

井下安放设备 的断裂控制及材料工艺

A·布雷克

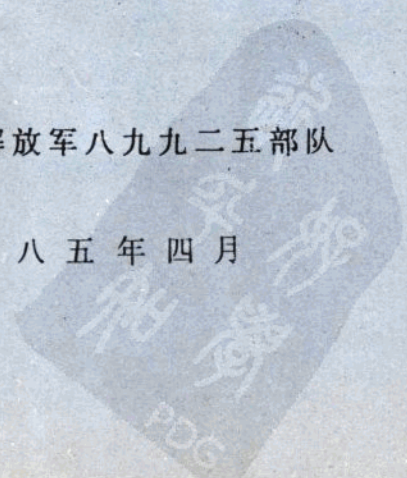
1983

劳伦斯·利物莫尔国家研究所



中国人民解放军八九九二五部队

一九八五年四月



TL9/20 TE9/4

目 录

术语汇编

提要

绪言

基本概念和定义

美国石油学会 (A P I) 材料方面的经验

起重设备改型的背景

高强度材料工艺

安放设备的材料选择

断裂力学的实际意义

结论

感谢 (略)

参考文献

术语汇编

ATLAS	新增设的后方试验组合系统
a	裂纹尺寸
acr	临界裂纹长度
B	试样宽度
C	断裂韧性方程中的常数
CAT	裂纹停止伸展曲线
CDS	电缆下井系统
CVN	夏氏V型缺口韧性
DT	动力撕裂
DWT	落锤试验
E	弹性模量
FRP	纤维增强塑料
HAZ	热影响区
HY	高强度 (高屈服强度)
K _{1c}	平面应变断裂韧性
K _{Si}	千磅/吋 ²
6 Ks rule (6 K _{Si} 规则)	安全应力的依据
L	缺口的长度或深度
LEFM	线弹性断裂力学
MIG	金属惰性气体
Modell Number	(莫德尔数) 擦伤和磨蚀的量度
MRER	中等能力的安放设备
NDT	零塑性转变温度
QA	淬火和时效
QT	淬火和回火 (调质)
r	曲率半径
S _e	许用的设计应力
S—曲线	转变曲线
SMA	有保护金属电弧
STS	特殊处理钢
S _N	预期的工作应力
等	零件的厚度

T_s	温度变化
ν	泊松比
σ	(弹性) 应力的一般符号
σ_e	当量应力
$\sigma_x, y, z,$	三向应力
σ_y	屈服强度
$\sigma_{1, 2}$	主应力

井下安放设备的断裂控制及材料工艺

提 要

本报告汇总了劳伦斯·利物莫尔国家研究所 (LLNL) 在过去15年间把断裂控制原理用于井下安装设备和技术保障机具各方面的经验。当前我们在处理地下核试验用的机具购置和设备改型的实际问题中的设计思想继续反映了这种经验。由此产生的技术发展已运用于质量保证和设计安全实践中。

我们的意图是打算将本报告作为一篇历史性的消息报道和工作文件, 写给那些保障核试验规划设计可靠性和外场工作计划以及其它实验室活动的有关技术、管理人员。本报告提出了在结构完整性和材料控制领域方面的局限性和可行的改进途径。

绪 言

这个研究所在过去15年间对核试验规划工程保障的实践经验导致了特殊设计和材料标准的形成, 其目标在于确保实验质量和井下安放系统的安全。国家的重要性和核试验的敏感特性继续要求我们对材料选择和设备设计基本保持不变。今后对现有断裂控制准则和设计约束条件的任何修改只应在对以前的外场经验和当前影响有关机械设备和机具可靠性的工业趋势有充分了解下才能尝试。这个报告打算就保持良好设计和运转实践所必须的机械和结构工程各领域合适的经验及现代知识作一鉴定性的评述。

断裂控制的定义与断裂力学理论有关, 它是从对裂纹伸展敏感的承载件的应力分析的运用中得出的。就工程材料经典的脆裂特性来说, 传统的机械特性, 例如屈服点、极限抗拉强度和伸长率必须用作为温度函数的断裂韧性和裂纹停止伸展应力等参量的适当知识加以补充。因此, 断裂安全设计的基本控制准则采用下列各实用措施之一便得以遵守:

1. 选择材料, 已知这些材料在特定工作环境下对脆性断裂本来就不灵敏。
2. 设计成低的应力水平, 其标志是弹性能量不足以使任何原有的或突然进入的裂纹伸展。
3. 对于核安全和工业安全所依赖的关键结构构件, 设计成重复超静定的载荷线路。

基本概念和定义

大约40年前,当第二次世界大战舰船的焊接钢板由于突然损坏造成了灾祸时,人们就痛苦地认识到金属的“展性到脆性”转变问题。作为这个经验的结果,弗吉尼亚州阿灵顿城的海军研究实验室的工作⁽¹⁾其目的是研究各种补救办法,并对屈服强度低于大约120 ksi (84.5 kg/mm²)的低强度钢和中强度钢的断裂安全设计准则的形成提供了极好的基础。

