

文章编号: 1001-4888(2017)02-0209-07

含砂流对弯管段冲蚀的机理分析^{*}

白莉¹, 文潇², 李晓东¹, 吴德君¹, 赵婷婷¹, 宋存德¹

(1. 中国石油大学(华东), 山东青岛 266580; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 管道的弯管段、闸阀等处常常面临含砂流动的冲蚀磨损而导致管壁减薄或泄漏。为研究弯管段冲蚀磨损的主要机制, 进行了加入 5% 石英砂的固液两相管流循环试验。试验按砂粒粒径分组, 主要观测布置在弯管段的一组碳钢贴片在 2~3 小时后的壁面冲蚀特征。用失重法计算各贴片的冲蚀速率, 基于扫描电镜(SEM)研究了贴片表面的损伤形貌。冲蚀后的贴片表面既有犁沟、挤压凹坑及划痕, 亦有圆形蚀坑。能谱分析(EDS)显示有一定量的铁氧化物, 且不同位置处的贴片失重率有正有负, 由此可见导致贴片表面破坏的机制既包括切削、挤压和二次冲击等含沙流流动的机械作用, 也伴随着腐蚀作用。这两种机制在弯管各区有不同的体现, 且受砂粒粒径的影响。用数值模拟的两相流冲蚀弯管段流场压力和颗粒分布特征做了验证。结果表明弯管段的壁面损伤机制在外拱壁面以颗粒冲击和切削为主, 在内拱壁面则以氧化腐蚀为主。

关键词: 弯管段; 冲蚀; 固液两相流; 损伤机制; 粒度

中图分类号: TD421

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-115

0 引言

冲蚀磨损是含固相输流管道常常遇到的难题之一, 其中弯头管件、节流阀件等又是输流管道最常见的破坏位置。冲蚀研究的传统理论包括 20 世纪 70 年代提出的塑性材料的微切削理论、脆性材料冲蚀破坏理论、弹塑性压痕破裂理论、二次冲击理论以及绝热剪切与变形局部化磨损理论等^[1-3]。在海洋油气生产与集输过程中, 海底管道输送多相流常面临采出液含砂易磨损弯管、闸阀及管壁减薄导致的流动保障问题。室内冲蚀试验研究^[4-5,7]从提高材料抗蚀能力的角度考虑冲蚀、腐蚀所致的金属材料及涂层损伤特征。李根生等(1997)^[6]总结了高速水射流的空化空蚀诸多影响因素, 汪家道等(2007)^[9]、Y. J. Li 等(2009)^[10]做了系列空蚀试验研究认为, 液体中原本存在的微颗粒含量、粒径等因素与引发的贴片空蚀效应之间有一定联系。偶国富等(2009)^[11]对弯管两相流固耦合所致的冲蚀作用做了模拟, 与试验得到的冲蚀失效危险区域一致。梁亮等(2012)^[12]等进行了冲蚀—空蚀的交互作用模拟分析与试验对比。L. Zeng 等(2014)^[13]通过阵列电极方法对纯侵蚀、纯腐蚀以及它们之间的促进作用进行了量化分析, 提出磨损使材料表层形成新鲜表面更容易被腐蚀; 腐蚀导致材料的表层组织结构遭受破坏, 致使材料的机械强度降低而加剧磨损。R. E. Vieira 等(2014)^[14]通过双重无网格传感器测量水平管多相流弯管段的壁面失重, 考虑了气液多相流型、液体粘度对侵蚀的影响。

多相管流冲蚀磨损的影响因素错综复杂, 既包括弯管段的多相流场特征, 也包括固相粒子随多相流流动对壁面的冲刷和腐蚀等的综合作用。本文模型试验采用布置碳钢贴片的方式, 通过循环试验研究含砂多相流动对弯管冲蚀的基本规律, 考虑砂粒粒径对于弯管段冲蚀规律的影响。在失重法和扫描电

^{*} 收稿日期: 2016-06-23; 修回日期: 2016-09-02

基金项目: 973“海洋深水油气安全高效钻完井基础研究”课题六“深水钻完井工程设计理论与风险管控”(2015CB251206)

