

HTP 管线钢试样取向与冲击韧性的相关性

朱丽霞 王亚龙 李金凤 陈宏达 何小东
(中国石油天然气集团公司管材研究所, 西安 710065)

摘要 试验结果表明, 14.3 mm HTP 管线钢带 (0.056C, 1.21Mn, 0.07Nb, 0.01Ti) 具有严重的各向异性现象, 平行于轧制方向的试样在同一温度下冲击功明显高于 45° 和垂直于轧制方向冲击功, 出现分层裂纹的倾向最大。分层裂纹主要是试样中条状缺陷所致, 受位错组态影响, 有确定的方向性, 与温度有关。

关键词 HTP 管线钢 冲击韧性 分层裂纹 试样取向

Correlation of Sampling Orientation and Impact Toughness of HTP Line-Pipe Steel Strip

Zhu Lixia, Wang Yalong, Li Jinfeng, Chen Hongda and He Xiaodong
(Tuber Goods Research Center, CNPC, Xi'an 710065)

Abstract Test results indicated that 14.3 mm HTP line-pipe steel strip (0.056C, 1.21Mn, 0.07Nb, 0.01Ti) had serious anisotropy, the Charpy V-notch impact energy and delaminating crack tendency of sample paralleled to rolling direction was obviously higher than that of samples being 45° and vertical to rolling direction at same temperature. The delaminating crack was caused by strip defect, it was effected dislocation configuration with certain direction feature and related to temperature.

Material Index HTP Line-pipe Steel, Impact Toughness, Delaminating Crack, Sampling Orientation

远距离天然气、石油管道输送过程中, 管道的安全性具有重要意义。管线设计和安全评定主要使用平面应变冲击韧性、平面应变断裂韧性作为材料破坏的指标, 工程结构的安全设计和评定都是依据现有规范和材料实验标准, 利用实验室获得的标准试样材料性能数据进行的^[1,2]。21 世纪是我国输气管建设的高峰时期, 需要大量的高性能管线钢体, 这种需要促进了科研单位对高性能管线钢的基础研究。其中 HTP (High Temperature Processing) 管线钢由于化学成分中减少或取消昂贵的 Mo、V 等元素的添加量, 钢在轧制过程中, 利用固溶铌提高奥氏体的再结晶温度, 使轧制可以在更高的温度进行, 终轧温度比常规管线钢高 100 °C 以上, 从而降低管线钢的冶炼和轧制成本, 具有高性能低成本的优势, 对管线建设有巨大的经济效益, 被称为新一代管线钢。

针对管线钢的大量使用和提高管线输气能力的需要, 本文以国产 HTP70 管线钢为例, 系统的研究了不同取向和不同温度的系列冲击特性, 分析温度

条件、试样取向对冲击韧性的影响, 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 试验材料及方法

试验所用材料为 HTP70 热轧卷板中部, 规格为 14.3 mm × 1 250 mm, 其化学成分如表 1 所示。分别在板卷宽度 1/4 处沿平行于轧制、45° 和垂直轧制方向取夏比 V 型缺口冲击试样 (图 1)。试样用机加工方法加工, 制备过程中避免由加工硬化或过热而影响材料的冲击性能, 尺寸为 10 mm × 10 mm × 55 mm, 未经展平, 试样位于板厚中间, 两边等厚, 在 Olsen-84 型冲击试验机上进行 -80 ~ 20 °C 的系列温度夏比冲击试验 (CVN)。采用试验标准为 ASTM E23^[3]。试验所采用的控温介质为酒精加液氮, 在規定溶液中保持足够长的时间保证试样表面与内部温度一致, 试样从液体介质中移至打击的时间小于 2 s。

2 试验结果及分析讨论

2.1 冲击试样的断口分析

表 1 HTP70 管线钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of HTP 70 line-pipe steel /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Cu	Nb
0.056	0.14	1.21	0.012	0.004	0.030	0.006	0.11	0.003	0.014	0.16	0.070

