解决定金属的断裂特征的物理冶金理论。最需要的是要认识到做为金属质量指标的断裂试验参数的意义。关键的问题在于根据结构性能来判定这些指标值。简单分析图为此提供判据。

图 9 上所示出的顺序图说明了曾对建立防断设计程序做出贡献的各项研究活动所起的作用。

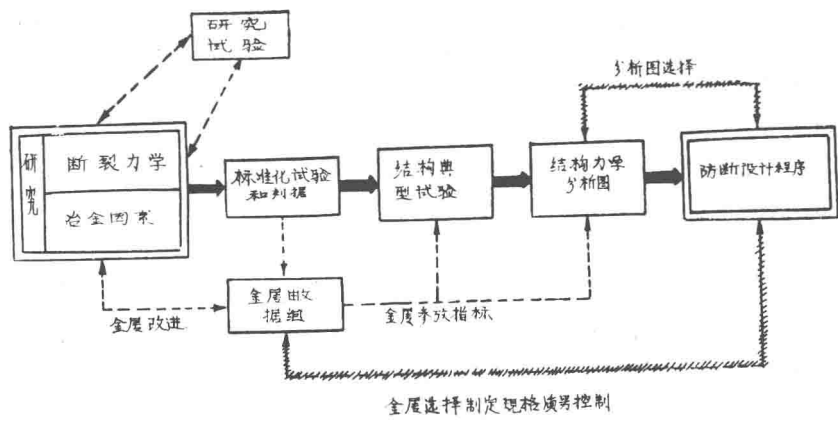


图 9 导致实用防断设计程序进展的研究活动；破折线表示与防断设计的一般工程实际有关的方面

标有“断裂力学”的框格代表断裂研究专家们所从事的活动。专家们的基本科研课题论证了：任何所要求的复杂程度的断裂研究试验试样，试验设备及试验费用等的使用和发展都是合理的。图中的迴线标出了这方面的出版物及会议活动的内容——这种活动通常只限于少数具有专门资格的成员参加。

标有“标准试验和准则”字样的框格代表着就工程师所关心的断裂研究的最重要的成果。能够标准化的试验甚少，它必须在技术意义和实践价值方面取得科研和工程单位的一致意见。一般来说，试验必须在程序上是简单的，而且是廉价的；以满足为制定规格和进行质量控制所采用的常规试验室试验的要求。

为了发展供工程参考的有关金属特性的数据组编码，标准试验是必不可少的。根据这些数据组，便可为防断设计的目的选定金属。

图中的迴线表明了又返回到涉及冶金因素的研究阶段的循环。它代表为改善金属特性而开展的研究活动，其结果，就质量选择而论，扩大了数据组。

标有“结构典型试验”的框格，代表把由标准试验试样所取得的指标值给予结构力学判定的这一发展方向上所迈出的第一步。结构原型试验描述能表征存在选定尺寸的缺陷的最简单的结构元件的性态这些简单构件可以是拉伸平板，处于弹性或塑性膨胀状态的板材、具有

缺陷的压力容器等等。如果分析得当,那么,结构破损也可用作结构原型的实例。重要的是:必须通过试验手段把断裂扩展所需要的弹性或塑性载荷要求与标准断裂试验值联系起来。一般来说,结构原型试验是就某一范围的缺陷尺寸和某一范围的金属质量水平(也就是断裂抗力由低至高的某一变动范围)进行的。

然后,把由结构原型试验所得出的资料数据化为适于具有特定断裂试验指标值的金属的缺陷尺寸-应力关系的图解表示。这一步骤是由标有“结构力学分析图”的框格表示的。此后,如果已知金属的断裂试验指标值,就可以确定金属在存在特定缺陷时承受弹性或塑性应力的结构能力。反之,如果规定缺陷尺寸和应力,那么,就可以确定所属金属所要求的断裂试验指标值。

各种研究活动的实际目标是要发展合理的防断设计程序。图9的虚线表明,防断设计程序取决于恰当的结构力学分析图的选择,以及有关的金属性能数据组参数。防断设计程序必须包括确定金属-订购规格标准,和制定制造-质量控制实践这两方面的工作。这两方面工作必须与决定金属选择的设计参数相配合。

现有四类基本的结构力学分析图:

断裂分析图(*FAD*)

图解断裂力学(*GFM*)

比值分析图(*RAD*)

