

铁素体管线钢的分层裂纹及其对断裂的影响 *

杨 政¹ 任 斌¹ 赵新伟² 霍春勇² 郭万林³

1. 西安交通大学土木工程系 西安 710049
2. 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
3. 南京航空航天大学航空宇航学院 南京 210016

摘 要 通过对针状铁素体管线钢缺口根部三维应力状态的有限元分析和不同形式的断裂实验,研究了管线钢分层裂纹产生的条件及其对断裂性能的影响.结果表明裂纹或缺口根部的三维应力状态是产生分层裂纹的必要条件,材料的强度分布影响分层裂纹的形式和方向.分层裂纹均为主裂纹扩展前材料中的弱界面在垂直该弱界面的拉应力作用下产生的,其数量和方向受裂纹根部三维应力场和材料的强度分布状态控制.分层裂纹面上的应力为零,分层裂纹有一定的间距.在断裂过程中产生的分层裂纹使裂纹或缺口根部的构形发生改变,从而对裂尖的应力状态和材料的断裂性能产生巨大的影响.穿透裂纹体的分层裂纹使其有效厚度减小,表面裂纹体的分层裂纹与裂纹扩展方向垂直.在断裂过程中产生分层裂纹需要消耗更多的能量、降低裂端三维应力约束、有效厚度降低或裂尖钝化.这些因素均使断裂扩展更加困难,而使材料韧性得到提高.

关键词 金属材料, 管线钢, 分层裂纹, 断裂

分类号 TG405, O346

文章编号 1005-3093(2007)03-0311-08

The delamination crack in ferrite pipeline steel and the effect on the fracture

YANG Zheng^{1**} REN Bin¹ ZHAO Xinwei² HUO Chunyong² GUO Wanlin³

1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

2. The Key Laboratory for Mechanical and Environmental Behavior of Tubular Goods, CNPC, Xi'an 710065

3. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

* Supported by the Research Fund of The Key Laboratory for Mechanical and Environmental Behavior of Tubular Goods, CNPC No.20051256. Manuscript received July 13, 2006; in revised form November 9, 2006.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(029)82665876, E-mail:zyang@mail.xjtu.edu.cn

ABSTRACT The delamination cracks and its effects on the fracture of pipeline steel were investigated. The results show that the three-dimensional stress state is prerequisite for delamination crack and the strength distribution of material influences the form and direction of delamination crack. The delamination cracks are produced on the weak interfaces in the material by the tensile stress perpendicular to them before main crack propagation. The occurrence of delamination crack and its direction depend on the three-dimensional stress fields and strength distribution of material near the crack tip or notch root. The delamination cracks change the form of the crack and influence the three-dimensional stress fields of the crack tip; this can influence the fracture obviously. The delamination cracks of the fracture through wall thickness make the effective thickness decrease and the delamination cracks of surface crack are perpendicular to the direction of fracture propagation direction. The more energy is needed to produce delamination crack, the three-dimensional constraint of crack tip decreases, the effective thickness decreases or main crack tip is blunt. These factors all make fracture more difficulty, the toughness of the material will be improved.

KEY WORDS metallic materials, pipeline steel, delamination crack, fracture

* 中国石油天然气总公司石油管力学和环境行为重点实验室研究基金 20051256 资助项目。
2006 年 7 月 13 日收到初稿; 2006 年 11 月 9 日收到修改稿。
本文联系人: 杨 政

油气输送效率和输送管线的口径和压力不断提高,对管线钢的强度和韧性的要求也不断提高.目前,高压大口径长输管线多采用控制轧制的高性能管线钢,其力学性能具有明显的各向异性现象^[1,2].“分层裂纹”是控轧钢断口一种常见的断口形貌,断口表

现为垂直于主裂纹面的分层裂纹(亦称“断口分离”)[3~5]。分层裂纹由断裂过程中裂纹端部剧烈的三维变形所形成的三维应力场产生,其数量及方向受裂纹端部三维应力场和材料的强度分布状态控制。分层裂纹的产生明显地受材料的本质、温度和应力状态等因素的影响。但是,断裂时产生的分层裂纹对材料的断裂性能又有明显的影响,使裂尖的应力三轴性降低[6]。使得厚度增加时,材料的有效厚度和裂尖的三维应力约束无法增加,并不导致断裂韧性随厚度的单调降低[7],合理地利用材料本身的特性,可以大幅度降低制造成本[8]。

试样的三维应力约束与实际管道断裂的三维应力约束不同,在两种情况下产生的分层裂纹不同。试验标准要求试样有高的三维应力约束[9],试样断口分层程度较高,标准试验所测得的韧性值高于管线实际断裂时的韧性。正是断裂过程产生的分层裂纹使得材料韧性提高,致使依据目前的设计方法和试验标准进行高性能管线钢的设计,反而又存在巨大的安全隐患。目前的研究对不同受力状态下分层裂纹产生的条件及影响因素缺乏系统的分析研究[3,5,6,8],工程界对分层裂纹对断裂的影响存在不同的认识,因而将各种分层裂纹均视为不利因素[4],对材料的使用强度和韧性进行较大的折减,限制管线的输送压力。本文通过对针状铁素体管线钢不同受力状态和温度下的大量断裂实验,分析不同取向断裂分层裂纹产生前后的应力状态,系统地研究分层裂纹产生的条件、机理及其对裂纹尖端应力状态和断裂的影响。

