

TE973
5

~~TE913~~
7

油气管道断裂力学分析

潘家华 编著

620000



石油工业出版社



B 620000

前 言

近二十余年来,断裂力学作为一门新兴的力学分枝有了很快的发展。

油气管道,尤其是输气管道曾发生过不少断裂事故,这些事故只有应用断裂力学才能正确地加以分析、解释并进一步采取工程措施加以防止。断裂力学在油气管道工程上的应用是其应用于工程实际上的一个最有成绩的领域。

我国的管道工业在近一、二十年来有了迅速的发展,但遗憾的是我国的大部分管道工作者对油气管道的断裂力学分析知之甚微,如这一情况不加以迅速改变,则很可能会重复国外工业发达国家在建设管道的初期,由于对断裂力学的无知而出现的大量惨痛事故。

在这一认识的指导下,笔者在大学讲授过这方面的课程,并做了一些试验研究工作,在国内外杂志上和论文报告会上发表过十余篇论文。为了较为系统地介绍,于1984年底动手写此书。

在编写过程中,笔者对多次在国外访问及工作期间收集的百余篇有关论著进行了择优吸收。

由于水平有限,加之时间匆忙,难免有不妥之处,还望读者指正。

在世界范围内,油气管道的断裂力学研究多数在美国进行,因而许多公式及图表均采用英制单位。由于试样(如夏比冲击试样)均系采用英制的,这些,尤其是图表往往难以折

合成我国的法定计量单位,为此本书中部分公式和图表仍保持原来形式,并在书中附表中给出常用单位的换算。

目 录

第一章 绪论	1
第二章 油气管道的脆性断裂	6
第一节 脆性断裂的特征及止裂的速度判据	6
第二节 脆性断裂的断裂力学分析	18
第三节 防止脆性断裂的工程措施	23
第四节 脆性断裂典型事故的分析	25
第三章 断裂的起裂	29
第一节 起裂转变温度	30
第二节 穿透裂纹的起裂判据	34
第三节 非穿透裂纹的起裂判据	48
第四节 对起裂判据的验证	57
第五节 螺旋焊缝钢管的起裂研究	60
第四章 管道的延性断裂及其止裂	76
第一节 延性断裂发生的历史背景	76
第二节 延性断裂的特征	78
第三节 延性断裂的扩展及止裂分析	81
第四节 影响止裂的其它重要因素	94
第五节 止裂环和止裂的其它措施	99
第六节 延性止裂的可靠性分析	101
第五章 油、气管道中缺陷的疲劳扩展	108
第一节 油气管道中的疲劳问题	108
第二节 裂纹的疲劳扩展	109
第三节 疲劳寿命的估计	118
第六章 管道缺陷在平面应力状态下的稳定扩展	121
第一节 承压能力的逆转现象	121
第二节 承压能力逆转现象的断裂力学分析	122

第三节	影响裂纹增长和承压能力逆转的几个因素	125
第四节	为减少承压能力逆转和裂纹稳定扩展的工程措施	128
第七章	管道的应力腐蚀断裂	135
第一节	应力腐蚀的机理	135
第二节	K_{ISCC} 及 da/dt	138
第三节	氢应力腐蚀 (氢脆)	144
第四节	温度对 SCC 的影响	147
第五节	使用寿命的估计	149
第八章	管道中的缺陷及修复	151
第一节	油气管道事故分析	151
第二节	裂源的判断	156
第三节	缺陷的修复	158
	本书所用非法定计量单位的换算	161

第一章 绪 论

第二次世界大战以后,油气管道工业得到了迅速的发展,据日本今西良一预计,在世界范围内管道增长每年约为 $4 \times 10^4 \text{km}^{[1]}$ 。从实际发展看,略高于此数值。1981年投入使用的长输管道为63853km,这超过今西良一估计的数字,如仍仅以每年增长4万公里的较为保守的数字估计,到目前为止,全世界管道总长已超过 $200 \times 10^4 \text{km}$,以上的数字不包括油、气田的集输管线。

