

引文格式: 田野, 朱丽霞, 罗金恒, 等. X80 管道划伤复合凹陷区的应力应变特征研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 177-182.  
TIAN Ye, ZHU Lixia, LUO Jinheng, et al. Study on stress and strain characteristics of composite scratch dent zone of X80 pipeline [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (3): 177-182.

## X80 管道划伤复合凹陷区的应力应变特征研究

田野<sup>1</sup>, 朱丽霞<sup>2</sup>, 罗金恒<sup>2</sup>, 惠文颖<sup>1</sup>, 阙永彬<sup>1</sup>, 武刚<sup>2</sup>, 周会萍<sup>1</sup>

- (1. 国家管网集团西部管道有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830013;  
2. 中国石油集团石油管工程技术研究院 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 通过对预制划伤缺陷的 X80 管道进行实物凹陷压制试验, 结合有限元数值模拟, 对划伤复合凹陷区的应力应变特征进行了研究。结果表明, 应变在划伤复合凹陷区随凹陷深度的增加而增大, 当凹陷深度大于 5% 管径时, 应变值快速增长; 随凹陷深度的增大, 管道复合凹陷区承受峰值应力和应变的位置逐渐由管道外壁凹陷中心区域向管道内壁的凹陷中心附近及划伤缺陷边缘转移; 同一凹陷深度下, 划伤缺陷和凹陷的叠加使复合凹陷区所承受的应力应变峰值高于单纯凹陷; 内压进一步加剧了管道划伤复合凹陷区的应变集中, 但无论管道承压与否, 划伤复合凹陷区的应变增幅与凹陷深度增幅的比值近似为常数; 划伤深度的增大使管道凹陷变形的局部化更加明显, 因此凹陷区的应变峰值随划伤深度的增加而显著增大。

**关键词:** X80 管道; 划伤复合凹陷区; 应变; 残余应力

中图分类号: TG142 文献标识码: A 文章编号: 1007-2012 (2021) 03-0177-06

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2021.03.023

## Study on stress and strain characteristics of composite scratch dent zone of X80 pipeline

TIAN Ye<sup>1</sup>, ZHU Li-xia<sup>2</sup>, LUO Jin-heng<sup>2</sup>, HUI Wen-ying<sup>1</sup>, QUE Yong-bin<sup>1</sup>, WU Gang<sup>2</sup>, ZHOU Hui-ping<sup>1</sup>

- (1. West Pipeline Company of PipeChina, Urumchi 830013, China; 2. CNPC Key Laboratory for PetroChina Tubular Goods Engineering, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The stress and strain characteristics of composite scratch dent zone were studied by the real dent pressing test for the X80 pipeline with prefabricated scratch defect and the finite element numerical simulation. The results show that the strain increases with the increase of dent depth in composite scratch dent zone. When the dent depth is greater than 5% of the pipe diameter, the strain value increases rapidly. With the increase of dent depth, the position of peak stress and strain in composite scratch dent zone gradually shifted from the center area of dent on outer wall of pipeline to the center area of dent on inner wall and the edge of scratch defect of pipeline. With the same dent depth, the peak stress and strain of composite scratch dent zone are higher than that of the plain dent due to the composition of scratch defect and dent. The internal pressure further intensifies the strain concentration of composite scratch dent zone, but the ratio of strain increase amplitude to dent depth increase amplitude of composite scratch dent zone is approximately constant whether the pipeline is under pressure or not. The increase of scratch depth makes the localization of dent deformation is more obvious, so that the peak strain increases significantly with the increase of scratch depth.

**Key words:** X80 pipeline; composite scratch dent zone; strain; residual stress

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0801204)

通信作者: 朱丽霞, 女, 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气管道的性能及服役安全研究, E-mail: zhulx@cnpc.com.cn

第一作者: 田野, 男, 1987 年生, 学士, 工程师, 主要从事油气输送管道的完整性研究, E-mail: jqty@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020-10-12; 修订日期: 2021-01-08

