•水利工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202300362

本刊网刊

排水用PVC轴向中空壁管力学性能及结构优化分析

唐鹏飞[1],胡少伟[2*],刘国安[1],叶宇霄[2],潘福渠[3],侯兆光[3]

(1.广西大学 土木建筑工程学院,广西 南宁 530004;2.郑州大学 黄河实验室,河南 郑州 450001;3.山东东信塑胶科技有限公司,山东 聊城 252000)

摘　要:轴向中空壁管具有节省材料、轻便易施工、成本低等众多优点,对其进行结构创新可进一步提高其优势。基于外压、内压、抗冲击和埋地模型试验及仿真分析,分析拱形孔轴向中空壁PVC管的基本受力特性,再通过有限元对不同孔形的结构壁管和实壁管进行对比分析,研究结构壁孔形的影响机制,最后分析管壁布局形式对管道刚度和强度性能的影响。结果表明:随着变形的增大,实壁管外压承载力与结构壁管的比值逐渐增大,说明结构壁管刚度退化较快;外压、内压、抗冲击和埋地力学性能均表明管壁的孔形具有圆形孔>拱形孔>矩形孔的效果;圆孔中空壁管截面惯性矩相对较大,抗变形能力在中空壁管中最高;孔心偏内可提高刚度;由于轴向中空壁管的特殊受力形式,圆孔中空壁管的孔角弧长增加有效壁厚,且减少应力集中,因此荷载作用下应力相对较低。最后得出,轴向中空壁从结构上来说宜优先选择圆孔结构,根据不同的主导工况选择孔数量和孔心偏心距可进一步提高结构性能。本研究可为中空结构壁管的结构设计提供技术支撑,发挥结构壁管道的优势,增加排水管道的种类。

关键词:轴向中空壁管;PVC;力学性能;管壁布局;结构优化

中图分类号:TV35;TU992.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2096-3246(2025)03-0192-09

中国排水管道铺设里程逐年递增,2020年已达到80.27×10^4 km[1],塑料管道作为排水管道的主力大军,在各类管道中市场占率已达到55%[2],且每年塑料管材增速达到20%以上[3],已是世界上最大的塑料管道生产国[4]。而塑料中空壁管相比于实壁管更加节约材料,能充分利用结构性能,在一定条件下相比于实壁管更具性价比[5-6]。

塑料结构壁管来源于欧洲,中国于21世纪初引进该类产品[7]。目前,轴向中空壁管(AHWP)普及率没有国外高,属于小众管道,结构壁管道主要为高密度聚乙烯(HDPE)径向中空壁缠绕波纹管。AHWP属于结构壁管材的一种[5],有研究[6]表明,其全生命周期成本与钢筋混凝土管相比降低了60%~70%,在市政排水工程中具有广阔的应用前景。彭菁[8]综合对比了塑料结构壁排水管的标准与国际标准,分析认为,中国的结构壁管创新性高,发展状况较好。关于结构壁管的力学性能研究基本集中在径向中空壁缠绕管,如魏超[9]进行了HDPE波纹管的各项力学特性研究,Fang等[10]进行了HDPE双壁波纹管在交通–污水耦合作用下力学响应研究。目前对于AHWP的研究主要集中在仿生结构壁管的耗能研究,如仿方竹结构[11]、甲虫鞘翅[12]和虾蟹结构[13]壁管等,这些结构壁管主要作为吸能元件,研究其抗冲击性能较多。现有的AHWP的力学性能研究相比于径向中空波纹管明显偏少,只有研究模拟施工工况下的落石冲击性能[14],其他力学性能研究未见报道。

结构壁管可通过优化设计提升性能,目前也有较多的结构优化研究,如刘晓阳等[15]通过一种算法对PE缠绕结构壁管进行了最优截面类型和尺寸设计;张建富等[16]以HDPE实壁管为原料,通过焊接或黏结不同截面形状的小管、纤维制成一种新型增强型PE结构壁管材。径向中空壁缠绕结构管使用率、研究率均相对较高,结构优化研究也较多,但对于AHWP的研究较少,尤其在材料与结构创新方面鲜见报道。大多AHWP为矩形孔双层薄壁结构[6,14],该类结构可进一步创新,创新后将产生更大的社会效益。

收稿日期:2023－05－13　　**修回日期**:2023－09－15　　**网络出版日期**:2024－04－17

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52130901);重庆市自然科学基金创新群体科学基金项目(cstc2020jcyj–cxttX0003);泰山产业领军人才工程专项经费资助(tsex202306104)

作者简介:唐鹏飞(1994—),男,博士生. 研究方向:新型埋地管道结构设计;埋地管道损伤机理及修复. E-mail:tpf@st.gxu.edu.cn

* **通信作者**:胡少伟,教授, E-mail:hushaowei@zzu.edu.cn

先进行了实壁管和AHWP的耗能和经济效益对比，然后基于试验，再通过有限元计算比较了几种孔形的AHWP的常用性能，如环刚度、环柔性、耐内压、抗冲击性以及埋地性能，获得了结构壁的最佳孔形设计，进行了机理分析，对最佳孔形中空壁的结构进行了优化分析，达到了优化AHWP管结构的目的，可进一步降碳节能，提高结构利用率。

1　PVC–AHWP及其材料性能

1.1　AHWP结构形式

新型塑料结构壁管大致可分为新型结构和新型配方两大类[7]。目前使用较多的为矩形孔中空壁管（RAHWP），本文试验用管道如图1所示的PVC–U拱形孔轴向中空壁管（AAHWP），其外径D=200 mm，壁厚5.5 mm。在此基础上，再设计一种圆孔新型轴向中空壁管（CAHWP），3种结构壁如图2所示。