随着海洋油气田的开发,海底管道也得到迅速发展。1940年世界上第一艘近代化铺管船开始铺管,至今已有40余年的历史,北海油田的开发促进了海底管道的发展,北海油田的海底管线水深已达168m,距离达400km^[2]。

我国近代管线的建设是1949年以后开始的。1963年3月,由巴县至重庆的输气管线投产,全长55.6km,直径426mm,自此以后,在四川省建设了十几条输气管道,总长近3000km。

五十年代末,在新疆建成了第一条长输原油管道,管径150mm,全长140km;六十年代初,又建了一条复线;1965年在山东省建成一条输油管线,七十年代前,共建了这三条输油管道,总长为373km。

随着大庆油田产量的迅速增长和新油田的不断开发,我国管道工业在七十年代进入了迅速发展的阶段,由1970年至1985年新投入的管线约为15000km,加上油、气田的集输管线,水管线等总长有数十万公里。

长期的生产实践证明,管道工业发展的历史也是一部人们对管道断裂问题不断认识并与之斗争的历史。

1950 年在美国有一条直径 30 in 的管线在试气时发生破裂,这可能是可以从文献中查找到的最早的管线破裂记录。自此以后,随着管道工业的发展,在五十年代曾发生过大量的管道断裂事故,迄今为止,世界上最引人注目的一次管道脆性断裂事故是 1960 年在美国 Trans - Western 公司的一条 30 in 的输气管线上发生的。该线全长 58 mi,材料为 X56,断裂发生时,应力为 35500 lb/in^2 (244.8 MPa),大约相当于规定最小屈服极限(SMYS)的 63%,断口剪切面积只占 5 ~ 15%,断裂长度达 13 km。该管线是在试压时发生断裂的,裂源为一根管子运输过程中造成的缺陷。起裂后,裂纹向两个方向扩展,一端碰到一个厚壁三通造成止裂,另一端碰到一根韧性较大的管子而止裂^[4]。

我国迄今为止,最大的一次管线脆性断裂事故是大庆至铁岭输油管线复线在 1974 年冬季进行试压时为防止水结冰而采用气压试压(这是不符合规范的)发生的^[5]。爆破发生在嫩江穿越段,当时大气温度约为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$,清晨最低气温接近 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$,试压长度,亦即爆破长度约为 2 km,管材为我国生产的 $\Phi 720 \times 9 \text{ mm}$, 16Mn 螺旋钢管,爆破时压力为 45 kg/cm^2 (4.11 MPa),应力接近材料规定的最低屈服极限(SMYS),2 km 管线全部破坏,有的管段被抛出约 50 m,从断口看,基本为脆性断口。

当钢管在试压或操作时,总之在承受压力时所处的温度高于材料的转变温度时,则不会发生脆性断裂。故设计时应当要求材料的转变温度低于管线承压时所经受的温度或有类似的规定,所以当今材料的转变温度已成为选材的重要指

标。

前面所述的嫩江穿越段冬季试压时之所以会发生长达 2km 的脆性断裂事故,是由于材料的转变温度明显地高于环境温度,破裂时,材料已处于脆性。

由于对脆性断裂机理的认识的加深和冶金工业的发展,使管材的转变温度大大降低,故近十余年来,脆性断裂事故在世界范围内已很少发生了。

在人们把注意力集中在脆性断裂的时候,延性断裂的事故却不断发生。延性断裂事故的增加是有其背景的,研究表明延性断裂能否得到止裂与管径的大小和管壁所受的应力水平的高低有关,管径越大、所受的应力越高,则为得到止裂所需的上平台能(CVN)越高,亦即要求材料的韧性越好。

近年来,管道工业有向大口径、高管材强度发展的趋势。1969年,30in 以上的钢管在美国占 25%,在苏联占 29%,但到 1980年,分别增加到 40% 和 45%,与此同时,管道强度等级的提高更为明显。

1926年,API 发布 API-5L 标准,其中只包括三种炭素钢,屈服极限分别为 173、206、235MPa。1947年 API 发布 API-5LX 标准,其中包括 X42、X46、X52 三种锰钢,1964年 API 发布 API-5LS 标准,将螺旋钢管标准化;1967、1968、1970 三年中,API-5LX;5LS 增加 X56、X60、X65 三种钢,1973年增加了 X70 钢种,1972年 API 发布 5LU 标准,其中包括 U80、U100 两种钢,其屈服极限已分别达到 551 和 690MPa。