通讯作者: 白莉(1975—), 女, 副教授。主要研究方向: 多相流流动、海洋油气流动保障。Email: baili@upc.edu.cn

镜观测弯管段金属贴片表面材料损伤机制的基础上,结合多相流场模拟与分析,明确了不同粒径固相粒子对弯管段的主要冲蚀机理。

1 循环管路模型试验

模型试验中液体流动挟带砂粒做循环运动,布置在弯管段的贴片将受弯管流动与含砂流动的共同作用,通过观测试验贴片的材料破坏特征来分析不同粒径砂对弯管冲蚀作用规律。试验材料为自来水+普通石英砂 5%(按粒径分组)组成的固液两相流体。在容器内放入 20L 固液两相液体,开泵,使之在循环管路内运行 2~3 小时后,取出弯管段的碳钢贴片,进行净化、干燥处理后用电子天平称重,分析试验前后贴片的失重率,然后用扫描电镜观察贴片的表面形貌特征。根据试验投放石英砂的粒径大小将试验分为三组,另外还有一组为对照试验组(表 1):自来水单相流体冲蚀循环试验。根据文献[8],自来水中含有大量粒度 $<10\mu\text{m}$ 的微颗粒,当流场有高低压变化时易导致空蚀效应。目数即筛分粒度,表示颗粒可以通过筛网的筛孔尺寸,以宽 25.4mm 筛网内的筛孔数表示。

表 1 试验组与参数表

Tab. 1 Treatment group and parameter table

石英砂粒径 (目)	粒度 (μm)	试验时间 (h)	流量 ($10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$)	液体流速 (m/s)	含沙量 (%)
20~40 目	400~850	3	1.23	2.5	5
40~60 目	250~400	2	1.23	2.5	5
60~80 目	180~250	2	1.23	2.5	5
自来水	<10	2	1.23	2.5	未加砂

2 试验结果分析

2.1 冲蚀后试验贴片减重规律分析

对冲蚀前后的贴片进行失重分析和扫描电镜分析。图 1 为依据试验数据估算的砂粒对不同位置贴片的最大冲蚀速率与粒径的关系。冲蚀速率定义为单位面积单位时间内冲蚀掉的材料质量。由图 1 可见最大冲蚀速率呈现出随粒径减小先减小然后有所增加的趋势。

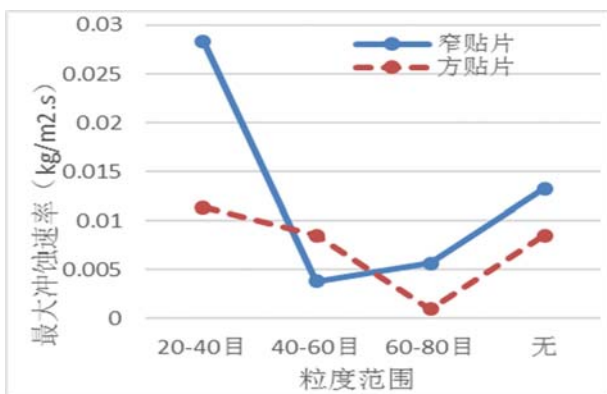


图 1 最大冲蚀速率与砂粒粒度的关系

Fig. 1 Erosion rate relation with sand particle

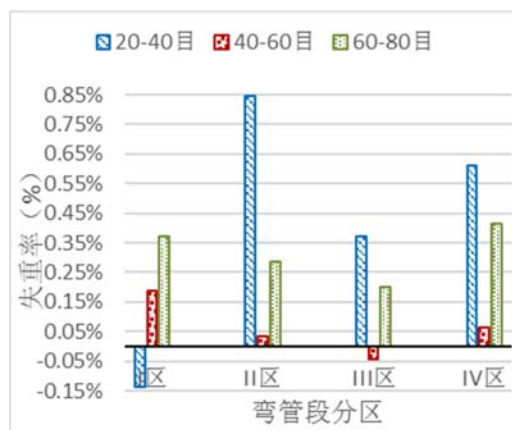


图 2 含砂试验组贴片在弯管段的失重率

Fig. 2 The weightlessness rate of sand experimental patch in the elbow

图 2 对比了弯管段内外拱壁、两颊壁面共四个位置碳钢贴片的失重率。失重率定义为冲蚀前后碳钢挂片的质量减少百分数。失重率为正,表明碳钢贴片的质量较冲蚀试验前减少;失重率为负,表明贴片质量较试验前增大。考虑到贴片在冲蚀试验后经过干燥处理,因此贴片表面可能有腐蚀所致的金属