## 引言

油气管道作为石油天然气的储运主体,其安全性一直备受关注。据统计,机械损伤作为引起油气管道失效的关键因素之一<sup>[1-2]</sup>,可以导致管道的保温层破损、管道弯曲变形、管壁机械划伤、管壁凹陷、管壁压瘪及管壁破裂<sup>[3]</sup>。DAWSON S J 等<sup>[2]</sup>对欧洲某长度为 7022 km 的管道的内检测数据进行了统计分析,发现管壁凹陷 9851 处,平均每公里 1.4 处;我国鄯乌输气管道内检测数据显示,在长 301 km 的管道内检测出凹陷 847 处,平均每公里 2.8 处。凹陷作为机械损伤的外部表现,会使管道的曲率发生变化,尤其当管道存在划伤和凹陷叠加的复合缺陷时,管道缺陷处同时表现出曲率变化和管壁减薄<sup>[5]</sup>,使得管道的承载能力急剧衰退,严重影响到管道的服役安全性。

近年来,对于划伤和凹陷的复合缺陷的研究主要以管道失效压力预测为主。英国燃气公司建立了预测含划伤凹陷管道失效压力的半经验断裂模型<sup>[6]</sup>,但该断裂模型并不能应用在高钢级管道上,且无法有效预测爆破强度的下限;英国 Battelle 试验室采用经验 Q 因子法评价含划伤复合凹陷的管道,综合考虑了管材的力学性能、划伤长度、管道规格和凹陷深度等影响因素<sup>[7]</sup>;ALLOUTI M 等<sup>[8]</sup>发现凹陷区是否含有划伤缺陷对管道的爆破强度并无显著影响,然而,他们的试验结果是基于一种合金钢得出的,其结论是否适用于长输管道普遍使用的管线钢还有待进一步验证;TIAN X 和 ZHANG H<sup>[9-10]</sup>采用拉伸试验和数值模拟对含划伤复合凹陷的 CT80 钢板进行了研究,建立了划伤复合凹陷材料的强度失效准则,并进一步研究了凹陷深度、划伤长度和划伤深度等参数对中高强度钢管道失效压力的影响,得到了含划伤凹陷管道失效内压的预测公式。但由于该研究缺乏相应的实物试验验证其合理性,因此需要进一步研究。

本文基于全尺寸管道实际试验,通过对含有预制划伤叠加凹陷的 X80 管道进行试验,并结合有限元模拟,研究了划伤复合凹陷区的应力应变分布特征,并对凹陷区的显微组织和硬度进行分析,旨在为含划伤凹陷管道的失效预测及安全评估奠定理论基础,为在役管道的运行管理提供指导。

## 1 试验

### 1.1 划伤复合凹陷预制及应变测量

选取 X80 管线钢为研究对象,管道外径  $OD$  为

$\Phi 1219$  mm、管道壁厚为 18.4 mm。沿管体轴向加工出划伤缺陷,其长度为 100 mm,宽度为 5 mm,深度为 2.76 mm (15% 壁厚)。完成划伤缺陷加工后,采用 1500 t 复合加载试验系统进行凹陷压制,压头前端为半球形,直径为  $\Phi 150$  mm,凹陷压制过程中确保压头的中心始终对正划伤缺陷的中心位置,压入凹陷深度为 83.14 mm (6.82%  $OD$ ),如图 1 所示。由于加工的划伤长度 (100 mm) 小于压头直径 ( $\Phi 150$  mm),凹陷压制过程中覆盖了凹陷尺寸 < 划伤长度、凹陷尺寸 = 划伤长度、凹陷尺寸 > 划伤长度 3 种情况。为进行对比,采用相同压头在管体预制无缺陷的单纯凹陷,单纯凹陷深度为 101.5 mm (8.33%  $OD$ )。试验中利用全场应变系统对凹陷区进行应变数据的实时监测及采集。

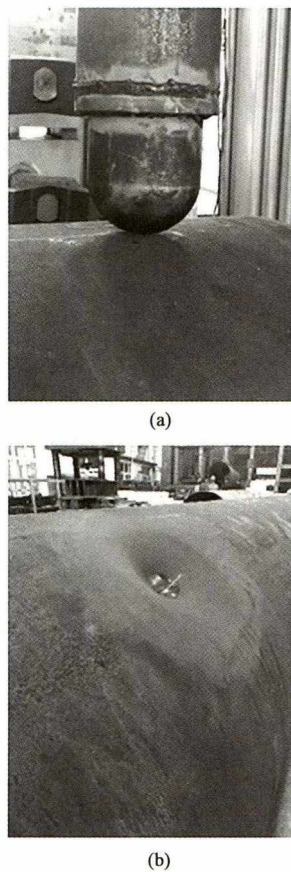


图 1 划伤复合凹陷预制试验

(a) 压头位置 (b) 划伤复合凹陷管道

Fig. 1 Prefabrication test of composite scratch dent

(a) Head position (b) Pipeline with composite scratch dent

### 1.2 残余应力测试

完成管体划伤复合凹陷及单纯凹陷预制后,对表面进行抛光处理,使测量区表面粗糙度  $Ra < 10 \mu\text{m}$ 。采用 MSF-3M 型 X 射线应力仪测量复合凹

