

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 26

大直径盾构机新型人舱的研究与应用

梁兴生

(中国铁建重工集团股份有限公司, 长沙 410000)

摘要: 以意大利西西里新铁路隧道工程为研究背景, 深入探讨了盾构机带压作业所需的人舱结构、配置和应用工况, 以解决长距离、全断面岩石地层掘进中的带压进舱作业难题, 满足盾构机在高压施工环境下的作业需求。根据带压进舱作业时人舱的功能需求, 综合考虑了人体工程学、紧急逃生、环境监测系统等多方面因素, 针对性地对人舱系统配置进行设计, 为作业人员提供了设备上的安全保障。对所设计的人舱舱门和舱体进行了有限元受力分析, 验证了人舱结构强度, 满足工作压力要求, 并通过水压试验和气密性试验验证了人舱结构的稳定性和可靠性。本文的有限元分析计算和承压试验结果证明了所设计的人舱不仅满足工程需求, 而且为盾构机在隧道施工中的高效、安全作业提供了坚实的设备保障, 确保施工效率与安全性的同步提升。

关键词: 盾构机; 带压作业环境; 人舱; 有限元分析; 承压试验

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0646-07

Research and Application of New Type Man Lock for Large Diameter Tunnel Boring Machine

Liang Xingsheng

(China Railway Construction Heavy Industry Co., Ltd., Changsha 410000, P. R. China)

Abstract: In the context of the grand construction of the new railway line tunnel project in Sicily, Italy, this article comprehensively and deeply analyzes the complex design and application of the man lock of tunnel boring machine in extreme pressure operating environments. Faced with the arduous task of long-distance crossing of full-section rock formations, especially the unique challenges brought by high-pressure water environments, this article creatively proposes a customized design scheme for the man lock system, aiming to completely solve the safety problem of pressurized entry operations. In response to the functional requirements of the man-lock during pressurized entry operations, and with due consideration given to ergonomics, emergency escape, environmental monitoring systems, etc., the man-lock system configuration was designed to provide equipment-related safety for workers. Finite element force analysis was carried out on the man-lock door and body to verify the structure's strength and ensure it meets working pressure requirements. The structure's stability and reliability were also confirmed through hydrostatic and air-tightness tests. The results of the finite element analysis and pressure tests show that the designed man-lock not only satisfies engineering needs, but also offers strong equipment support for the shield machine's efficient and safe tunneling, ensuring simultaneous enhancement of construction efficiency and safety.

Keywords: tunnel boring machine; pressure operating environments; man lock; finite element analysis; pressure test

收稿日期: 2025-06-20 (修改稿)

作者简介: 梁兴生 (1977—), 男, 广东封开人, 高级工程师, 主要从事地下隧道工程用掘进机产品研制等工作。

E-mail: liangxingsheng@126.com

0 引言

随着世界经济的蓬勃发展和科学技术的不断创新,地铁、铁路、隧道已成为现代重要的交通模式,世界各国及地区对地下交通网络建设的需求日益迫切,研究安全、高效、可靠、环保的地下施工装备和施工方法是进行地下建设的重要保障。目前,使用盾构法施工实现隧道全断面一体化成型,已成为现代隧道施工的主流方法之一,盾构法施工以其独特的优势在大直径、长距离、高水压的复杂施工环境中展现出强大的生命力,极大地提高了施工效率^[1-4]。而在实际施工中,盾构法面临着诸多风险和挑

战,其中带压进舱安全问题尤为突出。盾构开挖掘进施工时,刀盘的磨损修复和刀具更换是常见的难题^[5],由于常压条件下无法有效保证掌子面的稳定,使得带压进舱进行刀具维护和设备检修成为必然选择。然而,带压进舱作业风险高、进度慢,在高气压环境下的作业人员生命安全受到严重威胁,设备故障、地质条件的不确定性以及施工过程中的操作失误等因素都可能引发安全事故^[6]。为了降低带压进舱作业的风险,提高作业效率,盾构的加压开舱技术显得尤为关键,该技术通过调整盾构机内部的压力,使其与外部地层压力保持平衡,从而防止地层中的水砂涌入盾构机内部^[7-9]。

