

文章编号: 1006-3080(2025)06-0868-07

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20250103001

超压泄放装置高升压速率试验平台的研制

韩一乐, 惠 虎, 黄 淞

(华东理工大学机械与动力工程学院, 承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要:超压泄放装置是保证承压设备结构安全的重要部件, 保障其在设定压力下具备准确的动作特性至关重要, 但目前对超压泄放装置在高升压速率载荷下的研究仍不充分。本文开发高升压速率载荷试验平台, 分析平台实现高升压速率载荷的影响因素。基于试验验证, 本文开发的平台可有效实现无极调节升压速率, 且具有良好的试验重复性能, 输出载荷的升压速率误差在 $\pm 1\%$ 以内。所研制的平台解决了高升压速率载荷试验安全性、载荷可控性以及重复性的难题, 为超压泄放装置性能研究提供基础。

关键词:超压泄放装置; 高升压速率载荷; 试验平台; 重复性验证; 误差分析

中图分类号:TH49

文献标志码:A

超压泄放装置是保障压力容器使用安全的重要构件, 被广泛应用于压力容器及管道中。当承压设备正常工作运行时, 超压泄放装置具备承压能力及密封性。当承压设备内部压力上升时, 压力容器内部进入超压状态, 超压泄放装置主动动作并及时泄放内部压力, 以防止压力容器结构产生破坏。应对承压设备面临不同的泄放保护需求时, 超压泄放装置主要可分为爆破片、安全阀、串联组合泄放装置及并联组合泄放装置^[1]。

在工业生产中, 装置爆破时压力容器或管道面临的动态超压工况往往由水锤压力引起。水锤是由于水突然产生的冲击力形成机械波, 使承载其流动的容器或管道产生震动的一种现象^[2]。虽然水锤的持续时间较短, 但其危害性极大, 严重时可能造成设备损坏并伤及操作人员等^[3-4]。水锤的产生原因主要分为启动水锤、关闭水锤和停泵水锤 3 种类型。在实际工况下, 水锤升压速率范围广泛, 高升压速率工况时甚至超过 100 MPa/s^[5]。在一些化工反应容器中, 事故情况下发生一些失控化学反应, 温度与压力会极速变化。如超高压聚乙烯反应器一旦发生内部聚爆, 升压速率可达 300~700 MPa/s^[6-8], 因而有必要研

究不同升压速率下超压泄放装置动作特性及性能变化。目前关于升压速率对超压泄放装置性能影响的研究较少, 大部分研究集中于结构、材料、尺寸等因素的影响^[9]。

API 521—2020^[10]中规定爆破片除应用于常规工况外, 还可用于承压设备内部爆炸或瞬态压力波动, 例如化学反应、水锤、气锤等时间为毫秒级的快速升压工况。但在 API 521—2020^[10]、API 520—2020^[11]、ISO 4126-2—2018^[12]、GB/T 150—2024^[13]、GB/T 567.1—2012^[14]中均缺少升压速率对爆破片爆破压力影响的描述。在现有对爆破片在高升压速率载荷下性能变化的研究中, 文献[15-19]利用点燃可燃气体爆炸的方式对爆破片的爆破性能变化进行研究。但气体爆炸为化学反应, 无法剥离热量对材料的影响。而水锤过程中无热量变化, 仅为单一的升压速率载荷因素对超压泄放装置性能影响。

在 GB/T 150—2024^[13]、GB/T 12241—2021^[20]、GB/T 12243—2021^[21]及 ISO 4126-1—2013^[22]中仅提及安全阀不能应用于压力快速增长的工况, 但关于压力快速增长工况的判定依据存在缺失, 没有规定安全阀不能适用的升压速率限值, 且目前鲜见安全

收稿日期: 2025-01-03

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3408302)

作者简介: 韩一乐(1998—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士生, 主要研究方向为压力容器安全保障技术。E-mail: 1020328414@qq.com

通信联系人: 惠 虎, E-mail: huihu@ecust.edu.cn

引用本文: 韩一乐, 惠 虎, 黄 淞. 超压泄放装置高升压速率试验平台的研制[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(6): 868-874.

