

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2020.05-01

局部减薄水电站光面管失效模式研究

张 阳^{1,2}, 陈嘉其³, 王嘉伟⁴, 彭友文²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099;
3. 成都基准方中建筑设计有限公司南宁分公司, 广西 南宁 530012; 4. 江西省市政工程设计研究院有限公司, 江西 南昌 330000)

摘 要: 为了得出局部减薄水电站光面管失效模式判定方法, 开展了该类管道失效机理研究. 结合试验结果验证了本文失效分析方法的可靠性, 选取局部减薄管道与相应无缺陷管道失效时塑性区体积比为失效模式量化指标, 建立了管道失效模式与局部减薄几何参数的对应关系. 结果表明: 采用中高强度钢材的光面管跨度和局部减薄环向长度对减薄管失效模式的影响可忽略; 局部减薄厚度不大于 0.5 倍壁厚时, 采用中高强度钢材的光面管失效模式仅由局部减薄厚度控制, 否则光面管失效模式由局部减薄厚度和局部减薄轴向长度共同控制.

关键词: 失效模式判定; 弹塑性增量法; 水电站光面管; 局部减薄; 几何参数

中图分类号: TV732.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2020)05-0313-07

0 引 言

水电站压力钢管在高压水挟带的砂石冲刷及外界物质腐蚀作用下, 管壁常发生局部减薄现象^[1], 出现承载力降低、疲劳裂纹萌生、局部膨胀等问题. 因此, 预测局部减薄水电站压力管道的失效模式对其安全运行非常重要.

目前, 国内外研究者对局部减薄管道失效模式开展了一些研究^[2-5]. 陈钢等^[6]讨论了内压和面内弯矩共同作用下局部减薄弯头的典型塑性失效模式, 指出局部减薄参数是影响失效模式的关键因素; Choi 等^[7]通过爆破试验研究了不同减薄参数对 X65 钢管失效机理和失效压力的影响, 并结合数值模拟预测了失效危险区域; Lee 等^[8]针对含有点蚀和槽形减薄两种缺陷形式的压力管道展开了弹塑性有限元分析, 发现局部减薄几何形状对管道失效模式有较大的影响; Roy 等^[9]针对弯曲荷载和轴向荷载联合作用下的局部减薄压力管道开展了

实验和数值分析, 总结了局部减薄深度、局部减薄环向长度以及减薄位置对管道失效模式的影响规律. 上述研究表明局部减薄管道的失效模式受多种因素影响, 然而目前研究仍未给出失效模式的判定方法.

鉴于此, 本文针对采用中高强度钢材的局部减薄水电站光面管开展了失效模式研究, 选取局部减薄光面管与相应无缺陷管道失效时塑性区体积比为失效模式量化指标, 提出了该类管道失效模式的两级判定标准, 从而建立了采用中高强度钢材的局部减薄水电站光面管的失效模式判定方法.

1 局部减薄光面管失效机理分析与验证

1.1 失效机理判定方法

采用弹塑性增量法 (Elastic-plastic Incremental Analysis, 简记 EPIA) 开展局部减薄水电站光面管的失效机理研究, 从而确定该管道失效模式的判定关系式.

收稿日期: 2020-07-22

项目来源: 江西省教育厅科技项目 (GJJ180951); 国家自然科学基金资助项目 (51969018);

江西省优势科技创新团队建设计划项目 (20171BCB24012).

作者简介: 张 阳 (1990-), 男, 博士 (在站博士后), 讲师.

文中选取局部减薄管道失效时塑性区体积与相应无缺陷管道失效时塑性区体积比为失效模式量化指标,采用式(1)、(2)判定局部减薄水电站光面管失效模式类型:

$$\text{整体失效: } V_L/V \geq 60\% \quad (1)$$

$$\text{局部失效: } V_L/V \leq 20\% \quad (2)$$

式中, V_L 为局部减薄管道失效时塑性区体积, m^3 ; V 为无缺陷管道失效时塑性区体积, m^3 。

1.2 分析方法验证

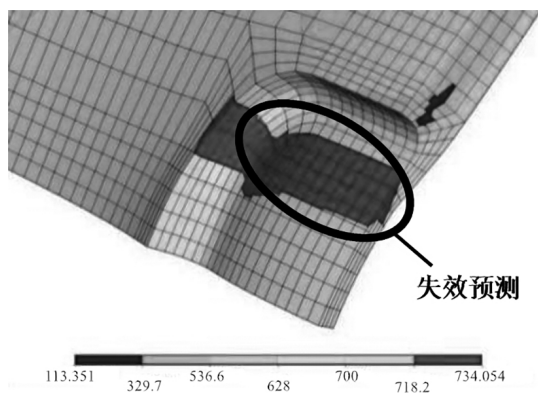
1.2.1 Benjamin 爆破试验

选取 Benjamin^[10]试验的 IDTS2 试件, 管材采用 API X80 钢, 材料屈服强度和抗拉强度分别为 534.1MPa 和 713.8MPa, 弹性模量为 2.0×10^5 MPa, 泊松比为 0.3。采用 EPIA 法得到极限承载力结果见表 1, 管道失效时的破坏模式和应力分布如图 1。

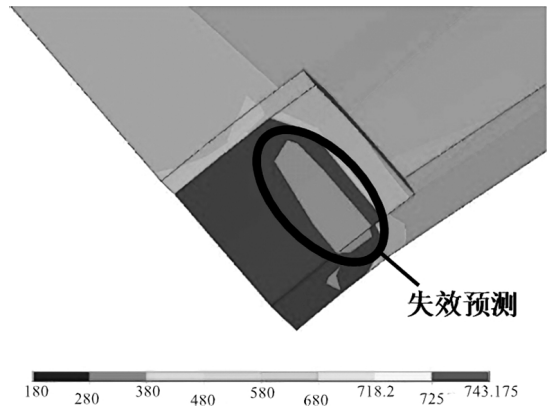
表 1 Benjamin 试验 IDTS2 试件^[10]的极限承载力结果

试件	2A /mm	2B /mm	C /mm	试验结果 ^[10] /MPa	本文结果 /MPa	误差 /%
IDTS2	39.60	31.90	5.39	22.68	22.00	3.18

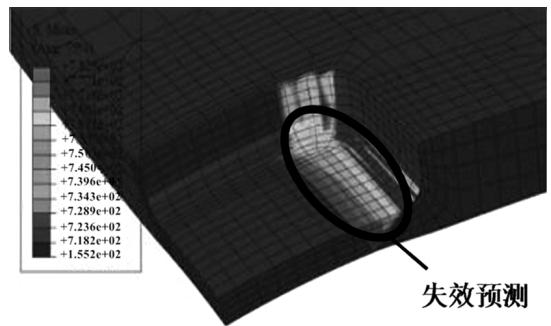
由表 1 可知, 本文极限承载力计算结果与实验结果符合良好, 误差为 3.18%。同时由图 1 可知, 各计算方法的应力分布均出现在平行于管道轴线的近无减薄区域, 与试验的破坏区域和破坏模式基本一致。研究表明, 失效区域限于减薄区的部分小范围内, 管道 V_L/V 为 12.1% 小于 20%, 属于局部破坏, 危险点出现在平行于轴线的近无减薄区域附近。



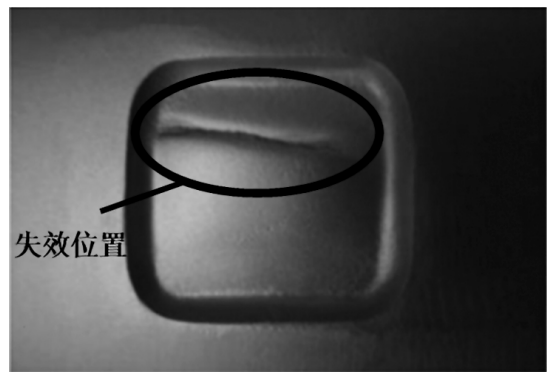
(a) Benjamin^[10]计算的应力分布



(b) 本文计算的应力分布



(c) 文献^[10]计算的应力分布



(d) IDTS2 试件的失效模式

图 1 IDTS2 试件失效的应力分布和失效模式

1.2.2 Choi 爆破试验

选取 Choi^[7]试验的 LA 试件, 管材采用 API X 65 钢, 材料屈服强度和抗拉强度分别为 465MPa 和 565MPa, 弹性模量为 2.06×10^5 MPa, 泊松比为 0.3。采用 EPIA 法得到极限承载力结果见表 2, 管道失效时的应力分布和破坏模式如图 2 所示。