采用大口径、高强度钢管通常可增加输送管线的经济效益。为追求经济效益,钢管的口径和强度等级迅速增加,但与此同时,管材的冲击韧性特别是对延性断裂规律的认识没有

相应跟上,以致出现了大量的延性断裂事故。

近十年来,人们把注意力主要放在延性断裂的起裂和扩展及止裂上,对延性断裂的研究,其范围之广,投入的财力和人力之多远超过了脆性断裂的研究,目前,这项工作还没有结束。

管线在使用过程中,由于种种原因,管线中的缺陷是会扩展的。扩展的原因之一是压力的波动。有些油、气长输管道是采取间歇输送的方式进行的,因而这种管道在整个使用期间,压力经常由零增至最高输送压力再降至零。另外一些管线,如供给居民使用的输送煤气的管线和供水管线一天内有两、三个高峰,压力也是有较大幅度的波动的。压力的波动造成管壁内环向应力的波动,从而会造成管线中缺陷的疲劳扩展。

输送腐蚀性介质时,也会造成管线中缺陷尺寸的扩展,由于这种原因造成的断裂称为应力腐蚀断裂,另外如还伴随压力的波动时,则会形成应力腐蚀疲劳断裂。

管材多属于韧性材料,从弹塑性断裂力学可知,对于韧性材料存在着平面应力状态下裂纹的稳定扩展问题。平面应力状态下的稳定扩展对管线,尤其是在试压阶段有较大的影响。

本书还将论述裂源的判断、缺陷产生的原因及其修复。裂源的判断往往是断裂事故发生以后为寻找断裂原因所碰到的第一个课题,著者将根据国内外的一些经验讲述判断裂源位置的方法,讲述根据统计资料对重大事故产生原因的分析,介绍缺陷产生的原因,并讲述修复的方法及一些基本原则。

弹塑性断裂力学是管道断裂研究的理论基础,故在阅读本书之前,需有一定的断裂力学的基本知识。

在本书的叙述中,将尽量采用深入浅出的写法,紧密结

合管道的工程实际，力求对管道工作者有所帮助。

参 考 文 献

[1] 今西良一：“长距离石油输送パイプラインの現状及将来”，石油学会志，第19卷，第3号，1976，p24～28；

[2] 潘家华：“关于管道输送问题”，综合运输，1981年增刊，p40～42；

[3] Pan Jiahua：“The development of China's oil and gas pipeline industry” CHINA OIL, Second Issue, Volume 1, 1984, pp126-128；

[4] “Rupture will not delay transwestern's line” The oil and gas J, Apr. 26, 1960, Vol. 58, No. 17, P. 105；

[5] Pan Jiahua：“Some fracture problems in pipelines” Europipe '83 conference ·Basle, Switzerland, Paper 2。

第二章 油气管道的脆性断裂

在本书的第一章曾例举了某些管道脆性断裂的典型事例。国外工业发达的国家,由于管道工作者对脆性断裂已经有了较为深刻的认识,选材时,对管材提出恰当的技术要求和采取了一些其它技术措施,再加上由于冶金工业的进步,管材可以满足管道工作者提出的技术要求,故十多年来,脆性断裂事故已减到很少了。我国管道工业发展得较晚,大多数管道工作者对管道的断裂力学分析还所知不多,故而七十年代以后,还发生过多起管道脆性断裂事故,除第一章所例举的事故外,我国黑龙江省输送成品油的管线也发生过多起管线脆性断裂跑油事故。如果我们不掌握这些知识,就会重复国外管道工业发达国家早期出现的管道脆性断裂事故。