Citation: HAN Yile, HUI Hu, HUANG Song. Development of a High Pressure Rise Rate Test Platform for Overpressure Relief Devices[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2025, 51(6): 868-874.

阀在高升压速率下性能变化的研究。

综上所述, 水锤载荷以及高升压速率载荷对超压泄放装置性能影响的研究仍存在大量空白。本文自主研发和搭建高升压速率载荷试验平台, 探究了试验平台高升压速率载荷的影响因素和平台性能, 为超压泄放装置在高升压速率工况下的性能变化研究提供基础。

1 超压泄放装置高升压速率试验平台的研制

本文开发的超压泄放装置高升压速率试验平台原理如图 1(a)所示, 实物图如图 1(b)所示。

试验平台利用水锤效应, 采用物理方法实现高升压速率载荷, 以避免其他因素对超压泄放装置的结构响应产生影响。试验平台主要由夹持模块、快开模块、蓄能模块、充压模块、压力采集模块及其他配套部件组成。充压模块为水锤载荷提供动力源, 由高压空气压缩机及附属管路组成, 最高可提供气源压力 30 MPa。蓄能模块为高升压速率载荷平台的核心, 由活塞式蓄能器及附属管路构成, 利用蓄能装置释放的高压水对试验对象加载, 实现快速增压直至动作泄放, 其中蓄能器采用高压气体作为驱动介质, 利用空气压缩机进行充能。充压模块将高压气体充入蓄能模块气相侧, 蓄能器内部活塞将空气与水两种介质相互隔离。当蓄能模块储蓄能量并达到

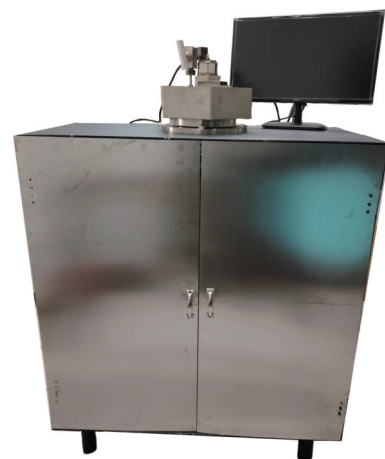
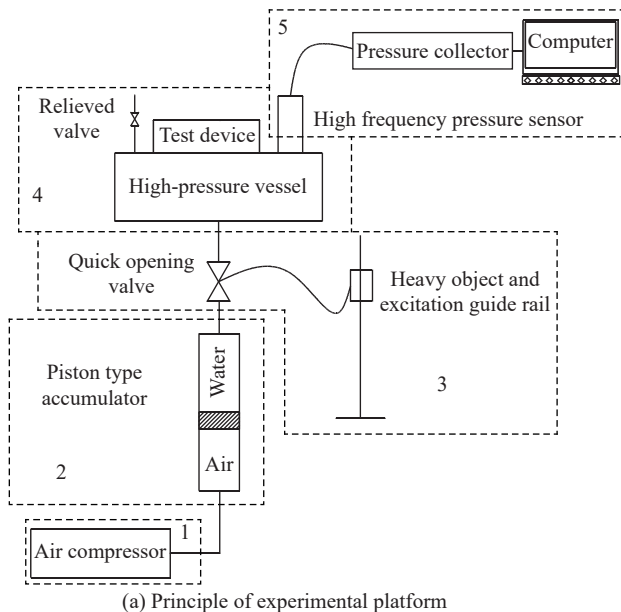
预定气相压力后, 快开模块迅速开启, 蓄能模块中积蓄的能量迅速释放。气相侧能量传导至液相侧, 高压气体迅速推动活塞压缩低压水, 形成高升压速率的动态水锤载荷。夹持模块为超压泄放装置提供夹持位置及压力监测点, 该模块由高压容器、卸荷阀、超压泄放装置夹持装置和压力传感器安装点组成, 如图 2 所示。压力采集模块由高频压力传感器、压力采集卡和计算机构成。水锤以压力波的形式传递能量, 在靠近爆破片处设有高频压力传感器, 压力监测点与试验点处于同一水平, 故认为压力传感器采集到的压力值即为超压泄放装置的压力值。高频压力传感器采集频率为 20 kHz。高升压速率载荷压力通过压力采集卡实时输入计算机, 计算机将采集到的压力数据存于数据库内, 并实时显示压力-时间曲线。

