

基于流固耦合的水箱结构优化设计

秦建明¹, 何鹏², 汪溯¹, 李宁², 李攀³

¹沈阳地铁集团有限公司, 辽宁 沈阳

²沈阳盾构设备工程有限公司, 辽宁 沈阳

³成都新一驱动技术有限责任公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年12月4日; 录用日期: 2023年12月25日; 发布日期: 2024年1月25日

摘要

以隧道清洗车的水箱为研究对象, 采用单向流固耦合方法, 利用有限元分析软件Workbench对水箱内的水冲击晃动问题进行建模和数值分析。对不同端面结构的水箱在不同储水量情况下施加不同制动加速度, 形成冲击载荷, 获得了水箱在不同工况下所承受的冲击压力和最大载荷。研究结果表明水箱所受冲击载荷受水箱结构、储水量、初始速度、制动加速度的影响。通过分析, 双隔板型圆弧头水箱结构良好, 在储水量80%时, 应力值和形变量都能得到有效控制, 验证了水箱计算模型与实际水箱的相符程度, 表明所用的单向流固耦合方法具有较好可靠性, 为隧道清洗车水箱结构的优化设计提供了可靠的分析方法。

关键词

隧道清洗车水箱, 单向流固耦合, 有限元, 结构优化设计

Optimization Design of Water Tank Structure Based on Fluid Structure Coupling

Jianming Qin¹, Peng He², Shuo Wang¹, Ning Li², Pan Li³

¹Shenyang Metro Group Co., Ltd., Shenyang Liaoning

²Shenyang Shield Equipment Engineering Co., Ltd., Shenyang Liaoning

³Chengdu Xinyi Drive Technology Driving Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Dec. 4th, 2023; accepted: Dec. 25th, 2023; published: Jan. 25th, 2024

Abstract

Taking the water tank of a tunnel cleaning vehicle as the research object, a unidirectional fluid

structure coupling method was used to model and numerically analyze the water impact and shaking problem inside the water tank using the finite element analysis software Workbench. By applying different braking accelerations to water tanks with different end face structures under different water storage conditions, an impact load was formed, and the impact pressure and maximum load that the water tank was subjected to under different working conditions were obtained. The research results indicate that the impact load on the water tank is influenced by the structure of the water tank, water storage capacity, initial speed, and braking acceleration. Through analysis, it was found that the double baffle type circular arc head water tank has a good structure. When the water storage capacity is 80%, the stress value and shape variable can be effectively controlled, verifying the consistency between the calculation model of the water tank and the actual water tank. It indicates that the one-way fluid solid coupling method used has good reliability, providing a reliable analysis method for the optimization design of the water tank structure of tunnel cleaning vehicles.

Keywords

Tunnel Cleaning Vehicle Water Tank, Unidirectional Fluid Solid Coupling, Finite Element Analysis, Structure Optimization

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着地铁运营里程的不断增加,地铁运维中对地铁隧道和沿线设备的清洁作业逐渐开始采用专用的隧道清洗车来完成,以替代传统的人工清洗,极大的提高了清洗效率。隧道清洗车所需用的水通常采用水箱进行存储运输,水箱的容积决定了一次清洗作业的可持续时间。

隧道清洗车在进行清洗作业时速度一般为 8 km/h,速度较慢,水的晃动较小,但在非作业时间时,运行速度较快,在加速、减速、紧急制动等情况下,储存在水箱内水的冲击和晃动情况非常严重,水箱所受载荷明显增加。因此,为满足载有水箱的隧道清洗车安全运行的要求,在载荷一定的情况下,为增加水的携带量,延长清洗作业的可持续时间,对水箱在不同工况下的载荷进行分析,并对其结构进行优化非常有必要。

RS Ganuga 提出了一种用于液体晃动分析的流固耦合模型,通过改变罐体的激励幅值,比较了刚性挡板和柔性挡板在不同的晃动荷载作用下的力的响应[1]。黄文采用弹簧质量模型和流固耦合模型对大型储水罐进行相互验证计算[2]。汪孝凡基于流固耦合方法分析了水体与结构的相互作用,研究了外挂水箱结构的地震动响应以及水箱内水体振荡特性[3]。金斌采用流固耦合动态有限元方法,通过对典型行驶工况的分析探究了洒水车水箱内部浪涌对结构的影响[4]。李明华基于流固耦合的分析方法,采用 RNG κ - ϵ 的湍流模型,分析了管道的速度和压力分布[5]。李小珊研究了制动力对方形水罐的影响,并对比了几种防浪板对抑制水罐晃动的作用[6]。李保元利用 VOF 模型对水罐进行了加压数值模拟,确定了最佳的内腔体积与空气压缩比例[7]。刘小明采用双向流固耦合方法,对运动罐车在刹车过程中罐体内液体的晃动现象进行了数值分析,获得了罐体结构应力随时间的变化历程[8]。

本文通过对水箱不同储水量和不同运行速度等多种工况进行分析,确定储水量和运行速度对水箱冲击的影响规律。选择在最不利的工况条件,基于欧拉-欧拉多相流模型,采用单向流固耦合方法对水箱

的受力和变形进行分析, 根据分析结果在水箱内部增加了不同结构尺寸的隔板, 在保证足够安全的情况下, 降低水对水箱的冲击影响, 减轻水箱的自重, 为地铁隧道冲洗车水箱结构的设计及优化提供了更有效的参考。

2. 模型与计算方法

2.1. 整体结构模型

隧道清洗车所用水箱长约为 6 米, 为不规则的椭圆形结构, 最多可容纳水 23 t。水箱材料均采用 06Cr19Ni10 不锈钢, 这种材料具有良好的耐腐蚀性, 耐热性、低温强度和机械特性[9]。水箱的侧壁和前后两个端面均采用薄壁结构, 端面有平头和圆弧头两种常用结构, 如图 1 所示。