由表 2 可知, 本文极限承载力计算结果与试验结果符合良好, 误差为 0.82%。同时由图 2 可知, 各计算方法的应力分布均出现在减薄中心的部分区域, 与实验的

表 2 Choi 试验 LA 试件^[7]的极限承载力计算结果

试件	2A /mm	2B /mm	C /mm	试验结果 ^[7] /MPa	本文结果 /MPa	误差 /%
LA	100	50	8.8	24.30	24.10	0.82

破坏区域和破坏模式基本一致。研究表明,失效区域沿减薄环向和轴向不断发展从而导致管道失效爆裂,管道 V_L/V 为 91.2% 大于 60%,属于整体破坏,危险点出现在减薄区域中心。

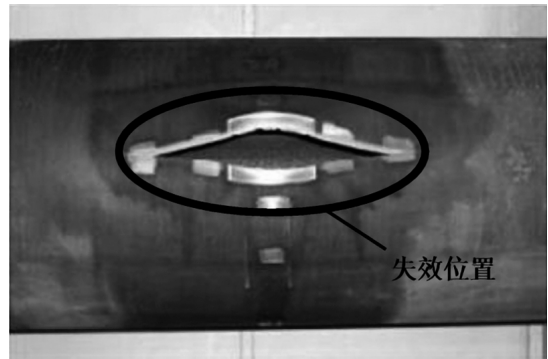
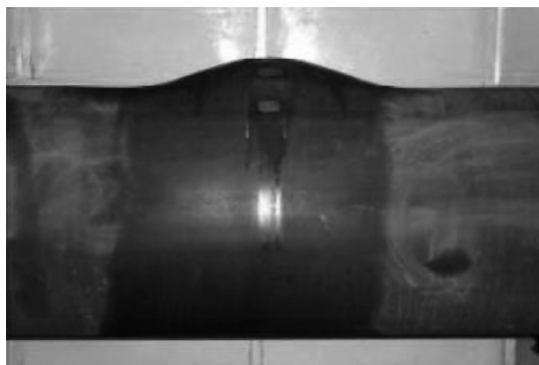
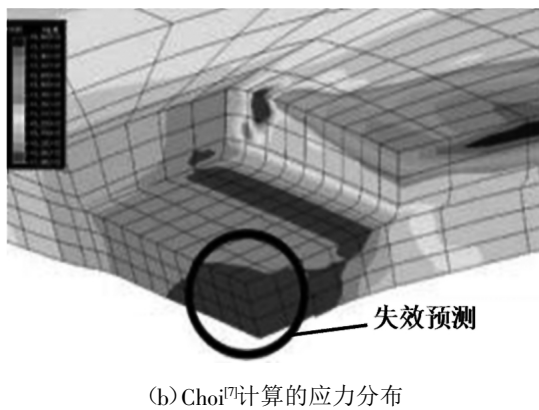
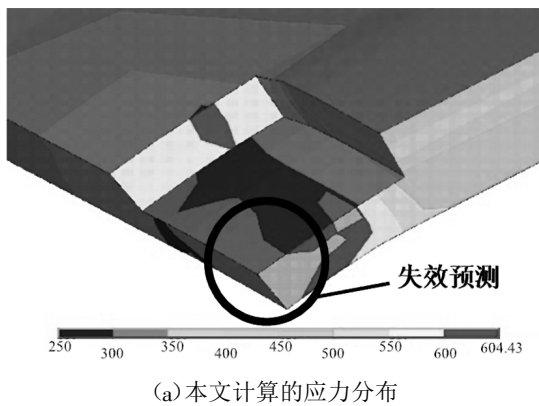