2 升压速率载荷影响因素

2.1 快开模块参数影响

快开模块将夹持模块与蓄能模块连接为一个整体。重物被安装于导轨上, 重物与阀门开启手柄之间通过防割线连接。利用重物自由落体运动开启快开阀门, 导轨结构如图 3 所示。张小莹等^[23]通过大量研究得出结论, 阀门开启速率与阀门开启角度对水锤波升压速率存在影响。

试验平台可通过改变快开模块的开启速率及开启角度影响升压速率, 即试验人员通过调节重物自



1—Pressurization module; 2—Energy storage module; 3—Quick opening module; 4—Holder module; 5—Pressure acquisition module

图 1 超压泄放装置高升压速率试验平台

Fig. 1 High pressure rise rate test platform for pressure relief devices

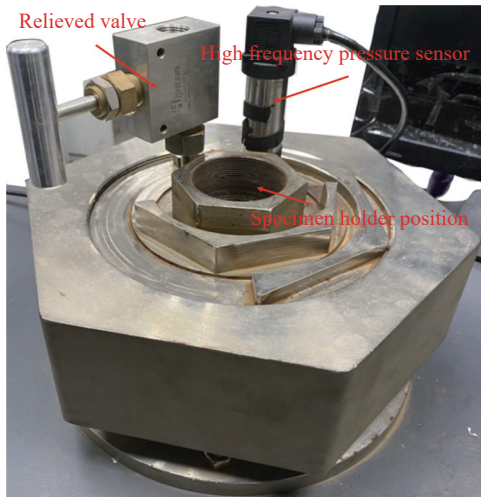


图 2 夹持模块
Fig. 2 Holder module

由落体高度与重物质量以调节开启速度与开启角度。当气相初始压力增大时, 阀门开启时受到的不平衡力矩随之增大, 对阀门开启速度起减弱作用。由于不同试验对象在受到载荷作用时的变形状态与形貌不同, 液相体积变化情况无法统一, 因而最终得到的升压速率也不同。在面对不同试验对象时首先应开展升压速率标定工作, 以得到当前试验对象在以上因素影响下的升压速率变化情况。

2.2 蓄能模块参数影响

试验平台通过活塞式蓄能器实现具有瞬时性的水锤工况。活塞式蓄能器能够将能量储存起来, 待试验开始后迅速将储蓄的能量释放并转化为压力。蓄能器工作原理如图 4 所示。

在初始状态时, 活塞式蓄能器液相端至超压泄



图 3 快开导轨
Fig. 3 Quick-opening guide rail

放装置间充满液体并保持快开模块处于关闭状态, 此时活塞式蓄能器气相端与液相端压力均为常压 p_0 。之后活塞式蓄能器气体端充入预设压力的高压气体后, 初始活塞式蓄能器气相端的气体压力即为充压模块输出的高压 p_1 , 由于液体具有不可压缩性, 因而活塞在初始位置不会进行移动。此时蓄能器两端气相压力与液相压力达到平衡, 蓄能器液相端至快开模块段的流体压力与气体压力相同。由于气体具备可压缩性, 因而气体可迅速膨胀释放能量。当试验开始时, 随着快开模块迅速开启, 此前被快开模块分隔开的液体流域被连通。活塞式蓄能器的气体区域体积不断扩大, 高压气体推动活塞移动并压缩液相端释放能量。活塞式蓄能器气相端压力以水锤压力波的形式传递至超压泄放试验装置, 液体压力迅速上升, 超压泄放试验装置受到高升压速率的压力载荷。