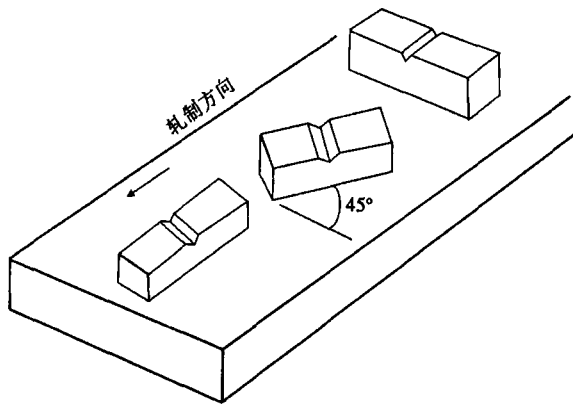


图1 HTP 管线钢材冲击试样取向

Fig.1 Sampling direction of Charpy impact specimen of HTP line-pipe steel strip

由于试验环境温度不同以及试样的取向不同,冲击试样破坏断口的宏观图像呈现明显的不同。由表2分析得,无论试样沿何种方向取样,冲击试样断口均出现分层现象。不同取向产生的分层裂纹倾向和出现分层裂纹的温度区间不同,纵向试样在20 ~ -80 ℃ 的温度区间均出现分层裂纹,横向试样出现的区间为0 ~ -40 ℃,45°方向试样出现分层裂纹的温度区间为20 ~ -40 ℃。冲击试样断口的分层裂纹都垂直于缺口,由此说明,HTP 管线钢板在轧制过程中产生了严重的各向异性现象。研究表明^[4,5],分层裂纹的起因是夹杂物、偏析、带状显微组织和织构等,在热轧卷板中这些缺陷均呈平行于

表2 HTP70 管线钢不同取向试样断口形貌

Table 2 Fracture Appearance of different orientation Samples of HTP70 line-pipe steel

温度 /℃	平行轧制方向	45°	垂直轧制方向
20			
-40			
-80			

钢板的轧制方向。在垂直于缺陷方向的应力作用下,这些缺陷的尖部产生非常高的集中应力,使得缺口根部附近产生分层裂纹。同时,由于分层裂纹的主裂纹扩展方向与轧制方向的角度不同,裂纹扩展阻力不同,平行于轧制方向试样出现分层裂纹的倾向最大,其次是45°方向,而横向取样时,分层裂纹的扩展与轧制方向垂直,裂纹表面因撕裂扩展所吸收的能量较大,扩展阻力大,故产生分层裂纹倾向最小。

不同取向试样的断口均表现出分层裂纹现象,分层裂纹与试样的缺口垂直,并产生在试样的中心;但由于试样的各向异性,使得裂纹尖端的塑性区发生变化。沿轧制方向取样的试样,缺口垂直于偏析带,冲击后分层裂纹区平行于偏析带,裂纹尖端出现在偏析带内部,并沿偏析带的方向扩展(图2)。垂直于轧制

方向取样,缺口平行于偏析带,冲击后的分层裂纹垂直于偏析带,裂纹垂直于偏析带组织扩展。根据线弹性力学,对于一般金属材料,当材料超过屈服强度时,将发生塑性变形,裂纹尖端将出现在塑性区。因此有必要讨论塑性区的组织形态和塑性区尺寸。

经研究发现,无论试样取向如何,裂纹尖端都是出现在试样中心的偏析带中,试样偏析带中存在大量的 MnS 类夹杂物,说明裂纹萌生在夹杂物表面,根据线弹性力学中的 Griffith-Orowan 能量理论,当裂纹失稳开始扩展时,其扩展所需要的能量主要消耗在表面能和塑性变形功,有^[6]:

$$G \geq R \quad R = 2(\gamma_s + \gamma_p)$$

式中:G- 裂纹扩展能力;R- 扩展单位面积缩小所耗的能量; γ_s - 塑性变形功; γ_p - 表面能。

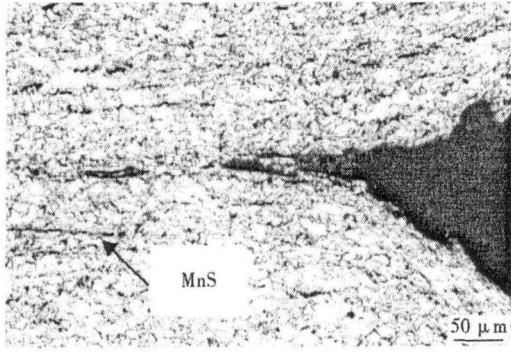


图 2 HTP70 管线钢试样组织形貌及分层裂纹特征

Fig. 2 Morphology of fracture of different orientation specimen and delaminating crack feature of HTP70 line-pipe steel

由于塑性变形区产生在偏析带,试样的取向不同,偏析带组织及夹杂物形态不同,使得 γ_s 发生变化。当裂纹平行于夹杂物及偏析带组织时(取样平行于轧制方向),裂纹尖端塑性区的位错密度低,位错线长程分布,说明位错受阻较小,塑性区的硬化程度较小,塑性变形所需要的能量 γ_s 较小;当裂纹呈一定角度直至垂直于偏析带组织时(取样 45° 、垂直于轧制方向),裂纹尖端塑性区位错滑移方向垂直于偏析带及 MnS 类夹杂物组织,大量位错钉扎在偏析带和夹杂物表面,使得偏析带和夹杂物界面出现了位错塞积,位错运动以绕过为主,伴随少量的切过,该条件下的位错组态反映了塑性区加工硬化程度较大,塑性变形所做的功 γ_s 较大。综上所述, $\gamma_{su} > \gamma_{sp}$ 有 $G_u > G_p$,说明了平行于轧制方向取样的试样在冲击试验中裂纹易于失稳扩展。

