doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2026.01.003

试验研究

高强管线钢划痕变质层微观结构与力学性能表征

杨　辉,王富祥,苏　鑫,张银辉
(国家管网集团科学技术研究总院分公司,天津 300457)

摘　要:针对现有管道划痕失效评估方法忽略表层材料性能变化、对高强钢管道划痕致裂风险认识不足等问题,提出一种基于双轴加载平台的划痕模拟与表征方法。设计并搭建专用划痕加工平台,制备不同工艺参数(刀头形状、垂直压力、划动速度)下的划痕试样,系统分析其剖面微观结构与力学性能。结果表明,划痕诱发近表层显著塑性变形,形成分层明显的变质层;靠近根部区域晶粒变形剧烈,组织更为致密。维氏硬度测试显示,根部硬度最高达到388HV,是母材(200HV)的近2倍,且随垂直压力和划动速度增加而升高。基于硬度分布确定变质层厚度均超过2 mm。此外,划痕根部存在残余压应力,其中纵向残余应力随深度增大而增大,横向残余应力则随深度增大而减小。研究为划痕区别于普通金属损失缺陷提供了直接证据,为高强管线钢划痕致裂分析与安全评估提供了重要依据。

关键词:高强管线钢;划痕;变质层;微观结构;力学性能;残余应力
中图分类号:TH142;TE973.6;TG113.25　　**文献标志码:**A

Characterization of microstructure and mechanical properties of the metamorphic layer in high-strength pipeline steel gouges

YANG Hui, WANG Fuxiang, SU Xin, ZHANG Yinhui
(PipeChina Institute of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: To address the issues that existing pipeline gouge failure assessment methods neglect the changes in surface material properties and have insufficient understanding of the cracking risk caused by gouges in high-strength steel pipes, a gouge simulation and characterization method based on a biaxial loading platform is proposed. A dedicated gouge processing platform was designed and built to prepare gouge specimens under different process parameters (tool shape, vertical pressure, scratching speed), and their cross-sectional microstructure and mechanical properties were systematically analyzed. The results show that gouges induce significant plastic deformation in the near-surface layer, forming a distinctly layered metamorphic layer; the grains in the region near the root are severely deformed, resulting in a denser microstructure. Vickers hardness tests reveal that the hardness at the root reaches up to 388HV, nearly twice that of the base material (200HV), and it increases with higher vertical pressure and scratching speed. Based on the hardness distribution, the thickness of the metamorphic layer was determined to exceed 2 mm. Additionally, residual compressive stress exists at the gouge root, with the longitudinal residual stress increasing with depth, while the transverse residual stress decreases with depth. This study provides direct evidence distinguishing gouges from ordinary metal loss defects and offers an important basis for crack initiation analysis and safety assessment of gouges in high-strength pipeline steel.

Key words: high-strength pipeline steel; gouge; metamorphic layer; microstructure; mechanical properties; residual stress

收稿日期:2025-07-14　**修回日期:**2025-12-26
基金项目:国家石油天然气管网集团有限公司科学研究与技术开发项目(AQWH202301)

0 引言

划痕是管道被异物刮擦而导致金属材料损失的一种表面损伤，也是最常见的管道缺陷之一[1-3]。在划痕形成过程中，划痕底部管材经历了严重的冷加工，使加工表面产生与基体材料性质不同的加工变质层[4-6]，该变质层延性降低，且可能含有微裂纹，因而易成为开裂敏感区[7-10]。2021年11月，某高钢级输气管道发生管体泄漏事故，其直接原因是管体外壁存在划痕损伤，该划痕作为脆性断裂的裂纹源，最终导致管道开裂泄漏。由此可见，相较于腐蚀等普通金属损失缺陷，划痕是更为危险的缺陷类型[11]。然而，除上述定性认识外，目前管道行业对变质层的组织、性能及尺寸等参数尚未形成明确的定量结论。现行划痕适用性评价方法仅简单地将深度增加0.5 mm，用以估算变质层对致裂的影响[12]。

目前，在油气管道输送领域，针对高强管线钢的划伤变质机制与变质层表征方面的研究尚未见公开文献报道。关于变质层的讨论与研究主要集中于机加工领域。岳彩旭等[13-14]分析了氮化硼刀具硬态切削高强度模具钢Cr12MoV过程中，切削速度、进给量、切削深度和刀具磨损等因素对已加工表面变质层生成的影响。ZHANG等[15-16]以热处理态高强回火马氏体8Cr4Mo4V钢为研究对象，探讨了磨削深度、砂轮线速度、冷却条件等不同磨削参数对表面变质层微观组织的影响，发现表面变质层具有明显的微观组织梯度分布，并提出了一种新的变质层分层策略。刘继刚等[17]利用MATLAB图像处理工具，对切削加工表面变质层进行图像识别，探讨了预分析图像质量对变质层厚度分析结果的影响。LIU等[18]研究了变质层的微观结构演变，发展了一种基于代表性体积单元的三维重构方法。罗庆洪等[19]通过透射电子显微镜确定了M50NiL钢渗碳后磨削表面变质层的厚度，同时表征了其磨削表面的完整性特征。