钢脆性断裂中的裂纹伸展和停止伸展特性最初是由罗伯逊⁽²⁾在五十年代初期研究的。这项研究得出了裂纹停止伸展变化的应力—温度曲线,该曲线指明低于一个特定的标称应力则裂纹会趋于停止伸展,这与裂纹的尺寸和几何形状无关。结构损坏的实际机理可以根据在特定情况下构成损坏的临界程度⁽³⁾得到一些解释。譬如,减少拉伸状态下的净截面面积会使结构不再能承受所需的荷载,不论裂纹顶端是弹性响应还是塑性响应。虽然对裂纹伸展和停止伸展的重要因素已经很好地认识并做了研究,但由于这个问题理论上的复杂性,制造技术的改变和经济上的制约,使得对于断裂控制在设计中的工程解决办法形成得很慢。

假定主要的机械性质是断裂控制的实质,在整个这篇报告中将用 K_{Ic} 表示。这个性质是众所周知的,并可通过线弹性断裂力学(LEFM)的基本关系归一化。 K_{Ic} 表示所存在的裂纹对于使裂纹以失稳状态伸展的驱动力的阻力。一般来说,假设 K_{Ic} 值与 $\sigma\sqrt{a}$ 成正比,这里 σ 是给定材料的基本弹性应力,而 a 表示裂痕的尺寸或者裂纹的深度。那么这个关系就可以说明一个参量,包括临界的裂纹尺寸和标称应力。这种解释连同按照标准的ASTM(美国材料试验学会)试验方法⁽⁴⁾得到的试验结果规定了一般屈服,弹性—塑性和结构特性的平面应变范围⁽⁵⁾。 K_{Ic} 这个词还可以称作在裂纹失稳的一瞬间与张开型应力强度相联系的平面应变断裂韧性。这样,就把它称为应变和温度的函数,而且它的适当数值只能由试验确定。所以对于所有实际用途, K_{Ic} 代表材料的一种内在性质,它应当与试样的设计和尺寸无关。在这方面 K_{Ic} 是单值的,例如,象通常的材料屈服强度那样。但是,它的数值不能从标准的机械特性例如屈服强度,极限强度,伸长率或弹性模量推导出来。此外, K_{Ic} 以(应力) $\times$ (长度) $^{\frac{1}{2}}$ 为单位来表示,和应力分析中任何其它标准因次量不一样。

必须注意脆性断裂一般是突变形式并且是在非常有限的塑性变形下发生的,裂纹伸展的速度高达7000 fps (2134 m/s)或可能更高⁽⁶⁾。相应的断裂表面显现为平的劈裂面,基本上没有切变裂痕。现在花费了很大的力气来防止这类损坏。但是,LEFM(线弹性断裂力学)技术还不能直接运用到大多数这类结构问题上,而且我们自己在过去15年间对井下安放设备设计和购置的经验历史也清楚地证明

了这个事实。主要是，设计工程师要求他所用的材料呈一般的屈服形式，以便避免各种类别的脆性变化。脆性的特性曲线类型是线弹性的，并要求更精确的设计方法，因为实际的裂纹尺寸变成一个必不可少的设计参量。

对于温度对大多数结构钢的缺口韧性的影响已经很好地认识到了。各种试验技术已经得到发展，如夏氏V型缺口（CVN），动力撕裂（DT）或经典的 K_{Ic} 方法⁽⁴⁾，技术和经济上的考虑已影响到选择夏氏V型缺口（CVN）指标作为研究断裂韧性随温度变化的转变曲线的有效试验方法。常用术语NDT是指零塑性转变温度，表示钢的断裂韧性开始从平面应变迅速增加到完全的展性变化时的温度。在这个转变过程中，材料经过弹—塑性变化状态。“弹—塑性”这个名词表明接近裂纹顶端有明显的屈服段。令人遗憾的是，现在还没有简单的分析仪器来测定这种类型的机械习性。

选用夏氏V型缺口技术来说明材料韧性的性能有时是恰当的，因为对CVN，DT和 K_{Ic} 数据的分析可得到合理的相关方法⁽¹⁾⁽²⁾。但是，不应认为CVN试验就是确定多种钢零塑性转变温度（NDT）的不变来源。潜在的困难是有些钢对于浅的缺口灵敏，并且由较小的CVN试验截面提供了有效的约束效应。由CVN试件设计造成的不适当约束的后果是观察到转变曲线朝较低温度偏移。这种效应不适合于一般的DT（动力撕裂试验）数据⁽⁸⁾。但是，表示通常的S形转变曲线的较上部分绝对能级与DT试验中获得的没有太大差别。考虑到NDT的重要性，我们必须作出这样的结论：使用CVN方法需要提出每种钢号特性的相关性，而实际切实可行的办法则是使用DT试验方法，据知它给出正确的NDT指数和致使断裂相应的能级。事实上多数形成的技术规范仍用CVN的标准表示，这清楚地表明经济上的考虑占优势，而不是技术上的考虑。

地下核试验断裂安全设计的鉴定是按照这样的基本思想发展的，就是核试验规划（NTP）对过去15年间在材料方面发展的安全 and 质量保证规定不应有任何明显的放松。下面叙述的历史将按时间顺序提出，并考虑到在绪言中说明的断裂安全基本准则相应手头两个准则的概念分别定义为 K_{Ic} 规定和 $6K_{Si}$ 规定。核试验部（NTED）多年采用的 $6K_{Si}$ 规定来源于罗伯逊的工作⁽²⁾。它确定了在转变曲线较低部分钢的应力大小，在该曲线以下裂纹在通常的载荷与几何形状条件下将不会突然伸展。

