

● 行业综述

油气管道基于应变的设计及 抗大变形管线钢的开发与应用

李鹤林^{1,2}, 李 霄², 吉玲康¹, 陈宏达¹

(1. 中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室, 西安 710065;

2. 西安交通大学 材料学院, 西安 710049)

摘 要: 简述了油气管道的失效模式及失效原因。着重介绍了地震和地质灾害引发的管道失效。重点对抗大变形管线钢的开发与应用进行了综合评述。提出:通过地震和地质灾害多发区的管道应采用基于应变的设计方法;在解决管道承受大位移、大应变问题的同时,选择合适的管线钢及钢管,也可使管道具有抗大应变的能力。抗大变形管线钢应具有的主要特性包括:应力应变曲线为 Round house 型、屈强比较低、形变强化指数高、均匀塑性变形延伸率高,组织为包含有硬相和软相的双相或多相组织,管道环焊缝接头应为高匹配。

关键词: 失效; 地震和地质灾害; 基于应变的管线设计; 抗大变形管线钢; 变形能力; 焊接接头

中图分类号: TE973.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-3938(2007)05-0005-07

0 引 言

管道输送是石油天然气最经济、最合理的运输方式。目前,全世界石油、天然气管线的总长度已超过 230×10^4 km,并以每年 $(2 \sim 3) \times 10^4$ km 的速度增加。我国从 1958 年开始建设长距离原油输送管线(新疆),1963 年开始建设长距离天然气输送管线(四川)。预计到 2015 年中国的管线总长度将达到 5×10^4 km。传统的管道设计是基于应力的设计,然而由于管道运行环境复杂多变,在地震和地质灾害多发区,管道将承受较大的位移及应变,管道的失效不再由应力控制,而是由应变控制。近年来,国外提出了基于应变的设计理念和方法,管线钢生产厂家也在开发抗大变形的管线钢。我国油气长输管道面临的地震和地质灾害问题必须引起高度关注。中国石油天然气集团公司管材研究所通过与国外专家进行研讨和联合研究,已经对基于应变的设计方法及抗大变形管线钢有了较为深入的了解。本文对管道失效及基于应变的设计方法进行评述,并对抗大变形管线钢的开发与应用进行分析和讨论。

