

井下救生舱密封装置设计

陈碧莉

广州科技职业技术大学自动化工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年2月11日; 录用日期: 2025年3月11日; 发布日期: 2025年3月27日

摘要

随着我国煤矿产业的快速发展, 煤矿安全也逐渐成为人们不可忽视的一环。而井下救生舱, 作为一个在发生矿难后无法及时撤离, 为矿工提供安全、密闭空间的救生装备, 要求不仅能够良好地抵御爆炸冲击的性能, 还要具备隔绝有毒有害气体的密封性。井下救生舱的出现, 极大地提高了井下工作人员的安全性, 同时大大减少了财物的损失。本文分析了在救生舱密封装置设计时应该注意的问题, 特别设计了救生舱舱门的气动原理和密封舱门结构, 对舱门机构进行了运动分析, 并对舱门的密封进行了设计和计算。

关键词

救生舱, 密封性, 安全性, 气动传动

Design of Sealing Device for Lifeboat in Underground Mine

Bili Chen

School of Automation Engineering, Guangzhou Vocational and Technical University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Feb. 11th, 2025; accepted: Mar. 11th, 2025; published: Mar. 27th, 2025

Abstract

With the rapid development of China's coal mining industry, coal mine safety has gradually become an indispensable aspect. The underground survival capsule, as a life-saving equipment that provides a safe, airtight space for miners who cannot evacuate in time after a mine disaster, requires not only the ability to withstand explosive shocks but also the sealing property to isolate toxic and harmful gases. The emergence of underground survival capsules has greatly improved the safety of underground workers and significantly reduced property losses. This article analyzes the issues

that should be considered in the design of the survival capsule's sealing device, especially the design of the pneumatic principles and sealing structure of the capsule door, conducts a kinematic analysis of the door mechanism, and designs and calculates the sealing of the door.

Keywords

Lifeboat, Air Tightness, Safety, Pneumatic Transmission

Copyright © 2025 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

建立煤矿井下避难场所，保证矿井发生事故后被困井下的工作人员的生命安全显得尤为重要[1]-[4]。井下矿产业发达的国家如美国、澳大利亚、南非、加拿大等国最开始着手研究矿井救生舱，走在了世界的前列，有关救生舱的使用和维护方面他们也积累了很多宝贵的经验。澳大利亚、美国等国研发生产了煤矿井下用救生舱。美国联邦矿山安全健康局(MSHA)出台了美国救生舱行业的标准和管理规定，非常详细具体地规定了在救生舱的生产和使用过程中，救生舱的生产企业和使用救生舱的矿山企业所要遵循的法律法规。美国煤矿井下避难场所以可移动式救生舱为主，加拿大煤矿井下避难场所结合使用了避难硐室与可移动救生舱其配备比例约为 1:5，以硬体可移动式救生舱为主，澳大利亚的矿井大多采用“空气呼吸器 + 加气站”的避险设施，南非以避难硐室为主，较少使用可移动式救生舱，基于这一特点他们研发出了便于携带的充气式救生囊，便于矿工携带。目前，有关矿用救生舱的研发生产，国内也有不少的相关单位设计研发出了自己的产品。其中，北京科技大学和重庆煤炭研究院走在了国内的领先地位，并分别进行了真人实验。国内现有的矿井救生舱大多采用整体式的密封结构：在由钢板组成的舱体外面加上一定的加强筋，并且在救生舱的内壁和外壁按相应的使用环境分别涂上不同的材料[5]-[7]。本文设计了一种可移动密封救生舱，利用数值模拟软件对救生舱的结构系统进行了设计分析计算。

2. 救生舱密封性舱门的气动传动

2.1. 气动元件和回路的选择

气动传动系统在工业生产中具有多个优点：① 以空气为传动介质、成本低；② 结构简单；③ 快速响应等。通常由 4 个元器件构件：① 气压发生装备，常见的有空气压缩机；② 控制元件，例如压力阀、流量阀等；③ 执行元件，如气缸；④ 辅助元件，常见的有过滤器、油雾器等。气源装置为气压系统的设备工作提供动力，作为气动系统的动力源，不仅要求满足系统对气体压力和流量的要求，而且要求输出清洁和干燥的压缩空气。因此，气源装置的组成一般包括空气压缩机、冷却器、油水分离器、储气罐、干燥器、过滤器等[8]-[10]。

