

厚度与分层耦合效应对 X60 管线钢断裂韧性的影响 *

郭万林^{1,2)} 董蕙茹^{2,3)} 杨政²⁾ 路民旭⁴⁾ 赵新伟⁴⁾ 罗金衡⁴⁾

1) 南京航空航天大学飞机工程系, 南京 210016

2) 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049

3) 空军工程大学工程学院, 西安 710043

4) 中国石油天然气总公司管材研究中心, 西安 710065

摘要 通过对厚度分别为 3, 6, 9, 12 和 15 mm 的 CT 试样的断裂韧性实验和微观断口分析, 研究了 X60 高韧性管线钢的断裂韧性和裂纹扩展阻力曲线的厚度与分层裂纹耦合效应。结果表明, 分层裂纹与厚度方向的离面应力存在约束相互作用, 厚度增加, 分层开裂加剧, 局部有效厚度并未增加, 导致断裂过程中裂纹端部的三维应力约束总是近平面应力的低约束状态, 表观断裂韧性不随厚度变化。在有分层裂纹出现时, 无法靠增加试样厚度获得材料的平面应变断裂韧性。由于分层与厚度的耦合作用与裂纹扩展方向与厚度方向的相对方位密切相关, 应用穿透裂纹的表观断裂韧性数据进行管道结构的安全评定并不完全可靠。研究还表明, 塑性区修正的有效应力强度因子与弹塑性 J 积分参量在失稳扩展前保持良好的等效性。

关键词 试样厚度、分层、延性断裂、三维应力约束、塑性、管线钢

中图法分类号 TG115.5, O346.1

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)04-0386-05

EFFECTS OF THICKNESS AND DELAMINATION ON FRACTURE TOUGHNESS OF X60 PIPELINE STEEL

GUO Wanlin^{1,2)}, DONG Huiru^{2,3)}, YANG Zheng²⁾, LU Minxu⁴⁾, ZHAO Xinwei⁴⁾,
LUO Jinheng⁴⁾

1) Department of Aircraft Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

2) The State Key Laboratory of Mechanical Structural Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

3) College of Engineering, Engineering University of Airforce, Xi'an 710043

4) Tubular Goods Research Center of China National Petroleum Corp., Xi'an 710065

Correspondent: GUO Wanlin, professor, Tel: (029)2668751, Fax: (029)3237910,

E-mail: guowl@xjtu.edu.cn

Manuscript received 2000-09-29, in revised form 2001-01-03

ABSTRACT The effects of thickness and delamination on the fracture toughness of X60 pipeline steel were investigated experimentally by using of compact tension specimens with thicknesses of 3, 6, 9, 12 and 15 mm. The couple effect of delamination cracks and out-of-plane stress constraint was discovered. Delamination became serious as thickness increasing, and the three-dimensional stress constraint near the crack-tip is nearly low-constraint plane stress state during fracture. Appearance fracture toughness is independent on thickness. It is impossible to attain plane strain fracture toughness by increasing specimen thickness when delamination cracks turn up. Because the couple effect of thickness and delamination is related closely with the relative direction of crack growth and thickness, the safe assessment of pipeline by using test data from through-thickness crack is not very reliable. The plasticity modified stress intensity factor K_e and J integral were found to be equivalent in description of the cracking growth of such ductile steel.

KEY WORDS specimen thickness, delamination, ductile fracture, out-of-plane constraint, plasticity, pipeline steel

* 国家杰出青年基金和中国石油天然气总公司管材研究中心基金资助项目

收到初稿日期: 2000-09-29, 收到修改稿日期: 2001-01-03

作者简介: 郭万林, 男, 1960 年生, 教授

远距离天然气管道输送过程中, 管道的安全性具有重要的意义, 工程结构的安全设计和评定都是依据现有规范和材料试验标准, 利用实验室获得的标准试样材料性能数据进行的。但是, 目前使用的断裂韧性 K_{Ic} 和 J_{Ic} 等都是试样厚度等影响裂端三维约束的参量的函数^[1,2], 另外高