$6K_{Si}$ （ 423 kg/cm^2 ）规定确实是保守的，而且含有某些总归纳的意思，当运用到一次性使用的试验设备时，它可以保证附加的核实与推敲。但是，在不能证明材料为断裂韧性的那些设计领域中，打算用它作为断裂控制的手段。这还适合于以前没有断裂韧性保证的成品项目以及新的设计，包括表现为 K_{Ic} 下限数值不高于大约 $25K_{Ic} - in^{1/2}$ （ $88.75\text{ kg/mm}^{1/2}$ ）的结构钢。前面所述暗指

保守的根据在于 $25 K_{Ic} = \sigma \sqrt{a}$ 这一事实即它代表了所谓“普通钢”的 K_{Ic} 值的理论下限。当实行了 LEFM 的适当的边缘缺口准则时，低限标称应力变为材料厚度和断裂韧性的函数⁽⁹⁾。在这些假设情况下，NTED 采用的所谓厚度“ $6 K_{Ic}$ ”规定成为图 1 中曲线上的一点。这个特殊曲线适合于常值 $25 K_{Ic} = \sigma \sqrt{a}$ 。

就断裂控制的基本概念而论最好强调一点，即在各工业部门牢固确立并仍在使用的 CVN 技术，从产品可靠性观点看一般并不能提供为了保证预防所需的所有资料。结构性能的鉴定需要对断裂韧性进行定量进行定量测量，如由动力撕裂 (DT) 试验提供。令人遗憾的是大多数钢铁制造仍未采用美国材料试验协会推荐的用 DT 试验进行材料性能鉴定。

因为断裂力学及其派生的断裂控制可以称作一个较新的概念（这个新的概念主要是在过去 25 年间发展的），所以它可能有助于确定试件的几何形状和动力撕裂试验 (DT) 的力学。用于动力撕裂试验的典型试件在图 2 中示出。它包括一个深的凹槽，凹槽根部可以靠把刀刃压入使其加深。试验在典型的摆式试验机上进行，这种试验机与夏氏 V 型缺口实验中使用的相似。压入顶端凹槽的最大半径，例如 LNL 多数高强度钢试验中所采用的是 0.001 吋⁽¹⁰⁾。在其它应用中这深而明显的裂纹可以用电子束焊、冶金脆化的焊珠来诱发。譬如，佩利尼引用一个例子，将钛丝加到焊缝上造成脆性 Fe-Ti 合金⁽¹¹⁾。所产生的窄焊缝很容易被预加载来产生非常小但是未确定半径的明显裂纹。DT 试件在一定温度范围内试验，使用摆式试验机，断裂后摆锤向上摆动可以看作是断裂过程中能量所吸收的大小。为了一致性的原因，在这类实验中试样的尺寸和几何形状必须标准化。

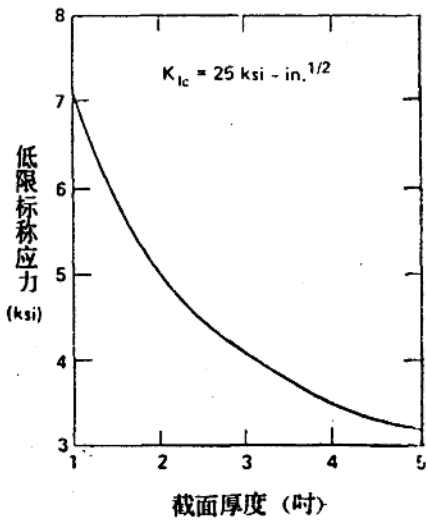


图 1 钢的断裂控制的低限设计应力

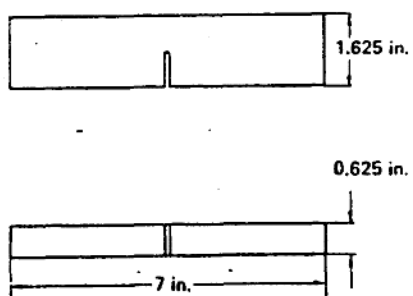


图 2 动力撕裂试验所用的试件

对于保守设计中断裂控制的基本要素，人们会自然地问起关于截面尺寸对 NDT 的影响。由比较厚的截面给出的潜在约束量也包含着脆性变化的趋势，这与冶金条件无关。直到最近，这些特殊性能提出了经典的断裂力学可能否认了物理冶金学的原理，并会有突然损坏的真实危险，譬如厚壁容器或其它结构即使在微高的工作温度下也会严重损坏。幸运的是，大约在12年前，当韦斯汀豪斯研究所和海军研究实验室进行了相当广泛的一系列试验以后，这些问题就都解决了⁽¹⁾。从使用异常大的DT试样的那些试验中得到的主要结论之一是截面的增加只展宽了温度转变的范围而没有使它偏移。在断裂安全设计中这是一项重要根据，因为它减少了对NDT和较低的应力级所必须的一些需要选定的变量。