第一节 脆性断裂的特征及止裂的速度判据

一、管材的冲击韧性与温度的关系

见图 2-1,该图为某厂 X60 钢管夏氏冲击能和断口的剪切面积与温度的关系。

由图 2-1(a)看出,在某一温度(在图中约为 -40°C)以上材料的夏比冲击能(Charpy V Energy)基本上是不变的,但低于此温度时,冲击能迅速下降,这一由韧性开始向脆性转变的温度称为管材的韧脆转变温度,或简称为转变温度(Transition Temperature)。当温度达到转变温度以后,继续下降时,冲击能继续降低,至某一值时,冲击能又大体保持衡定了,由图看出,此时冲击能已很低了。

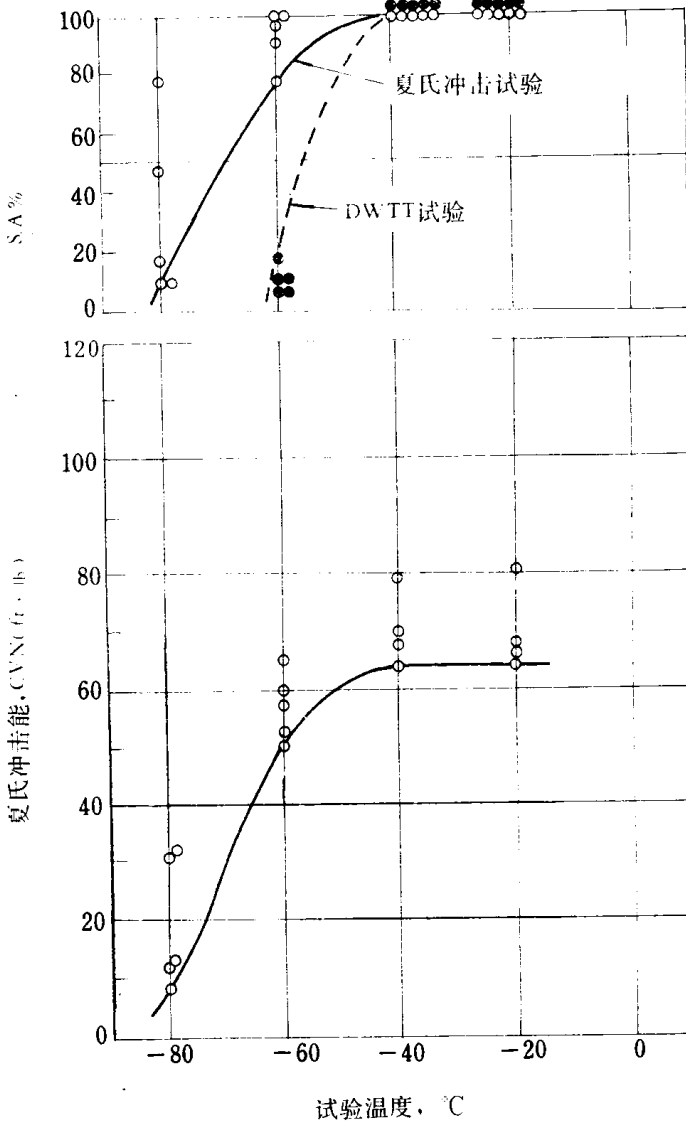


图 2-1 某厂 X60 管材夏氏冲击能、断口剪切面积与温度的关系

从冲击试验的试样的断口看,由两部分组成,一为解理断裂部分(cleavage region)另一为剪切断裂部分(shear region)。断面对于断裂的阻力几乎全部是由剪切断面提供的,所以剪切面积在整个断面上所占的百分比越大,则材料对断裂的阻力越大(剪切面积英文称为:Shear Area,简称为 S. A,下同),亦即冲击能越大。请参看图 2-1(b),由图看出,在转变温度以上时(图中约为 -40°C)剪切面积为100%,随着温度下降 S. A 逐渐减小,至 S. A% = 0 时,则全部断口均为解理断口,此时夏比冲击能接近于零。

剪切断面一般为斜断口,表面暗淡,呈纤维状,解理断面一般为平断口,表面有光亮晶粒状物,二者是很容易由形状上区分的。为了便于工作,在工程上常用断口上剪切面积百分比的值来定义转变温度,这种转变温度又称为断裂形貌转变温度,(Fracture Appearance Transition Temperature 缩写为 FATT,下同)。