韧性管道钢在断裂试验和冲击韧性试验中总是出现分层裂纹, 以往的研究主要集中于分层裂纹的形成机理^[3-5], 对厚度的影响虽然十分重视但缺乏系统的三维研究. 现行的管道剩余强度评定主要是基于材料的平面应变断裂韧性参量 K_{Ic} 和 J_{Ic} 等进行评定^[6], 但因分层的存在这些偏安全的材料参量是不可能得到的. 分层对断裂的影响主要是约束的变化, 分层降低约束, 而厚度增加提高约束. 因此, 只有在三维断裂理论的指导下, 通过厚度与分层裂纹的耦合效应研究才可能获得分层对断裂影响的较全面的认识, 为结构的安全设计和评定、管道材料的客观韧性指标的建立提供可靠基础.

X60 钢是目前我国使用的石油、天然气管道高韧性钢, 也是“西气东输”工程将采用的 X70 及更高等级钢的前身产品. 本研究以 X60 系列中性能较优的 (屈服应力 ≥ 500 MPa, 极限应力 ≥ 620 MPa) 大口径厚壁管道 (直径为 1420 mm, 壁厚为 17.4 mm) 材料为对象, 对不同厚度的穿透裂纹紧凑拉伸试样进行了实验研究和分析, 旨在揭示这类高韧性管道钢的三维破坏行为, 为建立客观的材料韧性指标和更有效的安全分析提供依据.

1 实验方法

实验材料取自正在服役的直径为 1420 mm、壁厚为 17.4 mm 的 X60 石油天然气管道. 其成分 (质量分数, %) 为: C 0.09, Si 0.21, Mn 1.27, P 0.009, S 0.008, Cr 0.018, Mo 0.003, Ni 0.024, Nb 0.042, V 0.041, Ti 0.021, Cu 0.01. 其机械性能如下: $\sigma_{ys} > 500$ MPa, $\sigma_b > 618$ MPa, Poisson 比 $\nu=0.3$.

为模拟管道使用中常见的在内压作用下沿管线纵向的开裂破坏, 揭示断裂的厚度与分层耦合效应, 加工了裂纹沿管轴向的不同厚度的紧凑拉伸 CT 试样. 试样宽度 $W=60$ mm, 试样面内尺寸符合 GB 4161-84^[7] 和 ASTM E399-83^[8] 规定. 为保持材料的一致性, 从原始壁厚机械铣切加工出厚度分别为 3, 6, 9, 12 和 15 mm 的试样各 5 件. 所有试样先由线切割加工初始裂纹, 缝宽约为 0.20 mm, 缝长为 0.45W. 全部试样在实验前都进行了疲劳预制裂纹. 预制结束时裂纹长度约为 0.466W.

实验采用位移控制, 加载速率小于 GB 4161-84^[7] 和 ASTM E561-81^[9] 的有关规定值. 实验过程中记录时间、力及位移, 并在试样上加装 MTS-COD 测量仪测量裂纹张开位移. 实验在大气环境下进行, 实验期间温度保持在 14—18 °C, 相对湿度为 50%—60%.

实验结束后对各种厚度穿透裂纹试件在 HITACHI S-2700 扫描电镜下进行断口分析.

2 实验结果及分析讨论

2.1 断口观察

试样材料取自管线中间部位的中间厚度处. 图 1a 是

厚度为 15 mm 试样的宏观 SEM 照片. 图中 A 为起裂点, 在分层顶点附近; B 为扩展区紧邻分层面的点. 其 SEM 图像是典型的指向断口源的抛物线形状的撕裂韧窝, 韧窝内有夹杂物. 在拉伸应力作用下夹杂物处首先开裂, 随着塑性变形扩展成空洞, 空洞聚合最终断裂. 图 2 是厚度为 3 mm 试样的 SEM 照片. A 处为预制疲劳裂纹区与裂纹扩展区的交界, 扩展区 B 表现为含夹杂物的等轴韧窝, 从 C 点可见薄试样中仍存在分层. 由此推知分层行为取决于材料, 而厚度仅决定分层的程度.

观察宏观断口及 SEM 照片, 可以发现:

(1) 由于厚度方向的离面应力约束作用和塑性变形, 所有试样断面都产生沿厚度方向的收缩. 厚度增加, 应力约束提高, 收缩加剧.