1 缺陷根部三维应力场分析

在实际结构的材料中不可避免地存在不同缺陷,在一定条件下引起结构的断裂。为了分析缺陷根部的三维效应和管线钢不同取向分层裂纹产生的机理,以缺口为例对缺陷根部三维应力状态进行分析。图1为缺口根部坐标系,缺口深度为 a ,缺口根部半径为 ρ ,坐标原点位于缺口根部厚度中面, B 为板厚的一半。

ρ/a 越小,缺口越尖锐,张开应力 σ_y 越大。缺口根部 σ_y 沿厚度分布不均匀,厚度中面 σ_y 最大,表面最小;随着 ρ/a 减小和试样厚度增加,缺口根部中面与表面 σ_y 的差值增大。研究已经表明[10],即使缺口的尖锐度相同,随着试样厚度的变化,其缺口根部中面的 σ_y 也是不同的。缺口根部中面的 σ_y 是厚度的函数,并在某一厚度时达到最大值,最大值及最大值对应的厚度与缺口的尖锐度有关。图2为缺口根部附近 σ_x 沿 x 方向的分布,图中 σ_0 为作用于远端的均匀拉应力。在缺口根部 σ_x 为零,随着 x 增大 σ_x 迅速增加,达到最大值后,随着 x 增加而逐渐减小。 ρ/a 越小, σ_x 最大值越大, σ_x 最大值位置离缺口根部越近。

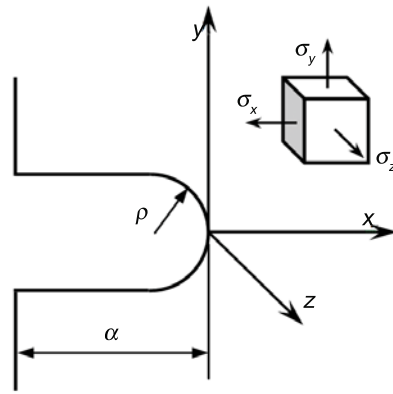


图1 针状铁素体管线钢缺口根部坐标系

Fig.1 Coordinates for notch root of pipeline steel

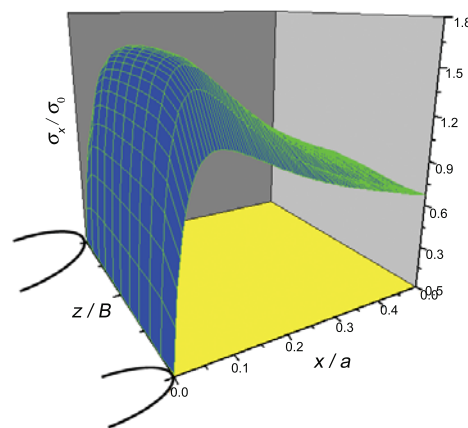


图2 针状铁素体管线钢缺口根部面内应力 σ_x 的分布

Fig.2 In-plane stress σ_x distribution near the notch root of pipeline steel

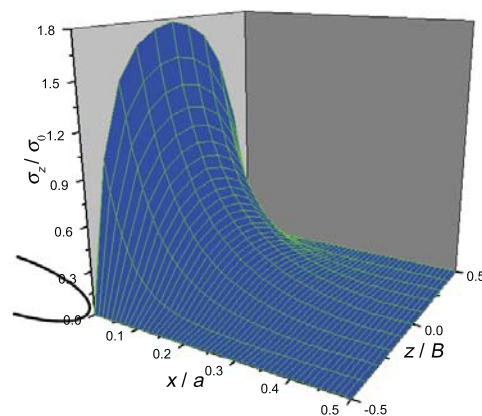


图3 管线钢缺口根部离面应力 σ_z 的分布

Fig.3 Out-of-plane stress σ_z distribution near the notch root for pipeline steel

当 ρ/a 趋近于零时即理想裂纹,根部 σ_x 和 σ_y 具有奇异性,与断裂力学中裂纹尖端应力解一致[11,12]。表

面和中面 σ_x 沿 x 分布并不相同, 中面 σ_x 最大值比表面 σ_x 最大值大, 且其位置更接近根部 [13].