图3表示结构钢的裂纹停止伸展曲线(CAT)的一个典型示例，这里将5到8 Ksi 范围规定为较低的应力级。这个范围与NTED采用的6 Ksi 规定是一致的，并且与图1中更一般的理论曲线也一致，该曲线是斯特雷特⁽⁹⁾在阐明断裂力学方程的基础上提出的。实质上在绘制图1中所做的假设是在结构中存在未探测到的裂纹，其深度大于或等于截面厚度的一半。将这假设的裂纹模拟成一块长方形板中的一个边缘裂纹，这块板承受一个垂直于裂纹表面的均匀的轴向拉力⁽¹¹⁾。

当具备了特定材料的更完整的CAT曲线时，断裂安全设计就可以简化了。在图3中，点A和A'分别表示在特定温度下许用应力 S_a 和工作应力 S_w 的大小。所有落在CAT曲线以下的标称应力和温度座标的组合都表示适合于裂纹停止伸展的条件。CAT曲线以上的区域代表助长裂纹伸展的变量区域。当裂纹的尺寸增加时，裂纹伸展所需的标称应力估计会较小。但是这个关系并未在图3中示出，因为我们保守的6 Ksi 规定是假设与裂纹尺寸无关的。这里可以为设计制定出一些实际断裂控制准则，而却未规定实际的裂纹尺寸与几何形状⁽¹⁾。这是NTED 6 Ksi 规定的一个重要特征，在图1中用截面厚度表示出对该特征能引起兴趣的理论说明。

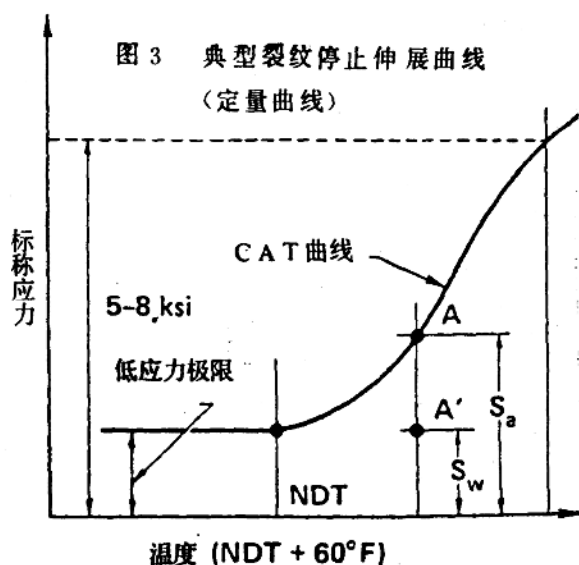


图3 典型裂纹停止伸展曲线
(定量曲线)

美国石油学会材料方面的经验

美国石油学会 (A P I) 对于过去50年间油井套管、油管和钻杆的经验及规范进行了收集及核实。在贸易和专业杂志上广泛刊登了所介绍的器材和设计准则, 并允许在安放管柱和类似机具的设计中有无数的组合⁽¹³⁻¹⁵⁾。多年来一些钢号已经审定作为A P I 标准, 其最小屈服范围在40, 000 和150,000 P s i (28.17 - 105.63kg/mm²) 之间。

为内华达试验场 (N T S) 任务考虑的最低级材料是A P I J 55, 具有的屈服强度为55,000 P s i (38.7kg/mm²)。但是在规划的早期, 就对J 55在试验场地经受的温度范围下的断裂韧性有所考虑。曾预计对于相对较低的断裂韧性来说, 临界裂纹尺寸可能太小而探测不出来。因为缺乏这种材料的N D T 和K_{IC} 数据, 所以就进行了研究以便判定供N T S 使用的J 55材料适用性⁽¹³⁾。下面给出的这项研究重点在将断裂力学和材料科学用于发展这种材料和其它A P I 材料的断裂控制计划方面具有长远的教育意义。

已发现原始的J 55 A P I 级具有的屈服强度为55,000 P s i, 伸长率为20%, 这把它分为一种合格的结构材料类。但是对于硫、磷 和碳的含量在化学性质方面没有很好地规定, 而正是这些元素可能影响N D T 的成分。此后还发现碳的含量在0.40 - 0.50% 范围内, 并认为这对于良好的韧性来说是太高了。进一步的考查发现原有的材料 是用最廉价的可能方法制造的, 对断裂控制没有任何专门考虑。随意抽取的材料抽样表明N D T 分散在0 ~ 150 ° F 之间, 而且所有较大的试样在环境温度下都基本上脆坏了。这个经验使我们能够认识在确定这种材料和其它A P I 材料的任何断裂控制计划中冶金和工艺过程变量的重要性。