(2) 厚度 $d=15$ mm 的厚试件中部存在贯穿整个断面

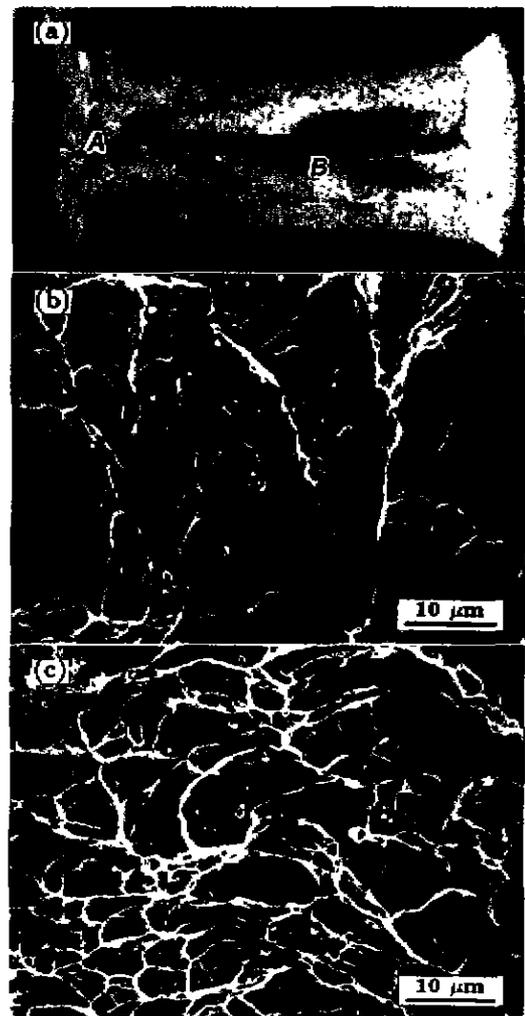


图 1 厚度为 15 mm 穿透裂纹试件的断口分析

Fig.1 Fracture profile and micro characteristics of 15 mm thick CT specimen

(a) macrograph of fracture surface

(b) SEM image of initiation marked by A in Fig.1a

(c) SEM image of growth zone B in Fig.1a

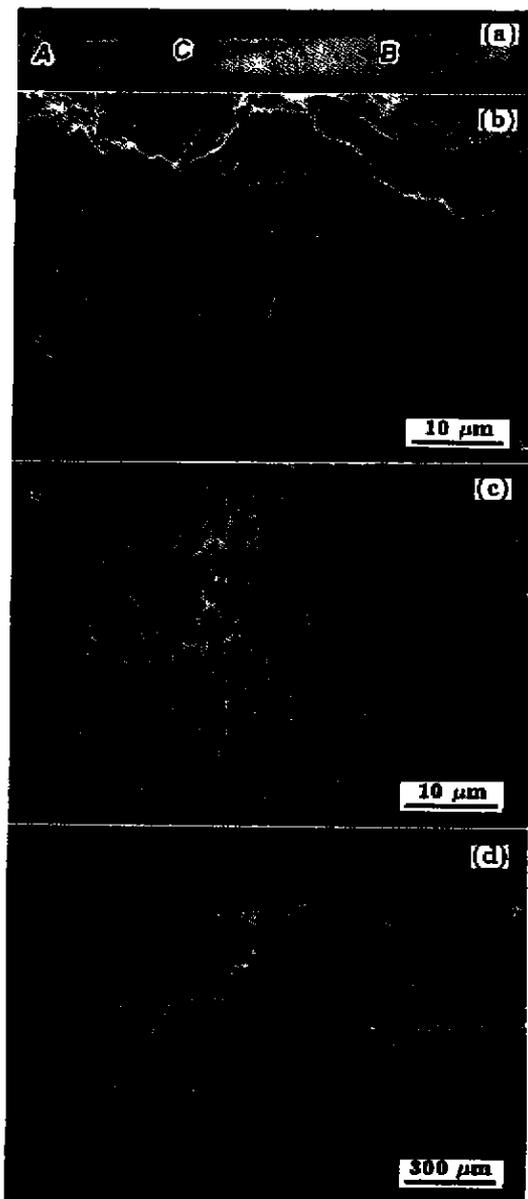


图2 厚度为3 mm的穿透裂纹试件的断口分析

Fig.2 Fracture surface and micro characteristics of 3 mm thick CT specimen

- (a) morphology of fracture surface
 (b) SEM image of initiation marked by A in Fig.2a
 (c) SEM image of growth zone B in Fig.2a
 (d) SEM image of zone C in Fig.2a