在对不同截面的管道进行力学性能分析前，进行了材料参数、耗材和经济性能对比，如表1所示。由于实壁管熔体压力大模具长。管壁熔融冷却慢，耗材多，导致生产成本高。AHWP由于熔体压力小，模具短，且米重轻、耗材少、生产速度快，因此总成本均低于实壁管，可见其节能减碳效果明显。在AHWP中，除RAHWP每吨总成本稍低些许外，其他指标大致相同（本文设计的几种AWHP体积相同，因此耗材相同）。由于RAHWP目前已相对普遍，生产技术娴熟，工人技术要求低，模具简单，因此成本相对低。但随着几种AHWP的普及，除模具成本外，不同AHWP的每吨生产造价及其他经济技术指标将会相同。

图1　拱形孔轴向中空壁管
Fig. 1　AAHWP

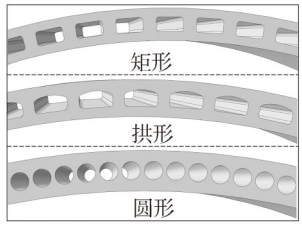


图2　不同孔形状的AHWP截面
Fig. 2　AHWP sections with different hole shapes

表1　不同截面的管道材料参数、耗材及经济性能对比
Tab. 1　Comparison of pipe material parameters, consumables and economic performance of different sections

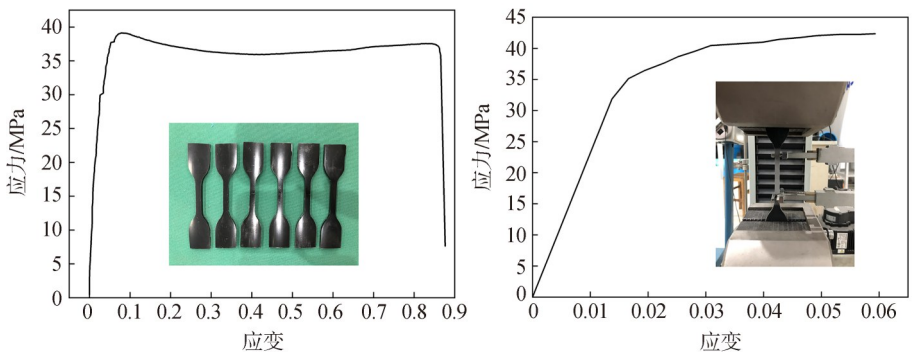
管类型	孔数	横截面面积/mm^2	米重/($kg\cdot m^{-1}$)	轴向截面惯性矩/mm^3	模具成本/(万元·套$^{-1}$)	单支生产时间/min	人工/(元·吨$^{-1}$)	每吨耗电/度	每吨生产造价/元
实壁管		3 361.0	5.13	15.80	20	15.0	252	410	8 220
RAHWP	89	2 348.9	3.59	11.02	11	9.3	255	390	7 645
AAHWP	89	2 348.0	3.58	11.03	12	9.3	265	400	7 665
CAHWP	205	2 354.4	3.60	11.05	13	9.3	265	400	7 665

注：生产造价包括人工费用、电费（工业用电）和原料成本。

1.2　PVC–U材料本构关系

试件选取同配方的PVC–U管材，沿管道纵向裁切制作，如图3(a)中狗骨试件所示。根据标准[17]进行试验，拉伸速率控制为5 mm/min，拉伸试验机为图3(b)中所示微机控制电子万能试验机。

图3(a)应力–应变关系为未计拉伸过程颈缩（即假



(a) 工程应力–应变　　(b) 真实应力–应变

图3　PVC–U材料本构关系
Fig. 3　Material constitutive relation of PVC–U

定试件横截面面积恒定)的工程应力–应变曲线,而真实应力–应变与工程应力–应变之间关系如下:

$$\sigma_{true}=\sigma_e(1+\varepsilon_e) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{true}=\ln(1+\varepsilon_e) \quad (2)$$

式(1)~(2)中,σ_{true}和ε_{true}分别为真实应力和应变,σ_e和ε_e分别为工程应力和应变,真实应力–应变反映了材料的真实力学行为。这里未考虑颈缩后的应变强化,所用管道材料基本参数见表2。

表2 管道材料参数

Tab. 2 Pipe material parameters

密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断面收缩率/%	断裂伸长率/%	泊松比
1.53	2 318	31.9	42.3	35.4	87.7	0.35

2 外压性能

为了明确AAHWP的环刚度性能,将该管进行了平行板试验[18],获得了该管的压扁荷载–位移曲线,可通过计算分析获得环刚度及环柔性[19]。在试验的基础上,进行该管的有限元模型分析,本文有限元软件均采用ABAQUS,材料参数均按表2取值。在试验结果与有限元计算结果一致的情况下,通过有限元分析AAHWP、RAHWP、CAHWP和实壁管的外压性能。

图4为4种管道荷载–位移曲线。由图4可知,实壁管刚度最强,承受的力最大。AHWP环刚度从大到小依次为CAHWP、AAHWP和RAHWP。对实壁、拱形和矩形中空壁管的大量试验表明,当管径变形达到30%时,AAHWP发生过变形突变,即管壁发生错动开裂。其他截面的管均出现有不同程度的不可恢复的屈曲变形,但RAHWP相对变形能力较强,说明RAHWP柔性最好,这也符合管道结构刚度强而柔性较差的特性。