图 3 为缺口根部离面应力 σ_z 沿厚度方向的分布. σ_z 在表面为零, 随着距表面距离的增加而增大, 厚度中面最大. 厚度中面 σ_z 最大值随着 ρ/a 减小而增大, 随厚度增加而增大. 当厚度较小时, σ_z 较小, σ_z 对断裂的影响很小; 当厚度较大时, σ_z 的分布对断裂的影响很大. 由于缺口的存在, 缺口根部产生应力集中而使缺口根部局部厚度减小, 缺口根部局部厚度减小受到周围变形程度较小或未变形材料的约束, 在试样内部缺口根部附近产生沿厚度方向的拉应力. 因此, 对于有限厚度的试样, 缺口根部不仅存在面内的集中应力, 同时还存在离面拉应力, 缺口根部的应力状态为三向受拉.

2 实验方法

实验用材料取自针状铁素体 X70 级别天然气输送管道用板材, 其室温屈服强度超过 482 MPa(70 ksi), 其材料成分(质量分数, %)为: C 0.06, Si 0.19, Mn 1.58, P 0.014, S 0.002, Cr 0.024, Mo 0.24, Ni 0.176, Nb 0.05, V 0.046, Ti 0.019, Cu 0.23. 为研究分层裂纹产生的条件和分层裂纹对断裂的影响, 分别制作了三点击弯断裂试样、冲击韧性试样、落锤撕裂试验试样以及偏心受拉试样. 试样的制作和试验过程分别遵循各自的试验标准 [14~16].

3 管线钢的不同分层裂纹及其产生机理

图 4 为针状铁素体 X70 管线钢微观组织结构. 管线钢在控轧过程中产生平行轧制方向的弱界面, 弱界面在垂直其表面的应力作用下有可能开裂、增长并连接形成分层裂纹 [5]. 图 5 为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不同取向产生分层裂纹夏比冲击试样断口形貌. 可以看出, $T-L$ 和 $T-S$ 取向试样断口均出现分层现象, 但缺口取向不同分层裂纹面方向和形态不同. $T-L$ 取向试样断口分层裂纹面与主裂纹扩展面正交, 而 $T-S$ 取向试样断口的分层裂纹与主裂纹扩展方向垂直. $T-L$ 和 $T-S$ 取向试样断口分层裂纹产生的机理不同, 但分层裂纹面均与板材表面平行, 均为材料中的弱界面在垂直该弱界面的拉应力作用下产生的. 由于断裂过程中裂纹尖端处于三向拉应力状态, 分层裂纹表面一般为脆性断裂形貌(图 6).

对于即将产生分层裂纹的材料, 在承受载荷之前, 并不存在分层裂纹和产生分层裂纹的倾向. 物体中产生分层裂纹的必要条件是有集中拉应力. 应力集中往往产生于材料的缺口或裂纹以及材料的缺陷处, 在缺陷附近产生剧烈的局部变形, 而局部变形受周围未变形或变形较小材料约束, 在裂尖形成三向拉应力

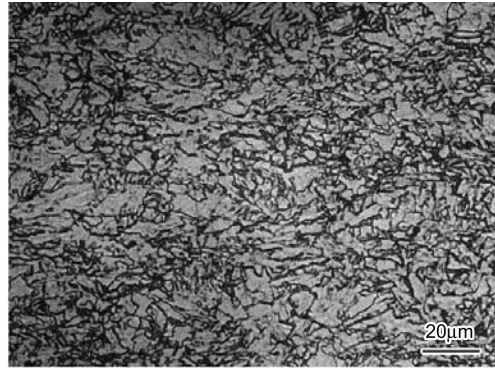


图 4 X70 管线钢的微观结构

Fig.4 Microstructure of X70 pipeline steel

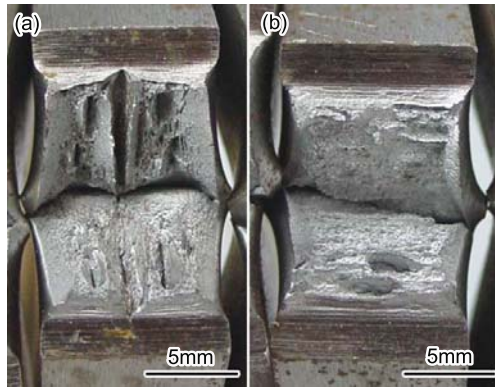


图 5 夏比冲击试样断口的分层裂纹 ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig.5 Fracture appearance of Charpy specimens ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) (a) $T-L$ orientation, (b) $T-S$ orientation



图 6 分层裂纹表面 SEM

Fig.6 SEM of delamination crack surface

(或应变) 状态. 当某一方向的应力(或应变)和该方向材料强度之间满足一定条件时, 在该方向首先断裂. 因此, 材料在断裂过程中是否产生分层裂纹, 或在哪一方向上产生, 与物体中缺陷(或裂纹)以及缺陷引起的应力集中处应力状态和该处材料的强度分布有关.