失稳分析图(*IAD*)

现在,必须要理解到,这些结构力学分析图的选用,决定于金属类型(对转变温度敏感与否),金属的断裂抗力品质(延性或脆性),及结构的整体特征(刚性或柔性)。当据较简单的结构而选定了合适的分析图时,工程师就易于进行防断设计了。

作者之所以强调分析图程序,是出于考虑到牵涉到金属特性和结构力学因素之间的折衷的工程可靠性。采用图解说明,就能简单地迭代交叉对照这些因素。我们对此情况作如下的申述:如果没有分析图,那么,交叉对照问题就只能由专家们来解决了。而且,即然如此,也是有极大困难的。如果要由一般工程界进行防断设计,那么,就必须用图解的方式表述。结构力学——金属特性相互关系。

这一部分着重指出,通过采用预定程序及预先建立的金属数据组值(*Metal data-bank value*),就能够着手进行防断设计。事实上,对于选择合适的防断设计程序来说,考虑一些基本的结构力学因素比详细了解断裂机理更重要。对于决定金属的断裂扩展抗力的诸因素的一般性介绍,就是以提供大多数工程目的所需的知识水平。

四、断裂抗力的表征

断裂所引起的破损意味着由预存裂纹的扩展过程所引起的金属分离。断裂扩展抗力的最明确的质量是由具有深的尖锐裂纹(或很尖锐的缺口)的试验试样给出的。之所以提出这一要求,那是因为自然裂纹都是尖锐的,因此试验试样就必须再现这一特征。

理想的断裂试验试样的特色是应具有至少是 $1/2$ 板厚(裂纹深度 ≥ 0.5 裂纹前沿宽度)的裂纹深度。如果满足了深的尖锐裂纹这一要求,那么,就在试验试样和结构中的自然裂纹扩展条件之间建立起了对应关系。因为理想试验试样“模拟”了结构中的裂纹扩展过程,所

以，它就为在实验室条件下测定特定金属的裂纹扩展抗力作了准备。

裂纹扩展过程，包括使在裂纹顶端造成局部塑性变形的力的施加以及在随后阶段中金属的塑性破坏。所有的断裂扩展过程，（无论是脆性的或延性的）都涉及到金属局部吸收塑性工作能的问题。不管使用什么单位制，所有的断裂试验参数基本上都是与能量有关的项，这是因为，断裂抗力只能由塑性工作能求出。各种不同类型的理想断裂试验（深尖锐裂纹或缺口）之间的唯一的重要差别是所测定的金属断裂扩展抗力的范围。

金属断裂扩展抗力的整个范围，包括象玻璃之类的脆性到象拉伸试验中表现出的延性。这两个极端情况之间的重要的工程上的分界线是在不稳定（脆性）和稳定（延性）断裂扩展之间出现的转变。图 10 示出了两种断裂类型。不稳定断裂，因弹性应变能的释放而以高速（1000 至 3000 呎/秒）扩展，即，通过弹性应力场而扩展。而稳定断裂包含其后在裂纹前沿的前方的较大范围金属（塑性包围区）的塑性破坏。由于塑性包围区相继发生的屈服和断裂所需的与时间有关的金属的惯性效应，因而裂纹扩展速度是很慢的。由包围圈区的破坏所致的断裂扩展方式，要求施以过屈服应力水平的力，所以，稳定断裂只能通过塑性应力场而扩展。