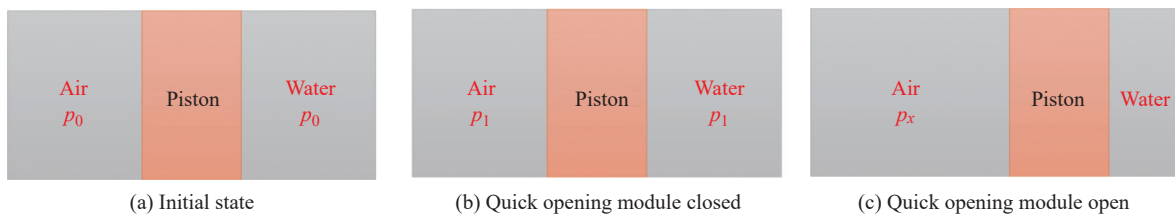


图 4 蓄能模块工作原理
Fig. 4 Working principle of energy storage module

根据理想气体方程 $pV=nRT$ (式中, p 为压力, Pa; V 为体积, m^3 ; n 为物质的量, mol; R 为摩尔气体常数; T 为温度, K), 当忽略活塞摩擦力及其余误差时, 可计算活塞式蓄能器气相端压力变化趋势。 nRT 为常数, 因而压力释放前的气相能量 p_1V_1 等于气相释放压力过程中的 p_xV_x 。以初始气相体积与蓄能器总体积之比 $3/4$ (以下简称体积比) 为例, 改变不同气相初始压力 p_1 , 气相压力与活塞至气相入口距

离关系曲线如图 5(a) 所示。以 $p_1=30$ MPa 为例, 对比不同体积比下气相压力变化趋势, 结果如图 5(b) 所示。
图 5 结果表明, 当体积比相同但 p_1 不同时 (图 5(a)), 气相压力变化斜率不同, 因而气相能量释放变化过程不同。当 p_1 相同但体积比不同时 (图 5(b)), 气相压力变化斜率不同, 因而气相能量释放变化过程不同。以上分析证明, 通过改变蓄能器气相与液相之间体积比或初始气相压力, 可调节超压泄放试验装

置承受的载荷大小与水锤升压速率。因而在蓄能器气相端放入限位器可对蓄能器活塞进行初始位置的限位设定。试验人员可通过设定充压模块以调节气相初始压力, 改变蓄能模块中限位器高度以调节气

相空间初始体积比, 这两个方法可调节控制试验平台输出载荷的升压速率。限位器限位方法如图 6 所示, 限位器为空心圆柱, 放置于气相侧, 为试验平台实现不同的升压速率提供保障。