氧化物生成,后面的电镜和能谱分析将验证这一推断。由于在弯管段处流体受到离心力的作用,将挟带石英砂对外拱处的贴片进行强烈的直接冲击,造成外拱处贴片的失重率大大高于其余三个壁面。内拱处由于不受砂粒的直接冲蚀,失重率最小。两侧的壁面由于对称的关系,失重率大致相同,位于内拱和外拱壁面之间。可见不同位置的贴片在试验后质量有增有减,且幅度不同。

2.2 冲蚀后试验贴片的形貌特征分析

本试验使用的是 20# 碳钢金属贴片,在含砂流体冲击下发生的主要为塑性变形。图 3~6 为含砂流冲蚀前后窄形和方形贴片 SEM 照片的对比。在贴片表面上发现了以冲蚀破坏为主,同时也包括空蚀和腐蚀机制的形貌特征。图 3 可见未经冲蚀的贴片表面的纹理和一道原始划痕,应为加工或运输过程所致。如图 4 所示,当砂粒对贴片表面的剪切应力大于碳钢材料的屈服应力时,亦有切削作用。由于砂粒对贴片冲击角度的变化,当砂粒对贴片作用时间较长且冲击应力较小时,材料表面上产生划痕;当作用时间较短且冲击应力较大时,材料表面上产生压痕,条状划痕和三角状压痕是砂粒冲蚀的主要破坏形式,虽然尺寸较小,但数量最多。犁沟型损伤会造成较大的贴片质量损失,在砂粒粒径较大时,犁削是冲蚀的主要方式之一。

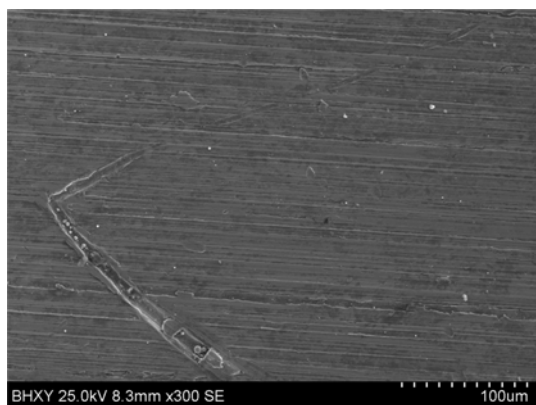


图 3 未冲蚀的 0 号方片($\times 300$ 倍)

Fig. 3 No erosion 0 square pieces ($\times 300$ times)

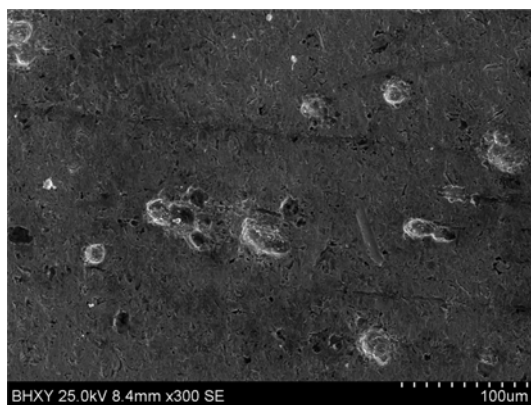


图 4 20~40 目冲蚀后 10 号方片($\times 300$ 倍)

Fig. 4 After 20-40 mesh erosion
10 square pieces ($\times 300$ times)

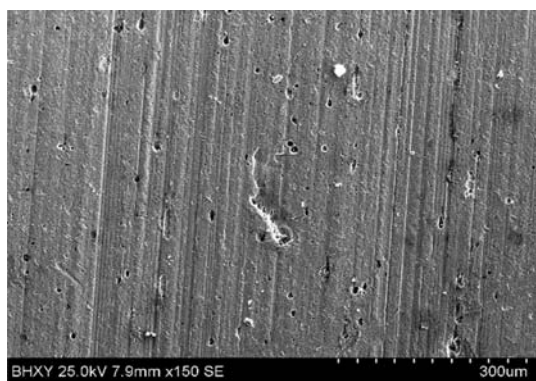


图 5 20~40 目冲蚀后 5 号窄片($\times 150$ 倍)