图 2 LA 试件失效时的应力分布和失效模式

2 计算模型与参数

图 3 为两端埋设在镇墩中的采用中高强度钢材的局部减薄水电站光面管示意图,其管跨为 L ,减薄轴向长度为 $2A$ 、减薄环向长度为 $2B$ (对应 2θ) 和减薄深度为 C 。管材采用 Q345D 钢材,其应力应变关系^[12]如图 4 所示,管道尺寸和材料参数如表 3 所示。采用 ANSYS 有限元软件进行结构建模,采用 20 节点的 SOLID95 单元模拟管壁,同时采用槽形凹坑模拟局部减薄区域,图 5 为根据对称性取 1/4 管段建立的有限元计算模型,对无缺陷区域管壁沿厚度方向划分 4 层单元、存在局部减薄的区域划分 2 层单元,并在减薄部位沿管轴向和环向精细划分单元。

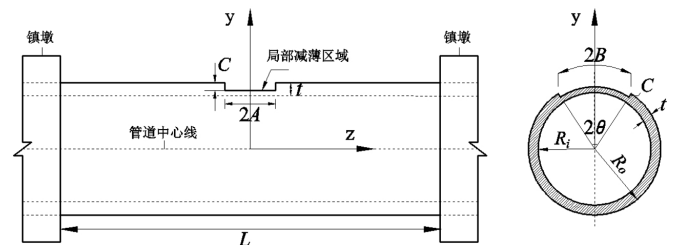


图 3 局部减薄压力钢管计算模型

表 3 管道尺寸和材料参数

参数	外径 R_o /m	内径 R_i /m	壁厚 t /mm	屈服强度 /MPa	弹模 E /MPa
数值	1.5	1.48	20	345	2.06×10^5

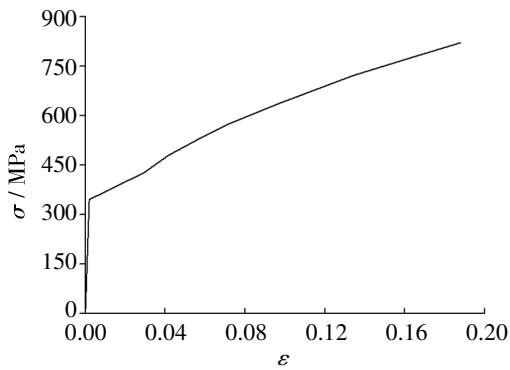


图4 Q345D的应力应变关系

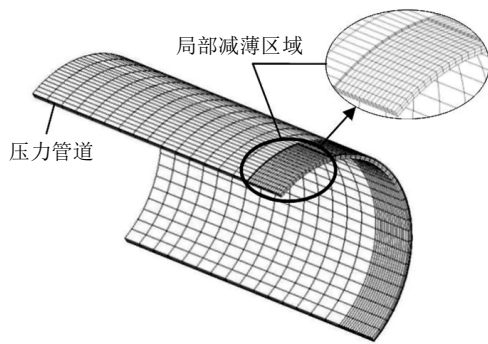


图5 局部减薄压力钢管有限元网格

为方便下文开展研究，将管道部分体型参数和局部减薄参数进行无量纲化：

$$l=L/2R_0; a=A/\sqrt{R_0t}; \tag{3}$$

$$b=B/\pi R_0; c=C/t;$$

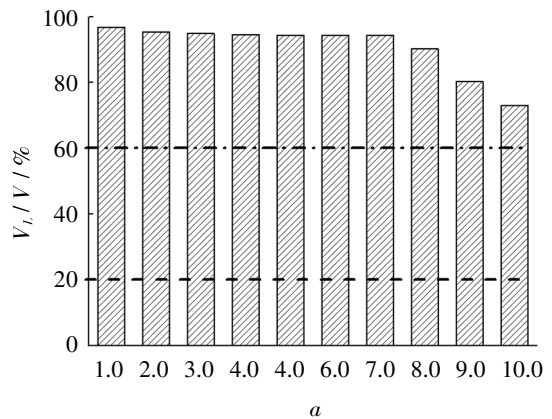
式中， l 为无量纲化的管道跨度； a 、 b 和 c 分别为无量纲化的局部减薄轴向半长、环向半长和深度。