空气压缩机用以压缩空气，一般将产生的机械能转换为空气的压力能。在选择空气压缩机时，其额定压力应等于或略高于所需要的工作压力。空气压缩机吸气口应装有空气过滤器。冷却器用以降低冷却压缩空气的温度，使其中水汽、油雾气凝结成水滴和油滴，以便将其分离出来。储气罐用以稳定储存的压缩空气压力，主要的作用是调节气流，减少气流压力脉动，使得气流具有流量连续性和气压稳定性。干燥器进一步吸收或排除压缩空气中的水分和油分，使之变成干燥的空气。而过滤器则进一步过滤掉灰

尘和杂质颗粒。由于气压传动相对于机械传动、电传动及液压传动而言具有防火、高效无污染等许多优点，对现有参考和相关设计规范，设计了其舱门气动原理图如图 1 所示。

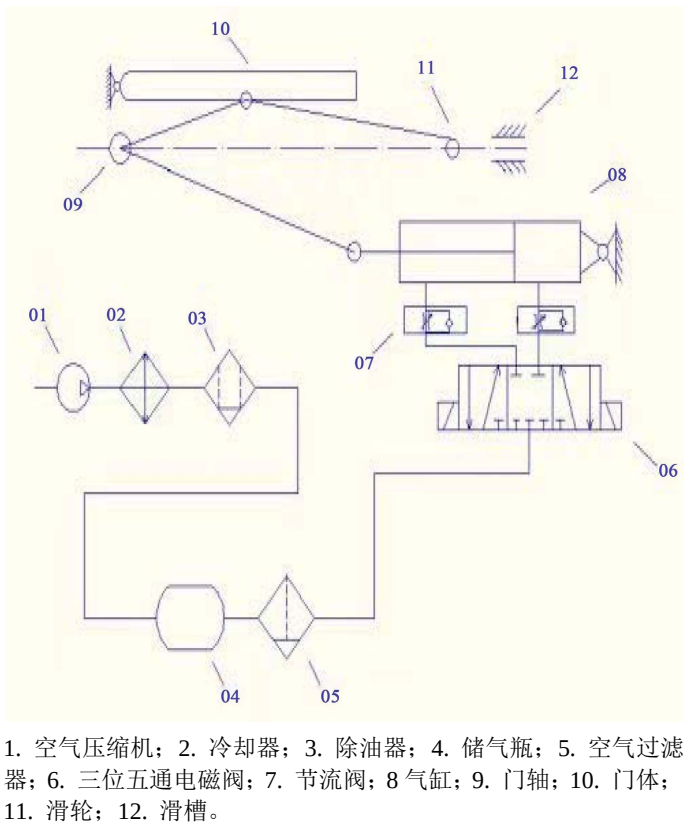


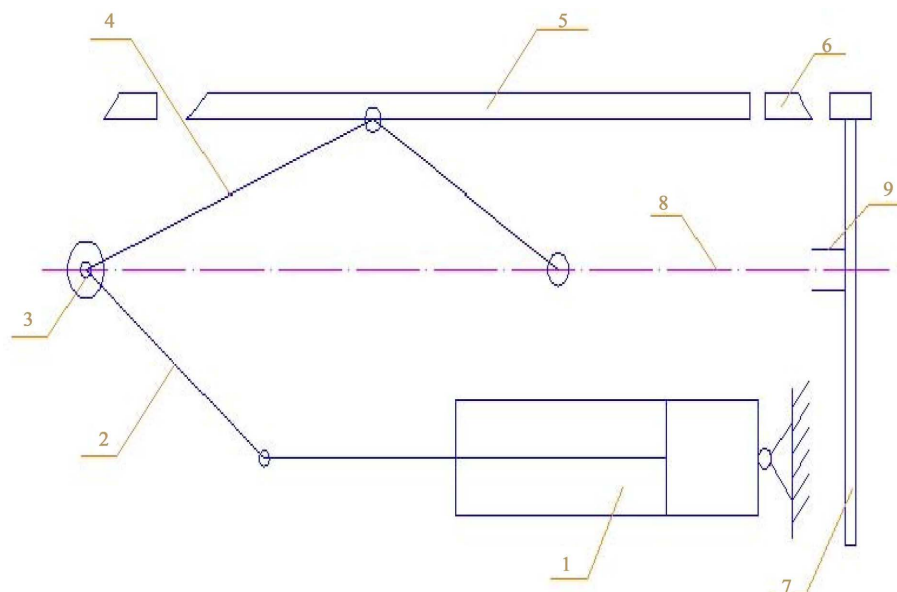
Figure 1. Diagram of pneumatic principle
图 1. 气动原理示意图