Fig. 5 After 20-40 mesh erosion 5 narrow
gauge ($\times 150$ times)

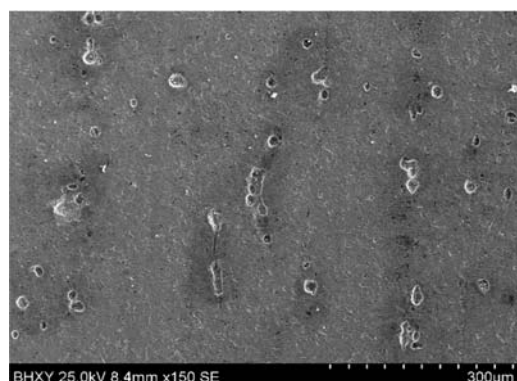


图 6 20~40 目冲蚀后 10 号窄片($\times 150$ 倍)

Fig. 6 After 20-40 mesh erosion 10 narrow
gauge ($\times 150$ times)

基于各个贴片的失重率数据与电镜照片,笔者分析认为:贴片质量减少,主要源于冲蚀对材料表面的切削和磨损所致。而贴片质量增加,则是腐蚀主导了金属氧化物的生成。弯管段的固-液两相流动特征对所挟带的粒子冲蚀或腐蚀机制有重要影响。一方面碳钢贴片在水中有自发的腐蚀过程,同时在砂粒冲击弯管段某些部位的过程中,若砂粒挟带的动能不足以将腐蚀产物冲蚀掉时,贴片表面会形成腐蚀保护膜使贴片增重;若砂粒挟带的动能足够大,砂粒会将腐蚀保护膜冲蚀掉,然后新鲜的金属表面

又形成新的金属氧化物保护膜,因此砂粒的冲刷能起到促进腐蚀的作用,导致部分贴片失重率大大上升。在同样流速条件下,较大的固相粒径对外拱壁位置的贴片冲蚀减薄较严重;较小的固相粒径,对弯管段贴片的腐蚀增重较严重。对比发现,各试验组砂粒粒径趋小时,观测到的犁沟型损伤亦减少。

由图 5 可见,5 号窄片出现的凹坑有明显的坑唇。其特征符合空泡溃灭时微射流撞击壁面产生冲击波导致材料表面破坏形态,属于空蚀破坏的机制。对凹坑里的成分进行能谱分析,氧含量高说明坑中有铁的氧化物,即贴片上也发生了腐蚀过程。由图 6 可见 10 号窄片表面破坏的主要机制是腐蚀—空蚀,凹坑内嵌入的微颗粒经能谱分析为铁的氧化物。图 4~6 蚀坑周围的阴影经能谱分析为金属氧化物。根据电镜观察,不同位置的贴片上,蚀坑周围都普遍存在着腐蚀现象。

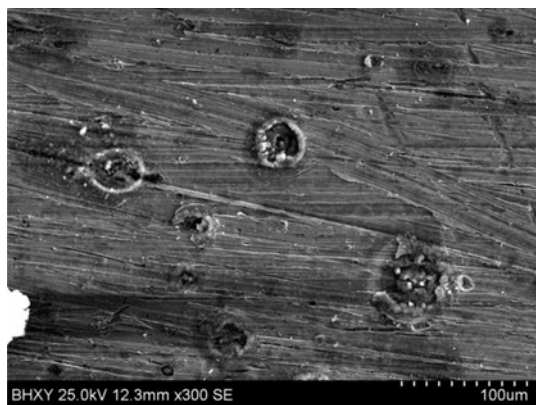


图 7 自来水冲后 5 号窄片($\times 300$ 倍)