1 油气管道的失效模式及原因

1.1 油气管道的失效模式

如图 1 所示,根据已进行的失效分析,油气管道的失效模式主要包括断裂、过量变形、腐蚀、机械损伤四类。其中,过量变形包括地震和地质灾害引起的屈曲、伸长、挤毁等。

1.2 油气管道失效原因

油气管道失效原因如图 2 所示。可见地震和地质灾害引起的管道损坏是管道失效的主要原因。

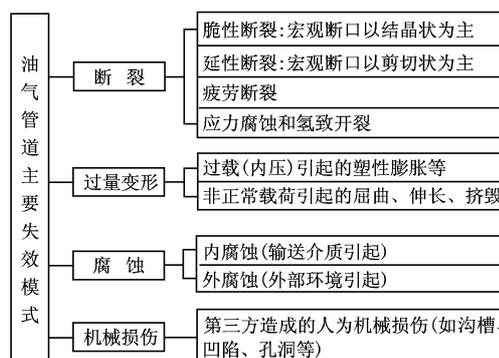


图 1 油气管道的失效模式

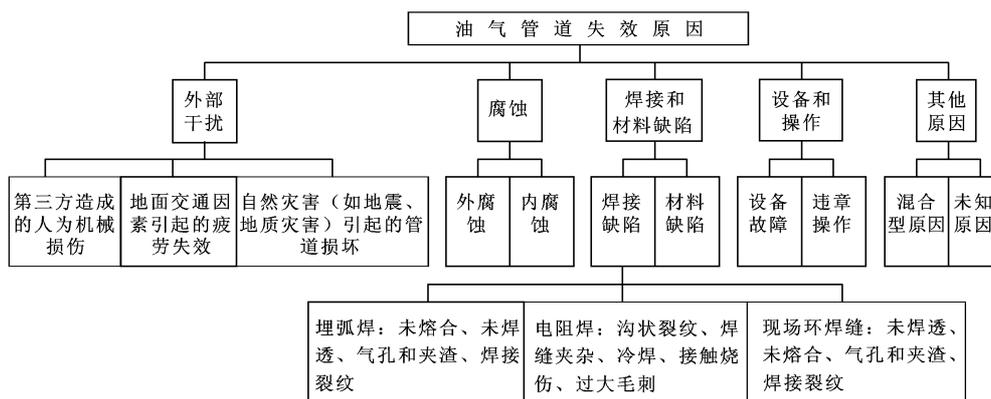


图 2 油气管道失效原因

2 地震和地质灾害引发的管道失效

2.1 地震和地质灾害引起的管道位移和变形

管道在地震、滑坡、不连续冻土区等地质灾害作用下,将承受大的应变,见表 1,而且地层应变的变化速度是很快的,如图 3 所示。在此过程中管道出现断裂、局部屈曲和梁式屈曲等现象,均属于外部干扰造成的非正常载荷引起的失效。图 4 所示为局部屈曲的情况。

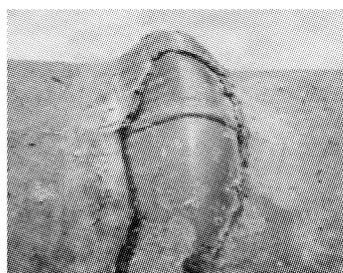


图 4 陕京管线发生的管道屈曲现象

2.2 我国长输管道涉及的地震和地质灾害情况

我国长输管道涉及的地震和地质灾害主要包括以下情况^[1-2]:

(1)地震带 西气东输一线及二线沿线通过

表 1 地震及地层运动产生的应变 %

中规模地震	大规模地震	地层侧向运动	地层断层运动
~0.1	~0.4	2	不连续位移

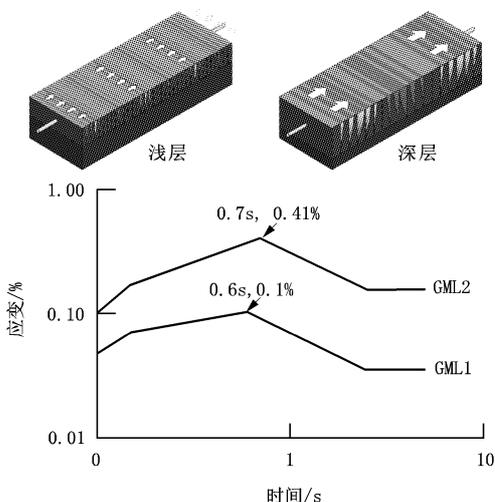


图 3 地震波中地层应变随时间的变化

的主要地震带有:南天山地震带、河西走廊地震带、银川地震带、山西地震带、郟城—庐江地震带。线路通过地震基本烈度为Ⅶ度区和Ⅷ度区的长度占全线路一半以上。

(2)滑坡、崩塌 陕西子长—山西永和的黄土梁峁沟壑的边坡地带和山西、河南境内的吕梁山、太岳山和太行山山地以及新疆库鲁克塔格山地斜坡等。

(3)湿陷性黄土 陕西靖边—河南郑州间,线路长约 670 km,除山地基岩出露外,沿线主要为黄土覆盖。如果黄土湿陷,可使管道产生不均匀沉降变形,过大的湿陷变形可能导致输气管道弯曲变形、裸露、悬空,甚至折断。

(4)泥石流 沿河西走廊祁连山北麓和中卫—中宁平原南缘的香山,分布有多条规模较大的泥石流沟,如东大沟、腰峁子沟,暴雨季节易形成山洪泥石流。由于泥石流突发性强,在泥沙、块石等固体物质的快速移动和水的渗透压力作用下产生巨大的推力和浮力,使管道受到强烈的冲击而产生弯曲变形和断裂。