2.2 冲击载荷、试样取向和温度之间的关系

不同取向试样的冲击曲线如图 3 所示,无论试样的取向如何,随着温度的降低,3 个取向的冲击功均下降,冲击韧性下降,这符合 TMCP 工艺下 X70 钢冲击性能和温度的关系;其中 $-80 \sim -40^\circ\text{C}$ 时的升幅较大,表现出试样对低温的敏感性较大。对比不同取向试样得:平行于轧制方向和 45° 方向的冲击功曲线均出现了明显的上升上台阶能,而垂直于轧制方向则未出现;同时,前两者的冲击功也高于后者。平行于轧制方向的试样在同一温度下的冲击功明显高于其他取向。在试验温度较高如 20°C 时,根据断口的分析,分层裂纹对试样的冲击韧性影响较大,平行于轧制方向的试样易于在缺口根部产生分层裂纹,该分层裂纹阻止了缺口裂纹的扩展,裂纹扩展需要较高的能量 因此,冲击功(CVN)较大。随着试验温度的降低,材料的脆性增加,垂直于断口处的分层裂纹数量减少,试样的冲击韧性减小, -80°C 时, 45° 方向和垂直轧制方向的试样断口基本为放射

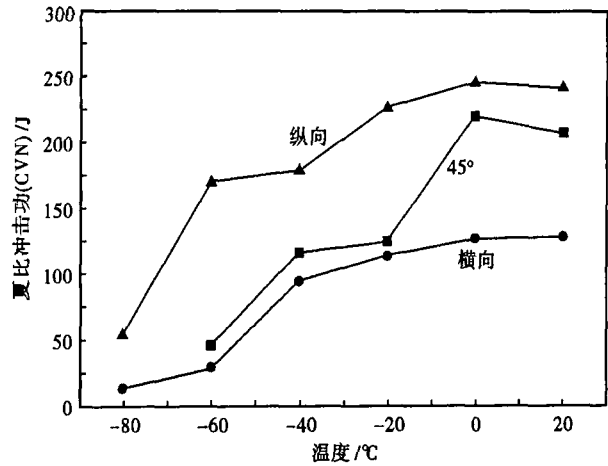


图 3 温度对不同取向 HTP70 管线钢试样冲击功的影响

Fig. 3 Effect of temperature on Charpy impact energy of different orientation specimen of HTP70 line-pipe steel

区,缺口附近裂纹较少,因此 CVN 较小。该现象与文献[7,8]报道的结果相符。

3 结论

(1) HTP 管线钢在轧制过程中,存在各向异性现象,平行于轧制方向、 45° 和垂直于轧制方向试样的力学性能相差较大。

(2) 分层裂纹的产生对 HTP 管线钢的冲击韧性是有益的,在 $-80 \sim 20^\circ\text{C}$ 平行于轧制方向试样的断口都出现了不同数量的分层裂纹,较其它取向试样表现出了较好的冲击吸收功。

(3) 分层裂纹萌生和扩展效应主要是由材料的条状缺陷和夹杂物所致,与温度有极大的相关性。当试样的取向不同时,裂纹尖端塑性区的位错组态不同,裂纹的扩展方向不同,分层裂纹效应随之改变。

参考文献

- 1 杨 政,郭万林. X70 管线钢冲击韧性实验研究. 金属学报,2003, 39(2):159
- 2 郭万林,董惠如,杨 政,等. 厚度与分层耦合效应对 X60 管线钢断裂韧性的影响. 金属学报,2001,37(4):386
- 3 ASTM E23, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2005
- 4 熊庆人,冯耀荣,霍春勇,等. X70 管线钢的断口分离现象分析研究. 机械工程材料,2005,29(12):21
- 5 冯耀荣,李鹤林,马宝钿,等. X52 输送管材料冲击转变特性与断口分离的研究. 钢铁,1998,33(6):41
- 6 石德珂,金志浩. 材料力学性能. 西安:西安交通大学出版社,1998
- 7 Ju Jang-Bog, Lee Jung-Suk, Jang Jae-il. Fracture Toughness Anisotropy in a API Steel Line-pipe. Materials Letters,2007,61:5178
- 8 袁鹏斌,张 毅,李健鹏. 控轧钢不同取向冲击试验对形成“断口分离”的影响. 焊管,1995,18(6):24

朱丽霞(1980-),女,助理工程师,石油管材的技术监督和研发。