上述机加工研究所涉及的材料多为轴承钢、模具钢等特种合金钢，且加工过程多伴随高压、高速和高温等工况，与管道划痕变质层的形成过程存在明显差异，因此其结果并不具有直接的指导意义。为明确高强管线钢划痕变质层的组织结构及材料性能分布规律，并为其致裂分析提供依据，本文设计并完成划痕加工与测试，揭示划痕基底变质层的微观结构响应，阐明高强管线钢划痕变质层的形成机制，重点分析显微硬度、残余应力等力学参量的变化规律，以期为划痕致裂研究及失效评估提供参考。

1 划痕设计加工

1.1 试验材料

试验材料取自∅1 016 mm×14.2 mm的X70钢级钢管（见图1）。材料实测屈服强度为545 MPa，抗拉强度为630 MPa，断后伸长率为28%。材料化学成分如表1所示，符合GB/T 9711—2017《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》标准要求。



图1 X70钢管实物图

Fig.1 Physical image of X70 steel pipe

表1 X70管线钢化学成分

Tab.1 Chemical composition of X70 pipeline steel %

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	Fe
含量	0.068	0.18	1.68	0.009 3	0.000 4	0.25	0.011	<0.002	0.003 6	0.013	0.045	剩余

1.2 加工平台

为模拟真实划痕的形成过程，设计并搭建了一套双轴加载划痕加工平台，主要包括：T型台底座、设备工装、垂向作动缸（最大载荷10 tf）、水平作动缸（最大载荷25 tf）、油源泵站、MTS Flex 40控制器、弧板装载台，以及两种刀头（60°，R6 mm和120°，R16 mm），如图2所示。其中，两个方向的作动缸分别用于实现垂直挤压与水平划动，两种刀头则用于加工不同形貌的划痕。

1.3 划痕加工

采用正交试验方法，在不同工艺参数组合下制备划痕试样。主要考察刀头形状（2种，对应不

同形貌）、垂直挤压力（2种，对应不同划痕深度）和水平划动速度（2种）等因素，并获得含划痕的弧板试样[20]，如图3所示。

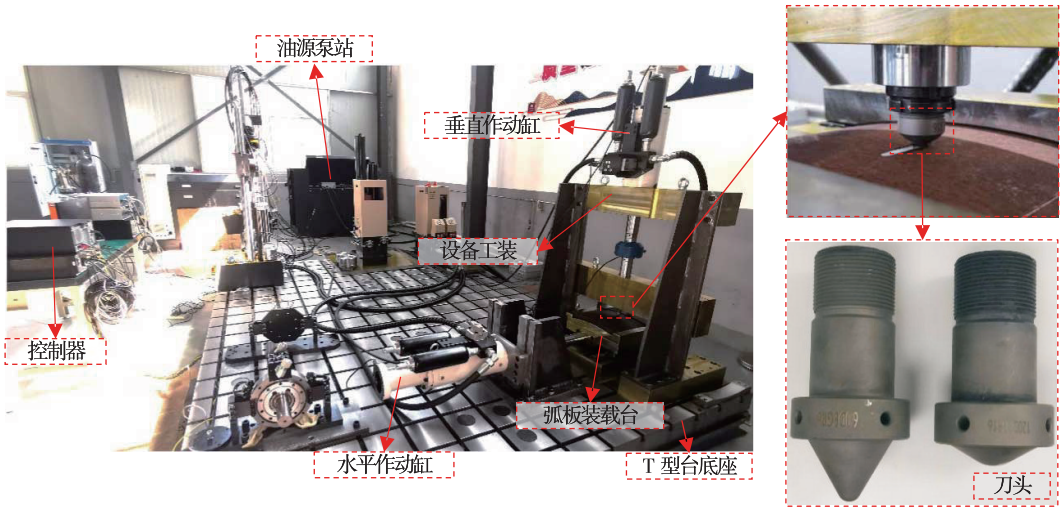


图2 划痕加工平台

Fig.2 Gouge processing platform



图3 含划痕弧板

Fig.3 Arcuate plate with gouge

采用白光干涉仪测量划痕的深度和宽度，每个划痕沿划动方向选取3个位置进行测量，取平均值作为最终结果，结果如表2和图4所示。可以看出，刀头越尖锐、垂直压力越大、划动速度越快，所形成的划痕深度越大，其中刀头形状的影响最为显著。

表2 划痕加工设计与尺寸测量

Tab.2 Gouge processing design and dimensional measurement

编号	钢级	刀头尺寸	垂直压力/kN	划动速度/(mm·s^{-1})	划痕平均深度/μm	划痕平均宽度/μm
1#	X70	120°，R16 mm	45	1	148	6 505
2#	X70	120°，R16 mm	90	1	268	9 853
3#	X70	120°，R16 mm	90	10	443	10 960
4#	X70	60°，R6 mm	90	1	1 627	8 739