3 局部减薄水电站光面管失效模式判定

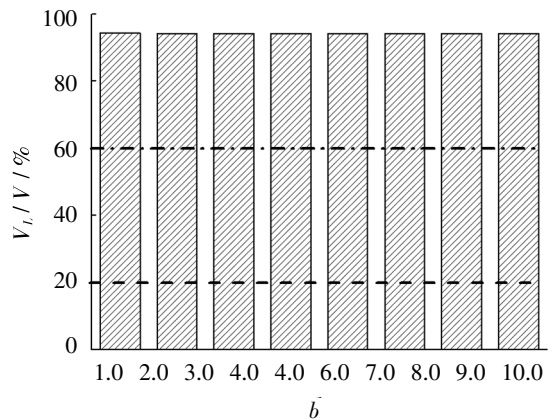
3.1 局部减薄几何参数对失效模式的影响

为揭示单个局部减薄参数对局部减薄光面钢失效模式的影响规律，取以下无量纲化局部减薄几何参数计算方案： $a=1、2、3、4、5、6、7、8、9、10$ ， $b=0.2$ ， $c=0.5$ ； $a=5$ ， $b=0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8$ ， $c=0.5$ ； $a=5$ ， $b=0.2$ ， $c=0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8$ ，结果如图6所示，其中点划线为整体失效量化指标下限，虚线为局部失效量化指标上限。

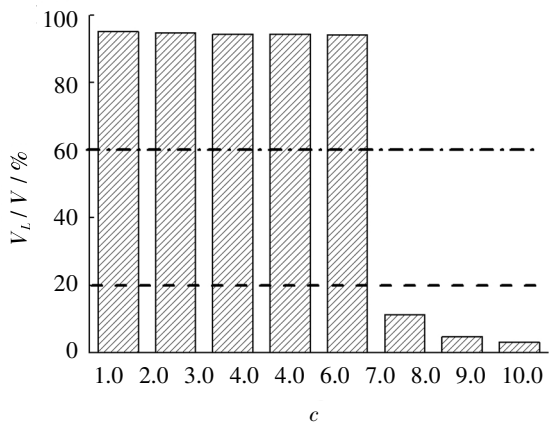
由图6(a)可知，无量纲化局部减薄轴向宽度 a 的变化对失效时有一定影响，随着 a 的增加逐渐降低，当 a 增大到10时为73.1%，仍高于整体失效量化指标下



(a) a 对失效模式的影响规律



(b) b 对失效模式的影响规律



(c) c 对失效模式的影响规律

图6 单个局部减薄参数对失效模式的影响规律

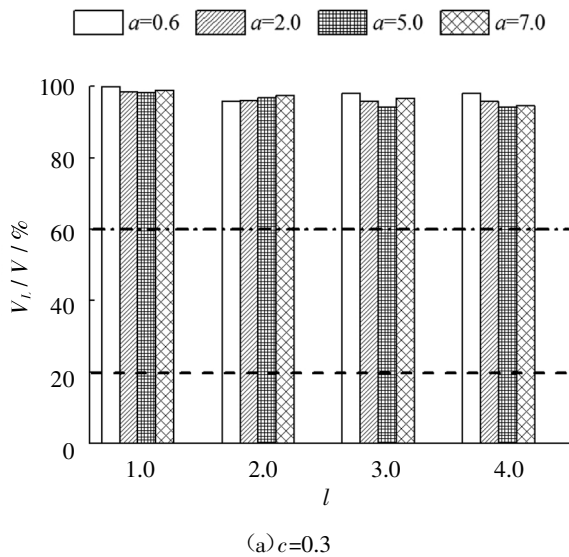
限，则管道总体上为整体失效模式。由图6(b)可知，无量纲化局部减薄环向宽度 b 的变化对失效时的影响较小影响可忽略，均约为95.2%，高于整体失效量化指标下限，为整体失效模式。由图6(c)可知，无量纲化局部