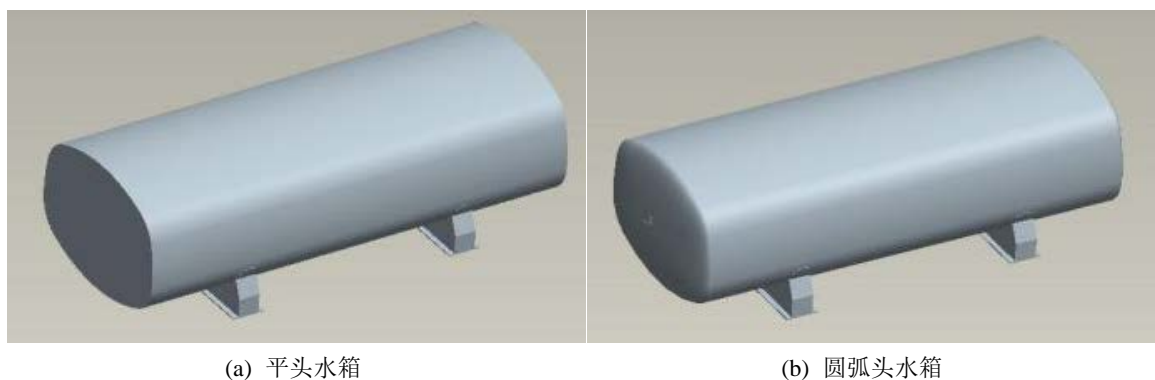


Figure 1. Two finite element models of water tanks
图 1. 两种水箱端面结构示意图

水箱作为一个常压容器, 端面为平头的水箱结构简单, 加工难度低, 可满足基本需要。端面为圆弧头的水箱加工难度有所增加, 其抗压能力更强, 也被经常使用。

2.2. 单向流固耦合

水箱内水的晃动属于较为典型的流固耦合问题, 可视为空气 - 水 - 箱体三相介质的相互耦合, 箱体作为固体域, 刚性较好, 变形量较小, 采用单向流固耦合合法求解较为理想。在计算时, 将流体域的计算结果作为外部载荷通过流固耦合交界面传递给固体域, 流体域和固体域的计算数据单向传递完成耦合计算。

在流体域的分析计算中, 利用 Workbench 划分网格, 选用 fluent 分析系统, 使用 VOF 模型定义气液两相流, 对箱内储水量和箱体运动速度及加速度进行设置, 通过迭代求解直至流体域计算收敛, 获得在不同工况下箱体内水的运动情况, 以及不同工况下水对箱体的作用力。将这个作用力作为载荷通过流固耦合的方式加载到在固体域, 完成固体域的计算, 获得箱体的应变及应力情况, 为箱体的优化设计提供数据支持。

2.3. 水箱结构模型

由于水箱体积较大, 水管、气孔、安装基座等相关辅件较为复杂, 因此在建立水箱结构模型时进行了简化, 不考虑水箱相关辅件, 仅分析水箱内水对箱体的影响。将简化后的平面水箱和圆弧水箱模型分别导入 Workbench 软件进行网格划分, 平头水箱网格总节点数为 148,457 个, 总单元数为 75,265 个, 圆弧头水箱网格总节点数为 159,375 个, 总单元数为 79,903 个, 划分网格如图 2 所示。

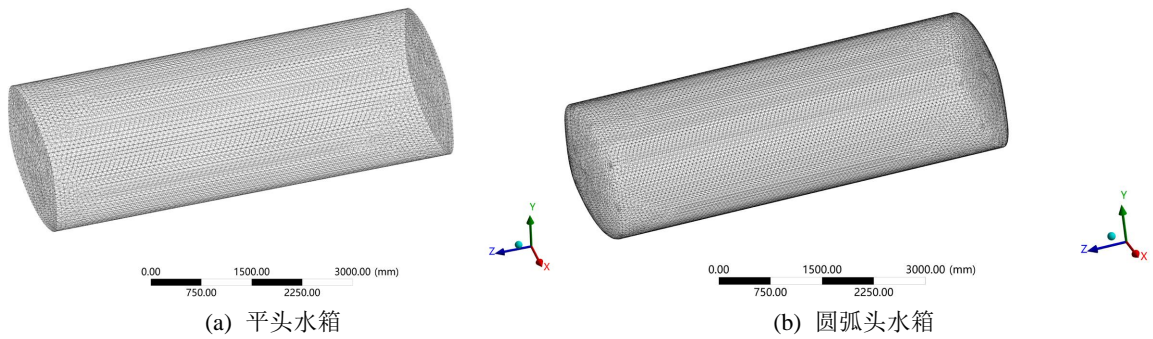


Figure 2. The maximum impact pressure generated by water on the box
图 2. 两种水箱有限元模型

2.4. 边界条件和工况

由于箱体的前后端面 and 侧面都受到水的冲击，选择所有的箱体内壁面为流固耦合面。固体域边界条件：对安装底座对应位置施加全约束。

当水箱随清洗车在轨道上运行过程中，在加减速和紧急制动时，都会产生一个加速度，从而引起水箱内水的晃动。

工况设置最高运行速度为 16 m/s (57.6 km/h)，制动加速度为 -4 m/s^2 ，水箱在 4 秒内停止运动，水箱内的储水量分别设置为 50%、60%、80%、90%。

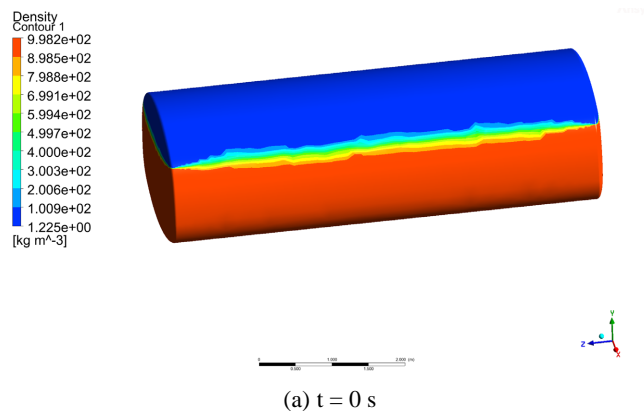
3. 结果分析

3.1. 箱体内水的运动对箱体的影响

(1) 水箱内气液瞬态分布

根据以上的计算方法和工况条件，对不同水位的箱体结构进行瞬态分析。图 3 为初始运行速度 16 m/s，制动加速度 -4 m/s^2 ，80% 储水量冲击下，水箱在不同时刻内部气液两相体积的瞬态分布情况，图中上部蓝色为空气的体积分布，下部红色为水的体积分布。

在相同工况条件下，平头水箱和圆弧头水箱气液两相瞬态分布基本相同，以圆弧头水箱为例。t = 0 s 时，水箱内的水和空气界限分明，当开始制动时，水在惯性的作用下继续往前运动而产生涌动式冲击，在 t = 0.6 s 时，水对水箱的前端面产生最大的冲击力，之后水往后端面移动，前端面受到的冲击力逐渐减小，当 t = 1.15 s 时，前端面受到水的冲击力达到一个低值，之后又逐渐增大，但都不会超过 t = 0.6 s 时的峰值，当 t = 4 s 时，箱体停止移动，箱体前半部充满水，之后进入振荡衰减直至完全停止晃动。