(5)流动沙丘 流动沙丘(垄)主要在线路西

北段断续分布。如新疆的库木塔活动性沙垄,武威—靖边段的腾格里沙漠南缘和毛乌素沙漠南缘的活动沙丘。库木塔沙垄呈南北向分布,宽约11km,高30m左右,移动性极强,移动方向与管道垂直。若管道覆土被风吹走,就会造成管道裸露悬空;超过管道挠曲强度,管道就会发生折断。

(6)悬空 新疆库尔勒、吐哈盆地、甘肃白墩子、宁夏惠安堡等严重干旱地区,地表多盐渍土分布。盐渍土对混凝土和钢管具有强腐蚀性,对管道地基土结构破坏力很大,容易造成管道的“暗悬空”。在山西境内,蒲县—泽州间煤矿采空区比较集中,煤矿采空区有可能引起地表沉降、塌陷变形、地表开裂等,易造成管道变形、悬空或断裂。

(7)冻土 我国东北及西部地区分布有大面积的冻土地带。冻土的融化及冰冻过程会使管道发生较大的变形。格尔木—拉萨输油管道建于1973年,是我国修建的第一条冻土区输油管道,全长1076km,已经运行30多年,由于融沉破坏等原因,该管道曾发生30次泄漏,造成了很大的经济损失。

2.3 预防地震和地质灾害的措施

地震和地质灾害对管道造成的损害是通过过量塑性变形引起的,主要预防措施有以下两种:

(1)在敷设方式上^[3],①尽量避免产生大位移的地层不稳定区域;②由于管道承受轴向拉伸应变的能力远大于承受压缩、弯曲的能力,管道的走向应使其承受拉伸应变;③采用大曲率半径弹性敷设方式,增加管道活动能力;④在断层大位移区应考虑宽沟、松散砂土浅埋或不埋;⑤采用轨道、滑轮减小管道的运动阻力。如图5所示,阿拉斯加输油管道安装在滑轨上,2002年11月3日经历了7.9级大地震安然无恙。

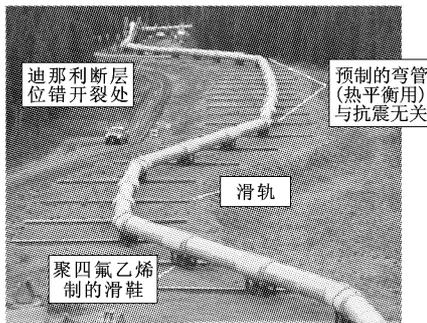


图5 安装在滑轨上的管道

(2)提高管道材料本身变形及抗变形能力。

3 油气管道基于应变的设计概述

3.1 基于应力设计与基于应变设计方法比较

一般情况下,油气管道均采用基于应力的设计方法,但对于可能经受较大位移的管道,如工作于地震及地质灾害多发区的管道,则适宜采用基于应变的设计方法。

基于应力的设计方法应满足

$$\sigma \leq \phi \frac{2t}{PD} \sigma_y \text{ 或 } \sigma \leq \phi [\sigma],$$

其中: ϕ —设计系数;

t —钢管壁厚;

P —工作压力;

D —管径;

σ_y —材料屈服强度。

而基于应变的设计方法则要求:

$$\varepsilon_d \leq \phi \varepsilon_c,$$

其中: ε_d —设计应变(需用应变);

ε_c —许用应变(取决于管材、管道的几何尺寸);