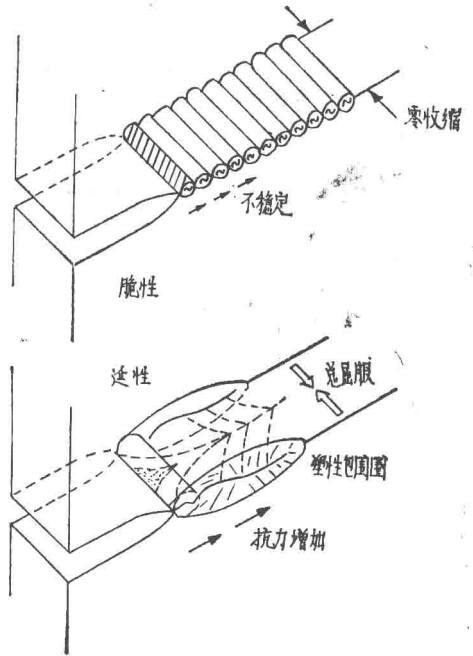


图 10 与不稳定（脆性）和稳定（延性）断裂扩展有关的裂纹前沿塑性状态的图解说明；V 型剖面表示延性金属的初始裂纹增长

断裂扩展所需的特定力学条件可总结如下：

（1）脆性断裂条件

金属抵抗断裂扩展的程度，取决于须受作用于裂纹顶端处的三向应力状态支配的金属的固有延性。当该应力增加时，则小的塑性区形成并增长。在临界应变水平时（它是由处于三向应力状态下的金属延性决定的），塑性区便破坏。塑性区前方的弹性应力场情况示于图 11。金属的脆性状态，随着在破坏时刻所达到的塑性区的临界尺寸的增加而降低。为了使增大了尺寸的塑性区破坏，就要求更高的弹性应力场强度 K ；因此也就必须增加名义弹性应力水平。

脆性金属的共同特点是：因弹性应力水平的载荷作用，就造成在裂纹顶端塑性区前方的不稳定断裂。不稳定断裂之所以以高速扩展，乃是由于弹性应力场能以只受弹性应力波和金属的惯性效应限制的速度向前移动。

（2）延性断裂条件

在三向应力状态下，这些金属的固有延性竟如此之高，以致不可能发生在小塑性区状态下的破坏。其结果是：裂纹顶端被钝化，而且形成一个大的塑性区（塑性包围圈）（如图 10 所示）。为了使这个大的塑性包围圈破坏，由外加载荷引起的应力就必须升高到超屈服的水平。提供驱动力的塑性应变场情况如图 12 所示。引起破坏所需要的塑性工作能比例于塑性包围区的范围和其中的塑性应变的数值。图中的阴影面积代表塑性工作能。可以把它与图 11 中

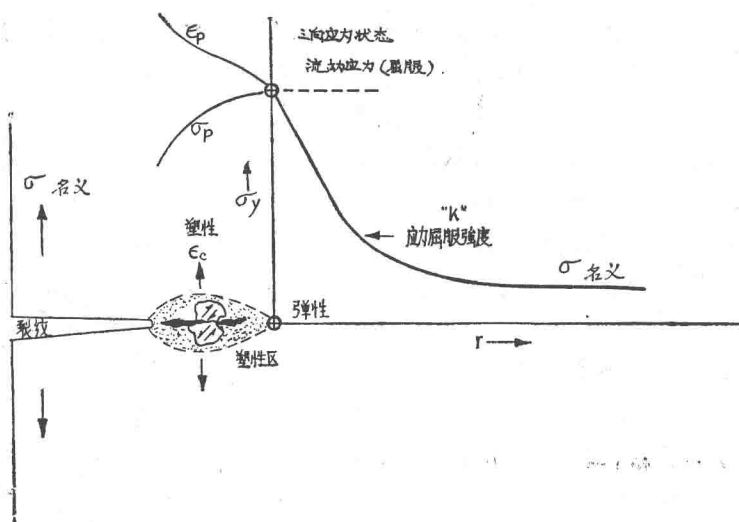


图 11 在脆性断裂发生的时候，裂纹顶端塑性区前面的弹性应力场特征；为了说明问题，塑性区尺寸被放大了。实际上，脆性金属的临界塑性区尺寸接近于裂纹顶端半径尺度，也就是非常小的。断裂力学参数 K ，是引起塑性区破坏的强化弹性应力场斜率坡度的指标。 K_{IC} 象征塑性区起始断裂点的应力强度水平 K

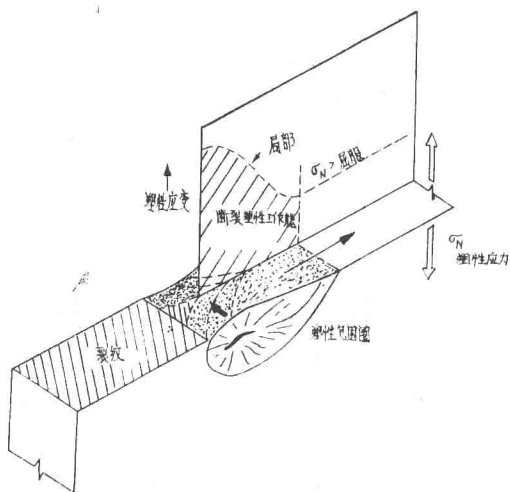


图 12 塑性断裂时，塑性包围区前方的塑性应力场特征。断裂塑性工作能 (PWE) 随包围区尺寸的增加而增加，也就是随厚度方向屈服程度的增加而增加。由于起始塑性包围区尺寸的增加，所以，在连续的中心破断的第一阶段发生了塑性工作能和扩展抗力尺寸的增加。断裂扩展过程的发生和继续所需要的名义应力必须超过屈服水平