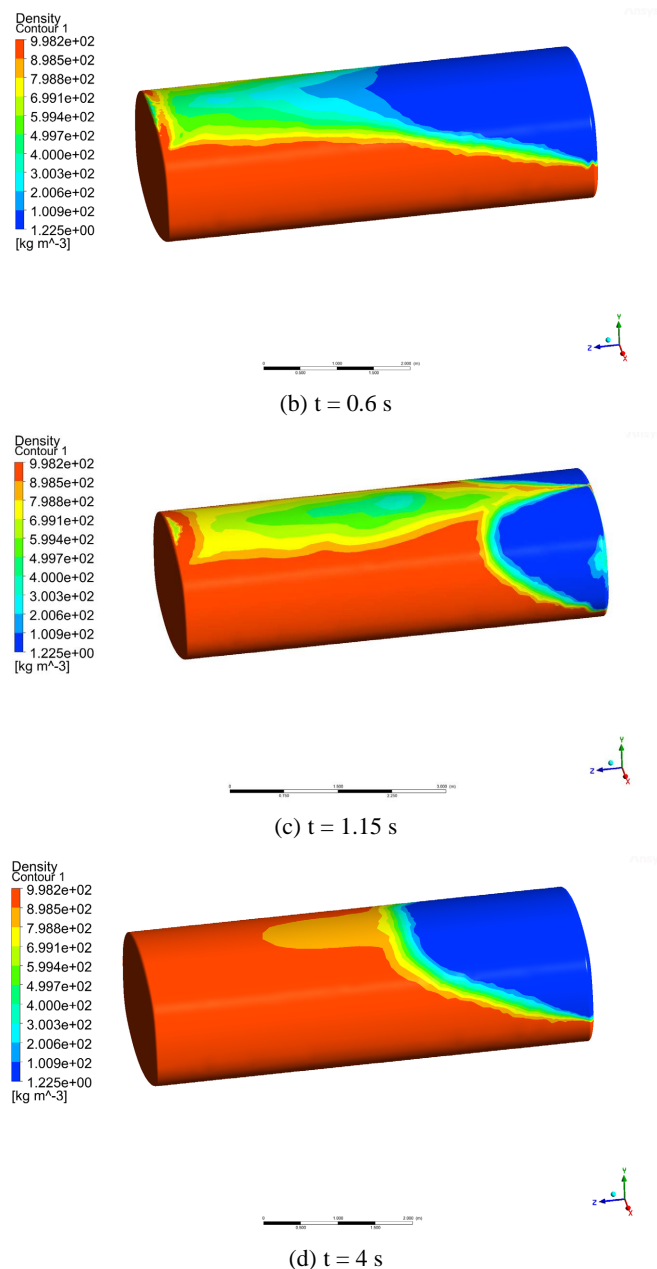


Figure 3. Transient distribution of gas-liquid two-phase flow in an 80% water storage tank (circular arc head water tank)

图 3. 80%储水量箱体内气液两相瞬态分布(圆弧头水箱)

(2) 最大冲击压力

$t = 0.6 \text{ s}$ 水对箱体的冲击力达到峰值, 如图 4 所示。水的冲击力主要作用在水箱的前端面, 从下至上呈阶梯状分布, 最大的压力为 $3.76\text{e}4 \text{ Pa}$ 。平头水箱受到的最大冲击力分布与图 4 非常接近, 最大的压力为 $3.68\text{e}4 \text{ Pa}$, 也非常接近。在其他条件相同的情况下, 水箱端面的结构形状对最大冲击压力基本不产生影响。

(3) 水箱前端面载荷分布

水箱前端面不同时间阶段受到的载荷分布如图 5 所示。水箱前端面在 0.6 s 时承受最大的冲击载荷, 之后迅速下降进入调整, 即一次制动只会对水箱前端面造成一次集中载荷。圆弧头水箱最大的载荷为

124.2 KN。平头水箱受到的最大载荷为 129.2 KN，也非常接近，在其他条件相同的情况下，水箱端面的结构形状对最大载荷影响非常小。

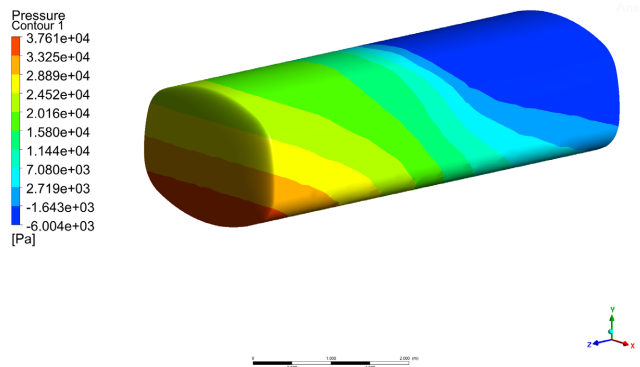


Figure 4. The maximum impact pressure generated by water on the box (80 % circular, arc head water tank)

图 4. 水对箱体产生的最大冲击压力(80%储水量，圆弧头水箱)