$T-L$ 取向试样弱界面平行于试样厚度表面, 当厚

度中心的离面拉应力超过材料厚度方向的抗拉强度时,产生与裂纹扩展方向正交的分层裂纹。 $T-S$ 取向试样弱界面垂直裂纹扩展方向,面内拉应力 σ_x 在缺口尖端一定距离处有最大值 $(\sigma_x)_{max}$,当 $(\sigma_x)_{max}$ 大于弱界面的强度时,便在主裂纹扩展前产生垂直主裂纹扩展方向的分层裂纹。假设面内与轧制方向平行的材料强度为 σ_c ,弱界面强度为 σ_{zc} ,一般 $\sigma_{zc} < \sigma_c$ 。于是,若在裂尖首先达到 $\sigma_y > \sigma_c$,则发生主裂纹扩展,不产生分层裂纹;若 σ_y 达到 σ_c 前,在试样有效厚度中心首先满足 $\sigma_z > \sigma_{zc}$,则先产生与主裂纹扩展方向正交的分层裂纹然后主裂纹才扩展;若 σ_y 达到 σ_c 前,在试样缺口或裂纹前首先满足 $(\sigma_x)_{max} > \sigma_{zc}$,则产生垂直主裂纹扩展方向的分层裂纹后,主裂纹才扩展,即:

当 $\sigma_y > \sigma_c$,而 $(\sigma_x)_{max} < \sigma_{zc}$ 和 $\sigma_z < \sigma_{zc}$,则主裂纹扩展,不产生分层裂纹;

当 $\sigma_z > \sigma_{zc}$,而 $(\sigma_x)_{max} < \sigma_c$ 和 $\sigma_y < \sigma_c$,则产生与主裂纹扩展方向正交的分层裂纹后,主裂纹扩展。

当 $(\sigma_x)_{max} > \sigma_{zc}$,而 $\sigma_z < \sigma_c$ 和 $\sigma_y < \sigma_c$,则产生垂直于主裂纹扩展方向的分层裂纹后,主裂纹扩展。

产生分层裂纹的应力是由产生主裂纹扩展的集中应力产生,主裂纹扩展后,原主裂纹尖端应力释放,原裂尖处可能产生分层裂纹的应力随之减小或消失,此处不可能再产生新的分层裂纹。因此,分层裂纹产生于主裂纹扩展之前。分层裂纹产生后,分层裂纹面上的应力为零。在离分层裂纹面一定距离处,才可能重新建立起大于弱界面强度的应力,产生新的分层裂纹。因此,并不是每个弱界面都产生分层裂纹,分层裂

纹间有一定距离(图5)。

4 分层裂纹的影响因素

4.1 温度和试样取向对分层裂纹的影响

随着温度的降低,材料的屈服强度明显提高,断裂逐渐转化为脆性。在断口上可以清楚地看出从纤维区转化为结晶区的形貌特征,分层裂纹的出现以及分层裂纹的特征明显地受试验温度影响。图7为不同试验温度压制缺口 DWTT 试样的断口形貌。随着温度升高,断口由解理断裂向剪切断裂转变,其韧脆形貌转变温度介于 $-20\sim-30\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。低于韧脆转变温度的脆性断口或韧脆转变温度区混合型断口的脆性区,不出现分层裂纹。高于韧脆转变温度的剪切断口,出现了不同程度的分层裂纹, $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 断口的分层裂纹最严重。随着实验温度的升高,其分层的程度降低,数量、长度和张开宽度也降低。

缺口沿板材的厚度方向取样时,随着取样方向的改变,分层裂纹的扩展方向与轧制方向的相对方向改变,分层裂纹的产生以及分层裂纹对试样的断裂影响也发生改变。试样长度沿卷板轧制方向纵向取样,出现分层裂纹的几率最高;试样长度垂直卷板轧制方向的横向取样产生分层裂纹几率最小;沿 45° 方向取样,产生分层裂纹的几率则介于此二者之间。其原因是,随着试样轧制方向的改变,形变织构和夹杂物延伸分布与受力方向均发生变化。纵向取样时,断口分层裂纹的扩展方向与轧制方向相同,即与形变织构和夹杂物分布方向相同,分层裂纹扩展阻力小,断口分层倾向较大。横向取样时,分层裂纹扩展与轧制方向垂直,