2 微观结构

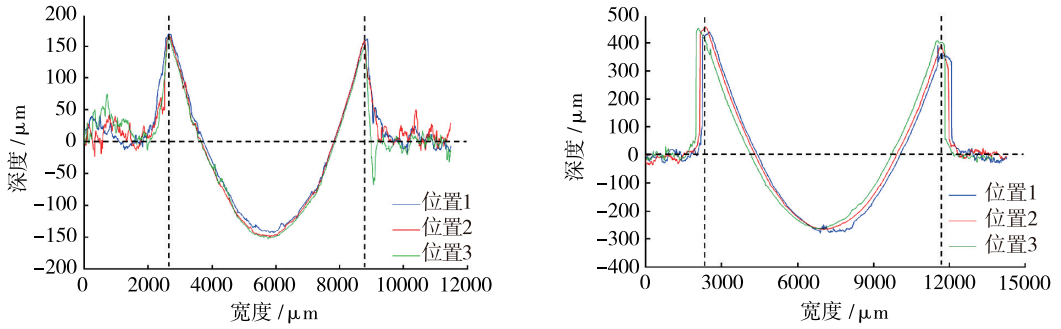
2.1 试样准备

沿划痕方向选取成形均匀段进行取样，取样位置如图5所示，样品尺寸为10 mm×10 mm×5 mm。取样后，依次使用1 000，2 000，3 000，5 000目的碳化硅砂纸进行机械抛光，随后采用粒度为W1.5的金刚石研磨膏和粒径为0.25 μm的OPS（氧化物抛光悬浮液）抛光液进行粗抛和精抛，直至样品表面达到镜面效果，以便开展后续微观结构观测与力学性能测试。

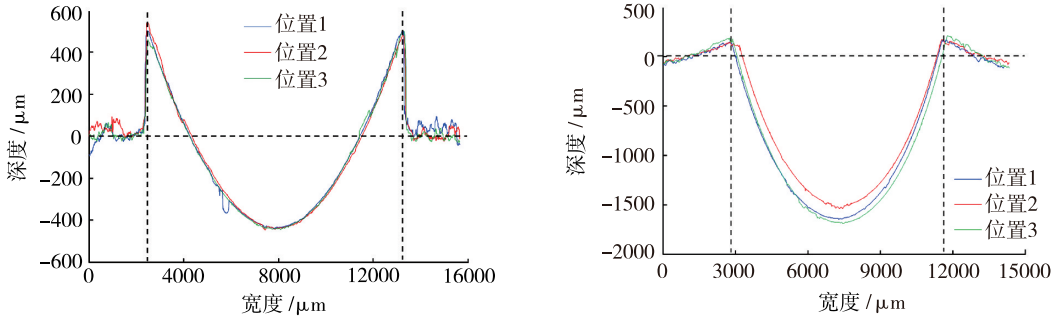
2.2 显微分析

通过显微镜及扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）获取划痕试样纵向-轴向剖面距根部不同深度处的微观组织形态。图6（a）为观测位置示意图，左侧方框为划痕表面；图6（b）为纵向-轴向剖面局部区域的50倍显微照片，可以看出，沿剖面不同深度，组织形态呈现明显分层现象：越靠近划痕根部，组织越致密，晶粒的拉伸变形程度越大。这是由于划痕加工过程中，刀头产生的径向挤压力和轴向剪切力共同作用所致。沿纵向在不同深度处选取区域进行500倍电镜观察，如图6（c）~（e）所示。在划痕根部近表面（约340 μm深度）位置，晶粒被拉长呈细长条状，其方向几乎与轴向平行；随着距划痕根部距离的增加，晶粒尺寸逐渐增大，方向逐渐发生偏

转，直至呈现无序状态。管线钢划痕变质层源于划痕基底近表层的塑性变形，即冷作硬化过程。



(a)1# (b)2#



(c)3# (d)4#

图4 划痕横向截面形貌测量结果

Fig.4 Measurement results of gouge transverse cross-sectional morphology

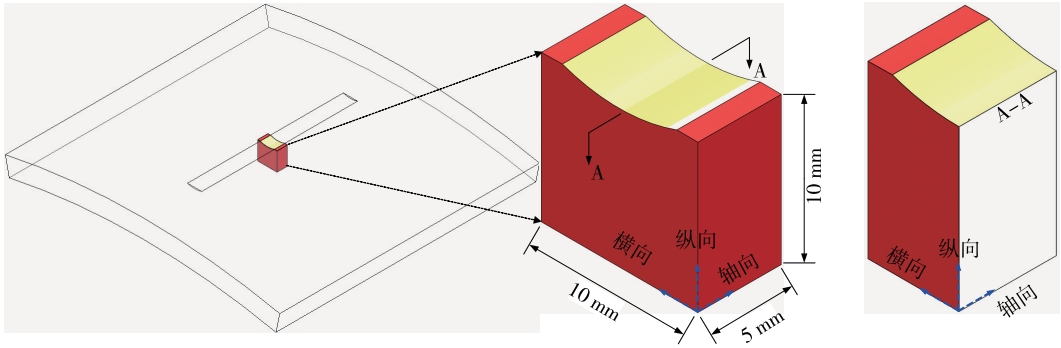
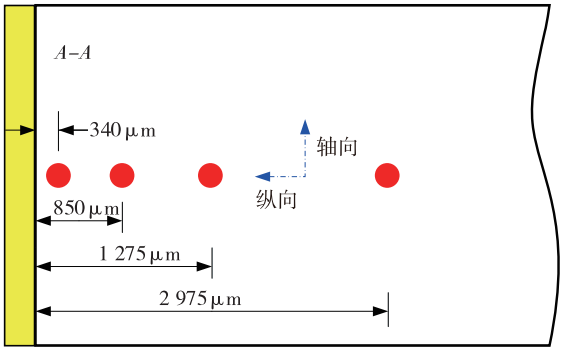
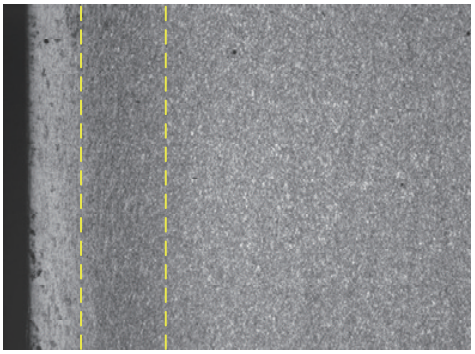