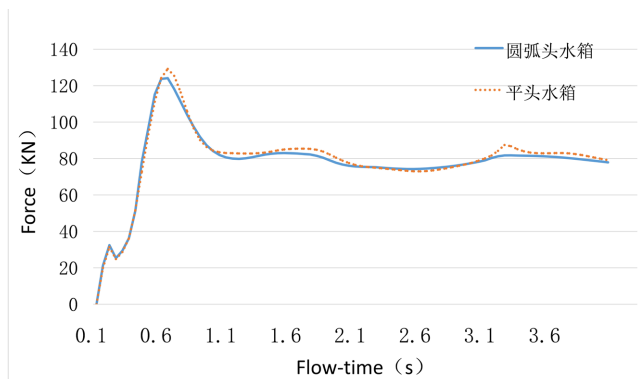
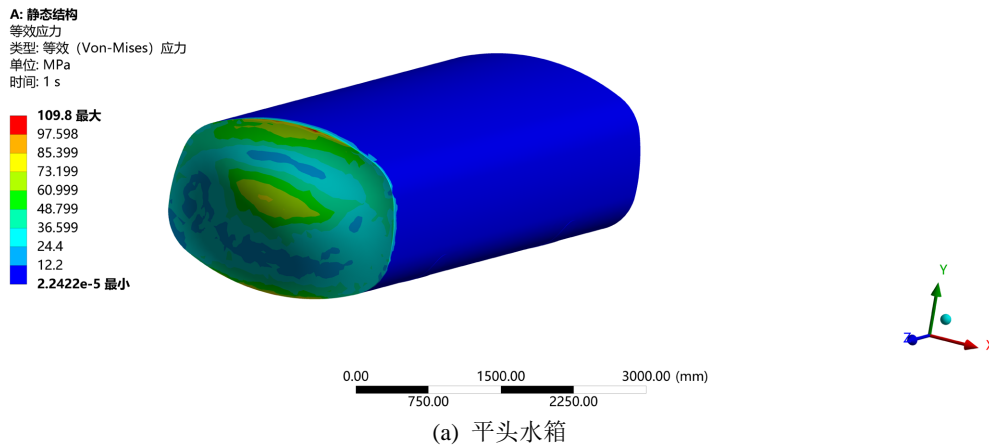


Figure 5. Load distribution at different time points on the front end face of the water tank

图 5. 水箱前端面不同时间点载荷分布

(4) 水箱固体域分析

将上述流体域的计算结果通过单向流固耦合的方式传递给固体域，水箱壁厚为 5 mm，可得到水箱在承受最大载荷时的应力和应变值。



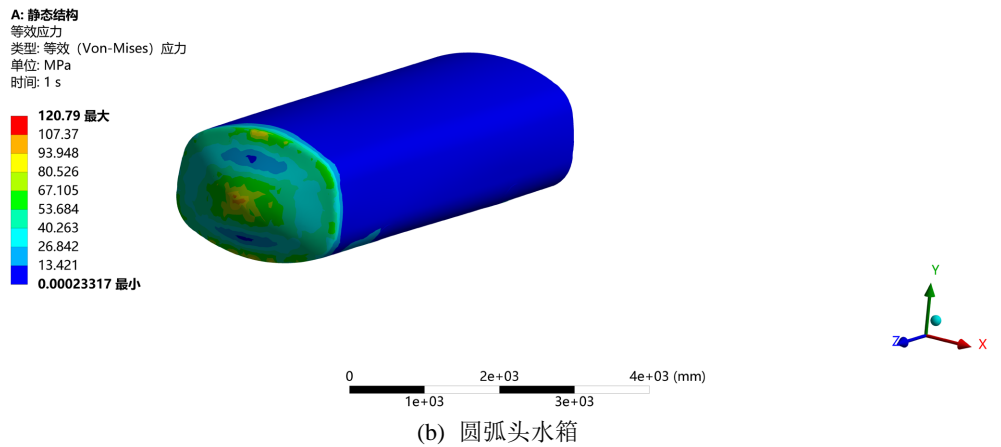


Figure 6. Stress cloud map of water tank under maximum load
图 6. 水箱在承受最大载荷时应力云图

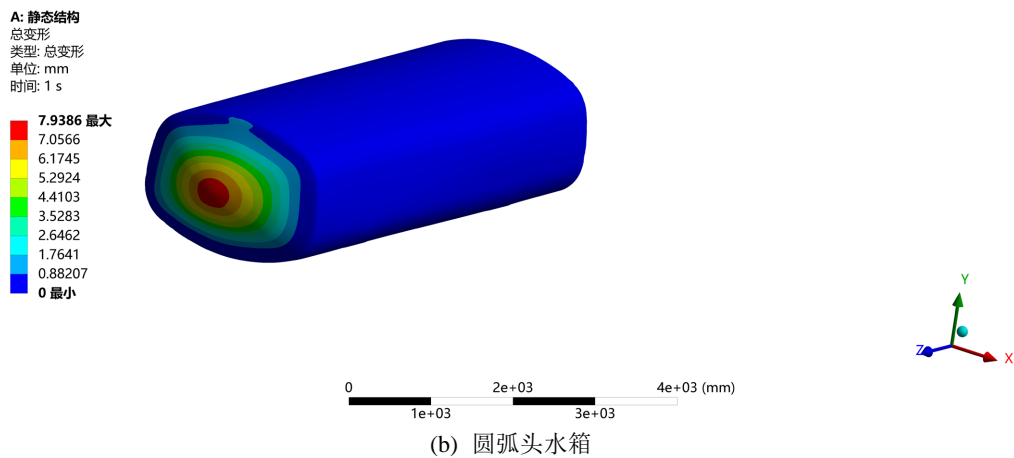
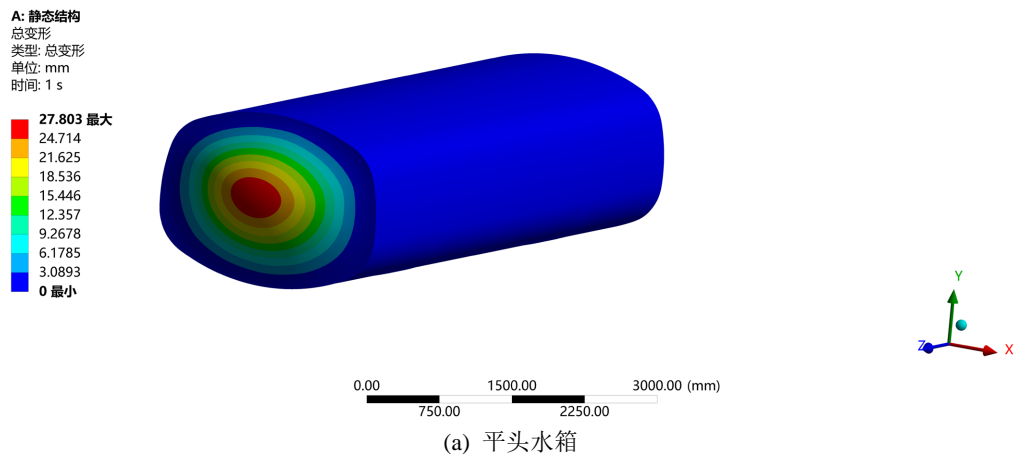


Figure 7. Cloud diagram of deformation of water tank under maximum load
图 7. 水箱在承受最大载荷时形变云图