ϕ —设计系数。

3.2 基于应变的设计思路

3.2.1 基于应变设计方法的基本思路

基于应变设计方法的基本思路如图6所示。

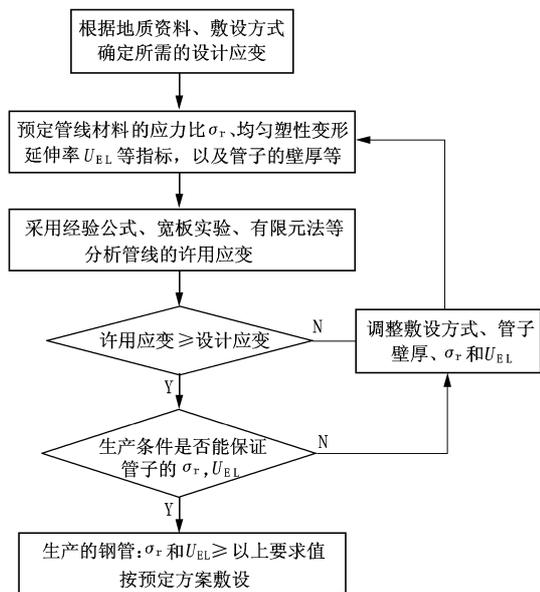


图6 基于应变设计方法的基本思路

其中:

$$\sigma_r = \frac{\text{设计应变对应的应力}}{\text{管材的屈服强度}}。$$

3.2.2 设计应变及许用应变的确定方法

基于应变的设计方法的关键,是确定管道在地震和地质灾害中将要承受的应变(设计应变)及管道本身所能够承受的应变极限(许用应变)。

设计应变根据地质资料确定。如通过地震区管道可根据震级确定位移量,再算出设计应变值。

表 2 是不同地震水平时管道应变的粗略估算值。

中规模地震	大规模地震	地层侧向运动	地层断层运动
~0.05	~0.2	0.9~1.2	1.4~1.6

许用应变可以根据拉伸、压缩、弯曲等试验或有限元分析确定(图 7)。尽管屈曲后管线并不会马上破坏,但一般要求管线不能发生屈曲变形,所以屈曲应变可以作为管线许用应变的临界值。

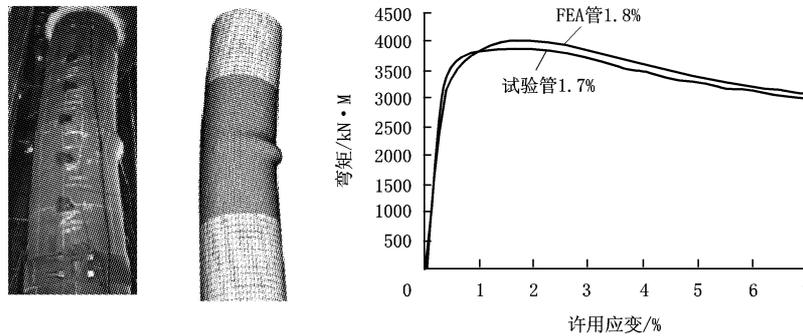


图 7 实物试验和有限元分析确定许用应变

根据经验公式也可以确定管线的许用应变,经验公式将材料的力学性能与屈曲应变联系起来,对于工程应用是非常有意义的,但是不一定适用于所有材料,所以很有必要积累一定的数据,如将屈曲应变作为许用应变。无内压条件下屈曲应变计算公式:

临界应变

$$\epsilon_c = \frac{4}{3} \sqrt{n} \frac{t}{D},$$

式中: n —应变强化指数。

X65 及以下钢级的临界应变

$$\epsilon_c = \frac{4}{3} \sqrt{0.11} \frac{t}{D} = 0.44 \frac{t}{D}。$$

X65 及以下钢级 JGA 设计公式

$$\epsilon_c = 0.35 \frac{t}{D}。$$

3.3 基于应变的设计规范

目前还没有专门、完整的基于应变的设计规范,但有些规范已涉及到这些内容,并分别对陆上管线、海底管线、管线钢提出了要求,见表 3^[4]。

3.4 已采用基于应变设计思路的管线

已采用基于应变设计思路的管线见表 4^[5]。

表 3 涉及基于应变设计方法的管线标准及规范

国家	陆上管线标准	海底管线标准	管线钢标准
加拿大	CSA Z662 CSA Z662 App. C	CSA Z662 Section 11	CSA Z245.1 CSA Z662
挪威		DNV	DNV
英国		BS 8010; Part 3	BS 8010; Part 2
德国		GL - Code III/4	
澳大利亚	AS 2885	AS 1958	AS 2018
美国	ASME PD Vol. 55, ASME PD Vol. 69, API 5L	API RP 1111	