带压进舱作业前,应先对开挖仓内水位进行监测,当开挖仓内水位过高时,需先将开挖仓内水位降到人舱以下,然后根据实际地层压力动态调整所加入的高压气体量,保持开挖仓内压力稳定,水压和气压一致,以便保障人员作业安全。当开挖仓内压力超6 bar时,需进行饱和带压作业。

在面对极端的高水压与强透水复杂地层的南京纬三路过江通道工程时,需进行长时间的开舱带压作业,人舱作为关键的气压过渡设备,与穿梭舱、生活舱等共同构建了一套高效安全的饱和带压作业体系,以实现带压环境的迅速对接,避免作业人员的频繁加减压,为工程的成功穿越江底复杂地质环境提供了强有力的技术保障与安全保障^[10-12]。

随着盾构隧道工程的不断增加,国内外盾构开舱技术取得了显著进步,人舱作为常规压缩空气开舱和饱和带压开舱的关键设备,其设计的功能完整性和结构安全性显得尤为重要。传统人舱结构为双舱室结构,一个主舱,一个副舱,不能互换使用。本文以意大利西西里新铁路隧道工程为研究背景,针对盾构机带压进舱作业的特殊需求,设计研

发了一种大型盾构专用新型人舱,双舱室结构,每个舱即可做主舱使用又可作为副舱使用。这种人舱旨在满足盾构机在带压环境下的作业需求,保障作业人员的安全,并进一步提升隧道施工的效率。

1 工程概况

意大利西西里新铁路计划连接墨西拿、卡塔尼亚和巴勒莫等城市,提高区域内的交通效率。该项目包含多条隧道和高架桥的建设,其中一项关键工程是隧道开挖。工程隧道开挖直径为9 360 mm,需穿越2个区间,设备单次掘进距离分别为:左线区间约6.2 km,右线区间约6.3 km,总计开挖长度约12.5 km,最大埋深275 m,最大工作压力6 bar,采用一台盾构使用土压模式与常压模式连续掘进,转弯半径、线路坡度可忽略。隧道穿越地层为:页岩/千枚岩、砾岩、玄武岩/砂岩、砂岩、砾岩,最大围岩强度45 MPa。

工程面临的主要重难点在于其长距离、全断面岩石地层连接掘进。这种环境下,刀具磨损迅速,导致换刀操作频繁,同时进舱作业需求高,增加了带压作业风险,需要人舱等设备具备高可靠性和低故障率。因此,在设备选型、维护保养及故障应对等方面必须做好充分准备,以确保工程顺利进行。

2 人舱总体设计

2.1 功能原理

人舱作为盾构机的载人压力容器,具备压力调节和安全过渡功能,是人进入开挖舱进行换刀和设备检修的通道。当开挖舱内带压时,通过对人舱加减压能够将人从常压环境过渡到高压环境的开挖舱,当开挖舱内常压时,人舱只是一个安全通道,不需要加减压。根据意大利隧道工程ZTE9360盾构的施工需求,设计了一种可拆卸的双舱并联结构人舱,人舱通过螺栓与盾体连接。

2.2 人舱结构组成

人舱舱体为双舱八门结构,以往人舱的设计主要为

主舱和副舱位置固定,功能无法互换,本项目人舱可互为主副舱,即两个舱室功能可互换,且两个舱室分别同时满足3人乘坐,舱内净空高度为1.5 m,舱内净空长度为1.9 m,人均舱容1.0 m³,空间尺寸符合人体工程学,如图1所示。人舱舱门设计为自紧密封,能够受压而关闭,门锁为机械锁紧形式。在人舱的筒体上布有8个吊耳,前面板上布有3个吊耳,均为可活动式吊耳,满足人舱平吊、垂吊等吊装需求。同时在舱体上还设有多种预留