如图 6 和图 7 所示, 应力最大值发生在水箱前端面下部, 应变最大值发生在水箱前端面中间位置, 在承受载荷非常接近的情况下, 平头水箱产生的应力值 109.8 MPa, 形变量 27.8 mm, 圆弧头水箱产生的应力值 120.7 MPa, 形变量 7.9 mm。这两种箱体结构的应力值都在材料的屈服极限(252 MPa)以内, 但平

头水箱的形变量太大,反复冲击容易对焊缝造成不利影响。本文后续分析均采用圆弧头水箱,其应力相对较大,形变量相对较小,水对水箱的冲击影响较大,现有水箱的结构需要进行优化。

3.2. 不同储水量对箱体的影响

在初始速度(16 m/s)和制动加速度(-4 m/s²)均不变的情况下,水箱内的储水量分别设置为 50%、60%、80%、90%,对水箱前端面的载荷分布如图 8 所示。

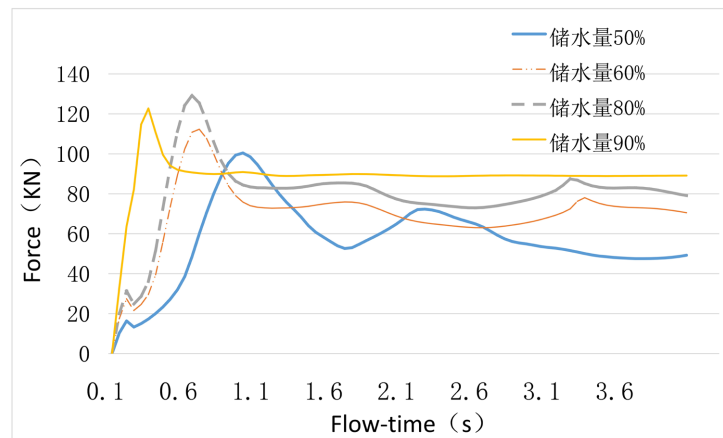


Figure 8. Load distribution on the front end face of the box with different water storage capacities

图 8. 不同储水量对箱体前端面的载荷分布

如图 8 所示,储水量 90%时,最大冲击力在 0.3 s 时产生,随着储水量的减少,产生最大冲击力的时间也逐渐延后,储水量为 50%时,最大冲击力在 0.95 s 时产生。储水量 90%时,最大冲击力过后,箱体内部的水波振荡衰减的最快,随着储水量的减少,水波振荡衰减所需的时间越长,当储水量为 50%时,冲击力还会出现第二、第三次较为明显的峰值。

Table 1. Load distribution under different water storage capacities

表 1. 不同储水量时载荷分布

储水量	50%	60%	80%	90%
端面最大载荷(KN)	100	112	129	122
最大载荷发生时间(s)	0.95	0.65	0.6	0.3

如表 1 所示为不同储水量时对应的载荷分布情况,储水量从 50%逐渐增大到 80%的过程中,随着储水量的增加,最大载荷也随之增大,但当储水量为 90%时,最大载荷反而比 80%时小,这是因为当水箱接近装满时,没有足够的空间形成浪涌,前端面受到的载荷反而减小了。储水量处于 80%左右时,水箱受到的冲击载荷最大,稳定性最差,后续分析均将储水量设置为 80%。

4. 水箱结构优化设计

4.1. 单隔板水箱

水对水箱端面的冲击造成了较大的应力和应变,水箱内部的水波振荡衰减速度较慢,为改善这一情况,在水箱中间位置设置一个隔板,以减少水的晃动和减小对水箱端面的冲击,隔板结构如图 9 所示。

如图 9 所示,单隔板将水箱平均分为 2 个互通的舱室,中间留有人孔,上下两端开口以连通两个舱

室，单隔板的有效横断面积约为 80%。

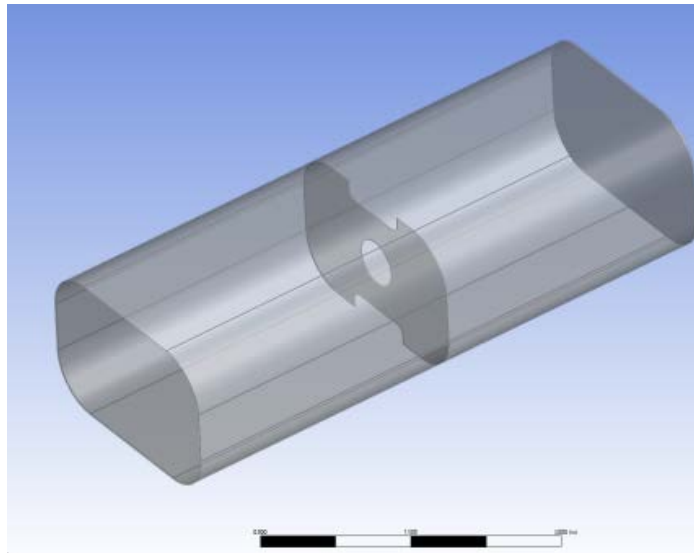


Figure 9. Schematic diagram of single partition water tank structure
图 9. 单隔板水箱结构示意图

采用流固耦合的计算方法对流体域进行计算，保持初始速度(16 m/s)和制动加速度(-4 m/s^2)不变，在储水量为 80%的情况下，对设置有单隔板的水箱进行流体域仿真分析。水对水箱产生的最大冲击力如图 10 所示。

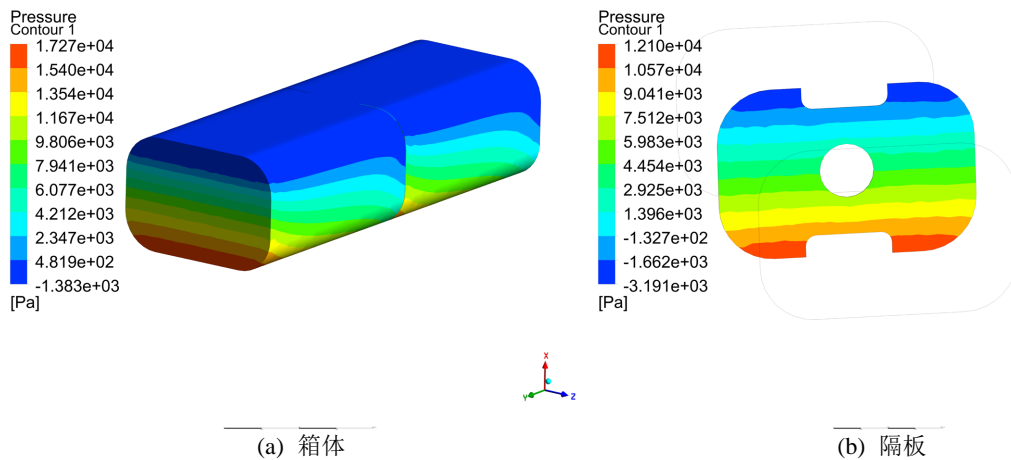


Figure 10. Maximum impact pressure generated by water impact (single partition)
图 10. 水冲击产生的最大冲击压力(单隔板)