的大分层, 在1/4厚度处存在密集的二重裂纹; $d=6, 9, 12$ mm的试样中有明显可见的分层裂纹, 厚度越小, 分层裂纹的尺寸越小; 在 $d=3$ mm的薄试件中无肉眼可见的分层, 但在电子显微镜下, 中部仍可见许多分立的分层裂纹, 表明分层裂纹是微小的片状夹杂或缺陷在较高的离面应力作用下开裂、增长并连接而形成的。

(3) 所有分层裂纹, 不管是宏观尺度的(如15 mm厚试样中)还是微观尺度的(如3 mm厚试样中), 在离面应

力约束作用下都是充分张开的, 分层裂纹的出现削弱了离面应力约束, 从而削弱了厚度效应。

(4) 所有断口 SEM 观察显示出的韧窝和延伸撕裂特征表明, 在本研究的室温环境下, X60 钢都是韧性断裂, 与试样尺寸无关。

2.2 断裂韧性

在韧性材料的断裂韧性实验中, 裂纹端部塑性变形大, 基于应力强度因子的线弹性断裂力学方法及考虑塑性的近似修正方法都有局限, 用它们来评价材料断裂韧性的合理性需要弹塑性分析来证实。

依照 ASTM E813-81^[10] 和 GB 2038-91^[11] 计算 J 积分如下

$$J = J_e + J_p \quad (1)$$

$$J_e = \frac{1 - \nu^2}{E} K^2$$

$$K = \frac{P}{d\sqrt{W}} f(a/W) \quad (2)$$

$$J_p = \frac{\eta U_p}{d(W-a)} \quad \eta = 2 + 0.522 \frac{W-a}{W} \quad (3)$$

式中, J_e 和 J_p 分别为 J 积分中的弹性和塑性分量, kJ/m^2 ; E 为材料的弹性模量, MPa ; K 为应力强度因子, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; P 为外载荷, kN ; $f(a/W)$ 及 η 为修正系数。如图3所示, U_p 为载荷-加载点位移曲线下的塑性功面积, kJ 。

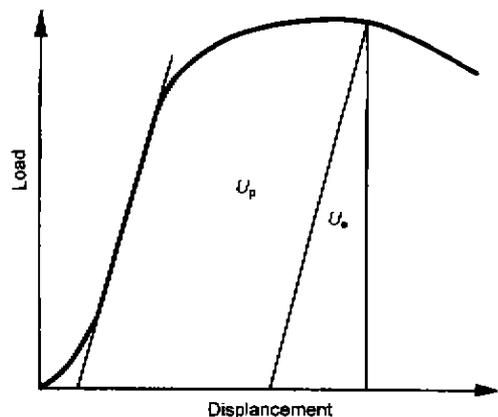


图3 载荷-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curves

为便于比较, 将 J 积分表示成应力强度因子形式如下

$$K_J = \sqrt{EJ} \quad (4)$$

同时定义有效应力强度因子为

$$K_e = \frac{P}{d\sqrt{W}} f(a_e/W) \quad (5)$$

其中, 等效裂纹长度 $a_e(\text{mm})$ 可以用 ASTM E561-81^[9] 给出的柔度公式从载荷-裂纹张开位移曲线求得。

定义不计裂纹扩展的应力强度因子为

$$K = K(a_0) = \frac{P}{d\sqrt{W}} f(a_0/W) \quad (6)$$

式中, a_0 为初始裂纹长度, mm.

图 4 为不同厚度试样的单位厚度下载荷 - 裂纹张开位移曲线. 显然, 在达到最大承载能力之前, 厚度对单位厚度载荷曲线基本没有影响. 在尾部的失稳扩展阶段, 剩余承载能力随厚度增加略有提高.