通过有限元计算平行板试验过程管道的变形荷载、环应变等参数,获得各截面管道的环刚度,计算公式如下:

$$S=(0.018\,6+0.025\frac{y}{d})\frac{F}{L\cdot y} \quad (3)$$

式中:S为环刚度,kN/m^2;F为相对于管材3%变形时的负荷,kN;L为试样的长度,m;y为相对于管材3%变形时的变形量,m;d为管径,m。

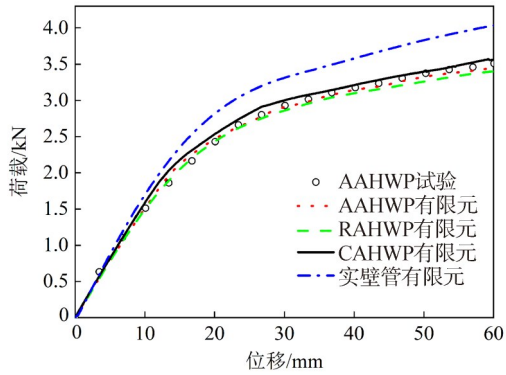


图4 4种管道的荷载–位移曲线

Fig. 4 Load–displacement curves of 4 kinds of pipes

将各AHWP获得的参数整理成表3进行对比,各管道壁厚、直径相同,管段长度均截取300 mm。从表3可知,无论是3%变形还是30%变形作用下,实壁管承载最大,相比于AAHWP承载倍数从1.10逐渐增大至1.17倍。AHWP中,CAHWP承载能力最大,RAHWP最小。线弹性变形下对应的最大应变与承载能力相反,刚度最大的实壁管应变最小,CAHWP次之,柔性最大的RAHWP管应变也最大。本文将相同材料不同孔形的AHWP在外力荷载下的性能称之为管结构效率,环刚度结构效率表现为:圆形孔>拱形孔>矩形孔。

表3 4种截面类型管的物理及外力荷载性能对比

Tab. 3 Comparison of physical and external load properties of pipes of four section types

管类型	质量/kg	3%变形荷载/N	30%变形荷载/N	环刚度/(kN·m^{-2})	3%变形最大应变/10^{-6}
实壁管	1.54	1 018.22	4 041.51	8.20	2 756
AAHWP	1.08	924.18	3 448.83	7.45	3 252
RAHWP	1.08	910.11	3 406.66	7.34	3 621
CAHWP	1.08	971.22	3 565.17	7.83	3 246

为了分析截面孔形布置影响环刚度的机理,基于材料性能和力学方面的理论进行进一步说明。环刚度的定义为:

$$S=\frac{EI}{D^3} \quad (4)$$

式中:E为材料的弹性模量,kN/m^2;I为单位长度的轴向截面惯性矩,m^3;D为管环的平均直径,m。

由式(4)可知,管道的环刚度与材料弹性模量和轴向截面惯性矩成正比,与管环平均直径成反比。几种截面的管道材料相同,平均直径也相同,因此影响

管道环刚度的参数主要是轴向截面惯性矩。由表1可知，轴向截面惯性矩大小为：实壁管>CAHWP>AAHWP>RAHWP。以上分析可知，轴向截面惯性矩影响着环刚度，从而影响截面变形，通过变化AHWP截面的布置形式改变轴向截面惯性矩，可提高管道的抗变形能力等外压性能。

3　内压性能

AHWP需进行内压为0.6 MPa的耐内压试验，保压1 h后观察有无破裂、渗漏[5]。为防止排水管内压过大影响试验效果，试验内压取值为0.4 MPa。先对AAHWP进行内压试验，在该试验基础上再进行几种AHWP的耐内压性能比较。在试验管外壁相同截面均匀贴有环向应变片，图5为试验所测管外壁的环应变。由图5可知，由于结构壁管不同于实壁管，外壁环向应变变化不均匀，在0.4 MPa内压时，最大环应变为2 500×10^{-6}左右。

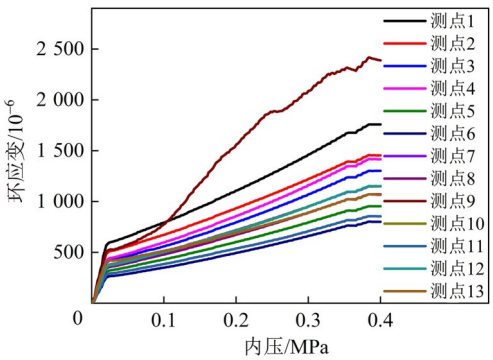


图5　环应变–内压曲线

Fig. 5　Curves of hoop strain–internal pressure

图6为AHWP在内压作用下应变云图。由图6可知，最大环向拉应变均在管道内壁，外壁环向拉应变小于内壁，在内压作用下引发内外壁应变差导致中间连接筋受压，且内外壁最大受拉应变(2 576×10^{-6})远大于连接筋的受压应变(385×10^{-6})。因此，AHWP在孔壁位置较为薄弱，超负荷情况下最先从该位置破坏。表明结构壁内外壁受力较大，起主要承载作用；中间筋受力较小，主要起连接作用。

图7为4种截面类型管的内压–环向应变曲线。图7中，AAHWP应变实测值在有限元值上下波动、趋势一致、数值吻合较好，有限元模型正确。由图7可知：实壁管微应变最小，承压能力最高；结构壁管中CAHWP微应变相对较小，承压能力相对较高，其次是AAHWP，RAHWP承压能力最小。