由于有隔板的抑制，当发生紧急制动时，隔板阻断了部分水箱后部的水对前端面的冲击，前端面受到的冲击力由没有隔板时的 $3.76\text{e}4 \text{ Pa}$ 大幅度减小到 $1.71\text{e}4 \text{ Pa}$ ，隔板承受了部分冲击力。设定水箱从运动到制动结束总用时为 4 s，分别对不同初速度(8~16 m/s)和不同制动加速度($-2\sim-4 \text{ m/s}^2$)进行分析，载荷分布如图 11 和图 12 所示。

随着初始速度的提高，水箱前端面受到的最大冲击载荷也随之升高，最大冲击载荷发生的时间也随之提前。隔板所受冲击载荷会形成 2 次波峰，具体数值见表 2。

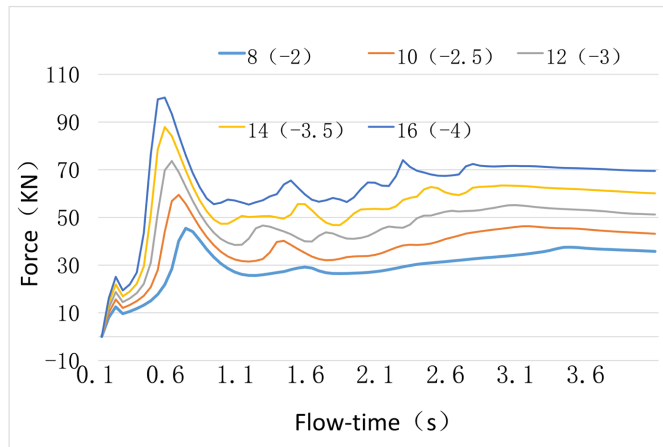


Figure 11. Load distribution of water on the front end face of the water tank under different working conditions
图 11. 不同工况下水对水箱前端面的载荷分布

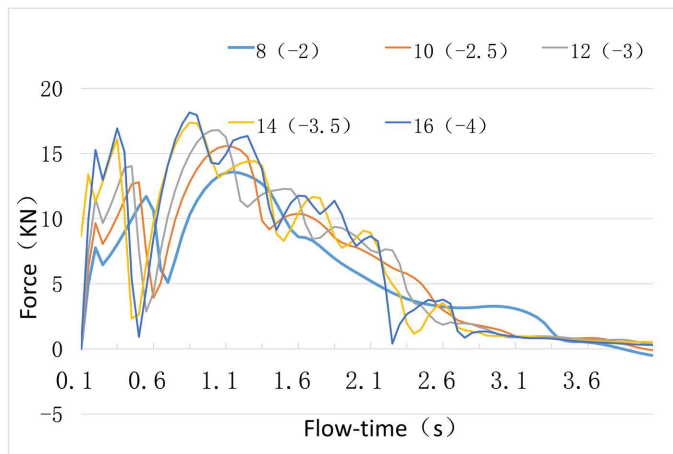


Figure 12. Load distribution of water on partitions under different working conditions
图 12. 不同工况下水对隔板的载荷分布

Table 2. Load distribution of a single partition at different speeds
表 2. 不同速度时单隔板载荷分布

初始速度(m/s)	8	10	12	14	16
制动加速度(m/s ²)	-2	-2.5	-3	-3.5	-4
端面最大载荷时间(s)	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
端面最大载荷(KN)	45.5	59.5	73.6	87.9	100.2
隔板第一次峰值(KN)	11.7	12.7	14	17.3	17.9
隔板第二次峰值(KN)	13.6	15.8	16.7	14.4	18.1
隔板/端面载荷比值	29.8%	26.5%	22.7%	19.6%	18%

随着初始速度的提高，水箱前端面受到的最大冲击载荷逐渐升高，发生最大载荷的时间也逐渐提前，初始运行速度对水箱所受冲击与水箱实际工作中的情况完全一致。隔板所受到的冲击载荷数值远小于前端面，所占比值随着速度的提高而逐渐减小，从 29.8% 逐渐降低到 18%，速度越快，隔板为前端面承担的载荷数值越高，但所占比值却呈下降趋势。在水箱中间增加隔板，可有效减小水箱前端面所受到的

冲击载荷。

4.2. 双隔板水箱

为了进一步验证隔板对水箱冲击载荷的影响，在水箱内部设置双隔板，双隔板结构如图 13 所示。

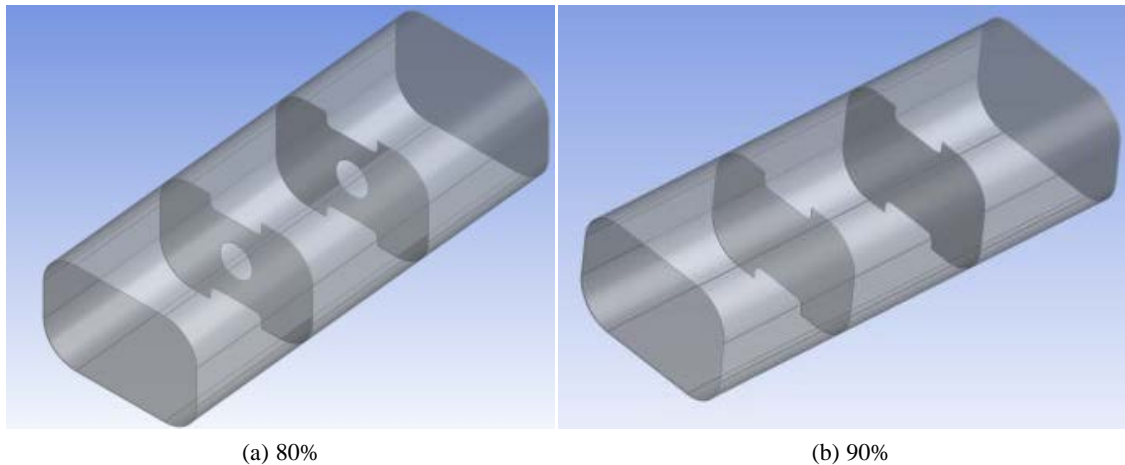


Figure 13. Schematic diagram of double partition water tank structure
图 13. 双隔板水箱结构示意图