虽然这项考查的目标对准了A P I 的J 55套管, 但随即就明确了对于化学性质和强度类似的钢来说可用的断裂韧性数据是何其的少。作为相比的一种材料, 其屈服强度为50,000 P s i, 伸长率为20%, 图4 表明A 302 B 钢的K_{IC} 随温度和工艺类型的变化情况⁽¹³⁾。这个试件取自7 英寸厚的钢板, 在确定K_{IC} 的过程中产生疲劳裂纹。总之, 热处理条件表明由于存在着较细的微型结构, 便使K_{IC} 显著提高。图4 给出在大约30° F 温度下, 相应的K_{IC} 值为130 和55K s i - i n^{1/2}。在已知K_{IC} 和工作应力的情况下, 从通常的断裂力学公式就可以估算出临界裂纹尺寸。这个尺寸的大小与(K_{IC}/σ)² 成正比, 这里σ是工作应力。还值得注意的是在图4 中限定K_{IC} 的两条曲线在较低温度下趋于展平, 下降到约25至30K s i - i n^{1/2}。据戈德伯格报导A P I J 55的断裂韧性初步估计为20K s i - i n^{1/2}⁽¹³⁾。按照这个数值和预期的工作应力40K s i, 计算出的。

临界裂纹长度等于0.16吋。在实践中，这样的大小的裂纹要可靠地探测出来是相当困难的。

从材料的观点看，普通钢中碳的含量决定着机械强度的增加。但是当碳含量增加时，NDT 偏移 to 较高温度，因而产生断裂所需的能量变小。图5 粗略地表明碳含量对正火、空气冷却的铁碳合金的影响。

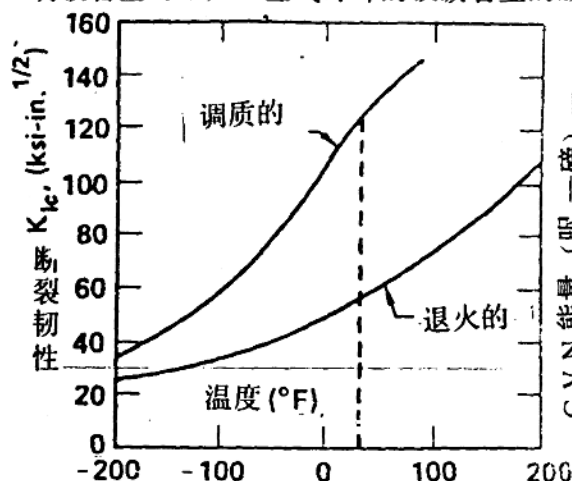


图4 热处理对材料A 302 B 的 K_{Ic} 的影响

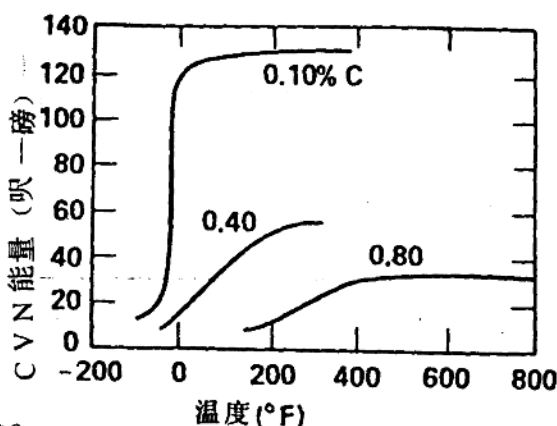


图5 碳的含量对C V N 能量的影响

从指出NDT 的精确值角度来说，这些特性曲线和它们相对的偏移在这里不能认为是准确的。图5 中的曲线只是用来表达这样的概念，即碳的含量对断裂所需能量和NDT 的位置的一般影响是主要的。合金元素例如Ni 的加入是为了固溶体效应，Al 用以控制N 和N₂，掺入Al 和Mo 是为了细晶化，这些肯定会改善断裂韧性。在API 的J 55中实际上没有这些控制元素，这说明为什么这种材料的断裂韧性总是很勉强的。

上面对发展断裂控制方法早期所做努力的总结表明不得不放弃使用API 的J 55。推荐用淬火和回火（即一调质一译注）状态的API N-80级作为替换，并适当控制其碳和合金的含量。在为安放设备购置和使用N-80钢时还做了一些切实可行的建议。我们感到这种钢基本上不应焊接或火焰切割。但是在不得已需要修理的情况下，合格的焊接程序应包括预热和用低氢含量的焊条。还有，在火焰切割后，受热影响的部分必须磨掉。

用J 55做安放装置套管的初步研究比较短的时间内就结束了，同时实验室所处地位是确实要付出各种努力来改善安放管柱的断裂控制特性。结果是只有调质状态下的API N-80和P-110 级可以推荐用于井下作业。此外，管子的承载试验只允许在60°F (16.7°C) 以上温度下进行，而且不应在低于20°F (-6.7°C) 温度以下进行安放。

J 55钢即时被废弃的最后情况与芬尼克斯和摩森（公司）报导的J 55套管的损坏有关系⁽¹⁷⁾。正常的检验技术不能正确测定出任何缺陷，因而结论是由于焊接飞溅造成了裂纹，必定是一个微小的缺陷起了作用。即使一个非常小的缺陷也会造成脆性损坏这一事实指明了这种材料的断裂性确实很低。这是选择劣质材料的典型例子，在这里通常根据屈服强度或极限强度确定的安全系数就没有意义了。显然，用J 55和类似材料制成的正常结构就不得不设计成能经受得住更低应力的结构。

