

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.005

双兰线管道水工保护结构分析及优化*

褚睿峰, 马廷霞, 贾心怡

(西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500)

摘要:以双兰线沿线河流水毁冲刷情况为工程背景,在分析水毁成因机理和现场数据基础上,利用CFD数值模拟等手段,对应急性水工保护结构——石笼展开优化设计,设计3种不同形状的石笼并完成几何建模,在Fluent中利用VOF模型计算分析它们在淹没水域中的抗冲刷表现,从水流速度、石笼表面压力分布、水流阻力、床面剪切力这几个方面进行评价,以找出抗冲刷效果最好的石笼形状。最后完成水工保护结构的优化并针对不同结构进行适宜性分析。

关键词:管道水毁;石笼结构;水工保护;数值模拟

中图分类号: X937 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0353-05

Hydraulic Protection Structure Analysis and Optimization of the Shuanglan Crude Oil Pipeline

CHU Ruifeng, MA Tingxia, JIA Xinyi

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Taking the situation of the scour of water damage along the Shuanglan crude oil pipeline as the engineering background, this paper discussed how to optimize the hydraulic protection structure. Based on the analysis of the mechanism of water damage and site data, CFD-based numerical simulation and other methods were adopted to optimize the design of the gabion as an emergency hydraulic protection structure. Three different gabion structures were designed and their geometrical models were constructed. The VOF model was used in Fluent to calculate and analyze their anti-erosion performance under water. Various factors including water-flow velocity, surface pressure distribution on gabion, flow resistance and bed shear stress, were evaluated to find the gabion structure with the best anti-scouring effect. Finally, the optimization of the hydraulic protection structure was completed and the suitability of each structure was analyzed. The results obtained in this study can not only provide guidance for the design of hydraulic protection works for the Shuanglan crude oil pipeline, but also have implications for similar water damage hazard prevention and control projects.

Keywords: pipe waterlogging; gabion structure; hydraulic protection; numerical simulation

引言

双兰线是我国西部大开发战略的重要组成部分,是继西气东输工程之后的又一重要工程,管线

西起新疆的乌鲁木齐市,东至甘肃省兰州市,途经28个市(县),管道全长近4 000 km,干线全长约1 848 km,为原油和成品油两条并行管线。整条管线穿越大型河流8次,沿途经过戈壁、荒漠、黄土高原、山地等各种不同地貌类型,受风力、水力和重力

* 收稿日期:2018-06-21;修回日期:2018-09-08

作者简介:褚睿峰(1992-),男,助理工程师,硕士研究生。主要从事压力管道方面的研究。Email:314839066@qq.com

等的影响因素也存在一定差异,造成了不同管段管道遭受的地质灾害及破坏方式也不尽相同。从现场调查的情况来看,河沟道水毁造成的露管长度、管道悬空、管道受外力推挤等安全威胁远大于坡面水毁和台田地水毁,且在三种水毁类型中占比最大。这就要求管线的水工保护工程需要有针对当地区域地貌特点的设计。

近年来,国内学者对长输油气管道的地质灾害以及水毁灾害的研究集中在:王成志^[1]针对山地、水库、冲刷平原及河沟道等不同地形下常见的问题提出了对应设计方法;王生新等^[2]总结了冲积扇上水工保护措施破坏类型和改进设计建议,指出管道及水保施工时对周围土体的扰动是造成土层被冲刷的重要原因;刘国起等^[3]提出了一种水力插板透水丁坝,并通过数值模拟证明其设计比水力实体丁坝和桩式透水丁坝有明显提升;孙志林等^[4]设计了一种正态曲面丁坝,通过改善丁坝附近水流结构以起到减小坝头局部冲刷的作用。国外研究方面,加拿大BGH公司^[5-8]拥有丰富的实践经验,曾经对长输油气管道的水毁灾害做了大量风险评价工作,但针对具体工程措施还没开展过相关研究工作。加拿大的另一家企业DHC公司长期开展长输管道的穿河灾害评价,并建立了穿越管道的水力学模型,其在管道水工保护工程方面的研究处于国际领先水平。

上述设计都是基于流体力学原理对水工结构的外形结构进行了改进,在保证原有效果的前提下,都起到了很好的减小局部冲刷的作用,这对于管道的水工保护结构设计是一个很好的启发,因此本文将借用这一思路来展开相关研究,对石笼进行形状设计,分别分析了正四边形、正三角形和半圆形三种不同形状石笼在淹没流场中的防冲刷表现,以找出抗冲刷表现最好的石笼形状。