FATT 可分为三种:一种以 DWTT 试验为依据,它用其剪切面积为 85% 时所对应的温度为转变温度,这种用得最多;另一种是以 charpy V 试验为依据的;还有一种以全尺寸爆破试验为依据,其转变温度对应的 S. A% 亦均为 85%。

我国现有油、气管线所用的钢材多为由日本进口的 X52 钢,牌号为 TS-52K,新建的一些管线试用了我国武钢生产的 WH-X60 钢材,也有用西德 WG-X60 钢材的,现将这三种钢材的性能列于表 2-1,表 2-2。

DWTT(Drop-Weight Tear Test),可译为落锤试验,在我国应用较少。至 1986 年,全国只有有限的几个单位可做。DWTT 试验应按 API RP5L3 进行^[1],其特点为,取样后冷压平,加工成标准落锤试样,其试样厚度就是管子的厚度,一

般认为这样更能反应钢管的实际。

表 2-1 三个钢种的FATT 和上平台能

夏比冲击 S.A % 钢种	FATT, C			上平台能 (J)
	20% S.A	50% S.A	85% S.A	
WG-X60	-68	-60	-53	67
TS-52K	-107	-98	-90	39
WH-X60	-83	-60	-49	48

表 2-2 三个钢种的FATT

DWT S.A% 钢种	FATT, C		
	20% S.A	50% S.A	85% S.A
WG-X60	-48	-42	-38
TS-52K	-85	-81	-76
WH-X60	-66	-57	-49

夏比冲击试验在我国已普遍采用,它的缺点是取样后,需把拱形刨平成标准的厚度(全尺寸Charpy V厚度为10mm, 2/3 Charpy V厚度为6.7mm, 1/2 Charpy V厚度为5mm),这样往往就不能反映钢管的实际。夏比冲击试验优点是,不仅能由断口测出 S.A%, 还可测出具体的冲击能,而 DWTT 一般却只能由断口测出 S.A%。

对于脆性断裂均以 DWTT 试验为准。

Battelle Memorial Institute (简称BMI, 下同)在这方面作了大量的工作,图2-2为他们用同一种钢管做了2/3 Charpy

V, DWTT, 及全尺寸爆破试验的韧脆转变温度曲线, 由图可以看出, DWTT 曲线与全尺寸爆破试验十分接近, 而韧脆转变温度几乎完全一致, 均为 $75^{\circ}\text{F}(23.9^{\circ}\text{C})$ [5]。再看 2/3

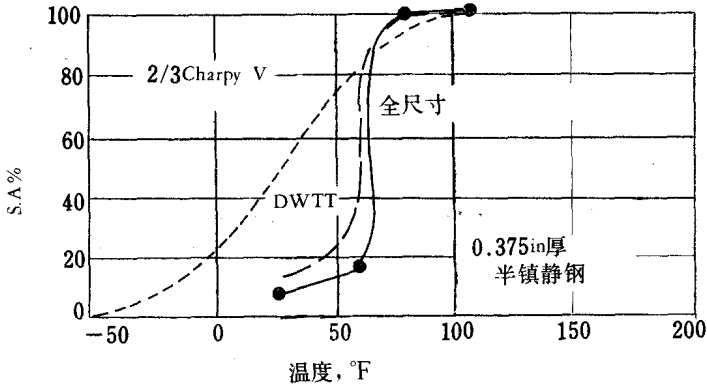


图 2-2 DWTT, Charpy V、全尺寸试验的 S.A.% 与温度的对应曲线

Charpy V 的曲线, 看出该曲线与全尺寸曲线相距甚远。之所以会有这种现象, 是因为正如前面所述, Charpy V 试样要求标准厚度, 因而它只能反映管材的材质情况, 它反映不了管材的几何尺寸(厚度)的情况, 而厚度却是有影响的, 通常厚度越大, 转变温度越高。为说明这一情况, 用 3/8, 1/2, 3/4 英寸三种厚度的钢管作了试验, 见图 2-3。