图5 含划痕弧板取样示意

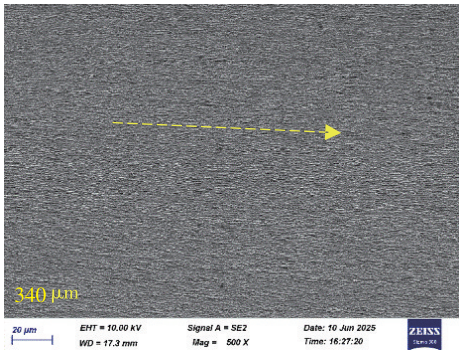
Fig.5 Schematic of sampling from arcuate plate with gouge



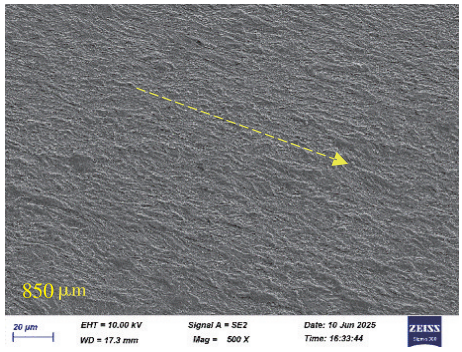
(a)观测位置示意



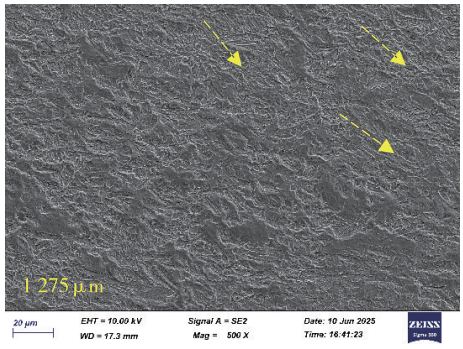
(b)纵向–轴向剖面局部区域50倍显微图像



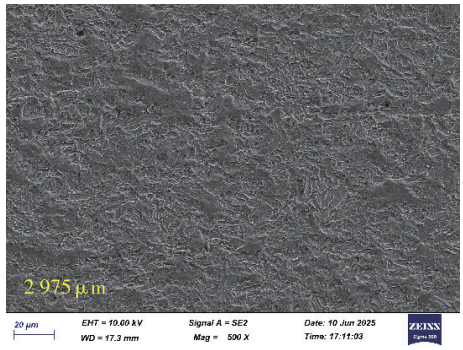
（c）340 μm位置显微图像



（d）850 μm位置显微图像



（e）1 275 μm位置显微图像



（f）2 975 μm位置显微图像

图6 划痕纵向-轴向剖面距根部不同距离微观组织

Fig.6 Microstructure at different distances from the root on the longitudinal-axial section of the gouge

2.3 电子背散射衍射分析

采用电子背散射衍射（electron back scatter diffraction，EBSD）技术进一步探究划痕变质层的微观组织特征，得到距划痕根部不同位置处的衍射带对比图（band contrast，BC）、反极图（inverse pole figure，IPF）及核平均取向差图（kernel average misorientation，KAM），分别用于表征晶粒形貌、晶体取向及塑性变形程度，结果如图7所示。BC图显示晶体整体较完整，但局部存在晶粒碎化现象，其中3#划痕分层特征尤为明显；IPF图表明，除2#划痕外，其余试样均表现出明显的晶粒择优取向；KAM图显示划痕根部区域存在显著塑性变形，2#和3#划痕的变形程度相对更大。

通过统计得到划痕根部近表面区域的平均晶粒尺寸可看出，划痕加工过程中刀头对管材表面产生挤压和剪切作用，垂直压力和划动速度越大，晶粒尺寸越小，塑性变形越显著。

3 显微硬度分析

为更清晰地界定划痕变质层的范围，采用全自动显微硬度计对划痕试样纵向-横向剖面进行维氏显微硬度测试。通过程序设置自适应网格生成测试阵列，如图8（a）所示。网格线交点为测点，网格大小为0.3 mm×0.3 mm，阵列距试样剖面边界的距离同样为0.3 mm。由于划痕表面为非规则平面，自适应测点距该边界的距离根据实测轮廓确定，如图8（b）所示。测试试验力为500 gf，保载时间为15 s。4种划痕条件下纵向剖面的硬度云图如图9所示。结果表明，X70管线钢基材硬度约为200HV，且近表层硬度同样呈现明显的分层分布特征：越靠近划痕根部，硬度越高。从加工条件来看，垂直压力越大，划痕基底层硬度越高；划动速度越大，划痕基底层硬度也越高。其中，3#划痕根部最高硬度达到388HV，约为母材硬度的2倍。在相同垂直压力条件下，不同刀头加工的划痕虽然深度差异较大，但其基底层硬度相近，约为330HV。