1 仿真模型的建立

双兰线河沟道水毁防治的主要水工保护结构为钢筋石笼,现场抢险时也多次运用到了此类水工结构,石笼采用钢筋、铅丝、镀锌铁丝等材料编织成蜂窝状网眼的金属网,是一种用于防止河床面、河岸或其他建筑受水流冲刷而放置在床面上的填装满石块的笼子,如图1所示。可代替防冲墙、挡土墙、丁坝及围堰等结构起到河床河岸防护、管道穿越段防护、排水引流等作用^[9]。下面将对不同形状

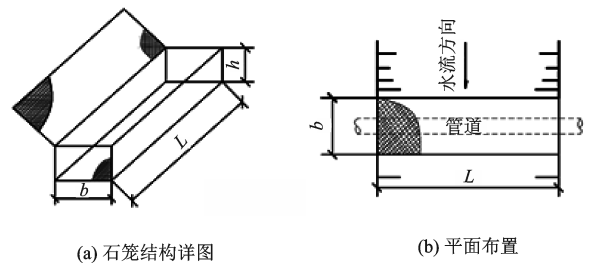


图1 石笼结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the gabion structure

的石笼结构进行流场分析对比,以找出抗冲刷表现最好的石笼形状。

1.1 模型建立与网格划分

现场发现常用水工保护石笼结构剖面为正四边形,在水流冲刷中易发生侧面受力不均导致翻覆脱离原施工位置,因此增加正三角形和半圆形两种石笼形状,以相同截面积(即工程量相等)为出发点条件,共建立了3种石笼抗冲刷几何模型,尺寸如图2所示。

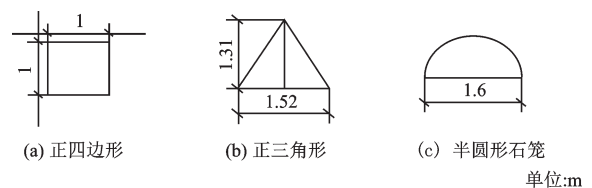


图2 三种石笼形状设计
Fig.2 Design of three gabions shapes

以墙体厚度作为特征尺寸($D=0.5\text{ m}$),为保证湍流充分发展的同时节约计算资源,根据M. Breuer^[10]的研究,将流场计算域设为 $(25D+35D)\times 5D\times 10D$,其中水深2 m,空气3 m,蓝色部分为水流的速度入口,设置流速为5.4 m/s,河床下游设置自由流出口,河底(黄色)与石笼网表层(红色)均设为可缩放比例壁面,流域两侧面和顶部均设置为对称边界,如图3所示。

模型采用结构化网格划分,为提高网格质量,对每种石笼网附近的网格都进行了边界层加密,如图4所示。正四边形、正三角形、半圆形的最小网格尺寸分别为0.03、0.01和0.005 m,最终输出总网格数分别为190 200、156 620和329 626。

1.2 边界条件设置

整个计算域分为洪水域和空气域两个流体区域:设两个压力出口,一个位于空气层的上平面,其

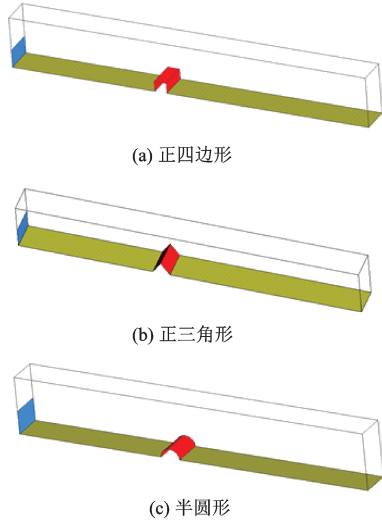


图3 3种石笼的几何模型

Fig.3 Three kinds of gabions geometric models

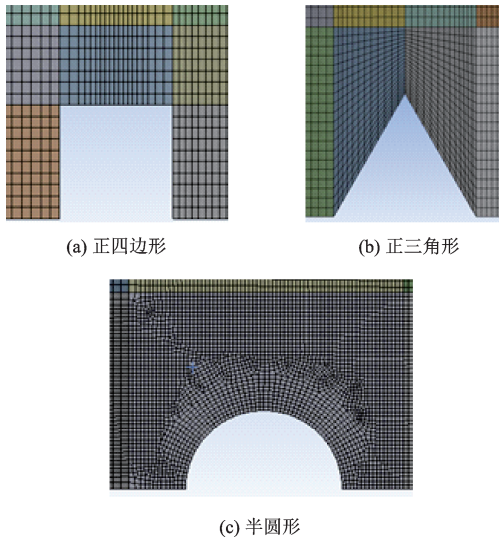


图4 3种形状石笼网附近网格加密

Fig.4 Grid mesh encryption of gabions with three different shapes

表压值为大气压,另一个位于水层下游出口,设置表压值为静水压值;河床底面设为无滑移壁面;水域和空气域交界面设为内部界面,其它边界均为对称边界。设置时间步长为 1×10^{-4} s,水流X方向速度为5.4 m/s,洪水体积分数为1,对流场进行初始化。