为了分析结构壁管的受力，建立荷载模型如图8所示，α为管内壁微单元上内压P的水平夹角，P_y为内

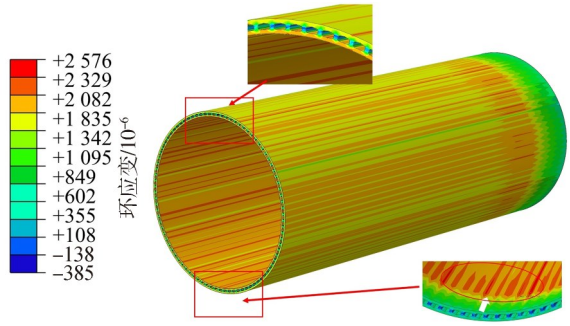


图6　AHWP在内压作用下的应变分布

Fig. 6　Strain distribution of AHWP under internal pressure

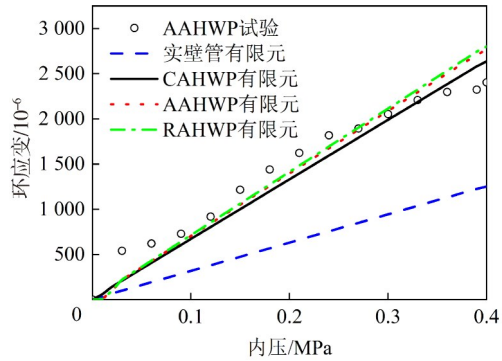


图7　4种截面类型管的内压–环应变曲线

Fig. 7　Internal pressure–hoop strain curves of pipes of four section types

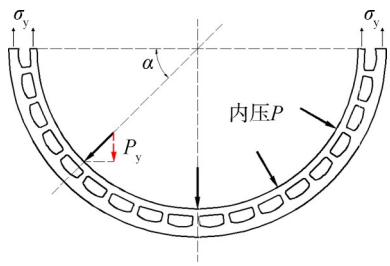


图8　AHWP受内压荷载模型

Fig. 8　Model of internal pressure load on AHWP

压P的竖直分量。由力平衡关系，得：

$$2\int_0^{\frac{\pi}{2}}\left(P\cdot\frac{D_0}{2}\cdot l\right)\sin\alpha\,\mathrm{d}\alpha=2\sigma_y l t_0 \tag{5}$$

式中：D_0为管道内径，mm；l为管段单位长度；t_0为管道结构壁内外壁壁厚之和，mm；σ_y为环向应力。

通过式(5)可求得管壁所受的环向应力为：

$$\sigma_y=\frac{PD_0}{2t_0} \tag{6}$$

分析可知，中间筋应力相比较小，假设只起连接作用，计算截面环向应力时宽度忽略不计，即这里的σ_y为结构壁管道的环向等效折算拉应力。

此外，比较了3种AHWP截面的尺寸，如图9所示。由图9可知，3种截面的内外壁壁厚均相同。根据表1中参数，在耗材相同的情况下(米重基本相同)，为了使3种截面面积相等，在孔形和孔数量不同的情况

下，中间筋的总面积相等，而由于孔高相同，中间筋的高度也相同，因此中间筋的宽度和数量不同。分析可知，中间筋主要起连接作用，因此削减中间筋的宽度，增加内外壁的等效厚度可以提高AHWP的承载能力。由图9可知，RAHWP中间筋的宽度为2.23 mm，在3种管截面中最宽，矩形孔孔角相对平直，增加内外壁的等效壁厚有限，而拱形和圆形孔角弧度大，AAHWP可增加外壁单壁的等效厚度，CAHWP则可增加内外壁双壁的等效厚度。综上分析，CAHWP相比于其他两类孔更能满足上述结论，且圆孔减少了孔角处的应力集中[20]，因此，CAHWP承载力相对较大。

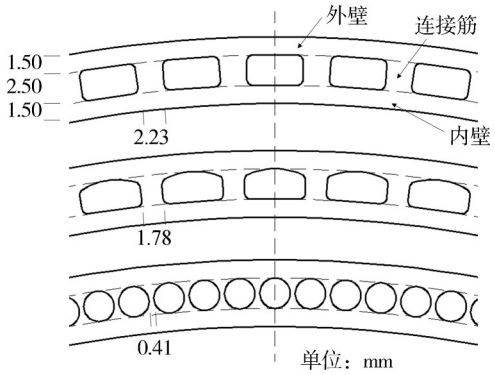


图9 3种AHWP截面尺寸

Fig. 9 Three types of AHWP section dimensions

4 抗冲击性能

排水管在施工安装过程中容易遭受落石、暴力施工和施工机器碰撞等冲击[21]，因此，有必要研究AHWP的抗冲击性能。通过有限元仿真分析，取铁锤下落开始1.0 s内的数值，管道长200 mm，D90型1.6 kg落锤从2 m高处由重力自由落下[22]，底部约束限制管道位移，单元网格密度相同，模型应力云图如图10所示。

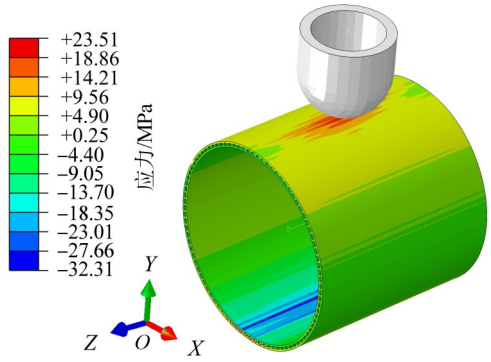
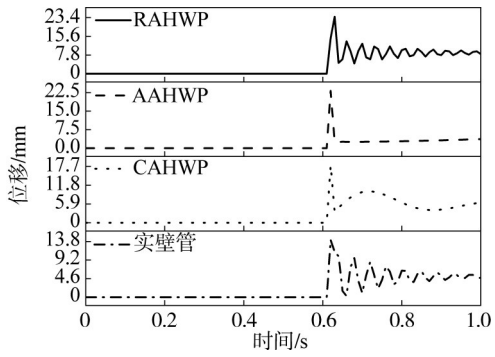