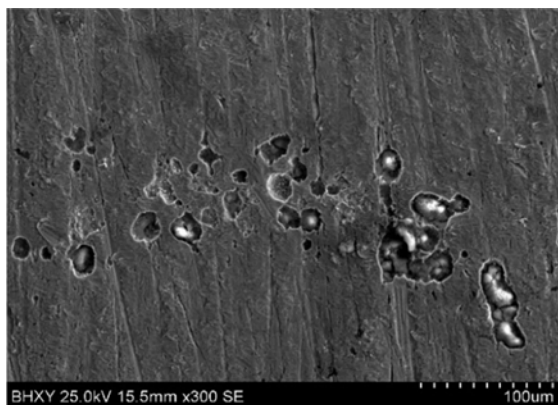


图 8 自来水冲后 10 号窄片($\times 300$ 倍)

Fig. 7 5 narrow gauge after the tap water ($\times 300$ times) Fig. 8 10 narrow gauge after the tap water ($\times 300$ times)

对照试验组的流动介质为自来水(图 7,图 8),冲后贴片的电镜照片仍可观察到大量蚀坑的存在和被腐蚀特征,而基本未见到犁沟型损伤。一方面贴片的表面形貌有天然纹理和沟槽,易形成流动的低压区和高压区,具有空蚀发生的必要条件,空泡溃灭产生的微射流传递给表面附近的微颗粒冲击壁面的法向速度。这也验证了文献^[9,10]的观点,即自来水所含微颗粒有利于诱发气泡对壁面的空蚀溃灭效应。四组试验体现了固相砂粒粒径对贴片的冲蚀减薄或腐蚀增重有明显影响。在此基础上,下文将考虑多相流在弯管处流场的复杂变化,如何影响弯管不同部位的冲蚀—腐蚀和空蚀机制。

3 油—砂多相流冲蚀的数值模拟

3.1 计算模型与参数

输送含砂油流的海底管道弯管段的内径 D 为 20'(508mm),弯径比(R/D)为 1.5。管道上游和下游分别有 10 倍管径的直管段,管道的轴线与水平面平行,重力方向向下(负 Z 方向)。六面体网格划分,网格数约 60 万。软件环境为 Fluent6.3,所用湍流模型为标准 $k-\epsilon$ 模型和 DPM 离散模型中的冲蚀/沉积模型,近壁区选用标准壁面函数。压力—速度耦合方程组采用半隐式 SIMPLE 算法。使用二阶迎风格式进行离散。边界条件:上游速度 10m/s,下游为自由出流,壁面为无滑移固壁边界。离散相边界条件为反射,法向反弹系数和切向反弹系数均为冲击角的三次多项式函数。冲击角函数使用分段线性函数^[5]。砂粒速度和连续相一样,粒子直径设为 $20\mu\text{m}$,按原油流量的 5% 给定粒子流量,为 182.41kg/s 。连续相是密度为 900kg/m^3 ,粘度为 $20\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的原油。砂粒是离散相,密度为 2650kg/m^3 。假设油流不含水和气,模拟中忽略了空蚀和腐蚀效应。

3.2 模拟结果分析

3.2.1 粒子冲蚀的流场分布特征

海底管道弯管段的冲蚀磨损很大部分取决于弯管段的内部流场特征。根据模拟,当管道内流体流速为 20m/s,砂粒质量分数为 5% 时,管道壁面的平均冲蚀速率为 $2.033 \times 10^{-5}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,最大冲蚀速率为 $2.4 \times 10^{-4}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。弯管段的主要流场特征是在外拱侧形成了低速高压区,内拱侧形成了高

速低压区,且弯管段下游出现了二次(对称)流动(图9)。二次流与轴向主流发生叠加作用,使弯管段下游的流体呈现出螺旋流动的形态,随着流速的急剧变化,上游管段、弯管段和下游段的壁面剪切力也剧烈变化,导致含砂流动中的砂粒与内拱、外拱壁面发生强烈接触、摩擦和冲击作用(图10)。