表 4 已采用基于应变设计思路的管线

管线名称	使用条件
BP - Northstar	阿拉斯加极地浅海
Statoil - Haltenpipe	针对悬空及不稳定海床,设计应变极限 0.5%
Connoco Philips - Ekofisk II	海底管线极限状态设计
BP - Alaska 海上 Liberty 管线	极地浅海管线
Shell - Malampaya	地震及不稳定海床管线极限状态设计
Exxon Mobil-Sakhalin Island 管线	地震区管线
Enbridge - Norman Wells	穿越冻土区
BP - Badami	阿拉斯加极地区,穿越河流
阿尔伯特 - Nova 输气管线	不连续冻土区
TAPS 输气管线	冻土区上拱
Texaco - Erskine	高温高压管线的极限状态设计
BP - Thunder Horse 管线	高温高压管线
North Sea - Mallard	管中管的极限状态设计
Elgin/Franklin 管线	管束的极限状态设计

4 抗大变形管线钢的开发与应用

抗大变形管线钢能承受较大的变形,在组织和性能上都有一些特点。如 DNV2000 对管线钢的要求:实测的屈服强度不高于标准规定值 100 MPa,实测的屈强比 ≤ 0.85 ,总延伸率 $\geq 25\%$,应变时效后的屈强比 ≤ 0.97 ,应变时效后的总延伸率 $\geq 15\%$ 。

4.1 管线钢力学性能指标对变形能力的影响

4.1.1 应力应变曲线

典型的管线钢应力应变关系曲线有 Luders elongation 型及 Round house 型两种,如图 8 所示。研究表明, Round house 型管线钢的变形能力优于 Luders elongation 型^[6]管线钢,其屈曲应变远高于 Luders elongation 型管线钢。屈服平台的出现使得管线管变形能力对内压及几何缺陷非常敏感,在较高内压条件下,随着屈服平台的的增长,压缩应变容限提高,然而较低内压时,压缩应变容限将减小^[7]。

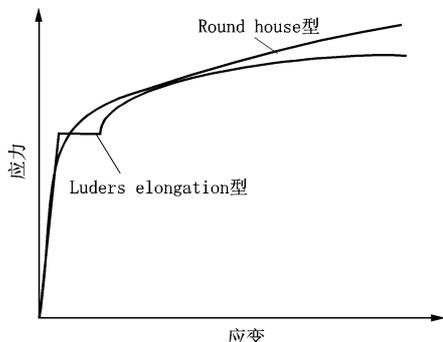


图 8 应力应变关系对管线管应变容限的影响

4.1.2 屈强比

EPRG 的研究指出,屈强比的增高对载荷控制的失效方式有利,对变形控制的失效没利。尽管该结果是针对环向变形得出的,但对于轴向应变控制的失效,仍然有参考价值。所以一些相关规范规定了屈强比的最高值为 0.85,相对于高钢级管线钢这是一个较低的值。有屈服平台(EC)型及无屈服平台(EA)型材料的压缩应变都会随着屈强比的提高而减小^[7]。

4.1.3 应变强化指数

钢材在塑性变形过程中产生的应变强化,可

以阻止进一步变形的发生,防止变形的局部集中,这一过程可以通过应变强化指数表征,它对管线钢的变形能力有重要作用。提高管材的应变强化指数是提高输送管变形能力的最有效途径,如图 9 所示^[8-9]。对于具有较高变形能力的管线钢,其应变强化指数一般大于 0.1。