由于河床摩擦力的影响,在实际洪水流动中,水面流速接近最大流速,而贴近床面的水流速度会有一定程度的减小,为使仿真结果更具有真实性,采用速度入口的方式,设置入口流速从河床底部到河水上平面为抛物线分布,速度最大值为5.4 m/s(百年一遇的洪峰流量下对应速度),位于河水的上平面,该部分功能通过UDF编程实现。

2 结果分析

2.1 水流速度分析

首先导出了3种石笼周围的水流流线,如图5所示。可以看出,在正四边形和正三角形的下游区都出现了大片回流漩涡,而在半圆形的下游区几乎看不到回流区。另外,正四边形和三角形上游区的壅水也比较严重,主流在翻过墙面时有一定程度抬高;半圆形周围的水流则较为平顺,水面没有明显的抬高,而是在靠近墙顶的地方加快了速度,这也侧面说明半圆形相对其它形状结构对水流的阻力作用较小。

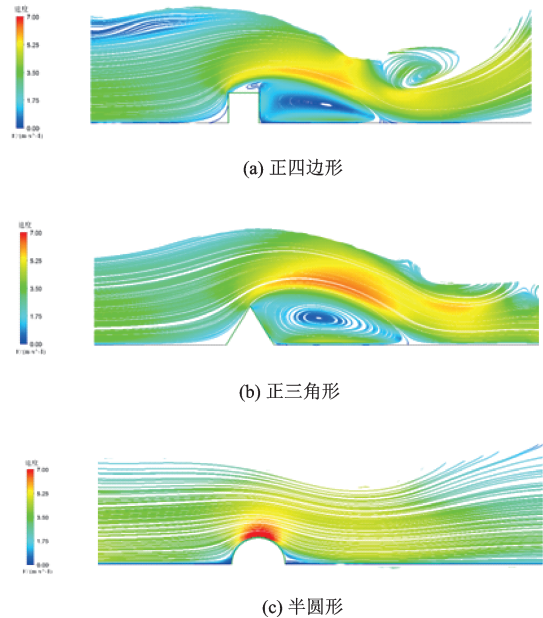


图5 3种石笼周围流线图

Fig.5 Streamlined diagrams around the three different gabions

2.2 压力分析

对3种石笼结构与水接触面进行了压力分析,如图6所示。可以看到,正四边形和半圆形石笼的迎水侧压力较大,正四边形和正三角形的背水侧压力较小,为了更进一步分析它们受压力情况,提取了各形状模型的纵向对称面上的点,以床面迎水侧为起点,绕周长长度为X轴,绘制了压力分布曲线如图7所示。可以发现,半圆形石笼的两侧压力差很小,而其它两种石笼结构的压力差较大。在半圆形石笼的表面压力分布较为平缓,没有出现压力突变的情况,而另外两种结构在靠近各自棱边的地方都存在压力突变,这有可能导致结构在压力不平衡状态下倾覆。