图 5 给出 $K(a_0)$ 和有效应力强度因子 K_e 随载荷的变化曲线, 从图可见二者的变化均与厚度无关.

图 6 给出 $K(a_0)$ 和应力强度因子 K_J 随载荷的变化曲线, 与图 5 比较可见, K_J 与 K_e 十分相近, 也与厚度基本无关.

根据 ASTM E561-81 规定, 确定失稳扩展临界点为

$$\frac{\partial K}{\partial a} \geq \frac{\partial K_R}{\partial a} \quad (K \geq K_R) \quad (7)$$

式中, K_R 为材料裂纹稳定扩展阻力.

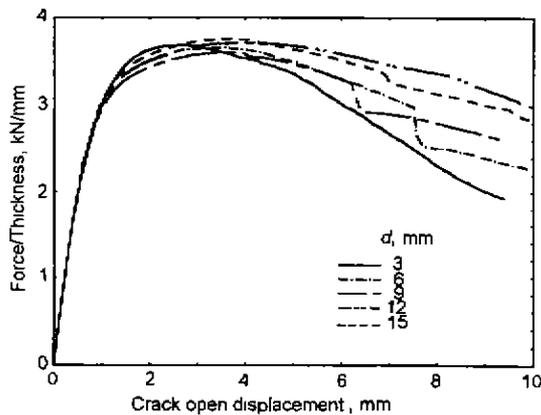


图 4 不同厚度紧凑拉伸试验载荷 - 裂纹张开位移曲线

Fig.4 Load vs crack open displacement curves for different thicknesses

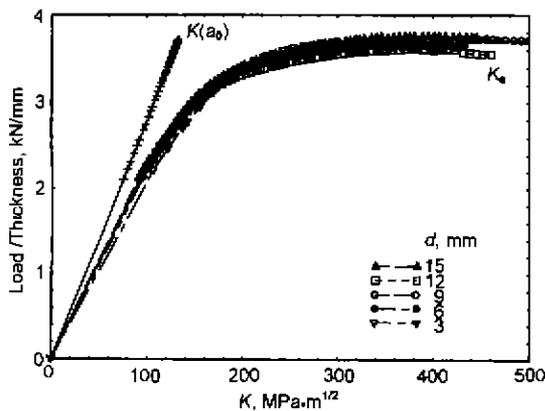


图 5 X60 管线钢有效应力强度因子 K_e 随载荷的变化曲线

Fig.5 Effective stress intensity factor K_e vs load curves of X60 pipeline steel

在正 K 梯度的 CT 试样中, 此临界点即为最大载荷点, 所以临界载荷 $P_c = P_{max}$. 此点对应的 K , K_e 和 K_J 分别为临界 K_{0c} , K_{ec} 和 K_{Jc} .

图 7 给出了临界 K_{0c} , K_{ec} 和 K_{Jc} 随厚度 d 变化的实验结果. 从图可见, K_{0c} 基本与厚度无关, K_{ec} 和 K_{Jc} 随厚度增大略有上升. 仅考虑初始裂纹尺寸的应力强度因子 K_{0c} 给出十分保守的材料断裂韧性估计. 按 ASTM 试验标准所得的修正的有效应力强度因子临界值 K_{ec} 比弹塑性 J 积分给出的临界值 K_{Jc} 略高 (不到 3%). 说明有效应力强度因子 K_e 可以将线弹性断裂力学的使用范围扩展至高韧性材料的断裂.

图 8 为用 K_J 和 K_e 随有效裂纹尺寸 a_e 变化表示的材料裂纹扩展曲线. 在达到临界值之前 K_e 和 K_J 吻合很好, 随 a_e 的变化近似呈线性; 在超出临界失稳点后, K_e 与 K_J 的差别逐渐增大. 说明在失稳扩展阶段基于线弹性断裂理论的有效应力强度因子不再适用. 图 8 还表明 X60 管道钢的裂纹扩展阻力曲线受厚度影响很小.