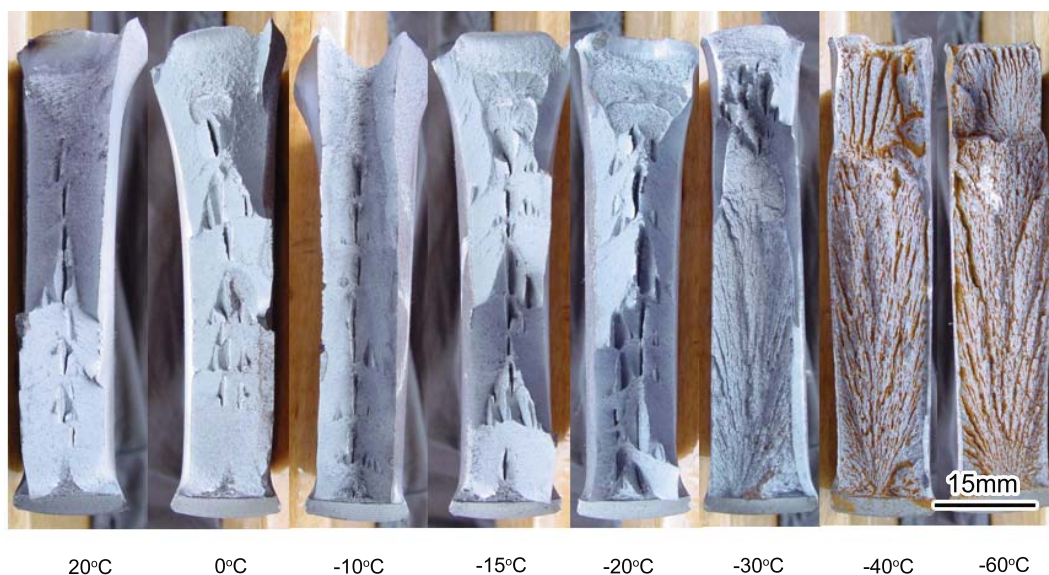


图7 压制缺口无背槽 DWTT 不同温度下试样断口

Fig.7 Fracture surface morphologies of DWTT specimen at different temperatures

裂纹表面因撕裂扩展所吸收的能量增大, 扩展阻力加大, 故断口分层倾向相对较弱. 沿着 45° 方向取样时, 分层裂纹扩展方向介于卷板纵、横向取样之间, 分层倾向也介于二者之间.

4.2 试样厚度对分层裂纹的影响

图 8 为不同厚度三点弯曲断裂试样破坏断口. 由于厚度方向离面应力的约束作用和塑性变形, 试样断面都产生沿厚度方向的收缩. 试样的厚度增加, 应力约束提高, 收缩加剧; 厚度较大的试样在厚度中心产生较大的离面应力, 产生较大的分层裂纹, 即一次分层裂纹. 一次分层裂纹产生后, 分层裂纹将试样分为两部分, 每部分有效厚度减小, 离面应力降低, 在每部分的厚度中心产生较小的分层裂纹, 即二次分层裂纹. 从图 8 可以看出, 厚度 $B=10\text{ mm}$ 的厚试件中产生裂纹长度和宽度较大的一次分层裂纹, 在 $1/4$ 厚度处存在密集的二次裂纹; $B=3, 5\text{ mm}$ 的断口中有明显可见的分层裂纹, 厚度越小, 分层裂纹的尺寸越小.

试样的分层断裂行为取决于材料韧性和材料内部缺陷, 而厚度仅决定分层的程度. 不管是厚度较大的 10 mm 试样, 还是厚度较小的 3 mm 试样, 断口上均产生分层裂纹, 且在离面应力作用下都充分张开. 由于在薄试样中最大离面应力比厚试样小得多, 厚度较小的 3 mm 试样断口上的分层裂纹比厚试样断口上的分层裂纹长度、深度和张开宽度均小得多.

4.3 变形梯度对分层裂纹的影响

图 9a 为标准压制缺口 DWTT 试样准静态三点弯曲试验的试样断口, 在断裂过程中裂尖变形梯度较大的. 压制缺口根部由于缺口压制过程中材料韧性劣化, 以及缺口对其根部变形的约束, 裂纹起裂时试样厚度方向变形较小, 由此引起的离面拉应力较小. 因此, 产生分层裂纹前缺口主裂纹已起裂扩展. 随着裂

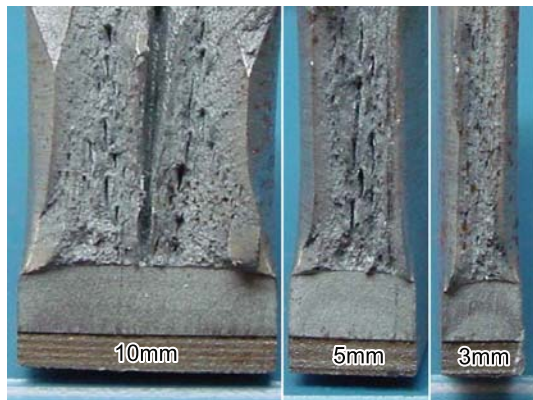


图 8 不同厚度试样断口 ($-20\text{ }^\circ\text{C}$)

Fig.8 Fracture surface morphologies of different thickness ($-20\text{ }^\circ\text{C}$)

纹的扩展, 裂纹穿过缺口根部材料劣化区, 同时在裂尖的厚度方向变形增大, 试样裂尖处与周围的厚度差增大, 由此引起较大的离面拉应力而自试样厚度中心首先产生较大的分层裂纹. 由于试样比较厚, 在厚度中心产生分层裂纹后, 大约四分之一厚度处又产生了分层裂纹. 该分层裂纹的产生, 降低了试样厚度中心的离面应力, 可能使厚度中心的分层裂纹消失. 随着裂纹的扩展, 试样厚度中心又产生分层裂纹. 这样在裂纹稳定扩展阶段, 分层裂纹在试样厚度中心, 及大约四分之一厚度处交替出现. 主裂纹扩展进入后期非稳定裂纹扩展阶段, 由于压头和弯曲的作用, 裂纹穿过前试样材料已承受很大的塑性变形而使材料韧性降低, 该处试样厚度较原始厚度增加许多, 受到其它部位材料的约束, 而产生沿厚度方向压应力. 因此, 标准压制缺口 DWTT 试样准静态三点弯曲试样断口的最后阶段, 没有观察到宏观分层裂纹.