检查J 55套管的断裂部位揭示出损坏的原因是由于脆性裂纹的迅速伸展，而该裂纹的起点在焊缝附近的外表面热影响区中。除去由于一个焊接飞溅外没有其它裂纹，而且没有迹象表明会存在超过0.02吋深度的裂纹。破裂表面基本上没有剪切凸缘，并且很明显，断裂是横晶的，典型的粗晶粒材料由于有限的能量而损坏。奥氏体晶粒大小将近0.15mm量级。但是通常的机械特性仍然是很好的，而且并没有提供有如不良的断裂韧性和发生塑性到脆性转变的高NDT的线索。

在对API级材料的性能描述过程中下一步要与安放设备关键部件的断裂安全实施和制订断裂控制计划的总考虑一致起来。在安排这个考虑中，为遵守必要的断裂阻力准则，选择了API的P-110级。那时发现这种管材以前并未用正规的和定量的断裂阻力试验方法描述过⁽¹⁸⁾。P-110管的试样是从琼斯与劳林钢铁公司，美国钢铁公司和阿姆柯钢铁公司取得的，并且是按照API的5-A X规范制造出来的。全部选择的是外径 $9\frac{5}{8}$ 吋（244.5 mm）、壁厚0.435吋（11.1mm）的管子。当时由制造厂提供的这种材料的机械特性在表1中示出。值得注意的是对于这种钢级的材料，其屈服强度对极限强度的比大约为0.87。保留的屈服强度超过规定值110 K si，变化范围为4%到14%。于是在所有情况下制造出的管子的强度比API规范规定的要高。

表1 P-110 材料的强度

制造厂	抗拉强度 (K si)	屈服强度 (K si)	伸长率 (%)
琼斯与劳林公司	141	124	25
阿姆柯钢铁公司	131	114	20
美国钢铁公司	143	125	26

海军研究实验室对这条管子所进行的研究工作集中在用DT和CVN参量确定整个温度转变关系上。各试件按纵向排列，而相应的断裂则沿着圆周轨迹。图6和图7中所表示的特性揭示出由DT和CVN方法获得的NDT位置上有重要差别⁽¹⁸⁾。图6和图7给出的编号1到3分别表示美国钢铁公司、琼斯与劳林和阿姆柯钢铁公司生产的钢。如前所述，NDT的实际位置只能由DT能量曲线来确定。但是两种方法表示出按照同一API规范从不同来源购置的材料之间都有差异。这些差异沿能量轴线和温度轴线都很显著。例如，美国钢铁公司生产的钢，在CVN曲线上的上升点大约是-120°F、27呎磅，而在DT曲线上相应点则给出-100°F和150呎磅。对于琼斯和劳林公司生产的材料，由标注#2的曲线表示，在两种方法之间作为结果所产生的NDT的差别大约是60°F。对NDT观察到的数值之间的差别证明有必要CVN和DT能级之间建立起某种联系，尽管由海军研究实验室所获得的有关P-110管结果是相当分散的。按照图6和图7给出的数据，API的P-110材料在CVN和DT能量之间的近似相关性可作如下表示： $(CVN) = 0.12(DT) + 15$

数据中存在着明显的分散性，这可以要求从手边所有实验数值分散带的顶部来选择适当的设计准则。当材料的断裂阻力受弹—塑性响应的控制时，对金属构件结构整体性的置信程度自然增高。对壁厚为0.435吋的API级P-110管推荐的原始DT值是125呎—磅。根据上面的相关性，相应的CVN能量是30呎—磅。海军研究实验室建议P-110材料的最小工作温度为-20°F。在这个基础上由美国钢铁制造厂和琼斯与劳林钢铁制造厂供应的试验管段关于上述能量和温度准则给出了良好的安全系数。然而根据图7则认为阿姆柯的材料在其断裂阻力方面处于边界上。当前，对于APL套管包括接箍用的两种高级钢，在淬火和回火(QT)条件下，公认的统一指标如下：⁽¹⁹⁾

API 5A, N-80级 25呎—磅 (三个的平均数) 两者都在 $-20^{\circ}\text{F} \pm 3^{\circ}\text{F}$
 API 5AX, P-110级 20呎—磅 (单个试件)

上述指标依据的是CVN型试验。安放管材料除刚提到的那些以外必须通过材料性能试验分别检验。在选择井下安放系统的主要部件之前，这些试验必须与ASTM (美国标准试验方法) 推荐的标准方法相一致。