接口和接盒,用以进舱作业时水气、电气设备的连接。

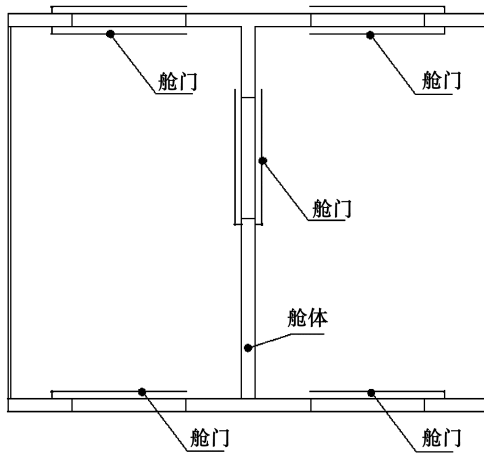


图 1 人舱结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of man lock

为保障作业人员在带压进舱作业时的安全,根据欧洲标准 BS EN 12110^[13],对人舱各舱室均配置以下系统:加减压系统(内外双向控制)、消防水喷淋系统(内外双向控制)、五组份气体采样分析系统、压力监测和显示系统、通讯系统、照明系统、加热系统、视频监控系统组成。其中,通讯系统电压为 24 V,包括一套开放式对讲电话和一套声力电话,断电或应急状态下可使用声力电话进行通讯;视频监控系统摄像头电压为 24 V,可实时将舱内画面传输至主控室;照明系统为电压 24 V 的 LED 照明灯;加热系统室外机电压为 220 V,对舱内进行水循环恒温加热,避免舱内高压用电的安全风险;此外,盾构机电气系统还配有 UPS,为人舱提供至少 2 h 的应急供电,保证人舱的稳定运转,降低安全事故发生的风险。

人舱舱内配置:舱内主要由加减压管路、消防水喷淋、高压灭火器、压力表、时钟、温湿度表、声力电话、对讲电话、摄像头、照明灯、水循环加热机组内机、座椅、排污管路等组成。

人舱舱外配置:舱外主要由加减压管路、消防水管路、气体分析仪、压力表、时钟、温度计、压力记录仪、流量计、声力电话、开放式对讲电话、通讯控制箱、水循环加热机组外机、安全阀等组成,人舱三维简图如图 2 所示。

2.3 主要技术参数

人舱结构的舱体尺寸、舱门尺寸除了需按照标准设计外,还需要根据盾体和主驱动的空间布置来确定,本文设计的人舱主要技术参数如表 1 所示。

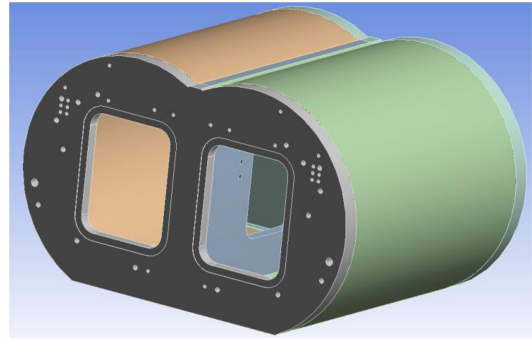


图 2 人舱三维简图

Fig. 2 3D diagram of man lock

表 1 人舱主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of man lock

序号	参数	数值
1	结构形式	卧式双舱
2	设计压力/bar	6.6
3	工作压力/bar	0~6
4	舱体规格/mm	2 100×2 600×1 600
5	主舱容积/m ³	3
6	副舱容积/m ³	3
7	主舱人数/人	1~3
8	副舱人数/人	1~3
9	主、副舱舱门尺寸/mm	800×630/800×600
10	后舱门尺寸/mm	φ600
11	舱体重量/kg	9 000