如图 1 所示，如果要使井下救生舱舱门在关闭锁紧位置时，舱门与舱体闭合；在完全开启位置时，舱门垂直于舱体，经过研究可以采用曲柄滑块机构控制开启舱门。在本设计中，救生舱舱门的开启和关闭是气缸左右两腔通过压缩空气推动活塞带动牙杆机构运动实现的，因此双作用单杆活塞作为执行元件是最佳选择。电磁阀左端线圈通电，压缩空气从电磁阀向气缸左腔充气，气缸右腔空气经电磁阀排气排出，从而压缩空气推动活塞向右运动，舱门打开；电磁阀右端通电，压缩空气经电磁阀向气缸右腔充气，气缸左腔空气经电磁阀排气口排出，压缩空气推动活塞向左运动，舱门关闭。

经过以上运动，井下救生舱密封舱门实现了气动启闭，从而可以实现了通过电磁阀的电信号控制开启和关闭，如此，可以使得对舱门可以实现智能的、远程的自动控制。

2.2. 气动结构

如下图 2 舱门气动结构简图中所示，气缸固定在门泵托板上，门泵托板通过螺栓固定在门体侧上方的舱体骨架上。气缸的活塞推杆与摆臂铰接，而摆臂与门轴通过花键固定。连接门体和门轴的转臂与门体铰接，与门轴通过螺栓固定为一体。这样，在活塞推杆外伸和收缩的过程中，可以使摆臂绕门轴摆动，带动门轴绕门轴中心线转动，与此同时，门轴带动转臂绕门轴中心线转动，使门体一起绕门轴转动，从而实现舱门的开关。



1. 气缸; 2. 摆臂; 3. 门轴; 4. 转臂; 5. 门体; 6. 门框; 7. 门泵托板; 8. 滑槽中心线; 9. 上滑槽。

Figure 2. Schematic diagram of the pneumatic structure of the hatch door

图 2. 舱门气动结构简图

3. 密封舱门的锁紧及密封

3.1. 锁紧方案

在实践运用中, 由于曲柄滑块机构(四点锁紧方案)和连杆机构(六点锁紧方案)这两种舱门结构方案应用较广泛, 因此, 在本文中重点对这两种锁紧方案进行分析对比:

1) 曲柄滑块机构(四点锁紧方案)