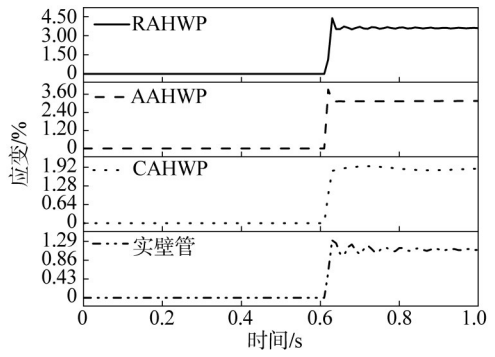
图10 落锤冲击瞬间的应力分布

Fig. 10 Stress distribution at the moment of impact of drop hammer

为了更加具体地分析动力响应，分析了应变和管径变形两个参量随冲击荷载变化。图11为4种截面类型管道的动力响应时程曲线。从图11(a)可看出：刚性落锤冲击管壁瞬间时刻为从2 m高下落后0.6 s左右，冲击后很短时间内，冲击处实壁管最大变形为13.8 mm，冲击变形最小，抗冲击变形最强；RAHWP为23.4 mm，其冲击变形最大，且冲击过后，和实壁管一样存在管壁变形振荡，说明其弹性较好，类似弹簧振荡；AAHWP为22.5 mm，没有发生振荡；CAHWP为17.7 mm，冲击引起的振荡频率较低。数值计算表明各管在冲击过后均发生有不同程度的残余变形，RAHWP最大。从图11(b)可看出：RAHWP冲击应变最大，值为4.50%；结构壁管中CAHWP最小，为1.92%，其他现象与动力位移相似。综合以上分析可知，AHWP抗冲击变形能力由大到小依次为CAHWP、AAHWP、RAHWP。



(a) 动力位移响应



(b) 动力应变响应

图11 4种截面类型管道的动力响应时程曲线

Fig. 11 Dynamic response time history curves of pipes of four section types

5 埋地力学性能

5.1 试验说明

砂箱试验常被用来模拟埋地试验[23–24]，其设备由砂箱、加载系统和采集系统组成，砂箱尺寸长×宽×高为900 mm×670 mm×860 mm，如图12所示。在油泵与板连接处设置力传感器，实时测定加载过程的加载压力；加载板布置有多个杆式位移计，用于测量砂土沉降；在管内设置有微型百分表，测定管径变形。回填砂满足规范施工要求，试验过程按力控加载，依次按

5、10、15、…、80 kN加载。为防止端部过度约束，管道长度稍短于箱体宽度，管道端口与砂箱侧面缝隙采用特制可伸缩透明胶封闭。图 13 为模拟砂箱加载过程管土变形的有限元计算结果云图。

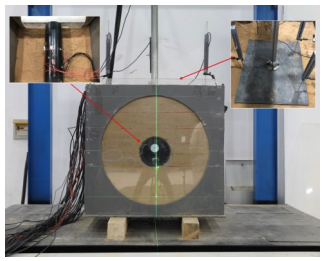


图 12　砂箱试验

Fig. 12　Sand-box experiment

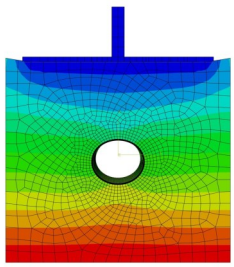


图 13　管土变形数值结果

Fig. 13　Numerical results of pipe and soil deformation

5.2　管径变形分析

图 14 为 4 种截面类型的管径变形对比。由图 14 可知：在 80 kN荷载时，管竖向变形试验值为1.89 mm，有限元值与试验值吻合较好；AAHWP 为 1.80 mm，RAHWP 为 1.82 mm，CAHWP 为 1.77 mm，而实壁管为 1.7 mm。综上分析可知：埋地作用下管径变形由小到大为实壁>CAHWP>AAHWP>RAHWP，结构壁管中CAHWP 在埋地环境下刚度效率最高。

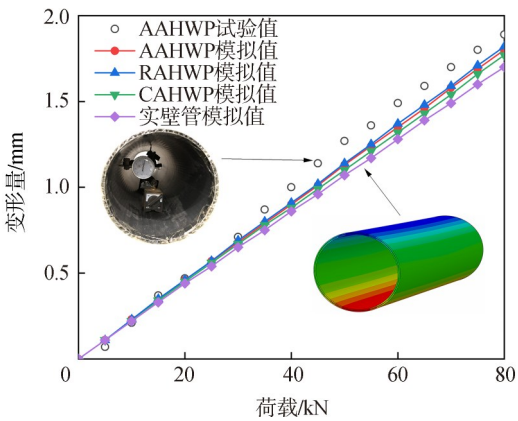


图 14　4 种截面类型的管径变形对比

Fig. 14　Comparison of pipe diameter deformation of four section types

埋地管道在管土共同作用下的变形计算一般采用 Spangler 公式，该式中管径变形与管道环刚度成反比，由第 2 节可知，CAHWP 环刚度最大，因此在埋地作用下管径变形最小。

5.3　管体应变分析

为了分析埋地作用下各 AHWP 的环向应变分布特性以及区别，图 15 为加载值 80 kN 时 4 种截面管外表面的环向应变。由图 15 可知，各管均在管顶和管底处的应变值较大，其中，管顶处应变最大，管肩和管臀处应变值较小，管腰处应变值最小。结构壁管中，CAHWP 环应变最小，RAHWP 应变除在管顶和管底大于 AAHWP 外，其他位置基本相同。所以，从管道强度设计分析，结构壁强度效率从大到小依次为CAHWP、AAHWP 和 RAHWP。