在长度为 6 米的水箱内部均匀设置 2 个隔板，隔板与端面之间的间隔为 2 米，2 个隔板将水箱分为 3 个互通的舱室，中间留有人孔，上下两端开口，每个隔板的有效横断面积约为 80%。当把中间的人孔去掉后，每个隔板的有效横断面积增大到 90% 左右。

采用流固耦合的计算方法对流体域进行计算，同样保持初始速度(16 m/s)和制动加速度(-4 m/s^2)不变，在储水量为 80% 的情况下，对设置有双隔板的水箱进行仿真分析。水对水箱产生的最大冲击力如图 14 所示。

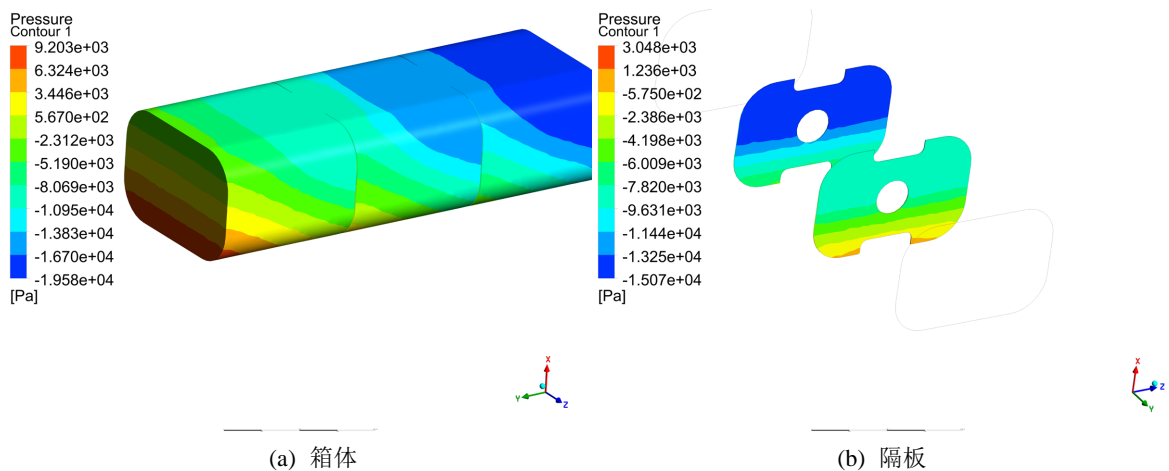


Figure 14. Maximum impact pressure generated by water impact (80%)
图 14. 水冲击产生的最大冲击压力(80%)

由于有双隔板的抑制，当发生紧急制动时，双隔板部分阻断了水箱后两个部分的水对前端面的冲击，前端面受到的冲击力由没有隔板时的 $3.76 \text{ e}4 \text{ Pa}$ 大幅度减小到 $9.2 \text{ e}3 \text{ Pa}$ ，双隔板承受了大部分冲击力。按文中 3.1 所设置的初始条件，对双隔板进行分析，结果如表 3 所示。

Table 3. Distribution of impact load on double baffles at different speeds
表 3. 不同速度时双隔板冲击载荷分布

初始速度(m/s)		8	10	12	14	16
制动加速度(m/s ²)		-2	-2.5	-3	-3.5	-4
横断面积 80%	端面最大载荷(KN)	26.9	44.2	61	75.8	89.1
	前隔板最大载荷(KN)	20.3	24.6	27.5	30.3	32.6
横断面积 90%	端面最大载荷(KN)	25.4	41.4	55	69.8	84.4
	前隔板最大载荷(KN)	23.8	28.8	33.3	36.7	38.2

当有双隔板时，水箱前端面所受到的最大冲击载荷明显比单隔板时低，前隔板所承受载荷明显大于单隔板时所受载荷，即前后两个隔板可为前端面分担更多的冲击载荷。双隔板水箱可更有效降低水对水箱的冲击，抑制水的晃动，提高水箱的安全性。

4.3. 水箱受力分析及结构优化

根据上述分析，得到了水箱的不同结构在不同工况下受到的载荷情况，如表 4 所示。

Table 4. Load distribution of water tanks with different structures under different working conditions
表 4. 不同结构水箱在不同工况下的载荷分布

初始速度(m/s)		8	10	12	14	16
制动加速度(m/s ²)		-2	-2.5	-3	-3.5	-4
前端面最大载荷 (KN)	无隔板	62.7	79	95.2	112.3	129
	单隔板	45.5	59.5	73.6	87.9	100.2
	双隔板(80%)	26.9	44.2	61	75.8	89.1
	双隔板(90%)	25.4	41.4	55	69.8	84.4

在相同的初始速度和制动加速度的情况下，设置有 90%横断面积双隔板的水箱前端面受到的载荷最小，部分载荷被隔板承受并传递给了箱体，使箱体能均衡受力，这个结构最为合理。

对横断面积为 90%的双隔板水箱进行结构受力分析，将上述流体域的计算结果通过单向流固耦合的方式传递给固体域，得到水箱在承受最大载荷时的应力和应变值如图 15 和图 16 所示。

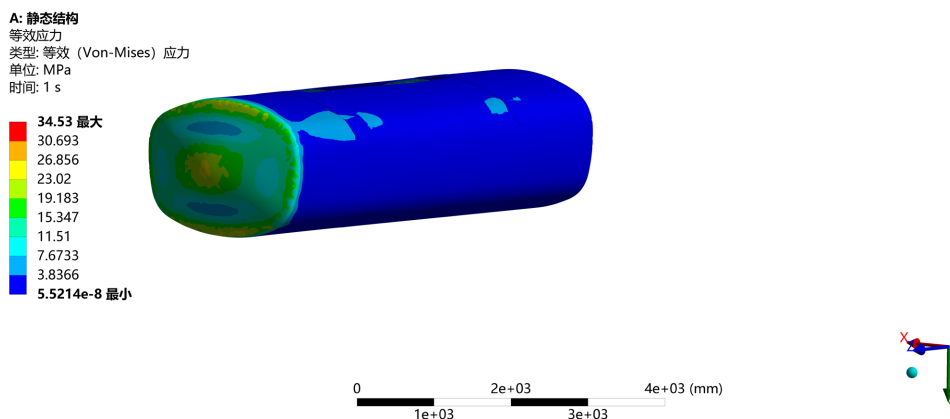


Figure 15. Stress cloud map of double partition (90%) water tank
图 15. 双隔板(90%)水箱应力云图