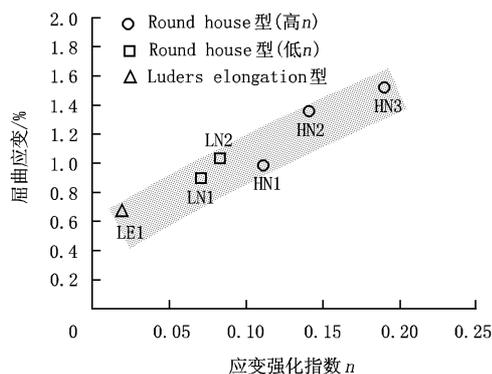


图 9 应变强化指数与屈曲应变的关系

4.1.4 延伸率

延伸率越高,管线管的变形能力越好。在总延伸率中,均匀塑性延伸率的大小对管线钢的变形能力的贡献更大,一般情况下,具有良好变形能力的高钢级管线钢的均匀塑性变形延伸率在 10% 以上。

4.2 时效对变形能力的影响

时效现象使得管材的变形能力降低。图 10 显示无论材料有无屈服平台,在无几何不完整性条件下时效都使得压缩应变容限提高;然而在有几何不完整性时,屈服平台的出现使得压缩应变容限降低^[7]。DNV 标准规定时效后屈强比 ≤ 0.97 ,总延伸率 $\geq 15\%$ 。

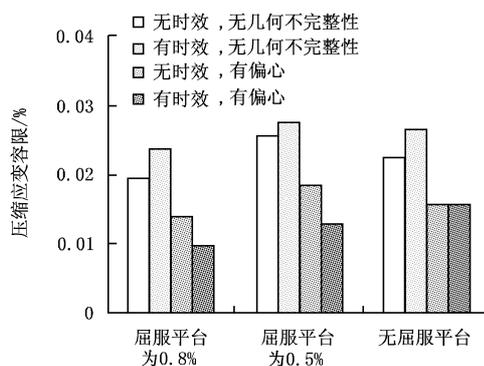


图 10 时效对管线管压缩应变的影响

4.3 组织状态对变形能力的影响

4.3.1 组织状态的影响

抗大变形管线钢既要有足够的强度,又必须有足够的变形能力,其组织状态一般为双相组织或多相组织,硬相为管线钢提供必要的强度,软相保证足够的塑性。如日本开发的抗大变形钢系列,组织状态为铁素体 + 贝氏体、贝氏体 + MA。有研究显示,铁素体钢的形变强化能力最好,针状铁素体次之^[10]。

4.3.2 体积分数及形态的影响

随着硬相比比例增加,管线钢强度提高,如铁素体 + 贝氏体管线钢,随着贝氏体体积分数增加到 30% 左右,屈服平台消失,屈服现象为 Round house 型,且当贝氏体为长条型时应变强化指数达到 0.12^[11]。而对于贝氏体 + MA 管线钢,MA 体积分数在 5% 左右时管线钢的屈强比最低,韧性最好。

4.4 可作为抗大变形管线钢的材料

目前可以作为抗大变形管线钢的材料有:

表 5 普通管线钢、NK - HIPER 钢、HOP - HIPER 钢的力学性能比较

钢级	规格		纵向拉伸性能				夏比冲击试验		DWTT S_A / %		
	壁厚/mm	外径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	n	温度/°C	冲击功/J	-10 °C	-20 °C	
普通管线钢	X80	12.7	610	557	637	87	0.07	-113	254	100	100
		16.9	610	578	646	90	0.06	-86	284	100	100
NK - HIPER 钢	X80			579	755	77	0.16		>160		
HOP - HIPER 钢	X80	15.6	762	532	702	76	0.12				
		17.5	1 016	581	734	79	0.14				

针状铁素体钢实质上也是一种多相组织,包括铁素体、针状铁素体(贝氏体)、MA 等,其中铁素体作为软相保证变形能力,针状铁素体(贝氏体)、MA 作为硬相保证强度,如果能够通过对轧制工艺进行合理的调整,如类似 TRIP 钢的工艺,获得合适的硬相与软相的组合,针状铁素体钢也是很有希望作为抗大变形钢的。事实上陕京管线中的某段也曾经受了较大的屈曲变形,而且安全度过了洪水的冲击。关键是需要对这样的管线钢的特点(力学性能、组织)进行研究,掌握可靠的轧制工艺,保证管线钢的性能稳定。