图 9b 为标准压制缺口 DWTT 试样偏心受拉试验断口, 断裂过程中裂尖变形较大, 但变形梯度较小. 偏心受拉试样断口的起裂和初始扩展阶段与准静态三点弯曲试样断口基本相同. 随着裂纹的扩展, 虽然试样承受的载荷降低, 但试样承受拉力的面积减小, 单位面积上承受的载荷反而增加. 从试样断口可以看出, 此时试样屈服区明显大于裂纹起裂时的屈服区, 且屈服范围随着裂纹扩展而增大. 由于屈服范围随着断裂扩展逐渐增大, 裂纹尖端附近厚度方向变形梯

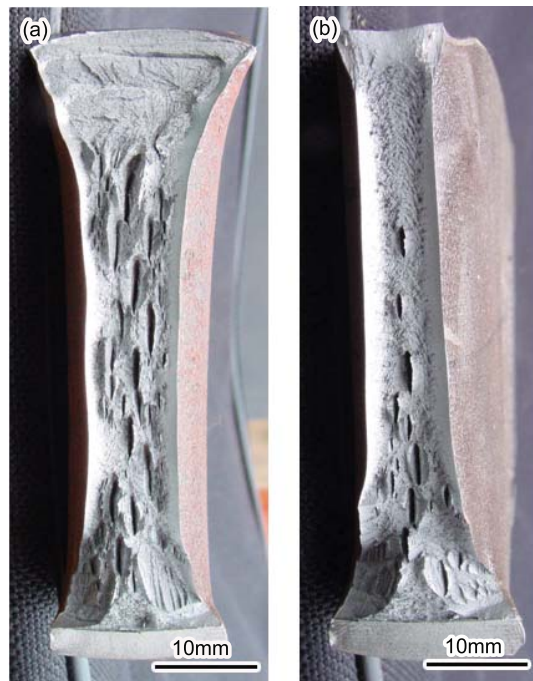


图 9 不同变形梯度试样断口的分层裂纹

Fig.9 Delamination crack morphologies of specimens with different deformation grads (a) 3-point bending specimen (b) eccentricity tensile specimen

度减小, 裂尖周围材料对裂尖厚度方向的约束减小, 裂尖离面应力逐渐减小. 可见, 随着裂纹的扩展, 偏心受拉试样断口的分层裂纹逐渐减少, 尺寸也逐渐减小, 裂纹扩展的最后阶段, 基本不产生分层裂纹. 尽管此时裂尖的变形程度非常大, 但变形梯度却很小. 因此, 分层裂纹与裂尖的变形程度关系不大, 而是取决于变形梯度, 变形梯度越大, 产生的离面应力越大, 分层程度就越高.

5 分层裂纹对裂纹扩展的影响

T-S 取向试样对应于管道的表面裂纹或缺口, 板材的厚度方向即为试样主裂纹的扩展方向, 弱界面与该方向垂直. *T-S* 取向试样在断裂过程中, 裂纹尖端不仅有非常大的张开应力和较高的离面应力, 在距裂纹或缺口根部一定的距离处还有较大的垂直于裂纹或缺口根部表面的拉应力. 裂纹顶端前面的弱界面在 σ_x 作用下将被拉开, 在主裂纹扩展前, 形成垂直裂纹扩展方向的分层裂纹 (图 10a). 弱界面的强度越低, 缺口越尖, 分层裂纹离原始缺口根部越近, 分层裂纹数量越多, 间距越小. 该分层裂纹的产生不仅使裂纹顶端的三轴性减小 [6], 同时也改变了裂纹端部的构形, 从而对断裂产生巨大的影响. 图 11 和图 12 分别为分层裂纹产生前、后和断裂扩展后 *T-S* 取向试样缺口根部附近 σ_y 和 σ_x 应力分布曲线. 分层裂纹在 σ_x 应力最大处产生后, σ_x 应力分布改变, 缺口根部 σ_x 应力降低. 主裂纹扩展到分层裂纹后, 分层裂纹面成为主裂纹的根部, 裂纹端部钝化. 钝化后的裂纹端部 σ_y 比裂纹扩展前裂纹端部 σ_y 小得多, 裂纹端部 σ_x 比裂纹扩展前裂纹端部 σ_x 也小, 在钝化后的裂纹端部产生比第一次小的第二次分层裂纹. 第二次分层裂纹与第一次分层裂纹之间材料拉断后, 主裂纹扩展, 断面与主裂纹扩展方向成 45° . 主裂纹的扩展