陷区内、外壁轴向及径向残余应力。测量起始点为内、外壁的凹陷区中心点, 轴向及径向方向上相邻两个测量点之间的测量间距为 50 mm。

### 1.3 有限元分析

采用通用有限元程序 ABAQUS 进行有限元分析, 建模时确保钢管规格、缺陷尺寸及方向、压头形状及尺寸分别与实际试验中保持一致, 管材属性如表 1 所示。首先采用 Cero 3.0 软件建立 1/4 模型, 其中, 管道长度大于 6000 mm, 以避免受端部效应影响。然后利用 ABAQUS 在导入的 1/4 管道模型中建立具有划伤缺陷的管道模型, 如图 2 所示。

表 1 有限元模型管材参数

Tab. 1 Pipe parameters of finite element model

管材	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	拉伸强度/MPa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
X80	210	628	741	0.3	$7.8 \times 10^3$

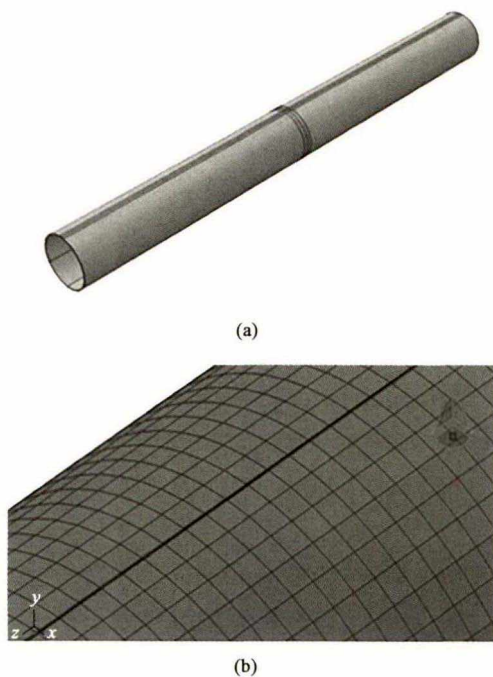


图 2 划伤缺陷管道模型示意图

(a) 完整模型 (b) 管道划伤缺陷

Fig. 2 Schematic diagram of pipeline model with scratch defect

(a) Full model (b) Scratch defect of pipeline

### 1.4 显微组织及硬度测量

在位于划伤复合凹陷中心处及距离凹陷中心 50、75、100 和 150 mm 处分别取样, 进行金相组织及硬度试验, 综合分析不同的凹陷深度对组织和硬度的影响。采用光学显微镜观察其金相组织; 采用维氏硬度计测定不同凹陷位置管外壁的硬度, 硬度

测试时, 载荷为 1.96 N、加载时间为 10 s, 在每个测量位置附近选取 5 个硬度值取平均后作为该处的硬度值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 划伤缺陷对凹陷区应变的影响

图 3 所示为实测的管道划伤复合凹陷区和单纯凹陷区的最大应变随凹陷深度的变化关系。由图可知, 随着凹陷深度的增加, 两种不同凹陷状态下的最大应变均呈现增加趋势。当凹陷深度大于 5% OD 时, 由划伤复合凹陷区的最大应变随凹陷深度的增大出现大幅度上升, 而含单纯凹陷的管道的最大应变则增加缓慢, 且趋于稳定状态。因此可以看出, 凹陷区的划伤缺陷在凹陷深度大于 5% OD 时使得管体的应力集中程度急剧加大。