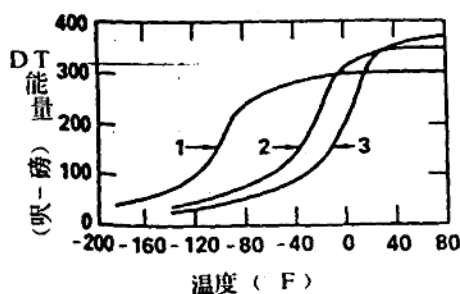


图6 P-110 管动力撕裂 (DT) 能量

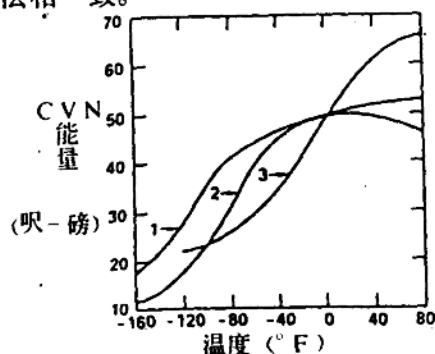


图7 P-110 管夏氏V型缺口 (CVN) 能量

起重设备改型的背景

差不多在18年前,用于内华达试验场(NTS)起重大钩组件中的吊杆在环境温度 28°F (-2°C)和很小的额定起吊能力下突然损坏了。根据记录⁽²⁰⁾损坏时的载荷是额定值的9.3%,屈服载荷的1.6%,只有最大假设起吊能力的2.6%。图8给出拜隆·杰克逊大钩组件吊杆的近似草图。断裂发生在横穿最小截面的地方,同图预料的一样,断裂发生在一个典型的带孔拉杆构形中,这里拉伸和弯曲的效应大概是合成的。在孔的内表面观察到了大量的擦伤,在这里吊杆销轴产生了最大的接触压力。实际断裂区是以人字形断口痕迹为特征的,从这就可以假定裂纹伸展的速度很快,而且与金属的脆性状态相一致。裂纹显然是从补焊地方开始的,接着磁粒探伤新发现了一个 $3/4$ 吋(19mm)长的原始裂纹。这条裂纹确实在通常所说的补焊热影响区(CHA Z)里。已经断裂开的部分则不能很好地密接在一起,这说明在断裂的过程中产生了明显的永久变形。人字形斑纹则证明这直接和脆裂特性有关。但是,还观察到一些粗的人字形痕迹,这样我们就可以假定,在断裂的最后阶段当裂纹伸展速度最后已减慢时,发生了一些剪切变形。

在吊杆损坏后对裂纹特征进行了较仔细的检查,证明了导致断裂的整个过程是非常复杂的。由于工作疲劳使原来的热影响区裂纹发展了,同时擦伤损坏在吊杆销轴和孔之间的接触表面引起剩余拉伸应力。由于在裂纹的根部应力高度集中,疲劳裂纹一旦开始就要发展。在断裂表面并没有锈蚀物,这也暗示着损坏过程必定是发展得非常快的。

随后对标注为AISI(美国钢铁学会)4140的吊杆材料进行了冶金研究,这也是很有启发的。表2列出经鉴定的化学成分总表。

令人吃惊的是所有元素,除去碳以外,都在允许剂量之内。吊杆材料的含碳量较低也造成锻件的硬度低。观察到的布氏硬度范围是210到230。但是,实际问题似乎是焊缝的显微结构,在那里发现了未回火的马氏体。马氏体区指明布氏硬度为600,并且它可能是在奥氏体冷却后5秒之内产生的。因为通常在马氏体转变的同时体积发生变化,兰顿认为⁽²⁰⁾这种效应连同未回火的马氏体的固有脆性是在热影响区产生原始裂纹的主要原因。在断裂区有很明显的劈裂面,这有力地启示我们在热影响区相当大一部分材料象玻璃一样脆。换句话说,在有裂纹存在的情况下,即使大钩的载荷很小也会对裂纹的伸展提供足够大的势能。

应该注意,如表3所列,吊杆锻件的一般机械性质是非常好的。

但是,4140材料的韧性不能用上述机械性质来说明,并发现这种材料的韧性如图9所示完全不合格。

表2

吊杆的化学成分 (百分比)

元素	断裂的吊杆材料	AIS I 4110要求
C	0.32	0.38 - 0.43
Mn	0.84	0.75 - 1.00
P	0.016	0.04 最大
S	0.014	0.04 最大
Si	0.33	0.20 - 0.35
Cr	1.01	0.80 - 1.10
Mo	0.18	0.15 - 0.25

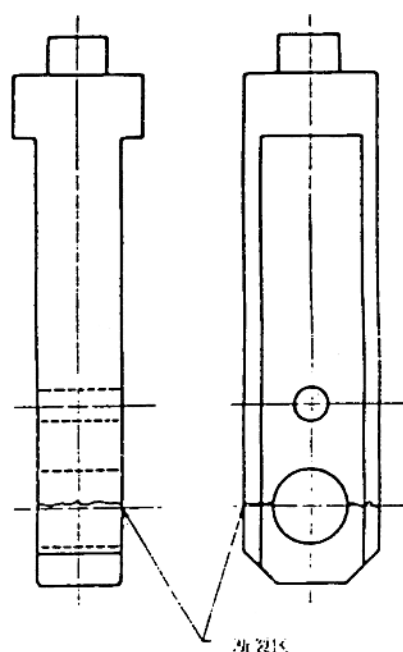


图8 起重大钩组件的吊杆示意图

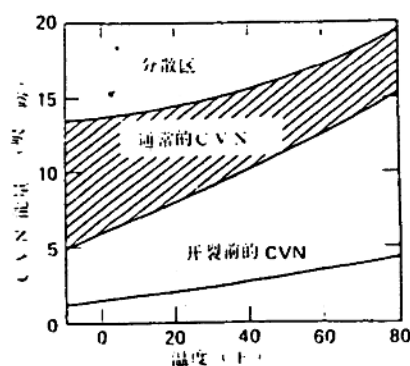


图9 大钩吊杆材料的断裂能量

表—3

吊杆锻件的机械性质

	试 验 温 度	
	28 F (- 2 C)	72 F (22 C)
0.2%屈服点 (K s i)	64 (45.1kg/mm ²)	63 (44.4kg/mm ²)
极限抗拉强度 (K s i)	117 (82.4kg/mm ²)	111 (78.2kg/mm ²)
伸长率 (%)	28	29