国内已经掌握了针状铁素体钢的生产工艺,并在西气东输管线上进行了成功应用,所以,通过调整轧制工艺使其作为抗大变形管线钢是很有意义的。

TRIP 钢是一种高强汽车用钢,也是一种变形

JFE 的 NK - HIPER(铁素体 + 贝氏体)钢,JFE 的 HOP - HIPER(贝氏体 + MA)钢,新日铁的 TOUGH - ACE(铁素体 + 贝氏体)钢,针状铁素体钢(针状铁素体 + 多边形铁素体 + MA)。TRIP(高强度及高延性)钢尽管有资料显示已有少量应用于管线,但需进一步研究其可应用性。

普通管线钢、NK - HIPER 钢、HOP - HIPER 钢的力学性能比较见表 5。NK - HIPER 钢、HOP - HIPER 钢的屈强比明显低于普通管材,而其应变强化指数明显高于普通管材,其均匀延伸率一般大于 8%。HOP - HIPER 钢、NK - HIPER 钢均比传统意义上的管线钢表现出较高的屈曲应变(约 1.5 倍),其力学性能及屈曲应变说明其具有较好的变形能力,该类管材已经在北美等地区有一定量的应用。TOUGH - ACE 钢有 X60 及 X80 钢级,组织为双相(铁素体 + 贝氏体),具有优良的焊接性(热影响区韧性好)、良好的延伸率,已经在 Sakhalin 管线上应用。

能力非常好的钢,它利用“相变诱发塑性”,通过成分和工艺控制,强度可达到 588 - 1 470 MPa,延伸率可达 30% 左右^[11]。有热处理冷轧 TRIP 钢及热轧 TRIP 钢,其组织状态均为铁素体、贝氏体、残余奥氏体。TRIP 钢由于具有 TRIP 效应,钢板有高的延伸率和抗拉强度,同时具有良好的成形性能、理想的应变强化指数,综合性能得到了提高,但是作为管线钢应用还是一个值得探讨的问题。

5 抗大变形的焊接接头

受管线钢冶金特点的影响,管线焊接必定会在热影响区(HAZ)产生软化区,而且由于焊接材料的选择及焊接工艺特点的影响,整个环焊缝的强度也是不均匀的,如根焊位置强度偏低,有可能

局部成低匹配状态,另外环焊缝也是容易产生缺陷的区域。对于承受大位移的管线,应变将在HAZ软化区及低匹配焊缝区产生强烈集中^[12-14],如图11所示。如果热影响区的强度比母材低10%,则热影响区应变集中系数可以高达9。在没有缺陷的情况下,如果软化区尺寸足够小(1/4~1/2管壁厚度),应变集中将不影响整个接头的静载变形能力^[5,15]。但是在焊缝及热影响区经常会出现缺陷,此时材料的后屈曲行为及缺陷的尺寸对输送管的变形能力有着直接的影响^[14]。所以在基于应变的设计中低匹配及软化应尽量避免,即使是基于应力的设计也应慎重采用。

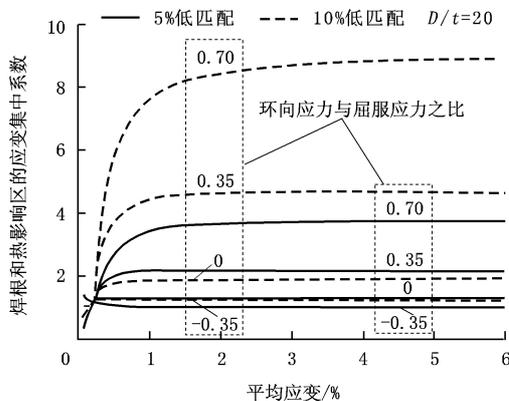


图11 焊接接头低匹配造成的应变集中

6 结 语

(1) 地震和地质灾害是引发油气管道灾难性事故的主要原因之一,地震和地质灾害引发的油气管道主要失效模式是过量塑性变形失效。

(2) 通过地震和地质灾害多发区的管道应采用基于应变的设计方法。

(3) 抗大变形的管线钢应具有的特征主要包括:无屈服平台、屈强比低、应变强化指数高、均匀塑性变形延伸率高,一般为双相或多相组织。

(4) 采用基于应变的设计,管道环焊缝与管体的强度匹配应为高匹配。

参考文献:

[1] 赵应奎. 西气东输工程管道线路地质灾害及其防治对策[J]. 天然气与石油, 2002, 20(1): 44-48.
[2] 李智毅, 颜宇森, 雷海英. 西气东输工程建设用地的地

质灾害[J]. 地质力学学报, 2004, 10(3): 253-258.
[3] 刘学杰, 孙绍平. 地下管道穿越断层的设计方法[J]. 特种结构, 2005, 22(2): 81-85.
[4] AARON S D, RAYMOND J S. Strain-based Pipeline Design Criteria Review[C] // International Pipeline Conference. Alberta: ASME, 1996.
[5] MOHR W. Strain-based Design of Pipelines[R]. Project No. 45892GTH. Washinton. DC: EWI, 2003.
[6] NOBUYUKI I. Development of High Strength Linepipe with Excellent Deformability[C] // Seminar of X100/X120 Grade High Performance Pipe Steel. Beijing: [s. n.], 2005.
[7] TSURU E, SHINOHARA H A. Strain Capacity of Line Pipe with Yield Point Elongation[C] // Proceedings of the Fifteenth (2005) International Offshore and Polar Engineering Conference. Seoul: ASME, 2005.
[8] NOBUHISA S, SHIGERU E, MASSKI Y, et al. Effects of a Strain Hardening Exponent on Inelastic Local Buckling Strength and Mechanical Properties of Linepipe[C] // Proc. of OMAE01, 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Brazil: OMAE, 2001.
[9] THOMAS H, SHIGRU E, NOBOYUKI I, et al. Effect of Volume Fraction of Constituent Phases on the Stress-strain Relationship of Dual Phase Steels[J]. ISIJ International, 1999, 39(3): 288-294.
[10] KIM Y M, KIM S K, LIM Y J, et al. Effect of Microstructure on the Yield ratio and Low Temperature of Linepipe Steels[J]. ISIJ. International, 2002, 42(12): 1571-1577.
[11] ENDO S, ISHIKAWA N, OKATSU M, et al. Development of High Strength Linepipes with Excellent Deformability[C] // Proceeding of HSLP-IAP2006, Xi'an: [s. n.], 2006.
[12] 张迎辉, 赵鸿金, 康永林. 相变诱导塑性 TRIP 钢的研究进展[J]. 热加工工艺, 2005, 35(6): 60-64.
[13] DENYS, LEFEVRE R M, GLOVER T, et al. Weld Metal Yield Strength Variability in Pipeline Girth Welds[C] // Proceeding of the 2nd International Pipeline Technology Conference. Ostend: ASME, 1995.
[14] GORDON R, HAMMOND J, SWAMK G. Welding Challenges for Strain-based Design[C] // The International Conference on Advances in Welding Technology: Pipeline Welding and Technology. Galveston: [s. n.], 1999.
[15] MOHR W, GORDON R, SMITH R. Strain-based Design Guidelines for Pipeline Girth Welds[C] // Proceeding of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference. Toulon: ASME, 2004.

作者简介: 李鹤林(1937-), 男, 中国工程院院士, 长期从事石油用钢及石油管工程科技工作。曾任中国石油天然气集团公司管材研究所所长, 现为该所高级顾问、中油集团咨询中心专家, 兼任中国材料研究会常务理事、中国机械工程学会失效分析分会理事长、西安交通大学材料科学与工程学院名誉院长等职。23项成果获国家及部省以上科技进步奖, 出版专著5本, 在国内外发表论文160余篇。

收稿日期: 2007-08-01