的由小塑性区所代表的很低水平的塑性工作能进行比较。

在裂纹钝化和塑性包围区增大期间，延性金属的断裂扩展抗力随着扩展的进行而增加。在这个期间内所发生的裂纹增长，出现在截面的中心区(关于这一点，以后将予以说明)。因

此，才有一系列的随后的破坏步骤。在扩展的第一阶段过程中，后一步破坏均较前一步破坏遇到更大抗力。这是由于塑性包围区尺寸增大以及侧向收缩增加的缘故。事实上，初始裂纹前沿所具有的拘束水平，因三向应力场的松弛而减小。出现抗力增高的距离是金属的固有延性的函数。

1. 断裂试验的工程含义

理解断裂试验参数的工程含义的关键在于：把上述的变动情况看作是牛顿第三定律“对于每一作用，都存在某一相等的反作用”的一种表现。驱动力系是造成致使裂纹扩展所必需的弹性或塑性应力水平的力系。而反作用是当金属在塑性区或塑性包围区的破坏近区经受塑性流变和加工硬化时由金属的内聚力所提供的抗力系。

驱动力系、抗力力系(反作用力)二者之间的关系，简略地示于图 13。临界塑性区或临界塑性包围区尺寸，决定了局部破坏抗力，因而，也就决定了所要求的驱动力系的强度。涉及到小塑性区的断裂是以低的反作用力能力为特征的；因此，弹性应力就足以造成断裂发生及扩展。涉及到塑性包围区屈服的特点是具有高反作用能力；因此，就需要塑性载荷驱动应力。

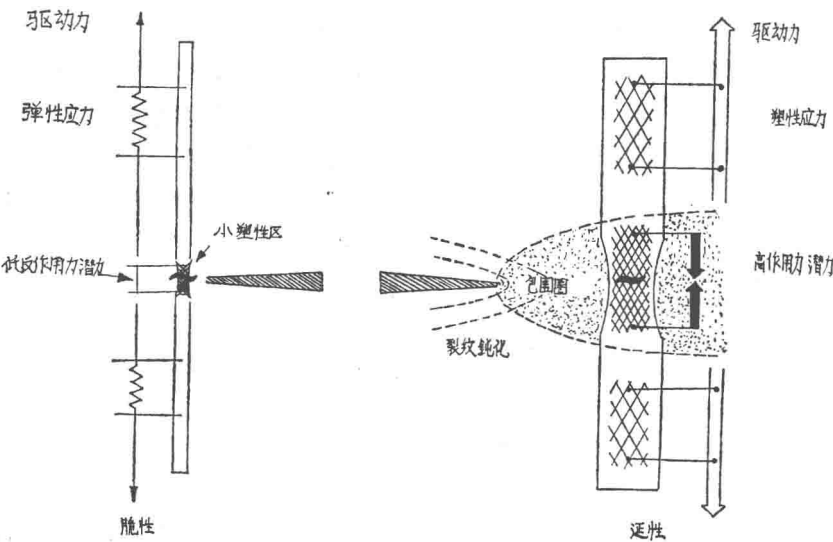


图 13 驱动应力水平和金属抗力能力之间的关系。脆性金属在弹性应力水平的断裂扩展，由于抗力能力低而从小范性区连续破断，高抗力能力的延性金属，为促成断裂扩展，需要有塑性应力

根据抗力曲线（它与初始扩展的每一单位增量所吸收的增高了的塑性工作能有关）可以想象出抗断裂扩展过程。R 曲线的斜率决定了所要求的驱动力的增加情况。表述如下：

- (1) 脆性断裂——塑性工作能并不随着扩展而增加。R 曲线是平直的。因此，并不要求随着扩展而增加驱动力。
- (2) 延性断裂——塑性工作能随着初始扩展量的增加而有不同程度的增加，其增加情况