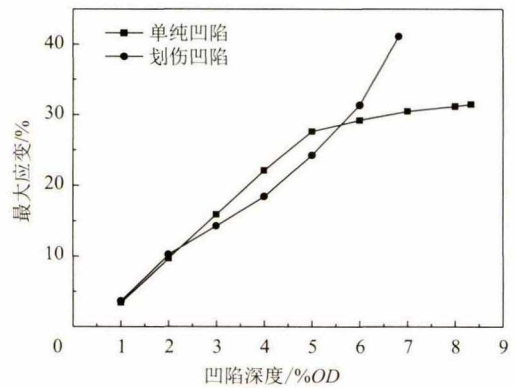


图 3 实测凹陷深度与最大应变的关系

Fig. 3 Relationship between dent depth and the maximum strain

### 2.2 划伤缺陷对凹陷区残余应力的影响

由于划伤缺陷位于管道管体外壁, 本研究重点测量钢管外壁凹陷区的残余应力变化情况。划伤复合凹陷和单纯凹陷的钢管在凹陷区外壁轴向及径向残余应力如图 4a 和图 4b 所示。可以看出, 钢管凹陷区的外壁在这两种不同的凹陷情况下, 凹陷中心区的残余应力均为压应力; 在远离凹陷中心时, 外壁处的压应力逐渐减小并向拉应力过渡; 对于距凹陷中心同一位置处, 含划伤凹陷钢管的残余应力明显高于含单纯凹陷管道, 可见, 轴向划伤缺陷与凹陷的叠加明显加剧了凹陷区的应力集中, 残余应力增幅最大约达单纯凹陷的 3.3 倍。沿钢管径向, 距离凹陷中心 0 ~ 50 mm 处时, 划伤复合凹陷出现压应力峰值, 约为 250 MPa。在本研究中, 直径为  $\Phi 100$  mm 的划伤缺陷位于管道外壁, 且小于凹陷区

域直径,从而可以看出,划伤复合凹陷钢管的凹陷区残余应力的峰值区正好与划伤缺陷与凹陷的叠加区域重合。另外,与含有单纯凹陷的情况相比较,由于凹陷损伤和划伤缺陷会发生叠加效应,使得划伤复合凹陷区承受的残余应力峰值远远高于单纯的凹陷区域承受的残余应力值峰值。

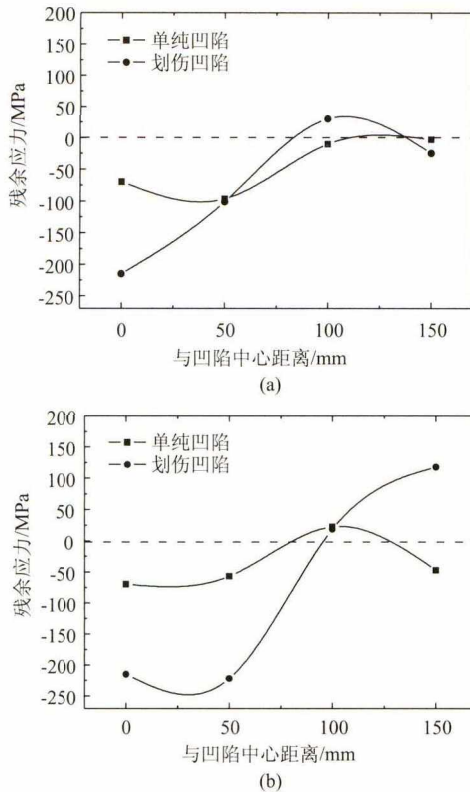


图4 单纯凹陷和划伤复合凹陷区的残余应力分布  
(a) 轴向 (b) 径向

Fig. 4 Distribution of residual stress in plain dent zone and composite scratch dent zone

(a) Axial direction (b) Radial direction

## 2.3 承压管道划伤复合凹陷区应变影响因素研究

### 2.3.1 内压

采用有限元数值模拟分析了内压为 6 MPa 情况下,含划伤复合凹陷管道(承压管道)凹陷区的等效塑性应变随凹陷深度的变化情况,并与实测得到的非承压管道的等效塑性应变进行对比,如图 5 所示,由图可知,在有无内压两种情况下,划伤复合凹陷钢管的等效塑性应变随凹陷深度呈线性增加趋势;通过线性拟合发现,承压管道的斜率( $k = 5.25$ )与非承压管道的斜率( $k = 5.28$ )相近,然而承压管道的等效塑性应变均大于非承压管道。这表明,承压管道在同一凹陷深度下的应变高于非承压管道,即内压极大加剧了复合管道凹陷区的应变集中。但无论管道承压与否,随着凹陷深度的