为分析划痕加工所导致的硬化层（即变质层）厚度，提取划痕试样中心线（Y=-4.7 mm）上的硬度分布，见图10。将硬度拟合趋于稳定时的位置距划痕基底的距离定义为变质层厚度，结果见图11。结合划痕加工参数可见，刀头垂直压力、划动速度及刀头形貌均在一定程度上影响变质层厚度：垂直压力越大、划动速度越快、刀头越尖锐，变质层越厚，其中刀头形貌对厚度的影响最为显著。

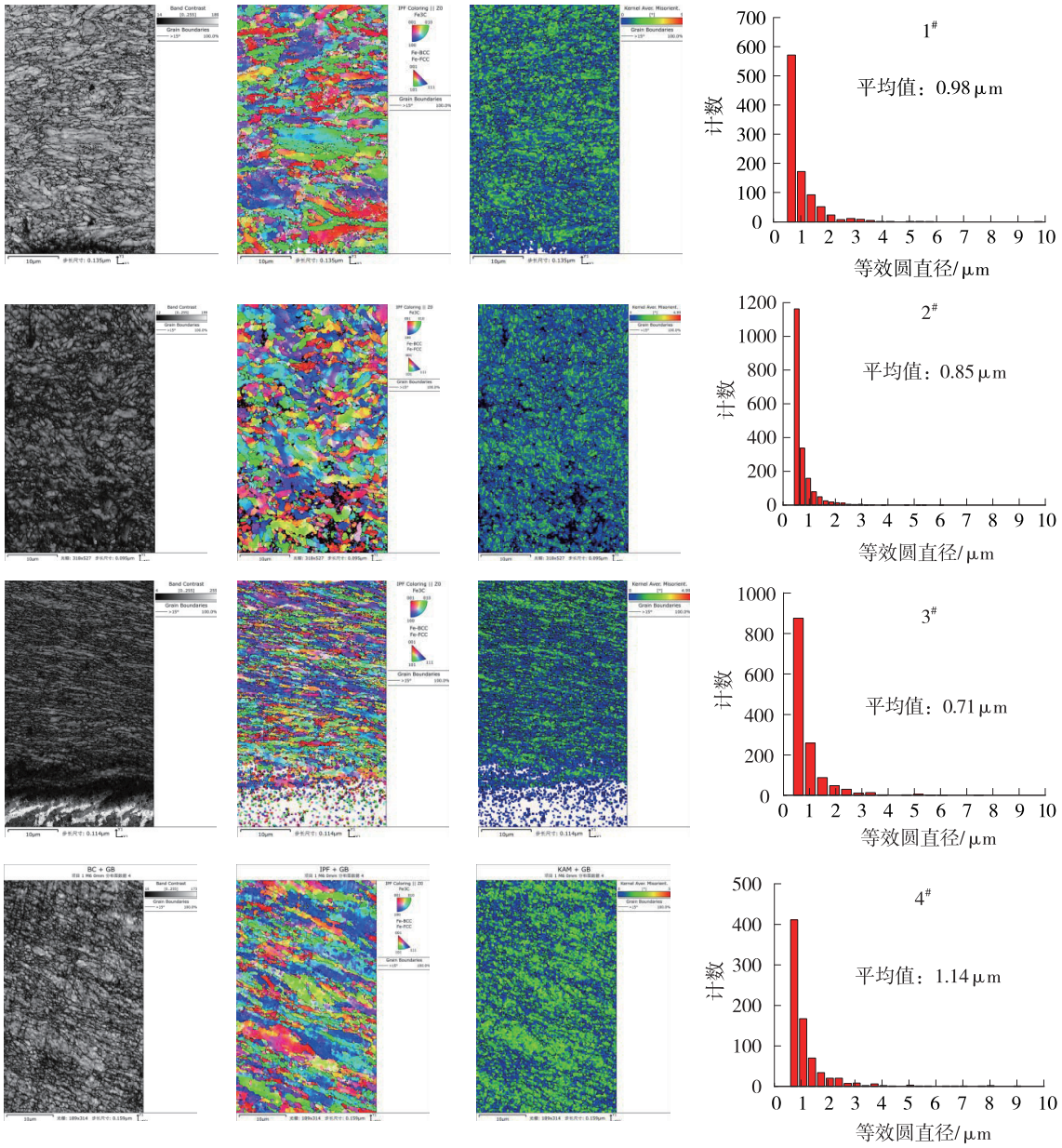
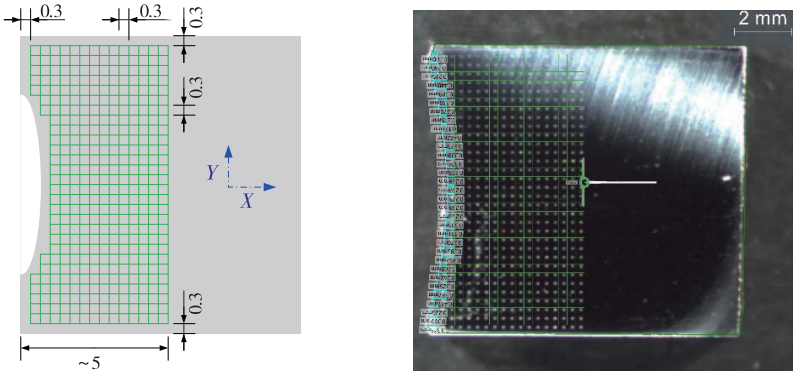