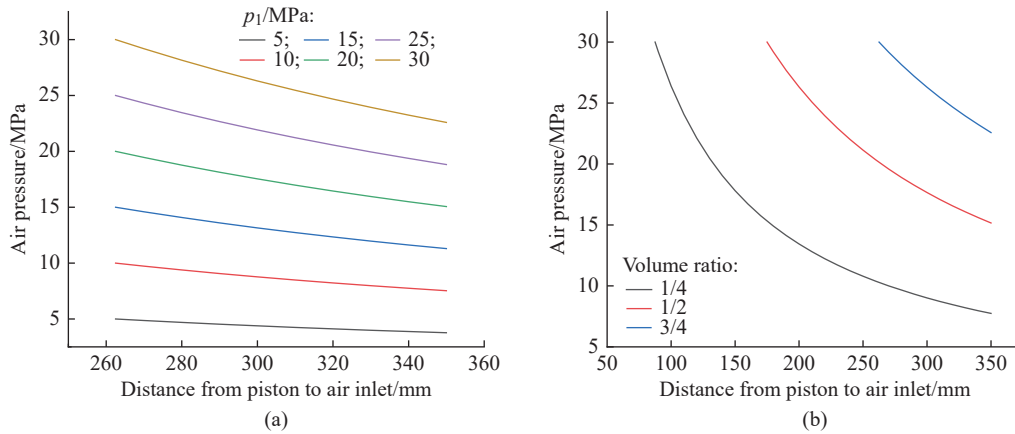


图 5 不同气相初始条件对气相释放过程的影响

Fig. 5 Effects of different initial gas phase conditions on the air release process

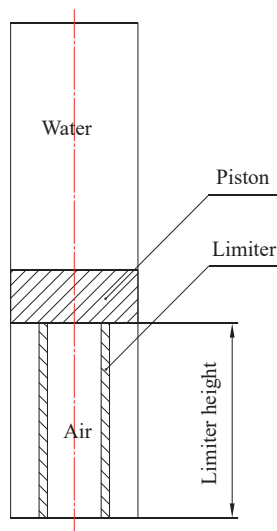


图 6 限位器安装方式

Fig. 6 Installation method of limiter

3 验证性试验

3.1 升压速率计算

盲板具有不易变形的优点, 在 30 MPa 压力下变形可忽略不计, 因而可以更好地对试验装置性能进行监测, 以排除由于泄放装置引起的液相空间体积变化对升压速率造成的干扰。以厚度为 5 mm 的 316 L 盲板作为试验对象, 分析试验台加载性能。在高升压速率超压试验中, 水锤使密闭容器内压力瞬间剧增, 在短时间内形成高升压速率的线性加载方式。

图 7 所示为盲板试验压力-时间变化曲线。图

中 A 点为阀门开启时的起始点, AB 段间升压速率逐渐增大, 至 BC 段升压速率稳定近似为线性增长。由于水锤波在装置内部不断反射, 因而 BC 段存在压力波动。该波动形式并非压力采集波动误差, 而是由于每个波峰与波谷间均由大量连续的压力测量点构成, 为水锤波自然压力波动的结果。水锤波是由前行压缩波、前行膨胀波与后行压缩波及后行膨胀波复合作用的结果^[24-26], 属于水锤压力波动正常现象。水锤在形成时压力波前端会形成前行压缩波, 因而压力升高。由于水的连续性, 靠近活塞部位原本受前行压缩波压缩的水开始膨胀, 压力降低。当前行压缩波到达盲端时, 根据动量定理, 由于此前前端微元液体速度为 0, 因而压缩波能量被反射回去, 变为方向相反的后行压缩波。同理前行膨胀波至盲端后也会反射为后行膨胀波。在 4 种波的复合作用下, 形成图 7 中的压力波动形式。C 点为高升压速率升压阶段的终点, 因而通过对 BC 段进行线性拟合得到高升压速率试验平台的升压速率。根据图示结果得到本次试验的升压速率(dp/dt)为 290.43 MPa/s。

3.2 升压速率载荷重复性验证

以平板普通型爆破片为例, 对超压泄放装置高升压速率试验平台输出的高升压速率载荷性能进行重复性验证。平板普通型爆破片结构如图 8(a) 所示。夹持直径 D 为 59 mm, 泄放口径 D_0 为 47 mm, 初始厚度 S_0 为 0.1 mm, 压环圆角 R 为 1 mm。设置 p_1 为 10 MPa, 气相初始体积与蓄能模块体积比为 1/4, 重物质量 2.35 kg, 重物自由落体高度 120 cm。图 8(b) 所示为 3 次重复爆破试验压力-时间变化曲