增加,凹陷区的应变增幅与凹陷深度增幅的比值近似为常数。

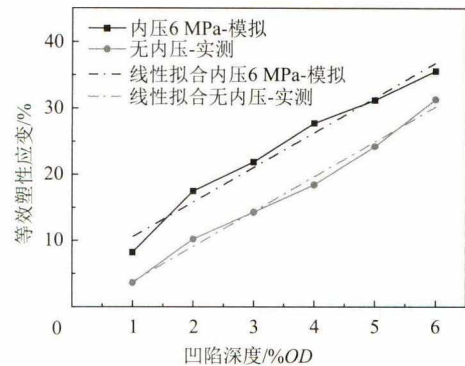


图5 复合凹陷管道等效塑性应变与凹陷深度关系

Fig. 5 Relationship between equivalent strain of pipe with scratch dent and dent depth

### 2.3.2 凹陷深度

图 6 所示为承压 6 MPa 管道划伤复合凹陷区的等效塑性应变在凹陷深度分别为 1% OD、3% OD 和 6% OD 时的分布,由图可以看出,凹陷深度为 1% OD 时,复合凹陷区的应变峰值位于管道外壁的凹陷中心位置,即压头与管道接触处;随着凹陷深度增大,变形量加大,复合凹陷区应变峰值位置逐渐由管道外壁凹陷中心区域转移到管道内壁凹陷中心附近的区域及划伤缺陷边缘位置,应变峰值位置与实测的应力峰值区域一致。对于含划伤复合凹陷的在役承压管道,应重点监测管道凹陷中心内壁区域及外壁划伤缺陷边缘的应变。

### 2.3.3 划伤深度

图 7 所示为内压为 6 MPa 情况下,不同凹陷深度管道凹陷区的等效塑性应变随划伤深度的变化情况。研究发现,划伤深度显著影响凹陷区的最大等效塑性应变,同一凹陷深度下,随着划伤深度的增加,复合凹陷区的应变峰值显著增大。在研究的内压及凹陷深度下,相较于无划伤管道,划伤深度为 15% 壁厚时,应变响应增幅较缓慢,而当划伤深度为 25% 壁厚时,应变响应剧增。这是由于在引入划伤缺陷后,划伤深度的增大使得管道的变形局部化更加显著,表现为凹陷区域应变响应明显。NAGHIPOUR M 等<sup>[11]</sup>和 GHAEDNIA H 等<sup>[12]</sup>研究了含划伤复合凹陷的 X80 及 X70 管道的失效行为,认为当划伤深度相对较低(<25% 壁厚)时,与完整管道相比,划伤对管道的承压能力的影响微不足道,当划伤深度增加到一定程度(>50% 壁厚)时,即使划伤缺陷的宽度和长度很小,也可能导致管道承