减薄深度 $c \leq 0.5$ 时, c 对失效时 V_L/V 的影响基本可忽略, V_L/V 高于整体失效量化指标下限, 均为整体失效模式; $c > 0.5$ 时, V_L/V 将迅速下降, 且低于局部失效量化指标上限, 则失效模式由整体失效模式转变为局部失效模式。

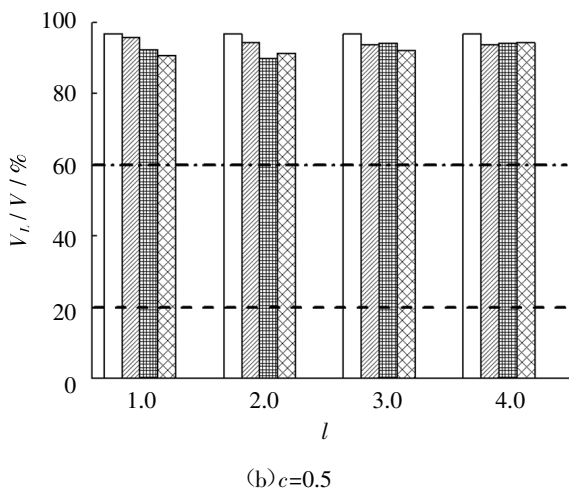
3.2 管道跨度 l 对失效模式的影响

考虑到管道设计相关规范^[13]对跨度与弯曲应力的要求, 无量纲化管道跨度 l 应不大于 4.0, 故无量纲化管道跨度 l 分别取 1、2、3 和 4, 同时考虑到减薄环向长度 b 对失效模式的影响不大, 故计算中 b 仅取 0.2, 局部减薄轴向长度 a 分别取 0.6、2.0、5.0 和 7.0, 局部减薄深度 c 分别取 0.3、0.5 和 0.7, 结果如图 7 所示。

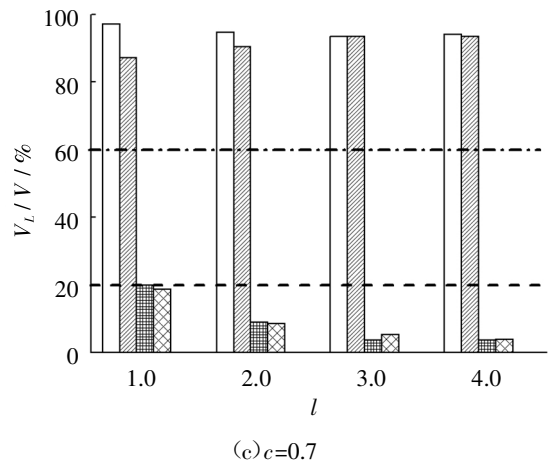
由图 7 可知, 随着无量纲化管道跨度 l 的增大, V_L/V 呈降低趋势, 尤其图 7(c) 所示 c 达 0.7 时, 有一定的降幅。总体而言, l 变化未改变管道的失效模式, 其原



(a) $c=0.3$



(b) $c=0.5$



(c) $c=0.7$

图 7 管道跨度 l 对失效模式的影响规律

因是在有限管长下跨中水重产生的弯曲应力远小于由内压产生的拉应力对局部减薄管道应力分布和失效模式的影响, 所以可不考虑光面管跨度对局部减薄管道失效模式的影响。

3.3 局部减薄几何参数联合作用对失效模式的影响

根据前述影响规律研究, 光面管的失效模式仅考虑 a 、 c 的联合作用。取以下计算方案: $a=0.6、1、2、3、4、5、6、7、8、9$ 和 $10, b=0.2, c=0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8$ 和 0.9 , 结果如图 8 和表 4 所示。

结合图 8 和表 4 可知, 局部减薄参数联合作用下的失效模式规律为: 当 $c \leq 0.5$ 时, 管道失效模式仅由局部减薄厚度控制, 否则管道失效模式由局部减薄厚度和局部减薄轴向长度共同控制。以上研究表明, 为了保障在役管道结构运行安全, 需要及时检查管道减薄 c 值和 a 值是否超标, 以预防发生局部失效问题。