3 人舱结构强度校核

人舱属于压力容器,按照美国机械工程师协会(ASME)相关规范进行设计制造,本文采用极限载荷法防止结构塑性坍塌失效,并采用弹性分析法防止局部失效^[14],人舱不承受外压,故无需进行屈曲分析,人舱生命周期内使用次数小于 1 000 次,故无需进行疲劳分析。

3.1 水压试验压力的确定

人舱舱体板材为 SA-516M Gr. 485,许用应力为 138 MPa,屈服强度为 255.6 MPa,设计压力为 0.66 MPa,极限载荷为 0.99 MPa,试验温度与设计温度材料许用应力比值 LSR = 1.0,最大允许工作压力 MAWP = 0.66 MPa,根据 ASME BPVC. VIII. 1^[15]和 PED 2014/68/EU^[16]确定人舱试验压力 P_1 。

根据 ASME BPVC. VIII. 1:

$$P_1 = 1.3MAWP \cdot LSP = 0.858 \text{ MPa} \quad (1)$$

根据 PED 2014/68/EU:

$$P_1 = 1.43MAWP = 0.9438 \text{ MPa} \quad (2)$$

水压试验压力设定为 $P = 0.99 \text{ MPa}$,满足

ASME BPVC. VIII. 1 和 PED 2014/68/EU 要求。

试验与设计压力比值:

$$Sr1 = 0.99/0.66 = 1.5 \quad (3)$$

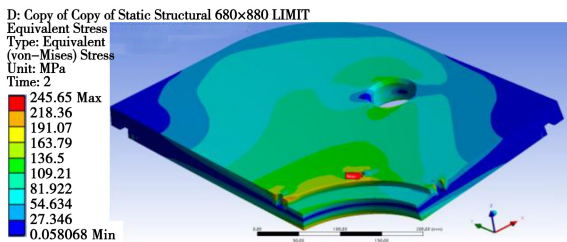
试验与设计的许用应力比值:

$$Sr2 = 0.9 \times 255.6 \div 138 = 1.667 \quad (4)$$

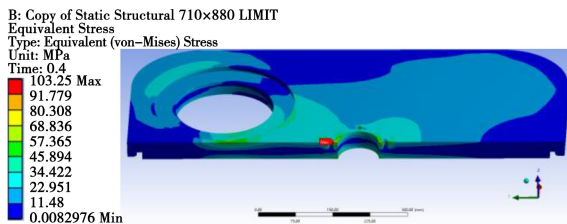
$Sr2 \geq Sr1$, 故按 0.99MPa 进行水压试验时应力余量足够, 设备安全。

3.2 舱门强度校核

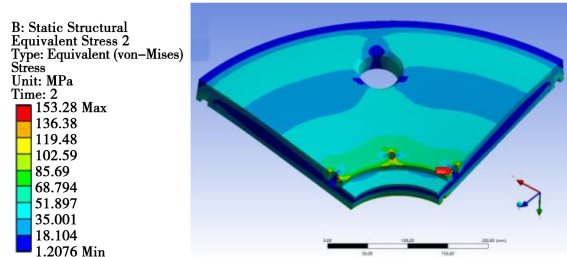
人舱为双舱八门结构, 分别为 2 道 600 mm × 800 mm 舱门、2 道 630 mm × 800 mm 舱门、4 道 φ600 mm 舱门, 主要关心舱门开孔处的应力分布规律及大小, 对舱门进行一次应力加二次应力的评定分析。为减少计算量, 600 mm × 800 mm 舱门采用 1/4 对称模型进行强度分析, 630 mm × 800 mm 舱门采用 1/2 对称模型进行强度分析, φ600 mm 舱门采用 1/4 对称模型进行强度分析, 模型均采用 Solid 45 六面体实体单元划分网格, 边界条件为对称面设置无摩擦约束, 门框轴向约束, 对舱门板材表面施加极限载荷压力。使用有限元分析软件计算得到应力云图如图 3 所示。