由图看出, 三种不同厚度有三条不同的 DWTT 曲线, 因而有三个不同的 85%FATT 值, 而 Charpy V 取标准厚度, 故三种材料只有一条曲线。

如前所述, DWTT 系专用设备, 而 Charpy V 是通用的,

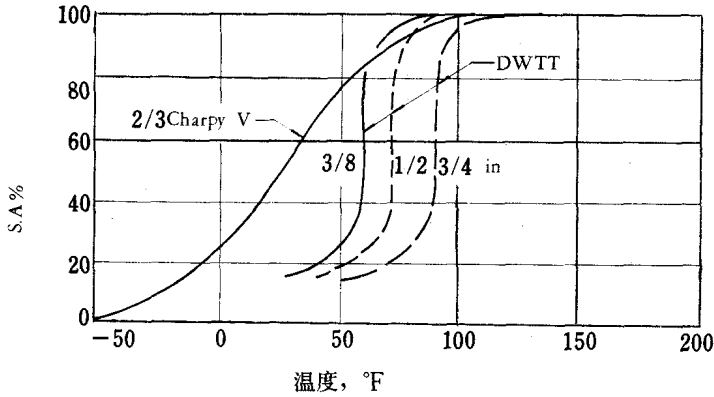


图 2-3 厚度对转变温度的影响

能否找出二者之间对应关系,从而用Charpy V代替DWTT呢? BWI在大量试验的基础上给出了二者的对应关系见图 2-4。

如图,如 85%Charpy V FATT 值为 5 °F,厚度为 0.5in,由图查出差值为 20 °F,则 85%DWTT FATT 为 25 °F。

由图还可看出,当厚度为 0.4in(10mm)时,二者一致,因为这恰恰是 Charpy V 的标准尺寸。

二、脆性断裂的定义

当管线的工作温度高于管材的 FATT 值时,一旦发生断裂将是延性断裂,此时断面的 S.A 值在 85% 以上,由于供货的 FATT 值往往低于规定值,故实际延性断裂的 S.A 值绝大多数为 100%。

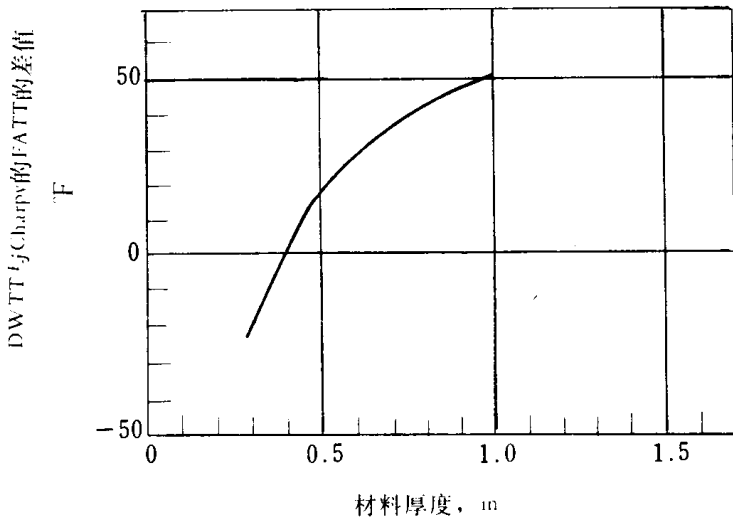


图2-4 85%DWTT, FATT与85% Charpy V FATT的对应关系

脆性断裂的断口,从理论上讲应为100%的解理断口,亦即 $S.A\% = 0$,但实际上这种情况几乎是不存在的。通常除延性断裂以外,在低温的工况条件下,管线断裂的断口均为混合型的,即有剪切断面,也有解理断面。剪切断面一般在周边上,称为剪切唇(shear lip)。故在工程上所说的脆性断裂系指延性断裂以外的,包括混合型断口的断裂在内的全部断裂。

三、脆性断裂的扩展速度

Mott 在1949年给出了在理论上脆性断裂扩展速度的计算公式^[2]：

$$v_m = 0.38v_a \left(1 - \frac{c_0}{c}\right) \quad (2-1)$$

式中： v_m ——断裂的扩展速度, m/s;

v_a ——声音在管材中的传播速度, m/s;