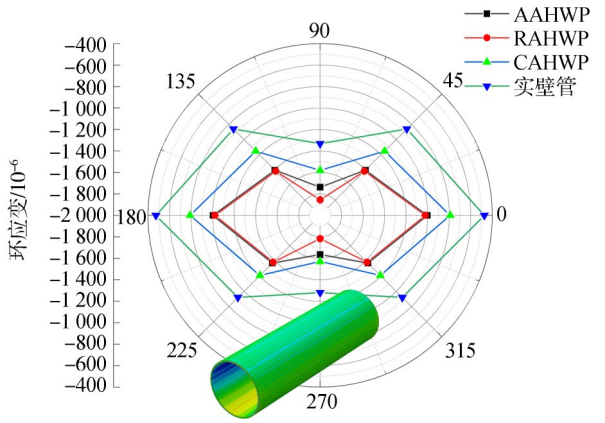


图 15　4 种截面类型管的外表面环向应变

Fig. 15　Circumferential strain on outer surface of pipes of four section types

管道在埋地组合荷载作用下的应力由各荷载产生的应力叠加而成，由第 3 节可知，CAHWP 内外壁等效厚度最大，故在荷载作用下环应力最小，承载能力最大。

6　结构优化设计与建议

由第 2 节至第 5 节内容可知，在材料体积相同的情况下，圆孔截面相对较优。本节基于管道的刚度和强度指标，分析孔数量和孔心偏离壁厚中心线的偏心距 e 两个因素的影响，从而对结构提出进一步优化。

6.1　基于刚度优化设计

截面惯性矩反映了管平面内的刚度，以此间接作为刚度设计准测。图 16 为孔数量对截面参数的影响。从图 16 可看出，随着孔数的增多，截面惯性矩和截面积呈线性减少。因此，在截面设计时，可根据该结论综合衡量管道变形能力和材料用量。以孔心向外壁偏离为正，向内壁偏离为负，图 17 为偏心距对截面惯性矩的影响。从图 17 可知，随着偏心距由负变正，截面惯性矩呈线性减少。因此，要提高 AHWP 的刚度，

孔心可适当偏内。

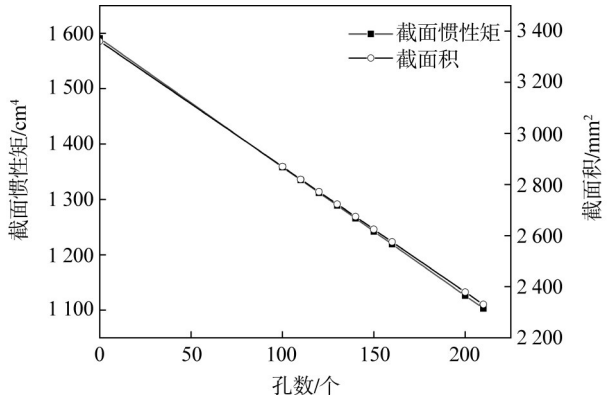


图16 孔数对截面参数的影响

Fig. 16 Influence of the number of holes on the cross-sectional parameters

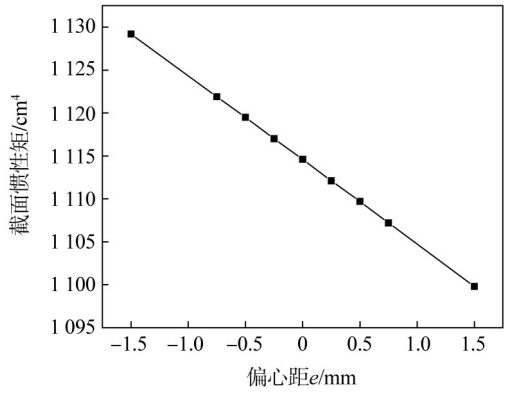


图17 孔心偏心距对截面惯性矩的影响

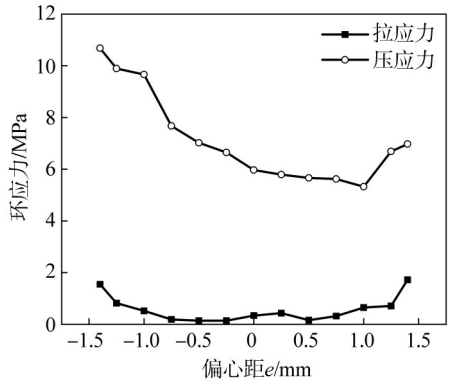
Fig. 17 Influence of hole center eccentricity on section inertia moment

6.2 基于强度优化设计

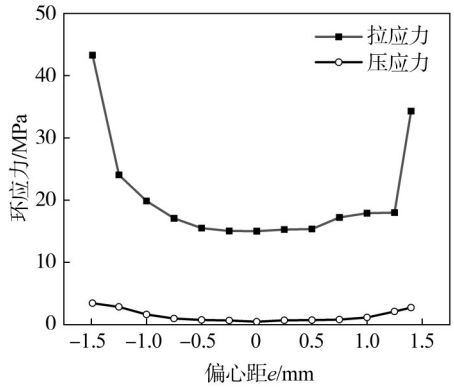
排水用埋地AHWP服役时主要受到埋地外压和少量内压作用，图18为两种工况下偏心距对管道强度的影响。埋地外压作用下，压应力大，最大压应力发生在内壁管腰位置；连接筋处受到拉应力，其值相比于管壁的压应力较小。如图18(a)所示，随着偏心距由负变正，管壁最大环向压应力呈先减少后增大的趋势，在孔心偏外的某处，存在环向压应力最小值。因此，当埋地外压作用占主导时，孔心可适当偏外。

内压作用下，拉应力大，当偏心向内时，最大拉应力发生在内壁；当偏心向外时，最大拉应力由内壁转向外壁；连接筋处受到压应力，其值相比于管壁的拉应力较小。如图18(b)所示，随着偏心距由负变正，管壁最大环向拉应力也呈先减少后增大的碗形趋势，当偏心距为0时，存在环向拉应力最小值。因此，当考虑内压占主导时，孔心可不偏离。