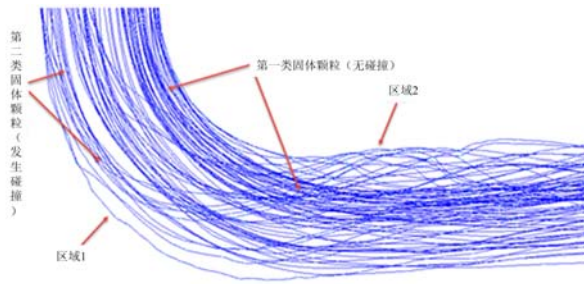


图9 固体粒子在弯管段的运动轨迹

Fig. 9 The trajectory of the solid particles in the elbow segment

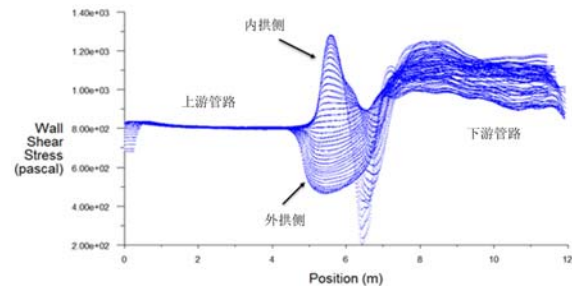


图10 弯管段壁面剪切应力的分区变化

Fig. 10 Partition change elbow section of wall shear stress

高流速冲击时(20m/s),上游管壁的冲蚀速率小。在90°弯管段及弯管转直管的过渡区域,流体流向发生改变,加上离心力的作用,砂粒直接冲击管壁,造成弯管段外拱侧壁面冲蚀增大;在下游管道中,由于二次流与轴向主流产生叠加作用,大大增加了壁面冲蚀量。且由于二次流在弯管两颊壁面处的冲击角较大,相应地在下游管道两颊壁面冲蚀量较大。下游管壁的冲蚀速率高于上游管道。鉴于实际管道中的冲蚀速率通常小于 $9.96 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,因此又模拟了流速变化在1~20m/s范围内弯管段的冲蚀过程,得到的平均冲蚀速率和最大冲蚀速率有一致的变化趋势,即随流速的增加而增大(图11)。

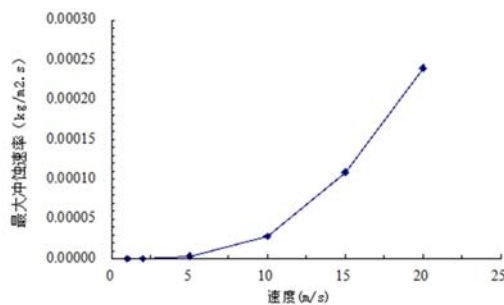


图11 不同流速下的最大冲蚀速率变化图

Fig. 11 The change map of maximum erosion rate under different flow rates

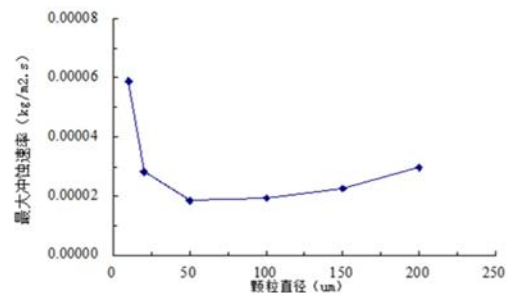


图12 不同粒子直径下的最大冲蚀速率变化

Fig. 12 The change map of maximum erosion rate under different particle diameters

3.2.2 粒度对砂粒冲蚀的影响

当砂粒含量不变,流速为2m/s,而粒径变化为10~200 μm 时的冲蚀速率变化如图12。随着粒径增大至 $d < 50 \mu\text{m}$,冲蚀率快速降低到某个范围;随着粒径增大至200 μm ,冲蚀率也趋于较平缓地增长。在砂粒直径较小时,冲蚀分布比较集中,在弯管段外拱侧和下游管道两颊十分严重,而其他部位冲蚀很小;随着砂粒直径的变大,冲蚀的分布变得均匀,弯管段外拱侧冲蚀减小,下游管道各位置冲蚀速率基本一致。说明当砂粒的直径较小时,管道中的流体对砂粒的挟带性好,弯管段处砂粒会跟随流体对外拱进行充分的撞击,下游管道中砂粒也会跟随二次流对两颊进行冲蚀,使这些地方产生较大的冲蚀速率;随着砂粒直径的增加,砂粒跟随性大大降低,流动在弯管段方向的改变和下游二次流不再主导砂粒的运动轨迹,使得砂粒在管道中流动更均匀,不再对某些位置产生持续的高强度冲刷,并且砂粒之间更容易发生碰撞造成能量损失,对弯管壁的撞击次数和强度也都大大降低。