图7 划痕根部近表面位置EBSD结果

Fig.7 EBSD results of the near-surface position at the gouge root



(a)示意图 (b)实物示例

图8 显微硬度测点示意及实物示意

Fig.8 Schematic of microhardness measurement points and physical schematic

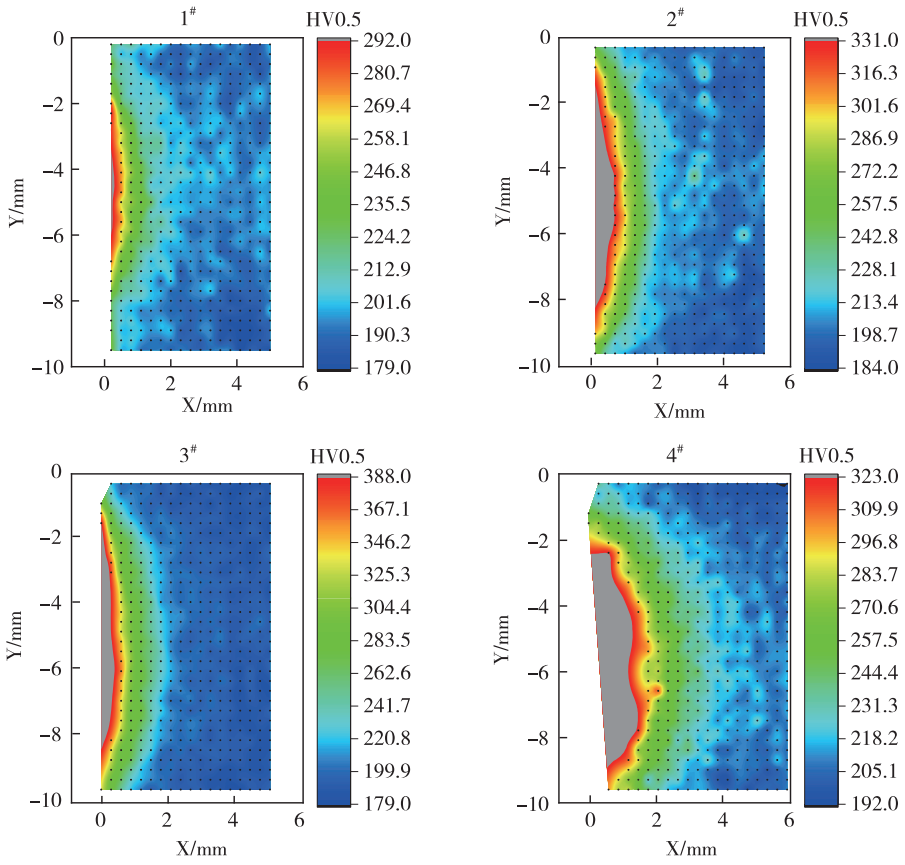


图9 维氏显微硬度云图

Fig.9 Vickers microhardness contour map

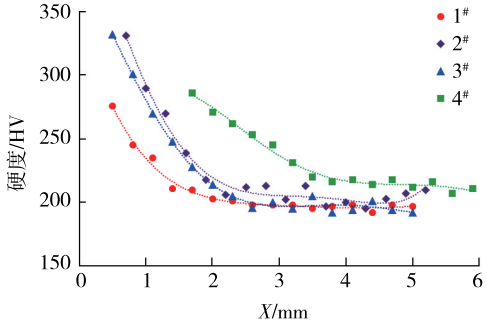


图10 划痕试样中心线硬度分布

Fig.10 Hardness distribution along the centerline of the gouge specimen

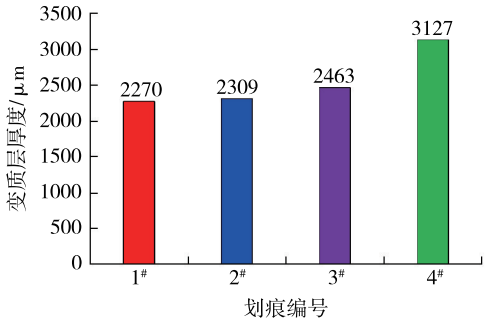


图11 划痕变质层厚度

Fig.11 Thickness of the gouge metamorphic layer

4 残余应力分析

采用X射线衍射法测量划痕纵向-横向剖面的残余应力[21]，X射线光斑尺寸为1 mm×1 mm。测点分布如图12所示，每个测点分别测量横向（管道周向）和纵向（管道径向）两个方向的残余应力，共测试2个试样，结果如表3所示。