图9中给出的分散区把标准的CVN冲击强度作为温度的函数。下边的一条曲线与开裂前CVN方法的结果相一致，指出了极限应变率和缺口灵敏度。值得注意的是尽管多年来其它制造厂用类似的低合金钢制造发电机轴和其它部件曾经有过问题。但在起重设备工业这时仍继续使用AISI-4140。按照图9所依据的实验室试验，4140材料塑性到脆性转变的温度可能高达100°F。从而可能极少数起重设备制造厂真正了解其起吊设备的低温限度。

上述有关大钩吊杆损坏这方面的特殊经验已归纳为一些专门的建议，其中有改型和质量保证等细节。建议对所有主要材料每年进行磁粉检验 (Magnaglow - 磁力线探伤) 和荧光差色渗透剂检验 (称为荧光探伤)。为了减少擦伤的可能性，吊杆销轴的硬度必须相应增加。这看来与所谓莫德尔数的概念相一致⁽²¹⁾。按定义，莫德尔数是衡量金属滑动摩擦的一种量度，也是擦伤趋势的一个标志。这个数值与布氏硬度对弹性模量的比数成正比，因为在布氏硬度和应力的弹性极限之间有密切关系。磨损和擦伤似乎随莫德尔数的增加而减少。就加工制造的约束条件而论，对于4140材料或说实在的，对任何一种其它合金钢不允许补焊，除非制定了控制得很好的焊接程序，并由合格的冶金工作者验收。最后建议，对于所有主要零件主张采用CVN检验，并具有明确的目标，即保证在-20°F下CVN能量至少为20呎-磅。

在内华达试验场对4140锻制的吊杆损坏进行初始调查研究的同时，劳伦斯·利物莫尔国家研究所对4140材料铸件加以研究，以便确定其一般的机械性能、CVN能量和平面应变断裂韧性⁽²²⁾。表4给出了这种材料的铸件的通常性能。

如所预料的那样，这种铸钢的基本机械强度特别好，但是伸长率很差，CVN的断裂能量结果表明相当分散。图10中表示根据实验画出的近似直线关系。原先舰船制定的最小CVN能量准则在工作温度下为12到15呎-磅。根据这个准则，铸造4140的极限低于60°F。与此同时进行的断裂力学计算表明温度为30到70°F，

表一 表2 吊杆的化学成分, A I S I 4140要求 断裂的吊杆材料 元素
 临界裂纹尺寸大约为0.475吋。对于温度接近 0 F 和断裂韧性大约为 $50 \text{ K si} - \text{in}^{1/2}$ 来说, 计算出的临界裂纹尺寸是0.16吋 (4 mm), 这里假设施加的应力等于该材料的屈服点, 并且几何形状为铸件中半圆形的表面裂纹。经验表明即使在表面上, 发现这样大小的裂纹也是非常困难的。

表 4 4140铸件的性能

	试验温度	
	32 F	72 F
0.2% 屈服点 (K si)	114	119
极限抗拉强度 (K si)	141	142
伸长率 (%)	8	8

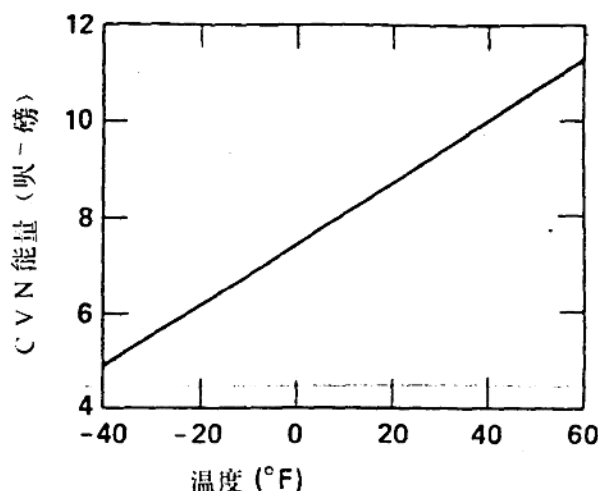


图10 4140铸件的近似断裂能量

大约在11年前, 恰恰在重要的“小罐”试验之前, 对750吨 I D E C O 游车支撑销轴的侧板开始了一次广泛性的讨论⁽²³⁾。这项改造结构设计特别重要, 因为它成为一般与起重设备制造有联系的材料和断裂控制整个问题的先声。这不是一个简单问题, 因为下面谈到的⁽²⁴⁾与起重设备整体性有关的问题由于断裂力学在起重设备工业中运用的必要性并未被充分认识这一事实而复杂化了。此外, 材料控制, 具体的设计准则和工业部门采用的公式通常被认为是带有专利性质的, 这使得对现有提吊设备结构可靠性的测定更为需要并且所需费用也就更高。