3.3 弯管段固—液两相流冲蚀模拟的基本规律

弯管段两相流动的基本特征是在弯管段的外拱侧和内拱侧,分别形成明显的高压区和低压区,压力相差达到十几倍。下游管道中的流体呈螺旋状流动,增大了下游管道受到的壁面剪切力。由于弯管段处流向的改变,流体所挟带砂粒与弯管段外拱侧极易直接碰撞,使外拱侧成为冲蚀最严重的部位之一;在弯管段下游,砂粒随二次流作螺旋流动,管道两颊处冲击角较大,冲蚀也较严重。

当流速较小时,冲蚀主要集中在下游管道的两颊;随着流速增大及惯性力的作用,弯管段外拱侧冲蚀变得严重;冲蚀速率随着流速的提高呈指数增长。冲蚀速率随着砂粒粒度的增加先减小,然后缓慢增大,反映出壁面损伤机制不仅仅是冲蚀磨削,还有空蚀和腐蚀的共同效应。

4 结 论

结合模型试验和数值模拟分析,总结出弯管段冲蚀的机制主要包括冲刷磨削和腐蚀两方面:冲蚀磨削作用,即砂粒冲击、切削和磨损壁面而产生挤压、划痕及犁沟型损伤。液流对碳钢贴片的腐蚀过程。但由于两相流流场的影响,在弯管段贴片上腐蚀和冲蚀作用各有其优势区域。另外也发现自来水工况中贴片表面的圆形带坑唇的蚀坑,推断为水—砂流动中微颗粒挟带着气泡冲击材料表面所致的空蚀溃灭现象。冲蚀、腐蚀等作用受到砂粒粒径和两相流流动特征的明显影响。

(1) 冲蚀过程中砂粒因撞击壁面及互相碰撞而破碎,使流体中砂粒粒度分布较广。不同大小的砂粒对弯管段进行冲蚀的过程中出现了多种损伤形貌:蚀坑、压痕、划痕、犁削沟和连续挤压型凹坑等等。

(2) 各种损伤形貌特征所体现的机制为:蚀坑主要是由于空泡溃灭微射流造成的;压痕和划痕是砂粒直接冲击造成的;犁沟型损伤是大粒径、带尖角砂粒沿材料表面剪切和摩擦,产生犁削作用引起的;连续挤压型凹坑是球形粒子在低冲击角下冲击材料表面造成的。

(3) 由于贴片表面粗糙度的影响,空化空蚀在几乎所有表面区域发生,因此蚀坑和压划痕是造成材料质量损失的主要原因。微射流对粒度较小粒子的扰动使犁沟型损伤和连续挤压型凹坑出现频率较低。

参考文献:

- [1] Lawn B R, Swain M V. Microfracture beneath point indentations in brittle solids[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(1):113—122.
- [2] Evans A G. Fracture toughness: the role of indentation techniques[J]. ASTM Special Technical Publication, 1979, 678:112—135.
- [3] Tilly G P. Erosion caused by impact of solid particles[J]. Treatise on Materials Science & Technology, 1979, 13:287—319.
- [4] 赵会友, 陈华辉, 邵荷生, 等. 几种钢的腐蚀冲蚀磨损行为与机理研究[J]. 摩擦学学报, 1996, 16(2):112—119 (ZHAO Huiyou, CHEN Huahui, SHAO Hesheng, et al. The study on the corrosion-erosion wear behaviour and wear mechanism of several steels[J]. Tribology, 1996, 16(2):112—119 (in Chinese))
- [5] McLaury B S, Wang J, Shirazi S A, et al. Solid particle erosion in long radius elbows and straight pipes[C]. Society of Petroleum Engineers, 1997, SPE-38842:977—986.
- [6] 李根生, 沈晓明, 施立德, 等. 空化和空蚀机理及其影响因素[J]. 石油大学学报, 1997, 21(1):97—101, 119 (LI Gensheng, SHEN Xiaoming, SHI Lide, et al. Review of studies on cavitation and cavitation erosion[J]. Journal of the University of Petroleum, 1997, 21(1):97—101, 119 (in Chinese))
- [7] 陈大年, Al-Hassani S T S, 俞宇颖, 等. 与冲蚀有关的粘着与犁沟摩擦系数[J]. 力学学报, 2003, 35(1):33—38 (CHEN Danian, Al-Hassani S T S, YU Yuyin, et al. Friction coefficient caused by adhesion and ploughing relevant to impact wear[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(1):33—38 (in Chinese))
- [8] 姜胜利, 郑玉贵, 姚治铭. 不同砂粒粒径多相流中 CrMnB 堆焊层的损伤行为[J]. 材料保护, 2004, 37(10):12—14 (JIANG Shengli, ZHENG Yugui, YAO Zhiming. Damage behavior of CrMnB coating in slurry of different particle size[J]. Journal of Materials Protection, 2004, 37(10):12—14 (in Chinese))
- [9] 汪家道, 陈皓生, 秦力, 等. 水力机械空蚀中微颗粒的关键作用[J]. 科学通报, 2007, 52(22):2683—2687