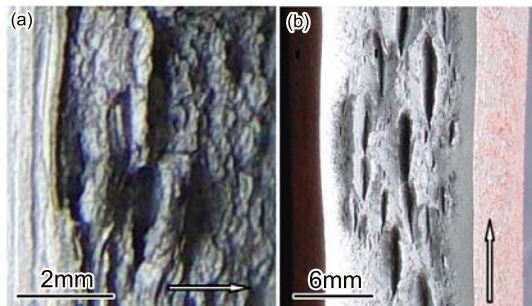


图 10 不同取向断裂的分层裂纹 (箭头为断裂扩展方向)
 Fig.10 Delamination crack of different orientation (the arrow indicates the fracture propagation direction)
 (a) *T-S* Charpy specimen, (b) *T-L* DWTT specimen

路径将不沿着直线扩展, 在分层裂纹之间形成斜的剪切破坏面 (图 10a). 主裂纹产生垂直于主裂纹扩展方向的分层裂纹, 其在材料中扩展需要消耗更多的能量, 使裂纹扩展更加困难. 因此, 管线钢中由弱界面在裂纹扩展时产生的分层裂纹对管线表面缺陷或表面裂纹向穿透管壁的扩展演化有阻碍作用, 对阻止形成穿透裂纹和管道破漏产生有利的作用.

T-L 取向试样对应管道的穿透裂纹或缺口, 弱界面与试样表面平行, 与裂纹扩展方向正交. 在 *T-L* 取

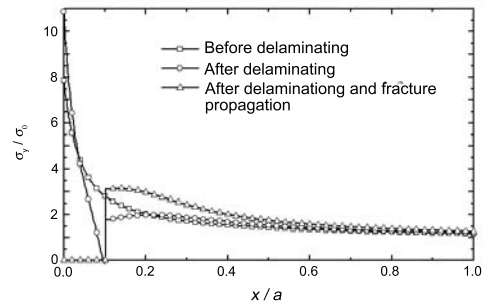


图 11 *T-S* 试样缺口根部附近 σ_y 应力分布

Fig.11 Stress σ_y distribution of *T-S* specimen near notch root

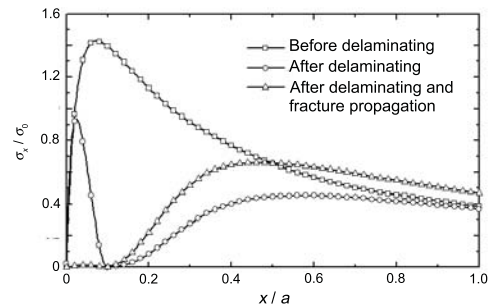


图 12 *T-S* 试样缺口根部附近 σ_x 应力分布

Fig.12 Stress σ_x distribution of *T-S* specimen near notch root

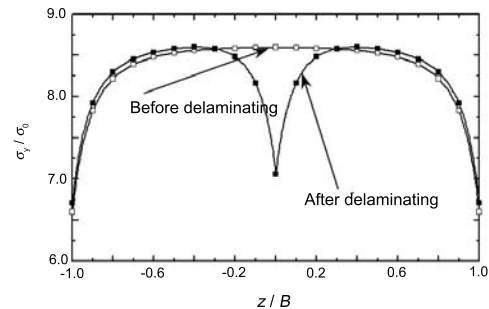


图 13 *T-L* 试样缺口根部附近 σ_y 应力分布

Fig.13 Stress σ_y distribution of *T-L* specimen near notch root

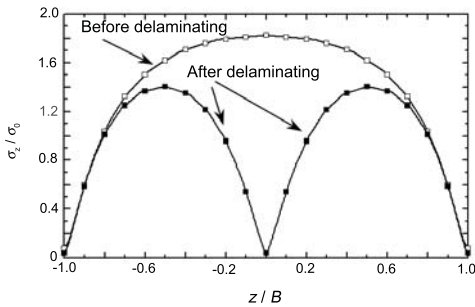


图 14 $T-L$ 试样缺口根部附近 σ_z 应力分布

Fig.14 Stress σ_z distribution of $T-L$ specimen near notch root

向试样的断裂过程中, 首先产生与裂纹扩展方向正交的分层裂纹, 最大的分层裂纹产生于试样厚度中央. 有效厚度越大、距有效厚度中心距离越近, 离面应力越大, 分层裂纹宽度越大. 图 13 和图 14 分别为厚度中面分层裂纹产生前、后 $T-L$ 取向试样缺口根部附近 σ_y 和 σ_z 应力分布曲线. 分层裂纹产生后, 裂纹或缺口前沿靠近分层裂纹面的张开应力降低. 而每个分层裂纹面上的离面应力 σ_z 降低至零, 也使裂纹或缺口前沿的离面应力 σ_z 松弛, 从而使裂纹端部的三维应力约束减小. 整个厚度的试样好象由许多薄的试样所组成, 有效厚度降低, 断裂韧性提高 (图 10b). 分层裂纹的数量越多、尺寸越大, 断裂韧性提高越多, 韧脆转变温度降低越大.