四点锁紧方案的优点是它的结构比较简单、工作可靠性高, 它的缺点是锁紧点较少、密封效果可能受到影响, 其示意图如图 3 所示。

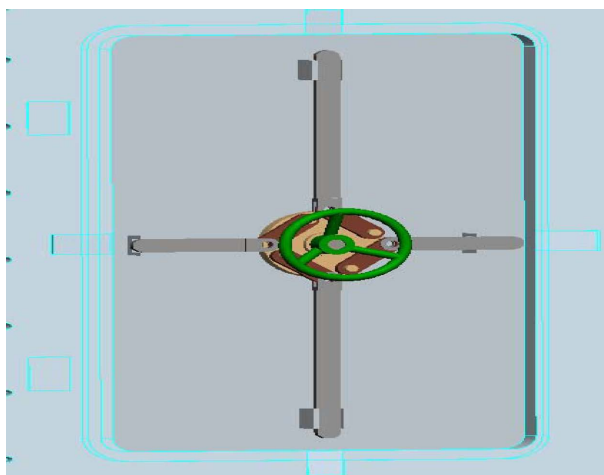


Figure 3. Illustration of the four-point locking mechanism

图 3. 四点锁紧机构示意图

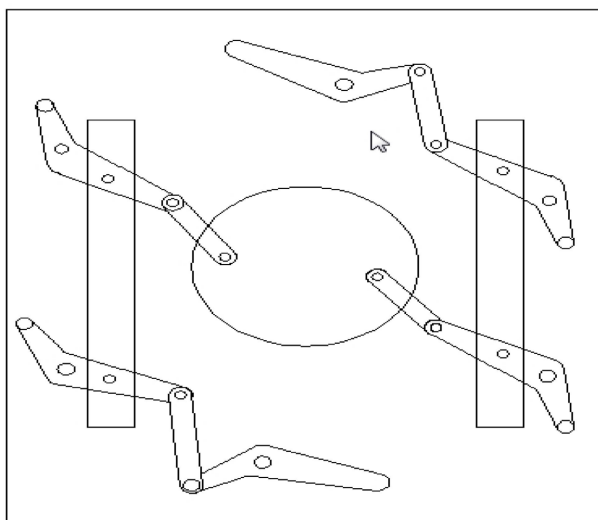


Figure 4. Illustration of the six-point locking mechanism
图 4. 六点锁紧机构示意图

2) 连杆机构(六点锁紧方案)

六点锁紧方案的优点是它的接触点较多，密封比较均匀，密封性能较好。它的缺点是机构结构比较复杂，要求制造精度较高，工作可靠性较差。其示意图如图 4 所示。

具体分析以上这两种舱门锁紧方案。由于曲柄滑块机构结构简单，工作可靠，并且可以达到密封舱门关于密封性的要求，因此最终选定曲柄滑块机构作为主舱门的结构方案。

3.2. 密封材料的选择

1) 油封沟槽式软填料密封：

这种密封方式要求加工精度较高，即在门的定位圈表面车出沟槽，然后在槽内装阻燃密封圈，密封效果尚可，但存在着结构上的弊病，即当定位间隙较小时(通常小于 1)时由于胶圈发涩，安装和拆卸困难，这对于密封舱门来讲是不适合的。

2) 平面压封式密封：

这种密封方式是在门的定位圈外圈的端面上加装弹性密封条。一般采用具有空气隙的弹性阻燃橡胶，用胶粘的方式粘在门的定位面上，高度易于控制，压缩量大，当门的预紧力达到一定程度时，密封效果很好，且保证了开闭自如，操作方便，这种方式现正被广泛采用。

综合分析以上两种密封方案，为满足密封门的工作功能要求，这里采用平面压封式密封方案作为舱门密封方案。

根据煤矿井下救生舱舱门的密封性要求，选用密封材料为：煤矿井下救生舱密闭门专用密封条。采用特种橡胶，特殊配方；产品特点：柔软，可压缩量大，密闭性能好，防水，防火，抗静电，隔热；规格型号：1500×750×20，可以根据客户的需求定做；经调查研究，煤矿井下用救生舱的密闭门专用密封条。经理论计算，当锁紧力 ≥ 10 KN 时，密封效果理想。规格尺寸：10 mm (宽)×20 mm (厚)(图 5)。