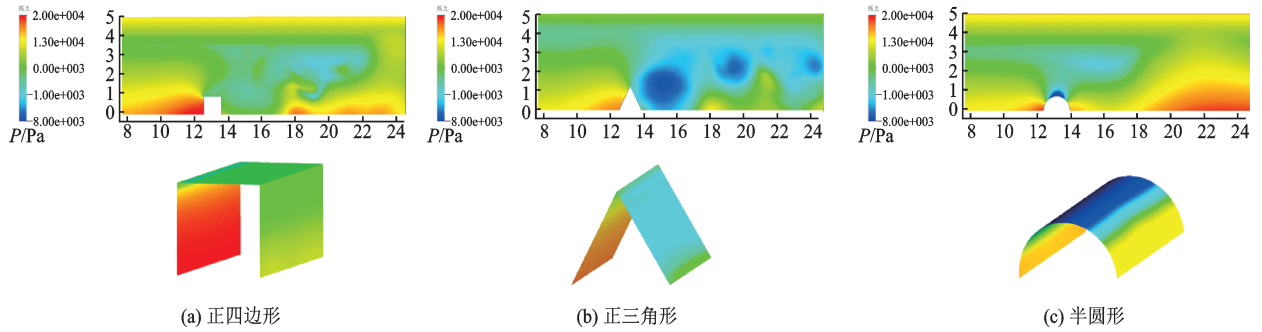


图6 石笼表面压力分布云图

Fig.6 Contour of surface pressure distribution on the gabions

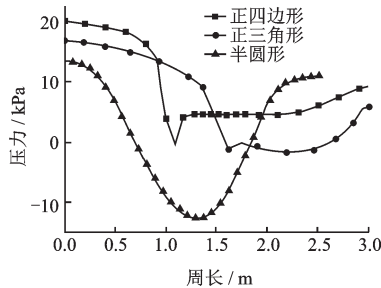


图7 石笼表面压力分布曲线

Fig.7 Surface pressure distribution curve of the gabions

2.3 阻力计算

石笼结构没有地基基础,施工时通常都是直接放置在河床面上,其浸没在水中的部分在流水作用下会受到一个与水流方向同向的曳力,当曳力增大到一定程度时,会推翻石笼使其离开原来的位置,严重时还会冲断石笼,因此有必要对河水的曳力进行研究。在流场分析中,研究曳力的方法主要是根据力的相互作用原理,对石笼反作用于水流上的与流体曳力大小相等、方向相反的阻力进行研究,从而可以得出曳力大小。

根据无旋运动理论,在没有边界的理想流体中,流体流经阻碍物时不会受到任何阻力,而实际流体中产生阻力的根本原因是流体具有的粘性力。根据流体力学理论,阻力是因水流在绕过障碍物流动时引起的压差和摩擦力所造成的,即由压差阻力和摩擦阻力构成,而这两部分力都与水流的粘性相关,摩擦阻力是由边界层上的剪切应力造成的,而压差阻力则是因为涡流的存在,导致障碍物迎水侧和背水侧产生压差。

阻力由压差阻力和摩擦阻力构成,但压差阻力在其中占主导地位,仅需要对压差阻力进行讨论就可得出阻力的计算式^[11]:

$$F_d = C_d A \rho U^2 / 2 \quad (1)$$

式中, C_d 为流场计算中得到的阻力系数; A 为障碍物垂直水流方向的投影面积的乘积; U 为水流速度; ρ 为水流密度。

利用流场模拟得到的阻力系数 C_d 带入上式(1)中计算了3种不同形状石笼在洪水冲击下对水流的阻力大小,结果见表1。可以看出,正三角形石笼的阻力值相比正四边形增加了21.7%,而半圆形石笼的阻力仅为正四边形石笼的22%,即在洪水来临时半圆形石笼受水流冲击力不到正四方的四分之一。

表1 不同形状石笼的阻力大小

Table 1 Resistance of the gabions with different shapes

石笼形状	C_d	A/m^2	动压水头/Pa	阻力/N
正四边形	0.659	1.000	14 667	9 665.553
正三角形	0.802	0.996	14 667	11 715.882
半圆形	0.145	1.005	14 667	2 137.348

2.4 床面剪切力

由图8可见,正四边形和正三角形的床面剪切力在下游区显著增加,且在回流区呈对称性的先增

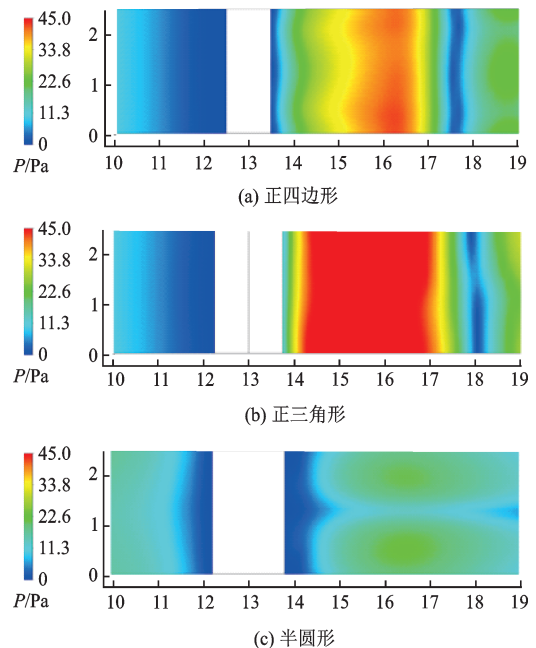


图8 石笼周围床面剪切力($Z=0\text{ m}$)