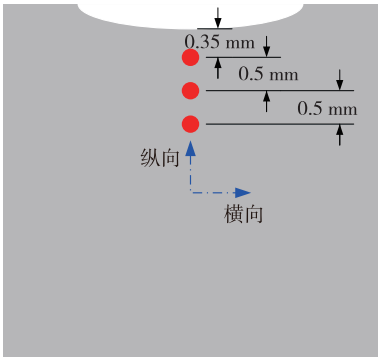


图12 残余应力测点分布示意

Fig.12 Schematic of residual stress measurement point distribution

由于刀头的挤压和剪切作用，划痕根部近表层产生塑性变形，从而引入残余应力，且均表现为

压应力。越靠近划痕根部，横向残余应力越小，纵向残余应力越大。显微分析表明，近表层晶粒在轴向剪切作用下产生拉伸变形，在纵向挤压作用下产生压缩变形，改变了管线钢轧制过程中形成的残余应力分布状态。除划痕导致的基底材料劣化（即“变质”）外，残余应力的引入也是划痕区别于普通金属损失缺陷的另一显著特征，这一特征在划痕失效分析与评估过程中往往容易被忽视。

表3 不同测点深度处的残余应力

Tab.3 Residual stress at different measurement point depths

试样编号	测点深度/mm	横向残余应力/MPa	纵向残余应力/MPa
1	0.35	−68.9	−167.3
	0.85	−112.3	−120.7
	1.35	−127.6	−22.5
2	0.35	−13.1	−249.5
	0.85	−97.9	−158.1
	1.35	−159.8	−122.0

5 结论

（1）设计并搭建了一套双轴加载划痕加工平台，模拟实际工况在X70管线钢上制备了不同形貌和尺寸的划痕。结果表明，划痕近表层材料因塑性变形形成了显著的变质层。该区域呈现出明显的分层结构：越靠近划痕根部，晶粒变形越剧烈、尺寸越小、组织越致密，硬度越高（显著高于母材的200HV），同时存在残余压应力（纵向应力增大，横向应力减小）。EBSD分析进一步印证了显微组织观察结果，并量化了塑性变形程度。垂直压力、划动速度等加剧塑性变形的因素，均会导致晶粒细化。

（2）以硬度趋于稳定的位置界定变质层边界。研究发现：垂直压力越大、划动速度越快、刀头越尖锐，所形成的划痕变质层越厚（试验中变质层厚度均超过2 mm）。值得注意的是，在相同垂直压力条件下，不同刀头加工的划痕虽然深度差异较大，但其基底层硬度相近（约330HV）；而垂直压力和划动速度的增加则可显著提升基底层硬度（最高可达388HV）。

（3）划痕变质层是划痕区别于腐蚀等常规金属损失类缺陷的核心特征。管道缺陷评估手册[12]建议在评价时将划痕深度增加0.5 mm以考虑其潜在影响。然而，实测变质层厚度远超该值（超过2 mm），表明当前划痕评价方法可能严重低估其致裂风险。鉴于冷作硬化导致材料硬度升高、屈服点上升、塑性下降，加之划痕根部残余应力与结构性应力集中的叠加作用，易诱发裂纹萌生与扩展。因此，亟需系统研究划痕变质层的致裂行为，建立针对性的失效判据，以完善管道划痕缺陷的适用性评价方法。

参考文献：

[1] MELIANI M H, AZARI Z, PLUVINAGE G, et al. Gouge assessment for pipes and associated transferability problem [J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(5): 1117-1126.

[2] 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: 1-13.

[3] TIAN X, ZHANG H. Failure criterion of buried pipelines with dent and scratch defects [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 80: 278-289.

[4] CAO T F, MAO Z Z, DU S Y, et al. Formation and deformation mechanisms of gradient structures: The role of strain hardening[J]. Materials & Design, 2025, 256: 114245.

[5] 张福全，何翠，周惦武. 高锰钢形变过程中加工硬化机理的研究[J]. 湖南大学学报（自然科学版），2016，43(12)：11-16.
ZHANG F Q, HE C, ZHOU D W. Study on work hardening mechanism of hadfield steel during deformation process [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(12): 11-16.

[6] 张方园，段春争，王敏杰. 已加工表面变质层的发展研究[J]. 机械设计与制造，2014(10)：265-268.
ZHANG F Y, DUAN C Z, WANG M J. Research status of the machined surface metamorphic layer [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014 (10): 265-268.

[7] OKODI A, LI Y, CHENG J J R, et al. Effect of location of crack in dent on burst pressure of pipeline with combined dent and crack defects [J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2021, 1 (2): 252-263.

[8] 徐广涛，李灿，路留成，等. 18CrNiMo7-6合金钢表面变质层准静态本构参数确定[J]. 机械工程学报，2025，61(6)：184-193.
XU G T, LI C, LU L C, et al. Determination of dynamic constitutive parameters for 18CrNiMo7-6 alloy steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(6): 184-193.