表 4 局部减薄参数与失效模式的对应关系

减薄深度 c	减薄长度 a	失效模式
$0.5 \geq c > 0$	—	整体失效
$0.7 \geq c > 0.6$	$2.0 \geq a > 0$	整体失效
$0.6 \geq c > 0$	$a=3.0$	整体失效
$c=0.8$	$a=0.6$	整体失效
$c \geq 0.6$	$a \geq 4.0$	局部失效
$c \geq 0.7$	$a \geq 1.0$	局部失效
$c \geq 0.9$	—	局部失效

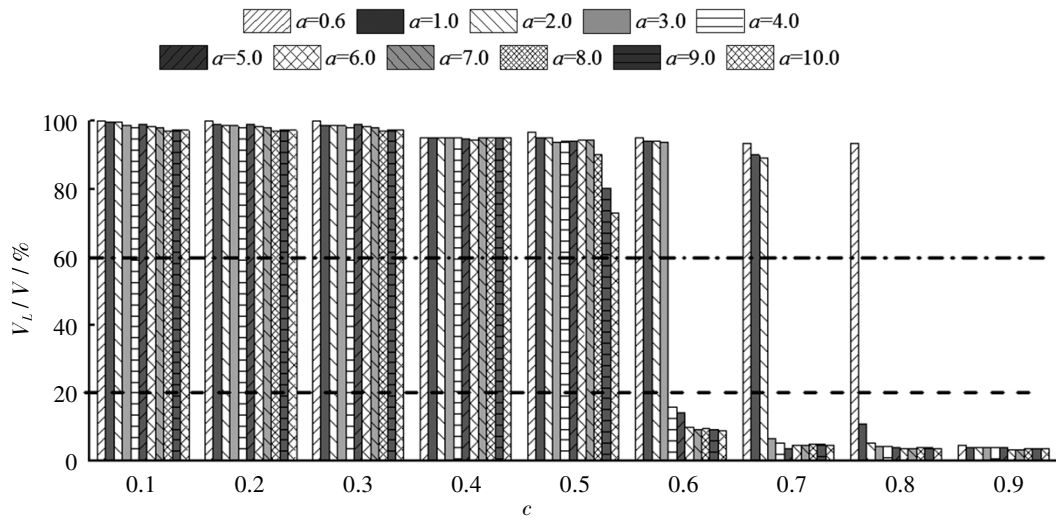


图8 局部减薄参数联合作用下压力钢管的失效模式

表5 局部减薄水电站光面管的失效预测

试验	管材	R_p/mm	$2A/mm$	C/mm	T/mm	a	c	实际失效模式	预测结果 ^[14]	神经网络 ^[15]	本文失效模式判定
1	X52	381.0	224.0	7.75	9.58	1.85	0.81	泄漏	泄漏	泄漏	局部
2	X52	381.0	312.4	4.77	9.52	2.59	0.50	爆破	爆破	爆破	整体
3	X52	381.0	219.2	5.99	9.80	1.79	0.61	爆破	泄漏	爆破	整体
4	X60C	381.0	152.4	4.52	9.47	1.27	0.48	爆破	爆破	爆破	整体
5	X60V	457.2	139.7	8.66	11.30	0.97	0.77	泄漏	泄漏	泄漏	局部
6	X60V	457.2	121.9	7.54	9.98	0.90	0.76	泄漏	泄漏	泄漏	局部
7	X60	533.4	165.1	6.50	10.26	1.12	0.63	爆破	泄漏	泄漏	整体

4 局部减薄水电站光面管的失效预测

为验证本文对减薄管失效模式判定的可靠性,将本文预测结果与现有试验结果进行对比。由表5可知,本文方法能较好地预测局部减薄压力管道的失效模式,可为局部减薄压力管道安全评估提供参考。

5 结论

本文开展了采用中高强度钢材的局部减薄水电站光面管失效模式判定研究,研究表明:

(1) 局部减薄环向长度和管道跨度对局部减薄水

电站光面管失效模式的影响很小,可以忽略。

(2) 局部减薄轴向长度和局部减薄深度是影响局部减薄水电站光面管失效模式的2个关键参数,文中给出了失效模式与2个关键参数间的对应关系。

(3) 为了保障在役管道的安全运行,需要及时检查管道减薄轴向长度和深度是否超标。

参考文献:

- [1] Skladnev M F, del Y U. Protection of hydraulic structures and electric power station equipment from corrosion and cavitation [J]. Hyrotechnical Construction, 1974, 8(8): 717~721.
- [2] Mondal B C, Dhar A S. Finite -element evaluation of burst pressure models for corroded pipelines [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2017, 139(2): 21~28.