4. 井下救生舱密封实验

验证井下救生舱的密封性能是否符合安全标准，确保在矿井突发紧急状况时，救生舱能够有效隔离外部有害环境，为舱内人员提供安全的生存空间。

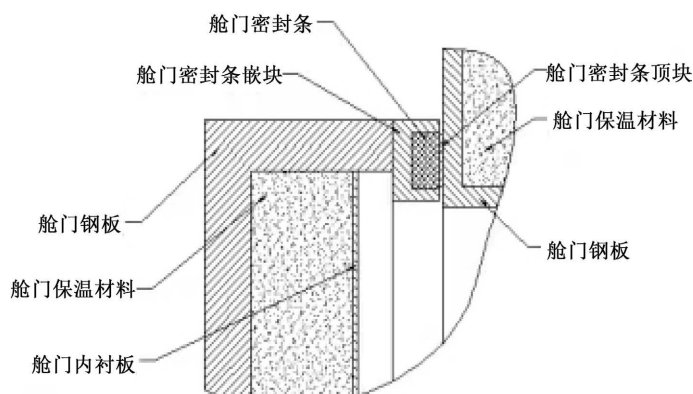


Figure 5. Sealing diagram of the hatch door

图 5. 舱门的密封示意图

4.1. 实验设备与材料

- 1) 井下救生舱：本次实验选用的设计中实验救生舱，其设计应满足相关煤矿安全规程对救生舱密封性能的要求。
- 2) 压力测试设备：高精度压力传感器，量程为 $0\sim 100\text{ kPa}$ ，精度： $\pm 0.1\text{ kPa}$ ，用于实时监测舱内压力变化；空气压缩机，能够提供稳定压力输出，最大压力可达 100 kPa ，为舱内加压。
- 3) 密封检测工具：肥皂水溶液，用于涂抹在救生舱的门缝、舱门与门框连接处、观察窗边缘等可能存在泄漏的部位，通过是否产生气泡来判断是否有泄漏；密封胶带，用于临时修补可能出现的微小泄漏点，以便进一步精确测试。
- 4) 数据记录设备：电脑及配套的数据采集软件，用于记录压力传感器传输的实时压力数据，并生成压力随时间变化的曲线。

4.2. 实验过程

- 1) 将救生舱放置在平坦、稳固的实验场地，确保救生舱处于水平状态，周围无杂物干扰。检查救生舱外观，确保无明显损坏、变形等影响密封性能的情况。关闭救生舱所有舱门、通风口、观察窗等可开启部件，并确保其关闭到位。
- 2) 连接压力测试设备，将压力传感器安装在救生舱内部合适位置，保证传感器能够准确测量舱内压力。将空气压缩机的出气口通过密封管道与救生舱的进气接口连接牢固。
- 3) 启动数据记录设备，设置好数据采集频率，确保能够准确记录实验过程中的压力变化数据。
- 4) 舱内加压
启动空气压缩机，缓慢向救生舱内注入空气，使舱内压力以大约 0.5 kPa/min 的速率逐渐上升。在加压过程中，密切观察压力传感器显示的压力值以及空气压缩机的运行状态，确保压力上升平稳。
当舱内压力达到设定的测试压力值 30 kPa 时，停止空气压缩机供气，并关闭救生舱进气口阀门，使舱内压力保持稳定。
- 5) 密封检测
在舱内压力稳定在 30 kPa 后，立即使用肥皂水溶液对救生舱的所有密封部位进行全面涂抹检查。重点检查舱门与门框的密封胶条、门缝、观察窗的密封胶圈、通风口的密封阀门以及各种管路接口等部位。
仔细观察涂抹肥皂水溶液的部位，若出现气泡，则表明该部位存在泄漏。对于发现的泄漏点，立即用记号笔进行标记，并记录泄漏位置和气泡产生的速率。

对于一些微小泄漏点，在标记后，使用密封胶带进行临时封堵，然后再次检查该部位是否还有气泡产生，以确认封堵效果。

6) 压力保持测试

在完成密封检测并对泄漏点进行初步处理后，开始进行压力保持测试。持续观察舱内压力传感器显示的压力值，记录压力随时间的变化情况。

按照实验标准，救生舱在测试压力 30 kPa 下，1 小时内压力下降不应超过 1 kPa。在测试过程中，每隔 10 分钟记录一次压力值，并绘制压力随时间变化的曲线。

7) 实验结束

当压力保持测试时间达到 1 小时后，实验结束。缓慢打开救生舱的排气阀门，将舱内压力降至常压。拆除压力测试设备、数据记录设备以及其他连接管路，清理实验现场，对救生舱进行检查，确保无因实验造成的损坏。

4.3. 实验结果与分析

1) 实验结果

压力保持测试期间，舱内压力随时间变化曲线显示，1 小时内压力从 30 kPa 下降至 29.8 kPa，压力下降值为 0.2 kPa，满足 1 小时内压力下降不超过 1 kPa 的标准要求。

2) 结果分析

对于发现的舱门左下角门缝泄漏点，经检查分析，可能是在救生舱运输或日常存放过程中，舱门受到轻微碰撞，导致该部位的密封胶条局部变形，从而影响了密封性能。经过密封胶带封堵后，该部位密封性能得到恢复，表明泄漏问题可以通过适当的维护和修复措施解决。