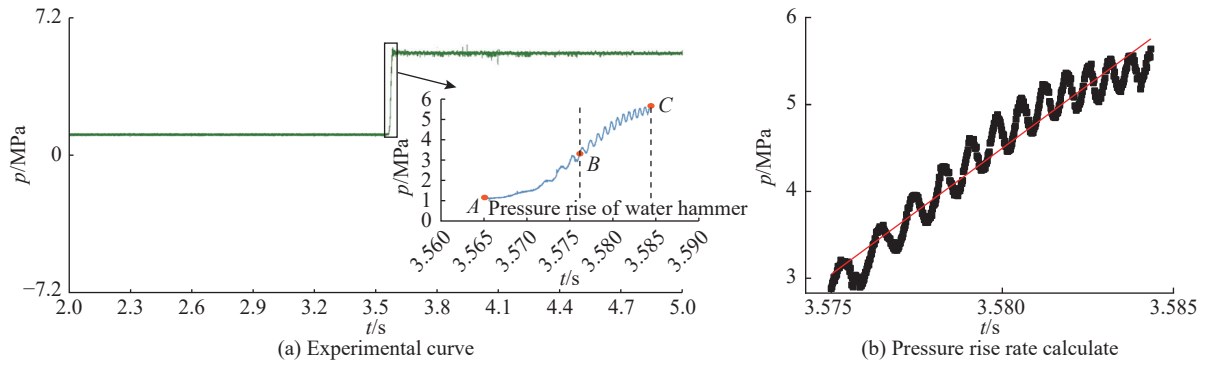


图 7 升压速率提取

Fig. 7 Pressure rise rate extraction

线。表 1 所示为试验平台输出载荷升压速率重复性试验误差结果分析。

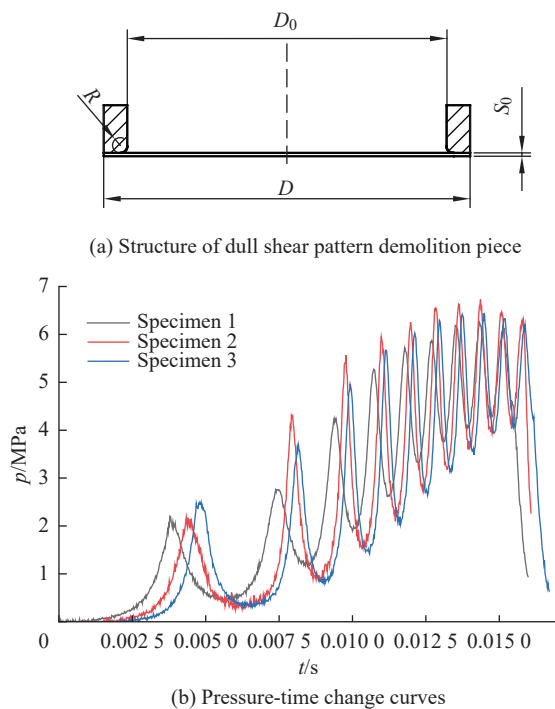


图 8 爆破片结构和爆破试验压力-时间变化曲线

Fig. 8 Structure of demolition piece and blast test pressure-time change curves

由表 1 可知, 试验平台实现的高升压速率载荷具有高度重复性, 水锤载荷升压速率误差在 $\pm 1\%$ 以内, 试验平台输出的载荷具有高精度与可控性。利用万能试验机对活塞式蓄能器进行压缩试验, 以测定活塞摩擦力大小, 得到载荷误差来源, 共进行 4 次试验。试验机压头位移速率 0.5 mm/min, 试验装置及结果如图 9 所示。可知, 由于活塞密封形式为非金属密封, 蓄能模块内壁粗糙度及平整度可能存在差异, 活塞摩擦力处于一个区间范围内。试验平台高升压速率载荷升压速率误差是由活塞摩擦力造成。在 4 次重复性试验中, 计算得到动摩擦力最大值为 237 N, 最小值为 136 N, 极差为 101 N。以试验平台气相初始压力 10 MPa 为例, 此时活塞受到气体压力