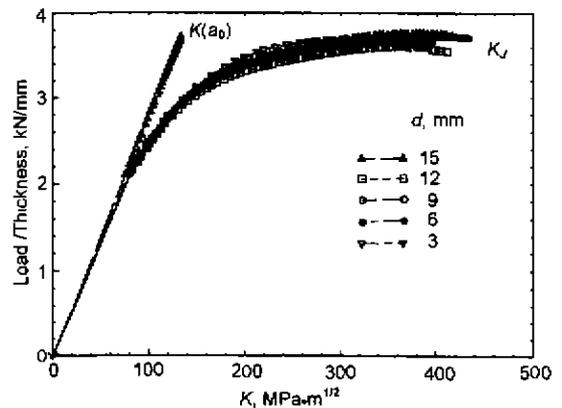


图 6 X60 管线钢应力强度因子 K_J 随载荷的变化曲线

Fig.6 Stress intensity factor K_J vs load curves of X60 pipeline steel

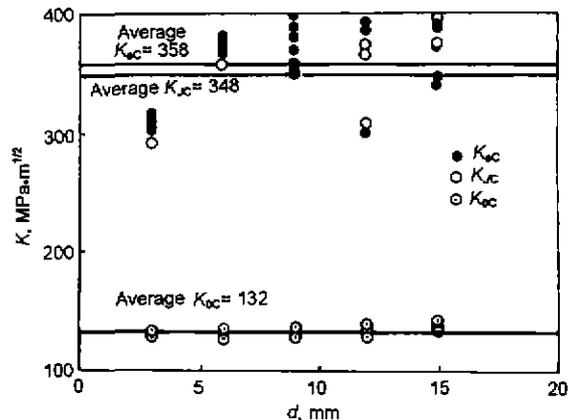


图 7 X60 管线钢断裂韧性参数随厚度的变化

Fig.7 Fracture toughness parameters vs thickness d of X60 pipeline steel

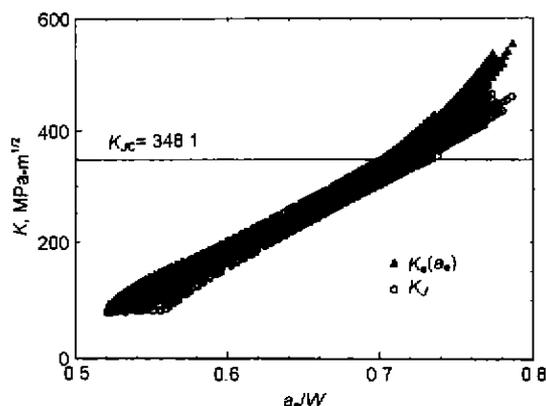


图8 X60 管线钢裂纹扩展阻力曲线

Fig.8 K_{IC} and K_J resistance curves of X60 pipeline steel

2.3 讨论

在没有分层裂纹的情况下, 韧性材料中穿透裂纹体断裂的断裂韧性总是三维应力约束的增函数, 随厚度增大而降低, 从而有平面应变断裂韧性 K_{Ic} 和 J_{Ic} 的概念. 但对 X60 这类高韧性管道钢, 由于分层裂纹的大量产生, 通过增加名义厚度是无法达到甚至接近 K_{Ic} 和 J_{Ic} 所要求的高离面应力约束的. 实际上, 由于分层随厚度增加而加剧, 厚试样的有效应力约束总与薄试样相当, 从而导致 K_{Ic} 和 J_{Ic} 实验给出过高的断裂韧性, 不能反映材料的实际承载能力. 平面应变断裂韧性 K_{Ic} 和 J_{Ic} 的概念对这类材料不适用.

当有分层裂纹出现时, 普通金属材料的韧性试验方法和材料评价方法也不再适用. 这包括裂纹体的断裂韧性试验、裂纹扩展阻力试验和缺口试样的冲击韧性试验. 如若使用这些概念, 必须将实验结果当作薄试样的近平面应力的上限值.