- (WANG Jiadao, CHEN Haosheng, QIN Li, et al. The key role of cavitation in hydraulic machinery microparticles [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(22):2683—2687 (in Chinese))
- [10] Li Y J, Chen H S, Chen D R, et al. Effect of Micro/Nano particles in cavitation erosion[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2009, 9(2):783—787.
- [11] 偶国富, 许根富, 朱祖超, 等. 弯管冲蚀失效流固耦合机理及数值模拟[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11):119—132 (OU Guofu, XU Genfu, ZHU Zuchao, et al. Fluid-structure interaction mechanism and numerical simulation of elbow erosion failure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11):119—132 (in Chinese))
- [12] 梁亮, 庞佑霞, 唐勇, 等. 冲蚀磨损与冲蚀、空蚀交互磨损的对比研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(4):338—344 (LIANG Liang, PANG Youxiang, TANG Yong, et al. A comparative study between erosive wears and interactive wears[J]. Tribology, 2012, 32(4):338—344 (in Chinese))
- [13] Zeng L, Zhang G A, Guo X P. Erosion-corrosion at different locations of X65 carbon steel elbow[J]. Corrosion Science, 2014, 85:318—330.
- [14] Vieira R E, Kesana N R, McLaury B S, et al. Experimental investigation of the effect of 90° standard elbow on horizontal gas-liquid stratified and annular flow characteristics using dual wire-mesh sensors[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 59:72—87.

Erosion Mechanism Analysis of Sand Flow Passing through the Elbow Segment

BAI Li¹, WEN Xiao², LI Xiao-dong¹, WU De-jun¹, ZHAO Ting-ting¹, SONG Cun-de¹

(1. China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Elbow and Valve and so on in pipeline are often subjected to sand fluid erosion inducing tube wall thinning even leaking. In order to study the main mechanism of elbow erosion wear, a solid-liquid two-phase flow pipe circulation experiment was conducted by using liquid added 5% quartz sand. Experiment was divided into different groups according to the sand particle size, and was focused on observing the erosion and wear characteristics of a set of carbon steel pasters mounted on pipe elbow after 2~3 hours circulation. The erosion rate of each paster was calculated by weight loss method. Then, the paster surface damage morphology was investigated based on scanning electron microscopy (SEM). Furrows, indentation, scratch even circle etch pits are found on paster surface after eroding. Energy dispersive spectrum analysis (EDS) shows the existence of a certain amount of iron oxides. It is obvious that the damage mechanism of paster surface includes not only the mechanical actions such as cutting, extrusion and second impact due to fluid passing through elbow segment, but also the coexisted erosion action. Both mechanisms have different manifestations in elbow segment and are affected by particle size. Numerical simulation verifies the flow field pressure and particle distribution characteristics of two-phase flow erosion. Results show that damage mechanism on the outer arch wall of elbow is controlled by particle impaction, while corrosion is dominant on the inner arch wall of elbow.

Keywords: elbow; erosion; solid-liquid two-phase flow; damage mechanism; particle size