Fig.8 Shear force distribution around the gabions ($Z=0\text{ m}$)

大后减小的分布规律;正三角形的高剪切力区范围较大且靠近石笼。而半圆形的后方没有出现类似的分布规律,其床面剪切力值很小。从数值模型中提取了纵向对称面上的床面剪切力值并绘制了剪切力分布如图9所示。可以看到,半圆形石笼后方的床面剪切力曲线平缓,经过计算发现最大剪切力仅为正正方形的33.4%,平均剪切力也减小了66%,其数值远低于其它两种形状石笼,说明半圆形石笼设计具有很高的防止河床冲刷的作用。

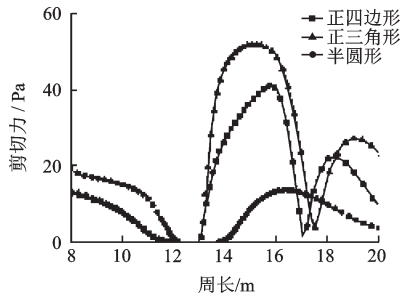


图9 床面剪切力分布

Fig.9 Shear force distribution

3 结 论

(1)数值模拟结果显示,同等截面积的半圆形石笼结构相比其它两种结构,周围水流较为平顺,石笼表面压力分布较平缓,两侧压力差最小,对水流的阻力作用较小。受到的水流曳力也仅为正四边形石笼的四分之一。

(2)半圆形石笼结构能使平均床面剪切力减少66%,可以有效防止结构在水流的冲击力下倾覆或断裂,保护周围床面不被水流冲刷的作用。

综上所述,可认为在水毁防治中半圆形石笼的设计方案比目前使用的正四边形有所提升,在抗倾覆性、抗冲击性及防床面冲刷性方面更好。

参考文献:

[1] 王成志. 探讨油气输送管道水工保护结构设计方法[J]. 中国科技投资, 2017, 13: 216.
Wang Ch Zh. Discussion on structural design method of hydraulic protection for oil and gas transmission pipeline [J]. China's Investment in Science and Technology, 2017, 13: 216. (in Chinese)

[2] 王生新, 周刚, 徐震, 等. 冲积扇上油气管道水工保护措施及破坏类型[J]. 石油工程建设, 2017, 43(5): 1-6.
Wang Sh X, Zhou G, Xu Zh, et al. Hydraulic protection

measure sand damage types of oil and gas pipelines on alluvial fan [J]. Petroleum Engineering Construction, 2017, 43(5): 1-6. (in Chinese)

[3] 刘国起, 李玉建, 侍克斌, 等. 水力插板透水丁坝在新疆多沙河流上优越性的初步研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 122-126.
Liu G Q, Li Y J, Shi K B, et al. Probe on superiority of hydraulic flashboard permeable spur dike in multi-sediment river of Xinjiang [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(1): 122-126. (in Chinese)

[4] 孙志林, 於刚节, 许丹, 等. 正态曲面丁坝三维水流数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(7): 1 247-1 251.
Sun Zh L, Yu G J, Xu D, et al. Three-dimensional numerical simulation of flow around spur dike with bivariate normal surface [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(7): 1 247-1 251. (in Chinese)

[5] Leir M, Reed M. Natural hazard database application-a tool for pipeline decision makers [C] // Proceedings of International Pipeline Conference, Calgary, Canada: IPC, 2002: 1 283-1 289.

[6] Savigny R W, Porter M, Chen J, et al. Natural hazard and risk management for pipelines [C] // Proceedings of the International Pipeline Conference, Calgary, Canada: IPC, 2002: 1 371-1 386.

[7] Leir M, Reed M, Yaremko E. Field inspection module for hydro technical hazards [C] // Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, Calgary, Canada: IPC, 2004: 2 597-2 602.

[8] Leir M, Reed M, Eugene Yaremko. Natural hazard database application-a tool for pipeline decision makers [C] // Proceedings of the International Pipeline Conference, Calgary, Canada: IPC, 2002: 1 283-1 289.

[9] 孙可欣. 石笼在河道整治工程中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 189-192.
Sun K X. Application of gabions in river improvement project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 189-192. (in Chinese)

[10] Breuer M. Numerical and modeling influences on large eddy simulations for the flow past a circular cylinder [J]. Heat Fluid Flow, 1998, 19: 512-521.

[11] 陈卓如. 工程流体力学 [M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 282-354.
Chen Zh R. Engineering fluid mechanics [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 282-354. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)