[9] 张超华，王晓霞，常茂椿，等.焊缝金属的屈服强度和材料的加工硬化对Q345钢焊接残余应力与变形计算精度的影响[J].机械工程学报，2021，57(10)：160-168.
ZHANG C H，WANG X X，CHANG M C，et al.Effects of yield strength of weld metal and material strain hardening on prediction accuracy of welding residual stress and deformation in a Q345 steel joint [J]. Journal of Mechanical Engineering，2021，57(10)：160-168.

[10] 左勇，尤景泽，孙永辉，等.高钢级管线环焊缝应变敏感性评价方法研究[J].压力容器，2025，42(5)：30-37.
ZUO Y，YOU J Z，SUN Y H，et al.Research on strain sensitivity evaluation method for high-grade pipeline girth welds [J]. Pressure Vessel Technology，2025，42(5)：30-37.

[11] 张雪伟，陈金忠，康小伟，等.油气管道划痕非饱和漏磁检测与识别[J].石油机械，2022，50(3)：132-138.
ZHANG X W，CHEN J Z，KANG X W，et al. Unsaturated magnetic flux leakage detection and identification of scratches in oil and gas pipelines[J]. China Petroleum Machinery，2022，50(3)：132-138.

[12] COSHAM A，HOPKINS P. The pipeline defect assessment manual [C]//2002 4th International Pipeline Conference，2002：1565-1581.

[13] 岳彩旭，仲昭楠，马晶，等.高强度钢Cr12MoV硬态切削已加工表面变质层形成机理[J].哈尔滨理工大学学报，2015，20(6)：32-36.
YUE C X，ZHONG Z N，MA J，et al. Research on formation of metamorphic layer in hard cutting process of Cr12MoV[J].Journal of Harbin University of science and Technology，2015，20(6)：32-36.

[14] 岳彩旭，杨永衡，刘飞，等.精密硬态切削过程中已加工表面变质层生成研究[J].纳米技术与精密工程，2014，12(3)：222-226.
YUE C X，YANG Y H，LIU F，et al.Deteriorative layer formation on machined surface in precision hard cutting process [J]. Nanotechnology and Precision Engineering，2014，12(3)：222-226.

[15] ZHANG B，LIU H，ZHANG M，et al. New layering strategy and the gradient microstructure distribution of surface metamorphic layer for 8Cr4Mo4V steel by grinding [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering，2024，24(1)：24-42.

[16] ZHANG B，LIU H，ZHANG M，et al. Metamorphic layer properties with gradient microstructure distribution of 8Cr4Mo4V steel by grinding [J]. Journal of Materials Research and Technology，2023，27：3679-3690.

[17] 刘继刚，吕绍瑜，刘战强.切削加工表面变质层厚度的图像识别技术[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2015，48(6)：547-554.
LIU J G，LÜ S Y，LIU Z Q.Evaluation of thickness of machined surface deformation layer with image processing technology[J].Journal of Tianjin University (Science and Technology)，2015，48(6)：547-554.

[18] LIU S Y，WANG X B，CHEN H T，et al.Investigation on micro-mechanics properties of machined metamorphic layer based on crystal plasticity finite element method[J].Materials Characterization，2024，218(Part 1)：114548.

[19] 罗庆洪，贺自强，汤春峰，等.M50NiL钢磨削表面完整性特征及变质层厚度表征方法[J].北京科技大学学报，2013：35(2)：201-206.
LUO Q H，HE Z Q，TANG C F，et al.Grinding surface integrity character and modificative layer depth test of M50NiL steel[J].Journal of University of Science and Technology Beijing，2013，35(2)：201-206.

[20] 刘明，伍家楠.圆锥压头递增载荷对材料的划痕行为[J].材料研究学报，2022，36(3)：191-205.
LIU M，WU J N.Scratch behavior of materials under progressive load by conical indenter [J]. Chinese Journal of Materials Research，2022，36(3)：191-205.

[21] 张倩琪，许鑫鑫，张建伟，等.表面变质层非等双轴残余应力的X射线/剥层测试与有限元矩阵修正[J].机械工程材料，2024，48(8)：95-100.
ZHANG Q Q，XU X X，ZHANG J W，et al. X-ray/stripping test and finite element matrix modification of non-equal biaxial residual stress in surface metamorphic layer [J]. Materials for Mechanical Engineering，2024，48(8)：95-100.

作者简介：杨辉(1987)，男，高级工程师，主要从事管道检测、评价、维修与失效分析等方向科研工作，通信地址：300457天津市经济技术开发区洞庭一街4号国家管网集团科学技术研究总院分公司，E-mail：yanghui06@pipechina.com.cn。

本文引用格式：
杨辉，王富祥，苏鑫，等.高强管线钢划痕变质层微观结构与力学性能表征[J].压力容器，2026，43(1)：17-25.
YANG Hui，WANG Fuxiang，SU Xin，et al.Characterization of microstructure and mechanical properties of the metamorphic layer in high-strength pipeline steel gouges[J].Pressure Vessel Technology，2026，43(1)：17-25.