综上述分析，AHWP可根据使用需求进行孔形优化设计。根据材料用量和环刚度的与孔数的线性关系合理确定孔数量。如以管道环刚度为主导，则可将孔心偏内；以埋地外压下管道强度为主导，则可将孔心偏外；考虑内压作用下管道强度为主导，孔心位于壁厚中心。



(a) 埋地外压



(b) 内压

图18 两种工况下孔心偏心距对环应力的影响

Fig. 18 Influence of hole center eccentricity on hoop stress under two working conditions

7 结 论

本文对AWHP的3种管壁布局形式，以实壁管为参考，结合试验和有限元开展了排水埋地管道常用力学性能对比分析，研究了结构壁的孔形影响机制，并基于管道刚度和强度指标对孔数量和孔心偏心距进行了优化分析，结论如下：

1)基于外压、内压、抗冲击、管土相互作用等埋地管道的4个主要的力学性能均表明，不同孔形管壁的AHWP力学性能顺序为CAHWP>AAHWP>RAHWP，AHWP从结构上来说宜优先选择圆形孔结构。

2)在材料和管径相同的情况下，管道抗变形能力主要取决于轴向截面惯性矩，CAHWP轴向截面惯性矩相对较高，孔心偏内可提高管道刚度，可通过合理选择孔形及偏心距提高刚度，从而提高管道抗变形能力。

3）AHWP受荷载作用时，内外壁起主要承载作用，应力较大；连接筋主要起连接作用，应力较小。削减连接筋的宽度，增加内外壁的等效厚度可以提高AHWP的承载能力。CAHWP由于圆形孔角的弧度较长，增加了内外壁双壁的等效厚度，减少了孔角处的应力集中，因此承载能力相对较大。

4）AHWP可根据使用需求进行孔形优化设计。在材料用量和刚度平衡中合理选择孔数量。根据不同工况合理选择孔心偏心距：以管道刚度为主导，则可将孔心偏内；以埋地外压下管道强度为主导，则可将孔心偏外；考虑内压作用下管道强度为主导，孔心位于壁厚中心。

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部．中国城乡建设统计年鉴 2020[M]．北京：中国统计出版社，2021.

[2] 中研普华产业研究院．塑料管道行业市场现状及发展趋势分析[EB/OL]．(2022–08–06)[2023–05–13]．https://www.chinairn.com/hyzx/20220806/165345604.shtml

[3] Chen Kun. Performance and development trend of plastic water pipe[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(5): 105–108.[陈鲲．给水塑料管材的性能研究和发展趋势[J]．塑料工业，2016，44(5)：105–108.]

[4] Hu Shaowei, Yang Jinhui. Research and safety guarantee technology of large diameter high-performance pvc pipelines for water delivery project[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(1): 1–31.[胡少伟，杨金辉．大口径高性能聚氯乙烯管道研发与工程安全保障技术[J]．工程力学，2023，40(1)：1–31.]

[5] 中华人民共和国国家市场监督管理总局．埋地排水用硬聚氯乙烯(PVC–U)结构壁管道系统第三部分：轴向中空壁管材：GB/T 18477.3—2019[S]．北京：中国国家标准出版社，2019.

[6] Wang Qunlong, Guo Mingjie, Yang Jinhui, et al. Application of high performance PVC–U axial hollow wall pipe in urban drainage engineering[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(Supp1): 406–411.[王全龙，郭明杰，杨金辉，等．高性能聚氯乙烯轴向中空壁管道在城市排水工程中的应用[J]．给水排水，2022，48(增刊1)：406–411.]

[7] Du Ying, Xiao Da, Li Weiwen, et al. Investigation on patents and industry status of plastic drainpipe products[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(10): 13–17.[杜颖，肖达，李伟文，等．塑料排水管产品专利及行业状况调研[J]．塑料工业，2021，49(10)：13–17.]

[8] Peng Jing, Xiao Da, Wu Yingjiang, et al. Comparative analysis of Chinese and international standards for plastics structured-wall drainpipes[J]. China Plastic, 2022, 36(4): 135–141.[彭菁，肖达，吴映江，等．塑料结构壁排水管的国家与国际标准对比分析[J]．中国塑料，2022，36(4)：135–141.]

[9] Wei Chao. Experimental study on mechanical properties of high density polyethylene corrugated pipe culvert covered with soil[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.[魏超．覆土高密度聚乙烯波纹管涵受力性能试验研究[D]．北京：北京交通大学，2020.]

[10] Fang Hongyuan, Tan Peiling, Du Xueming, et al. Mechanical response of buried HDPE double-wall corrugated pipe under traffic-sewage coupling load[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103664.

[11] Chen Xiaowei, Ma Bin, Chen Yong. Crashworthiness analysis and structural optimization of the bionic square-bamboo battery box's thin-walled tube[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(1): 78–84.[陈晓薇，马彬，陈勇．仿方竹电池箱体薄壁管结构优化及耐撞性分析[J]．机械设计，2021，38(1)：78–84.]

[12] Bai Fanghua, Zhang Linwei, Bai Zhonghao, et al. Crashworthiness of coach's octagonal bionic multi-cell thin-walled tubes based on beetle elytra[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(21): 24–30.[白芳华，张林伟，白中浩，等．基于甲虫鞘翅的客车八边形仿生多胞薄壁管耐撞性研究[J]．振动与冲击，2019，38(21)：24–30.]

[13] Huang Han, Yan Qinghao, Xiang Zhixin, et al. Crashworthiness investigation and optimization of bionic multi-cell tube based on shrimp chela[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(3): 716–724.[黄晗，闫庆昊，向枳昕，等．基于虾螯的仿生多胞薄壁管耐撞性分析及优化[J]．吉林大学学报(工学版)，2022，52(3)：716–724.]