不管试样的取向如何, 分层裂纹均产生于主裂纹扩展之前. 在断裂过程中, 分层裂纹对裂尖的应力状态影响非常大, 从而对断裂产生巨大的影响. 在正常使用时, 管道材料中不存在分层裂纹, 管线钢的分层裂纹只在断裂过程中产生, 而断裂时的分层裂纹对管线的正常使用没有影响. 另外, 断裂时产生分层裂纹需要消耗更多的能量, 同时, 穿透裂纹体的分层裂纹使其有效厚度减小, 表面裂纹体的分层裂纹与裂纹扩展方向垂直, 所有这些因素均使裂纹扩展更加困难, 使材料韧性得到提高.

6 结 论

(1) 铁素体管线钢分层裂纹的数量及方向受裂纹端部三维应力场和材料的强度分布状态控制. 分层裂纹为材料中的弱界面在垂直该弱界面的拉应力作用下产生的. 裂纹或缺口取向不同, 裂纹端部三维应力分量与材料强度分布的关系不同, 产生分层裂纹的方向和机理不同, 断裂过程中分层裂纹产生于主裂纹扩展之前, 且分层裂纹间有一定的距离.

(2) 分层裂纹的产生以及分层裂纹的特征明显地

受材料的本质、温度和应力状态等因素的影响. 分层裂纹产生于韧性断裂区, 分层程度取决于裂尖的变形梯度. 无论穿透裂纹体的分层裂纹还是表面裂纹体的分层裂纹均使主裂纹扩展更加困难, 从而使材料韧性得到提高.

参 考 文 献

- 1 M.S.Mamdouh, Through-thickness properties of TMCP steel. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **126**, 346 (2004)
- 2 J.Sun, J.D.Boyd, Effect of thermomechanical processing on anisotropy of cleavage fracture stress in microalloyed linepipe steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **77**, 369(2000)
- 3 S.Kawaguchi, N.Hagiwara, T.Masuda, M.Toyoda, Evaluation of leak-before-break (LBB) behavior for axially notched X65 and X80 line pipes, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **126**, 350(2004)
- 4 LI Heilin, Developing pulse and prospect of oil and gas transmission pipe, *Welded Pipe and Tube*, **27**(6), 1(2004) (李鹤林, 油气输送钢管的发展动向与展望, *焊管*, **27**(6), 1(2004))
- 5 G.M.Wilkowski, Y.Y.Wang, D.Rudland, Recent effect on characterizing propagation ductile fracture resistance of linepipe steels, *Pipeline Technology* (Amsterdam, Elsevier Science, 2000) p.359
- 6 R.W.Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 2nd Edition, (New York, John Wiley & Sons, 1983) p.364
- 7 YANG Zheng, GUO Wanlin, HUO Chunyong, Fracture toughness of X70 pipeline steel at different temperatures. *Acta Metallurgica Sinica*, **39**(9), 908(2003) (杨 政, 郭万林, 霍春勇, X70 管线钢不同温度下断裂韧性实验研究, *金属学报*, **39**(9), 908(2003))
- 8 W.L.Guo, H.R.Dong, M.X.Lu, X.W.Zhao, The coupled effects of thickness and delamination on cracking resistance of X70 pipeline steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **79**(6), 403(2002)
- 9 GB 2038-1, *Metallic Materials-Standard Test Method for J_{IC} , a Measure Fracture Toughness*, 1991 (GB 2038-91, 金属材料延性断裂韧度 J_{IC} 试验方法, 1991)
- 10 Z.H.Li, W.L.Guo, Z.B.Kuang, Three-dimensional elastic stress fields near notches in finite thickness plates. *International Journal of Solids and Structures*, **37**, 7617(2000)
- 11 A.Kotousov, C.H.Wang, Three-dimensional stress constraint in an elastic plate with a notch. *International Journal of Solids and Structures*, **39**, 4311(2002)
- 12 S.W.Kwon, C.T.Sun, Characteristics of three-dimensional stress fields in plates with a through-the-thickness crack, *International Journal of Fracture*, **104**(3), 291(2000)
- 13 W.L.Guo, Recent advance in three-dimensional fracture mechanics, *Key Engineering Materials*, **183**(I), 193(2000)
- 14 GB 4161-84, *Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*, 1984 (GB 4161-84, 金属材料平面应变断裂韧性 K_{IC} 试验方法, 1984)

-
- 15 GB/T 229-1994, Metallic Materials-Charpy Notch Impact Test. 1994
(GB/T 229-1994, 金属夏比缺口冲击试验方法. 1994)
- 16 API RP 5L3-1996, Recommended Practice for Conducting Drop-Weight Tear Tests on Line Pipe. American Petroleum Institute, 1996.