由于穿透裂纹的分层效应主要是离面应力约束和材料固有的片状缺陷或夹杂所致, 有确定的方向性, 当裂纹扩展方向与厚度方向的相对方位改变时, 分层裂纹效应将变弱, 实际的断裂韧性可能会显著下降. 例如, 对管道中最常见的内壁表面裂纹, 其沿厚度方向的扩展将导致泄漏和最终破坏, 但这种扩展过程中肯定不会因分层裂纹而降低裂纹端部的三维应力约束, 可以断定其断裂韧性将远低于有分层裂纹的标准穿透裂纹试验所得的名义断裂韧性. 因此, 当有分层裂纹存在时, 用穿透裂纹试样的试验数据预测一般的管道破坏的可靠性较差.

3 结论

(1) X60 钢断裂的厚度效应和分层裂纹强烈耦合. 一方面随着厚度的增大, 沿厚度方向的离面应力约束提高, 致使材料固有的分立的微小片状薄弱夹杂或缺陷开裂、连接产生微观至宏观尺度的分层裂纹. 厚度越大, 裂纹端部离面应力约束越高, 所产生的分层裂纹尺寸越大, 密度越

高. 另一方面, 分层裂纹的产生释放了局部离面应力约束, 致使断裂发生时裂纹端部的整体离面约束下降. 因此, 不同厚度试样裂纹端断裂时的三维应力约束趋向一致, 都比较弱, 从而削弱了该材料断裂的厚度效应.

(2) 断口分析表明, 无论试样薄厚, 整个断口都呈韧窝和延伸撕裂特征. 这表明 X60 钢在本研究的室温环境下都是韧性断裂, 与试样尺寸和分层裂纹无关. 裂纹在起裂后并不连续扩展, 而是严重钝化, 然后才失稳扩展.

(3) 按 ASTM 试验标准所得的修正的有效应力强度因子 K_e 与弹塑性 J 积分给出的 K_J 直至失稳扩展一直吻合很好, 说明有效应力强度因子 K_e 可以将线弹性断裂力学的使用范围扩展至高韧性材料的断裂. K_e 与 K_J 阻力曲线都基本与厚度无关, 说明分层裂纹有效地抑制了厚度增加引起的三维应力约束的提高, 从而基本消除了断裂的厚度效应.

(4) 由于分层裂纹出现, 穿透裂纹实验给出的材料断裂韧性是接近平面应力的上限值, 用其评定实际管道结构的破坏并不可靠. 进一步研究试样几何、透裂形式、分层断裂、裂纹钝化和三维应力约束的联合作用十分必要.

参考文献

- [1] Yin S Z. *Fracture Damage Theory and Application*. Beijing: Tsinghua University Press, 1992: 118
(尹双增. 断裂·损伤理论及应用. 北京: 清华大学出版社, 1992: 118)
- [2] Guo W L. *Acta Mech Sol Sin*, 1993; 14(Spec.): 1
(郭万林. 固体力学学报, 1993; 14(特刊): 1)
- [3] Romilly D P. *Test Eval*, 1993; 21: 239
- [4] Feng Y R, Li H L, Zhang P S, Ma B D, Jin Z H. In: American Society of Mechanical Engineers ed., *Proc of Pressure Vessels and Pip*, New York: ASME, Pressure Vessels and Piping Division, 1998: 13
- [5] Kunishige K, Fukuda M, Sugisawa S. *Trans Iron Steel Inst Jpn*, 1979; 19: 324
- [6] Zhao X W, Lu M X, Bai Q Z, Li P Q, Zhou F Q, Luo W H, Liu H F, Wang J. *Oil Field Equip*, 1999; 28(3): 24
(赵新伟, 路民旭, 白权真, 李平全, 周方勤, 罗文华, 刘海峰, 王靖. 石油矿场机械, 1999; 28(3): 24)
- [7] 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)
- [8] ASTM E399-83, *Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*, 1983
- [9] ASTM E561-81, *Test Method for Determining R Curve*, 1981
- [10] ASTM E813-81, *Metallic Materials — Standard Test Method for J_{Ic} , a Measure of Ductile Fracture Toughness*, 1981
- [11] GB 2038-91, *Metallic Materials — Standard Test Method for J_{Ic} , A Measure of Ductile Fracture Toughness*, 1991
(GB 2038-91, 金属材料韧性断裂韧度 J_{Ic} 试验方法 1991)