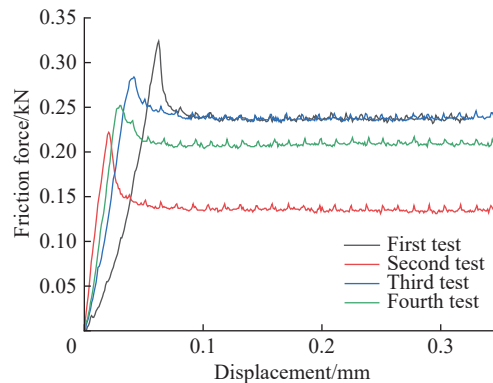
表 1 升压速率误差分析

Table 1 Pressure rise rate error analysis

| Specimen | Pressure rise rate/ (MPa·s ⁻¹) | Average pressure rise rate/(MPa·s ⁻¹) | Error/% |
|----------|---|--|---------|
| 1 | 576.80 | | -0.59 |
| 2 | 585.19 | 580.23 | 0.86 |
| 3 | 578.69 | | -0.26 |



(a) Setup of friction force measurement



(b) Results of friction force measurement

图 9 摩擦力测定试验装置和测试结果

Fig. 9 Setup and test results of friction force measurement

换算成推动力为 28260 N, 远大于动摩擦力的极差 101 N。动摩擦力极差仅占气体推动力的 0.36%, 因而活塞摩擦力误差造成的影响可忽略。

4 结 论

本文开发了一种超压泄放装置高升压速率试验平台。通过论证分析得到高升压速率载荷受到气相初始压力、气相空间初始体积比、快开模块开启速度、快开模块开启角度等因素的影响。基于试验验证, 该装置可有效实现无极调节升压速率, 且具有良好的试验重复性能。该平台解决了高升压速率载荷下超压泄放装置的试验安全性、载荷可控性以及重复性的难题。试验平台输出载荷的升压速率误差在 $\pm 1\%$ 以内。结果表明试验平台满足高升压速率载荷下超压泄放装置性能研究需要, 为超压泄放装置(爆破片、安全阀)性能研究提供基础。

参考文献:

- [1] 束从杰. 浅述超压泄放装置的分类及选用[C]//安徽省机械工程学会成立 50 周年论文集. 合肥: 安徽省机械工程学会, 2014: 172-175.
- [2] 邱荣华. 基于水锤现象的建筑给水系统防护措施[J]. *江苏建材*, 2023(6): 128-130.
- [3] GHIDAQUI M S, ZHAO M, MCINNIS D A, *et al.* A review of water hammer theory and practice[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2005, 58(1): 49-76.
- [4] SKALAK R. An extension of the theory of water hammer[J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1956, 78(1): 105-115.
- [5] 吴雨泽, 龙连春, 吴奇, 等. 高压复合管线法兰连接设计及疲劳寿命分析[J]. *石油机械*, 2022, 50(8): 140-148.
- [6] LUFT G, BROEDERMANN J, SCHEELE T. Pressure relief of high pressure devices[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2007, 30(6): 695-701.
- [7] ALBERT J, LUFT G. Thermal decomposition of ethylene-comonomer mixtures under high pressure[J]. *AIChE Journal*, 1999, 45(10): 2214-2222.
- [8] ALBERT J, LUFT G. Runaway phenomena in the ethylene/vinylacetate copolymerization under high pressure[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 1998, 37(1): 55-59.
- [9] 顾雪铭, 吴全龙, 杨秀霞. 正拱环向开缝型爆破片的爆破性能[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 30(1): 99-102.
- [10] American Petroleum Institute. Pressure-relieving and depressuring systems: API 521—2020 [S]. Washington D C: American Petroleum Institute, 2020.
- [11] American Petroleum Institute. Sizing, selection, and installation of pressure-relieving devices: API 520-2020 [S]. Washington D C: American Petroleum Institute, 2020.
- [12] International Standardization Organization. Safety devices for protection against excessive pressure: Part 2. Bursting disc safety devices: ISO 4126-2—2018 [S]. Switzerland: International Standardization Organization, 2018.
- [13] 国家市场监督管理总局. 压力容器 第 1 部分: 通用要求: GB/T 150.1—2024 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2024.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆破片安全装置. 第 1 部分: 基本要求: GB/T 567.1—2012 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2012.
- [15] 李志义, 丁信伟, 贺匡国. 爆破片在爆炸压力作用下的动态响应[J]. *石油化工设备*, 1986(2): 1-8.
- [16] 李岳, 闫兴清, 喻健良, 等. 升压速率对反拱带槽型爆破片爆破压力影响的试验研究[J]. *压力容器*, 2020, 37(1): 8-13, 19.
- [17] 喻健良, 曾方驰, 闫兴清, 等. 动态超压工况下正拱开缝型爆破片的爆破性能研究[J]. *压力容器*, 2020, 37(6): 9-14, 47.
- [18] 曾方驰. 动态超压工况爆破片爆破性能及本构关系研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2020.
- [19] 徐锋, 刘应华. 升压速率对正拱普通型爆破片爆破压力的影响规律及机理研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(2): 69-79.
- [20] 国家市场监督管理总局. 安全阀一般要求: GB/T 12241—2021 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2021.
- [21] 国家市场监督管理总局. 弹簧直接载荷式安全阀: GB/T 12243—2021 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2021.
- [22] International Standardization Organization. Safety devices for protection against excessive pressure: Part 1. Safety valves: ISO 4126-1—2013 [S]. Switzerland: International Standardization Organization, 2013.
- [23] 张小莹, 边少康, 冯梦雪, 等. 有机玻璃管道直接水锤压力特性试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2024, 42(1): 37-42.
- [24] 胡斌. 水力锤击压力波在水系中传播特性研究[D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [25] 陈亚飞, 顾卫国, 王德忠, 等. 球型调节阀水锤效应的试验研究与数值计算[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(10): 1027-1032.
- [26] 李妍, 白绵绵, 闫飞. 高落差重力流输水管道开关阀水锤模拟分析[J]. *西北水电*, 2022(4): 94-97.

Development of a High Pressure Rise Rate Test Platform for Overpressure Relief Devices

HAN Yile, HUI Hu, HUANG Song

(Key Laboratory of Pressure Systems and Safety, Ministry of Education, School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The overpressure relief device is an important part to ensure the structural safety of pressure equipment. Existing research on the pressure relief device under high pressure rise rate load was still insufficient. It is very important to ensure that it has accurate action characteristics at the set pressure. If the overpressure relief device cannot act correctly, the structural integrity of the pressure vessel is at risk of damage. In this paper, an experimental platform of high pressure rise rate load is developed. And the influencing factors of high pressure rise rate load are analyzed. Through the theoretical analysis, the factors affecting the pressure rise rate load include the opening rate and opening angle of the quick-opening module, the initial air pressure and the air volume. The experimenter can achieve different pressure rise rate loads by adjusting the heavy objects weight, the heavy objects free fall initial height, the pressurization module output air pressure, and the height of the internal limiter of the energy storage module. Based on experimental validation, the platform can effectively generate high pressure rise rate loads with infinitely adjustable pressure rise rates. The output load pressure rise rate error is within $\pm 1\%$, which proves that the high pressure rise rate load generated by the experimental platform has reliable repeatability. The developed experimental platform solves the problems of safety, load controllability and repeatability of high pressure rise rate load test, and it provides a basis for the performance research of overpressure relief device.

Key words: pressure relief device; high pressure rise rate load; test platform; repeatability verification; error analysis

(责任编辑: 张欣)