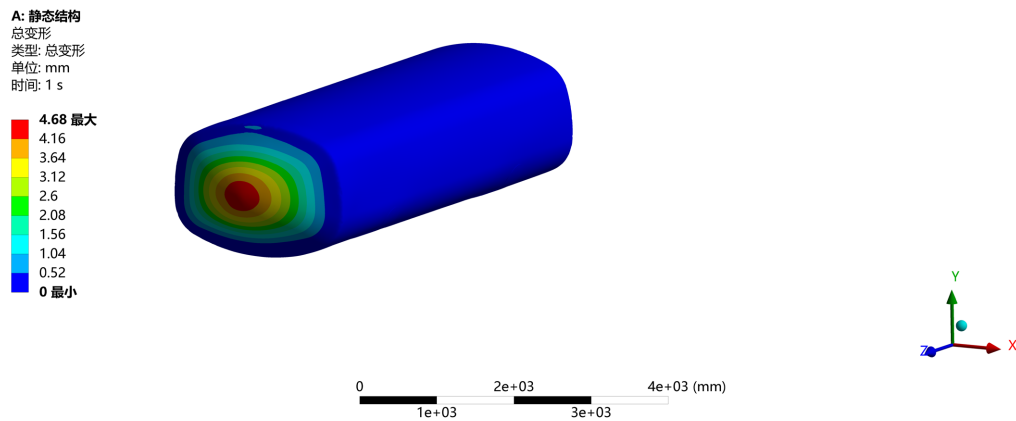


Figure 16. Double partition (90%) water tank deformation cloud map

图 16. 双隔板(90%)水箱形变云图

水箱壁厚为 5 mm，水箱的应力和应变均发生在水箱前端，因为计算条件设置加速度为负值，水箱逐渐停止运动，水在惯性力的作用下对水箱前端产生冲击，如在加速启动的过程中，则后端面承受冲击载荷。最大应力为 34.53 MPa，最大应变为 4.68 mm，远低于材料的强度极限(252 MPa)，安全系数很高，为了更有效利用好隧道清洗车的承载能力，需要降低水箱自重，在保持清洗车总负载和尺寸不变的情况下，尽可能的多装水，以延长有效的清洗作业时长。

将水箱的前后端面、箱体、前后隔板分布设计为不同厚度，采用流固耦合的计算方法，计算结果如表 5 所示。

Table 5. Structural analysis of water tanks with different thicknesses

表 5. 不同厚度水箱结构分析

工况	端面隔板(mm)	箱体隔板(mm)	隔板(mm)	最大应力(MPa)	最大应变(mm)
1#水箱	5	5	4	34.5	4.6
2#水箱	5	4	4	40.9	5.1
3#水箱	4	4	4	75.7	7.8
4#水箱	4	3	3	78.5	8.3
5#水箱	3	3	3	110.2	10.5

当水箱的厚度均采用 3 mm 厚(5#水箱)的不锈钢时，其最大应力值为 110.2 MPa，最大的应变值为 10.5 mm，安全系数仍然较高，完成满足水箱这种常压容器的使用需求。

经过优化后的水箱自重由原来的 1.79 t，降低到了 1.21 t，在改变车辆承载能力和尺寸的情况下，可多装 0.58 t 水，可有效延长有效清洗作业时长。

5. 结论

本文基于有限元与单向流固耦合两种理论，以隧道清洗车的水箱为模型，利用有限元分析软件 Ansys Workbench 分别建立了水箱与流体的有限元模型。使用单向流固耦合方法，对平头、圆弧头两种端面结构的水箱在不同储水量、不同制动加速度的工况下施加冲击载荷进行计算，并将流体域的计算结果传递给固体域进行分析，得出以下结论：

- (1) 通过单向流固耦合得到了不同端面结构在冲击载荷作用下的应力和应变值，结果表明圆弧头端面

结构优于平头端面结构, 储水量不同时, 水箱受到的冲击载荷随储水量的增加而增大, 当储水量超过 80% 时, 由于没有浪涌形成的足够空间, 冲击载荷反而减小了。

(2) 在水箱内部增设隔板可有效减小水的冲击力, 对于容积为 23 t 的水箱, 双隔板的设计可有限抑制水的晃动对水箱的冲击, 当横断面积减小时, 抑制效果更明显。

单向流固耦合的计算结构与实际情况相吻合, 为地铁隧道冲洗车水箱结构的设计及优化提供了有效的参考。

参考文献

- [1] Ganuga, R.S., Viswanathan, H., Sonar, S., *et al.* (2014) Fluid-Structure Interaction Modeling of Internal Structures in a Sloshing Tank Subjected to Resonance. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, **41**, 145-168. <https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.v41.i2.40>
- [2] 黄文, 谭添才, 马建中. 基于两种模型下的储水罐应力计算[J]. 核动力工程, 2016, 34(2): 127-128.
- [3] 汪孝凡, 曹学武. 安全壳外挂水箱结构强度分析[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(3): 494-502.
- [4] 金斌, 姜永正, 戴德志, 等. 基于流固耦合的大型矿用洒水车矿区行驶防浪涌分析[J]. 矿山机械, 2021, 49(8): 52-56.
- [5] 李明华, 冯佳荟, 韩雯静. 基于流固耦合的供水管道的振动特性分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(1): 155-160.
- [6] 李小珊. 液罐汽车方形罐体罐内动力学行为的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 太原理工大学, 2011.
- [7] 李保元, 郭红波. 井下巷道喷雾降尘用加压水罐的结构优化设计[J]. 煤炭技术, 2015, 34(3): 212-214.
- [8] 刘小民, 王星, 许运宾. 运动罐体内液体晃动的双向流固耦合数值分析[J]. 西安交通大学学报, 2016, 46(5): 120-126.
- [9] 王龙益, 赵泽福, 李国芳, 等. 基于双向流固耦合的铁路客车水箱的强度分析[J]. 机械强度, 2021, 43(2): 464-469.