[14] Mu Zhao, Hu Shaowei, Shan Changxi, et al. Experimental study and numerical analysis of anti-impact performance of axial-hollow-wall pipe[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 42(2): 240–249.[牟钊，胡少伟，单常喜，等．轴向中空壁管抗冲击性能试验研究与数值分析[J]．防灾减灾工程学报，2023，42(2)：240–249.]

[15] Liu Xiaoyang, Wang Jinye, Zhang Juncai, et al. An optimization design method for buried polyethylene winded wall pipe based on NSGA–Ⅱ[J]. China Plastics, 2020, 34(2): 67–73.[刘晓阳，王金业，张君彩，等．基于NSGA–Ⅱ的埋地聚乙烯缠绕结构壁管的优化设计方法[J]．中国塑料，2020，34(2)：67–73.]

[16] Zhang Jianfu, Zhou Qingwang, Guo Yumei. A new type of structured-wall reinforced PE coal mining pipe[J]. Plastic Science and Technology, 2012, 40(7): 64–67.[张建富，周清旺，郭玉梅．一种矿用新型增强PE结构壁管材[J]．塑料科技，2012，40(7)：64–67.]

[17] 国家质量监督检验检疫总局．热塑性塑料管材 拉伸性能测定第2部分：硬聚氯乙烯(PVC–U)、氯化聚氯乙烯(PVC–C)和高抗冲聚氯乙烯(PVC–HI)管材：GB/T 8804.2—

2003[S].北京:中国标准出版社,2003.

[18] 国家质量监督检验检疫总局.热塑性塑料管材 环刚度的测定:GB/T 9647—2003[S].北京:中国标准出版社,2003.

[19] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.塑料管道系统 热塑性塑料管材 环柔性的测定:GB/T 39385—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

[20] Li Xia.Fabrication and design calculation method of horizontal honeycomb beam with elliptical holes[D].Changsha:Central South University,2007.[李霞.卧式似椭圆孔蜂窝梁的制作与设计计算方法[D].长沙:中南大学,2007.]

[21] Zhang Hu,Shao lei,Yu Cheng,et al.Experimental and numerical simulation study of impact loading on buried pipeline[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2022,42(3):243–252.[张虎,邵磊,余成,等.冲击荷载对埋地管道影响的试验与数值模拟研究[J].地震工程与工程振动,2022,42(3):243–252.]

[22] 国家质量监督检验检疫总局.热塑性塑料管材耐外冲击性能 试验方法 时针旋转法:GB/T 14152—2001[S].北京:中国标准出版社,2004.

[23] Xiao Chengzhi,Yang Yaxin,Yang Aike,et al.Mechanical performance of buried pipes protected by geogrids under static load[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(9):1928–1937.[肖成志,杨亚欣,杨爱克,等.静载作用下土工格栅加筋防护埋地管道力学性能实验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1928–1937.]

[24] Zhou Min,Wang Fei,Du Yanjun,et al.Feasibility study on the use of geosynthetics to reinforce buried HDPE pipes subjected to localized ground subsidence[J]. Transportation Geotechnics,2020,22:100303.

Mechanical Properties and Structural Optimization Analysis of PVC Axial Hollow-wall Pipe for Drainage

TANG Pengfei[1], *HU Shaowei*[2*], *LIU Guoan*[1], *YE Yuxiao*[2], *PAN Fuqu*[3], *HOU Zhaoguang*[3]

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2.Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
3.Dongxin Plastic Technology Company Limited, Liaocheng 252000, China)

Abstract:Axial hollow-wall pipe has many advantages, such as material saving, lightweight and easy construction, and low cost. Innovating its structure enhances these advantages. Based on external pressure, internal pressure, impact resistance, and buried ground model test and simulation analysis, the basic mechanical properties of arch-hole axial hollow-wall PVC pipe are analyzed. Then, through finite element analysis, a comparative study is conducted on structural wall pipes with different hole shapes and solid-wall pipes, and the influence mechanism of structural wall hole shapes is examined. Finally, the influence of pipe wall layout on pipeline stiffness and strength performance is assessed. The results show that with increasing deformation, the ratio of the external pressure-bearing capacity of solid-wall pipe to structural wall pipe increases gradually, indicating that the stiffness of the structural wall pipe deteriorates rapidly. The mechanical properties under external pressure, internal pressure, impact resistance, and buried ground conditions all demonstrate that the hole shape effect follows the order: circular hole > arch hole > rectangular hole. The cross-sectional moment of inertia of the hollow-wall pipe with circular holes is relatively large, and its deformation resistance is the highest among hollow-wall pipes. The deviation of the hole center toward the inner wall improves the ring stiffness. Due to the specific stress form of axial hollow-wall pipes, the arc length of the hole angle in the circular hole hollow-wall pipe increases the effective wall thickness and reduces stress concentration, resulting in relatively lower stress under load. The circular hole structure should be preferred for axial hollow-wall structures, and selecting the number of holes and eccentricity of hole centers based on different dominant working conditions can further enhance structural performance. This study provides technical support for the structural design of hollow structural wall pipes, uses the advantages of structural wall pipes, and expands the variety of drainage pipes.

Key words: axial hollow-wall pipe; PVC; mechanical properties; pipe wall layout; structure optimization

（编辑　张　琼）

引用格式:Tang Pengfei,Hu Shaowei,Liu Guoan,et al.Mechanical properties and structural optimization analysis of PVC axial hollow-wall pipe for drainage[J].Advanced Engineering Sciences,2025,57(3):192–200.[唐鹏飞,胡少伟,刘国安,等.排水用PVC轴向中空壁管力学性能及结构优化分析[J].工程科学与技术,2025,57(3):192–200.]