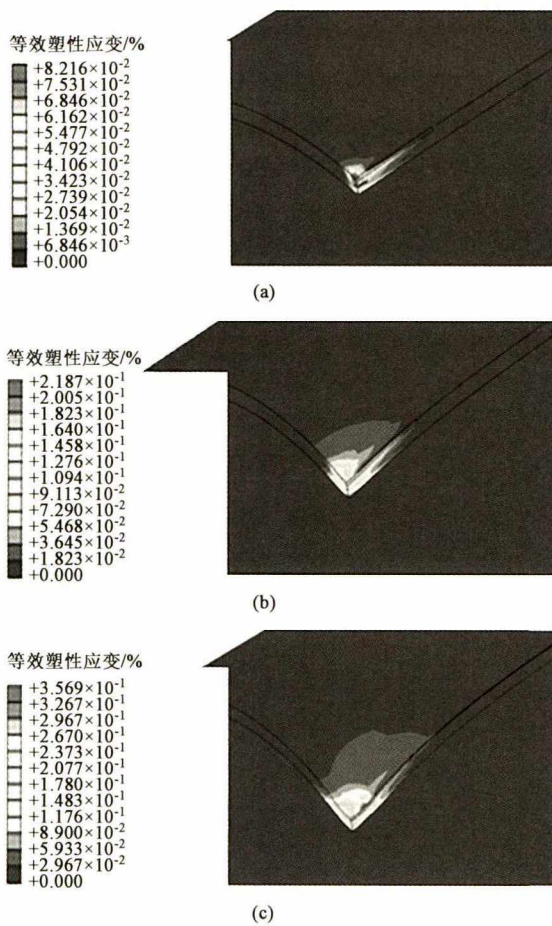


图6 承压管道划伤复合凹陷区应变分布 (a) 1% OD (b) 3% OD (c) 6% OD

Fig. 6 Strain distribution of pressure pipe with scratch dent

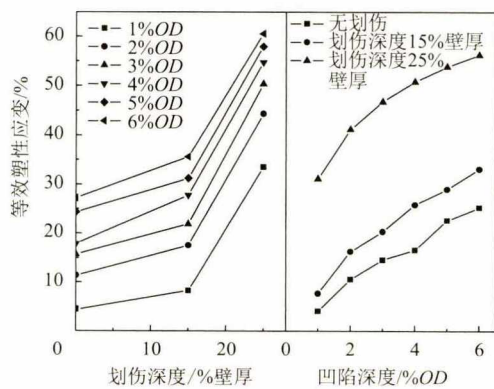


图7 管道等效塑性应变与划伤深度、凹陷深度的关系 Fig. 7 Relationship between equivalent plastic strain and scratch depth, dent depth

压能力显著降低, 当划伤深度为 70% 壁厚时, 可使管道的承压能力降低 55%。本文得出的结果从应变变化的角度解释了管道承压能力下降的原因。

### 2.4 划伤复合凹陷区显微组织及硬度试验结果

划伤复合凹陷区不同位置的显微硬度分布如图

8 所示, 钢管远离凹陷区及凹陷中心处的微观组织如图 9 所示。由图 8 可知, 在距凹陷中心 0 ~ 75 mm 范围, 钢管外表面的显微硬度明显升高, 而远离凹陷中心时, 硬度值趋于稳定。由图 9 可知, 管道组织为粒状贝氏体<sup>[13]</sup>, 从图中可以清晰地观察到远离

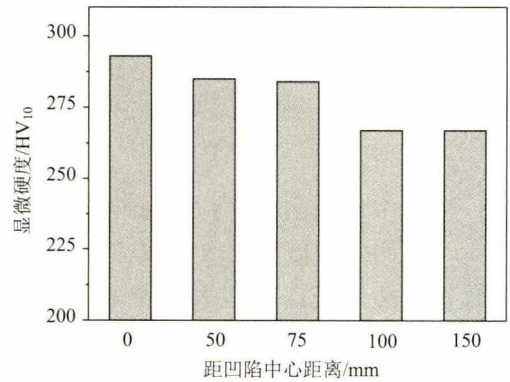
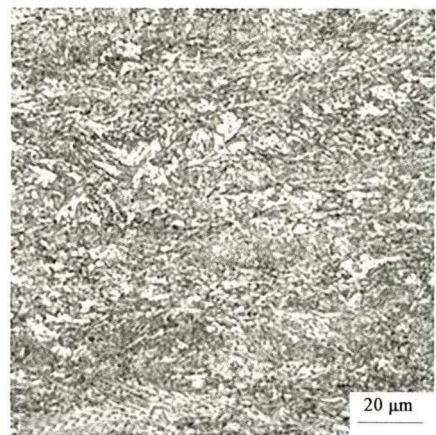
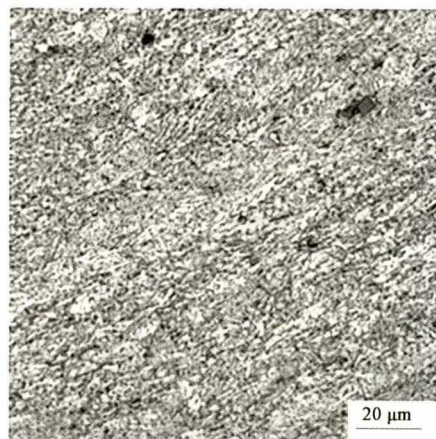


图8 划伤复合凹陷区显微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distribution in composite scratch dent zone



(a)



(b)

图9 划伤复合凹陷区显微组织 (a) 远离凹陷区 (b) 凹陷中心

Fig. 9 Microstructure in composite scratch dent zone (a) Zone far from dent (b) Center of dent