整体压力保持测试结果表明，该井下救生舱的密封性能基本符合安全标准要求。虽然在实验过程中发现了一处泄漏点，但经过处理后，救生舱能够在规定时间内保持稳定的压力，具备在紧急情况下为舱内人员提供安全密封空间的能力。同时，实验结果也为救生舱的日常维护和定期检测提供了参考依据，应加强对舱门密封胶条等关键密封部位的检查和维护，确保救生舱始终处于良好的密封状态。

5. 达到密封要求所需正压力计算

根据前面对舱体尺寸的分析，并考虑密封舱门密封、防爆的功能要求，选择门的基本尺寸为：高度 1250 mm，宽度 650 mm，门框宽度 50 mm。

由于 45#钢综合力学性能良好，适合制作受力复杂的各种工件，因此，本设计中锁紧机构的主要材料就选取 45#钢，可得：抗拉强度 $\sigma_b = 640 \text{ MPa}$ ，屈服强度 $\sigma_s = 355 \text{ MPa}$ 。所选密封橡胶的弹性模量为 2 MPa，尺寸为宽 10 mm，厚度 20 mm。静密封一般选用压缩量为 15%~20%。为达到密封要求，密封圈压缩量取 $\Delta L = 3 \text{ mm}$ 。

求锁紧装置所需提供压力：

由物理胡克定律公式

$$\Delta L = \frac{FL}{EA} \quad (1)$$

得： $\Delta L = 3 \text{ mm}$ ， $L = 20 \text{ mm}$ ， $E = 2 \text{ MPa}$ 时，

$$A = (1250 + 650) \times 2 \times 10 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 3.8 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \quad (2)$$

$$F = \frac{EA\Delta L}{L} = \frac{2 \times 10^6 \times 3.8 \times 10^{-2} \times 0.003}{0.02} = 11.4 \text{ kN}$$

对于 4 点密封门, 为达到密封要求每个着力点所需的力为:

$$F' = \frac{1}{4}F = \frac{1}{4} \times 11.4 = 2.85 \text{ KN}$$

6. 结语

由于救生舱的研究在近几年来受到我们国家和煤炭企业的大力重视, 救生舱的研究和应用就显得相当急迫, 因而选择救生舱密封装置设计作为毕业设计课题, 具有重要的实际意义。主要对井下救生舱密封舱门进行了设计。从自身的设计水平出发, 简要研究了气动舱门的气动原理和气动机构设计, 而后进一步进行了井下救生舱舱门的锁紧结构和密封的设计研究, 最终得出了较为合理的舱门密封方案和锁紧结构的设计及尺寸。经过分析论证此种救生舱舱门结构的强度和密封性能比较理想, 达到设计要求。

参考文献

- [1] 许炜华. 基于 PLC 的煤矿井气体监测防爆控制柜系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(1): 190-192.
- [2] 王豪. 宋官林. 2016-2020 年中国煤矿安全事故统计与现状分析研究[J]. 能源与节能, 2023(3): 170-173.
- [3] 杨斌. 我国煤矿安全生产现状分析及改善研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2020(8): 126.
- [4] 燕军. 煤矿井下紧急避险系统发展现状与应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(2): 157-158.
- [5] 刘志通. 煤矿可移动式救生舱防护密闭门气密性数值模拟研究[J]. 建井技术, 2024, 45(4): 60-64+54.
- [6] 伊海洋. 张才. 矿用胶囊式救生舱设计与仿真分析[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(4): 34-38.
- [7] 罗浩舜. 窦宏莺. 戴震. 李志强. 冲击载荷下救生舱缩比模型模拟验证[J]. 煤矿安全, 2021, 52(12): 165-171.
- [8] 王莹. 气动传动控制系统在非标自动化设备设计中的应用分析[J]. 自动化应用, 2021(11): 49-51.
- [9] 李水军. 非标自动化设备的气动传动控制系统设计[J]. 自动化应用, 2020(9): 151-152.
- [10] Len Van Kien, 孙瑜. 陈丽娟. 方美. 张敏. 基于双向 LSTM 的气动回路故障诊断方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(2): 367-372.