- [3] Wu J, Ji C, Long Y, et al. Dynamic responses and damage of cylindrical shells under the combined effects of fragments and shock waves [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 113 (2): 94~103.
- [4] Wu W, Cheng G, Hu H, et al. A knowledge-based reasoning model using causal table for identifying corrosion failure mechanisms in refining and petrochemical plants [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2012, 25 (25): 97~105.
- [5] 马欣, 李杰, 薛涛, 等. 含内腐蚀凹陷的压力管道应力应变研究[J]. *塑性工程学报*, 2018, 25 (3): 268~273.
- [6] 陈钢, 张传勇, 刘应华. 内压和面内弯矩作用下含局部减薄弯头塑性极限载荷的有限元分析 [J]. *工程力学*, 2005, 22 (2): 50~56.
- [7] Choi J B, Goo B K, Kim J C, et al. Development of limit load solutions for corroded gas pipelines [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2003, 80 (2): 121~128.
- [8] Lee O S, Kim H J. Effect of external corrosion in pipeline on failure prediction [J]. *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 2000, 2 (1): 48~54.
- [9] Roy S, Grigory S C, Smith M, et al. Numerical simulations of full-scale corroded pipe tests with combined loading [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1997, 119 (4): 457~466.
- [10] Benjamin A C, Freire J L F, Vieira R D, et al. Burst tests on pipeline containing interacting corrosion defects [C]// *Proceedings of OMAE2005 24th international conference on offshore mechanics and arctic engineering*, Halkidiki, Greece, 2005: 403~417.
- [11] Li X, Bai Y, Su C, et al. Effect of interaction between corrosion defects on failure pressure of thin wall steel pipeline [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2016, 138: 8~18.
- [12] 徐义波, 王效岗, 凡明, 等. Q345D 钢高温力学性能试验研究 [J]. *机械工程与自动化*, 2009, 156 (5): 84~86.
- [13] NB/T 35056-2015, 水电站压力钢管设计规范 [S]. 中国标准出版社, 2005.
- [14] Kiefner J F, Maxey W A, Eiber R J, et al. Failure stress levels of flaws in pressurized cylinders [J]. *Astm Special Technical Publication*, 1973 (536): 461~481.
- [15] 胡兆吉, 韩良浩, 柳曾典. 基于人工神经网络的含缺陷压力管道失效模式的识别[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 1997, 19 (3): 24~27.

编辑: 张绍付

Investigation on failure mode of plain penstocks with local wall-thinning

ZHANG Yang^{1,2}, CHEN Jiaqi³, WANG Jiawei⁴, PENG Youwen²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. School of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

3. Nanning Branch of Chengdu Benchmark Square Construction Design Co., Ltd, Nanning 530012, China;

4. Jiangxi Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd, Nanchang 330000, China)

Abstract: In order to obtain the method for the failure mode determination of plain penstock with local wall-thinning, the failure mechanism of plain penstock with local wall-thinning was investigated. Firstly, the reasonability of the failure analysis method was proved based on the experimental data. Then, the volume ratio of plastic regions for plain penstock with local wall-thinning and intact penstock was selected as the quantitative index of failure mode. The relationship between the local thinned geometric parameters and the failure mode determination was proposed. The results show that the structural span and local thinned circumferential length have little influence on failure mode. It also indicates that when the local thinned thickness is no more than 0.5 times of the wall thickness, the control parameter of penstock failure mode is the local thinned depth, otherwise, the failure mode is controlled by both the local thinned depth and the local thinned axial length.

Key words: Failure mode determination; Elastic-plastic incremental analysis; Plain penstock; Local thinned defect; Geometric parameters

翻译: 张阳