凹陷区的粒状贝氏体之间的晶界,但是由于凹陷中心承受了较大的变形,可观察到明显的变形流线,这是由于晶粒沿着变形最大的方向被拉长所造成的。可见,凹陷由浅到深的过程是微观组织形态变化的过程,凹陷区组织的变化提高了材料的抗变形能力,产生了应变硬化,从而使凹陷中心及边缘表现出较高的硬度。

### 3 结论

(1) 在划伤复合凹陷区应变随凹陷深度的增加而增大,当凹陷深度大于 $5\%OD$ 时,应变值增长速度较快;随凹陷深度增大,管道划伤复合凹陷区应变峰值位置逐渐由管道外壁凹陷中心区域转移到管道内壁凹陷中心区域及外壁划伤缺陷边缘。

(2) 内压加剧了划伤复合管道凹陷区的应变集中,但无论管道承压与否,凹陷区的应变增幅与凹陷深度增幅的比值近似为常数;划伤深度的增大使管道凹陷变形的局部化更加明显,划伤凹陷区的应变峰值随划伤深度的增加而显著增大。

(3) 划伤复合凹陷钢管凹陷区的“应力峰值区”位于划伤与凹陷叠加区域;在凹陷区内,管道外壁以压应力为主,远离凹陷中心时,管道外壁受到的压应力逐渐过渡为拉应力。在凹陷和划伤的复合损伤作用下,复合凹陷区所承受的残余应力峰值远远大于单纯凹陷区。

#### 参考文献:

- [1] 杨琼, 帅健, 左尚志. 管道凹陷研究现状 [J]. 油气储运, 2009, 28 (6): 10-15.  
YANG Qiong, SHUAI Jian, ZUO Shangzhi. Research actuality of pipelines with dents [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28 (6): 10-15.
- [2] DAWSON S J, RUSSELL A, PATTERSON A. Emerging techniques for enhanced assessment and analysis of dents [J]. Journal of Pipeline Engineering, 2008, 7 (3): 189-204.
- [3] 曹庆慧, 姚建辉, 惠丽丽, 等. 机械外力导致埋地油气管道损伤破坏分析 [J]. 中国特种设备安全, 2014, (S1): 100-104.  
CAO Qinghui, YAO Jianhui, HUI Lili, et al. Analysis of buried oil and gas pipeline damage caused by external mechanical forces [J]. China Special Equipment Safety, 2014, (S1): 100-104.
- [4] 孙明楠, 高健, 林冬. 含凹陷油气管道安全评估方法 [C] //2015年全国失效分析学术会议. 北京, 2016: 432-435.  
SUN Mingnan, GAO Jian, LIN Dong. Safety assessment method of dents on oil & gas pipeline [C] //2015 National Academic conference on Failure Analysis. Beijing, 2016: 432-435.
- [5] LEIS B N, BUBENIK T A, RANCINI R F, et al. Recent developments in avoiding, detecting, and assessing severity of mechanical damage [C] //Proceedings of 3rd International Pipeline Technology Conference. Belgium, 2000: 387-399.
- [6] LIMA M A, BARRA S R, FREIRE J L D F. Analysis of methods to assess pipelines with dent and gouge damage [J]. Soldagem & Inspeção, 2010, 15 (4): 298-306.
- [7] MAXEY W A. Analysis made of outside-force damage to pipelines [J]. Oil Gas J. (United States), 1987, 85: 20.
- [8] ALLOUTI M, SCHMITT C, PLUVINAGE G. Assessment of a gouge and dent defect in a pipeline by a combined criterion [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36 (1): 1-13.
- [9] TIAN X, ZHANG H. Failure criterion of buried pipelines with dent and scratch defects [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 80: 278-289.
- [10] TIAN X, ZHANG H. Failure pressure of medium and high strength pipelines with scratched dent defects [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 78: 29-40.
- [11] NAGHIPOUR M, EZZAT I M, ELYASI M. Analysis of high-strength pressurized pipes (API-5L-X80) with local gouge and dent defect [J]. Applied Ocean Research, 2018, 78: 33-49.
- [12] GHAEDNIA H, SREEKANTA D, WANG R, et al. Safe burst strength of a pipeline with dent-crack defect: Effect of crack depth and operating pressure [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 55: 288-299.
- [13] XIAO F R, LIAO B, SHAN Y Y, et al. Challenge of mechanical properties of an acicular ferrite pipeline steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 431 (1-2): 41-52.