(a) 600×800舱门极限载荷下的应力云图



(b) 630×800舱门极限载荷下的应力云图



(c) φ600舱门极限载荷下的应力云图

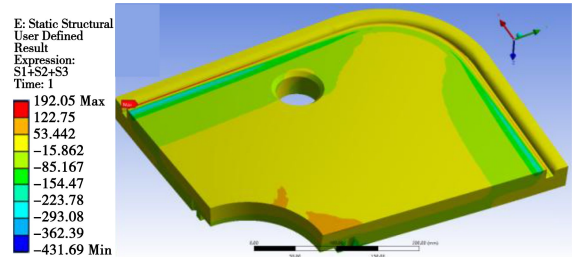
图 3 舱门在极限载荷下的应力云图

Fig. 3 Stress nephogram of lock door under ultimate load

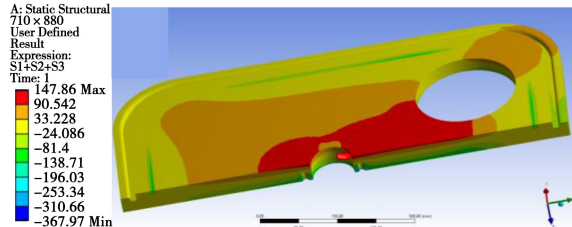
根据极限载荷法, 由图 3 计算结果能得到极限载荷下的收敛解, 600 mm × 800 mm 舱门、630 mm ×

800 mm 舱门、φ600 mm 舱门的一次应力加二次应力最大应力和分别为 245 MPa、103 MPa、153 MPa, 均位于舱门中心位置。

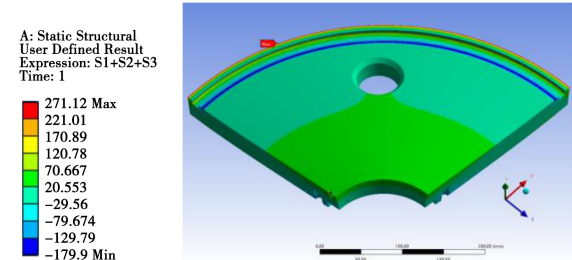
根据弹性分析法, 由图 4 计算结果看, 600 mm × 800 mm 舱门、630 mm × 800 mm 舱门、φ600 mm 舱门的最大三向主应力之和分别为 431 MPa、368 MPa、271 MPa, 分别位于舱门边缘、舱门中心、舱门边缘。



(a) 600×800舱门三向主应力之和应力云图



(b) 630×800舱门三向主应力之和应力云图



(c) φ600舱门三向主应力之和应力云图

图 4 舱门三向主应力之和

Fig. 4 The sum of the three principal stresses on the lock door

舱门板材为 SA-516M Gr. 485, 许用应力为 138 MPa, 屈服强度为 255.6 MPa, 泊松比为 0.3。

由图 3、图 4 得到的 3 种舱门应力计算结果, 对设计的 3 种舱门强度进行评定, 见下表 2, 根据分析结果可知, 舱门结构强度均满足要求。

3.3 舱体强度校核

人舱舱体为左右结构, 共有左、右两个舱室, 采用全对称模型进行强度分析, 模型采用 Solid 45 六面体实体单元划分网格, 边界条件为后盖板上的螺栓孔。本文共考虑了 3 种加载情况: 左侧舱室带压时极限载荷、右侧舱室带压时极限载荷、两侧舱室均带压时极限载荷。使用有限元分析软件计算得

到应力云图如图 5 所示。

表 2 舱门应力评定

Table 2 Lock door stress assessment

名称	应力形式	最大应力值/MPa	评定结果
600×800 舱门	一次加二次应力	245	<3×138
	三向主应力和	431	<4×138
630×800 舱门	一次加二次应力	103	<3×138
	三向主应力和	368	<4×138
φ600 舱门	一次加二次应力	153	<3×138
	三向主应力和	271	<4×138

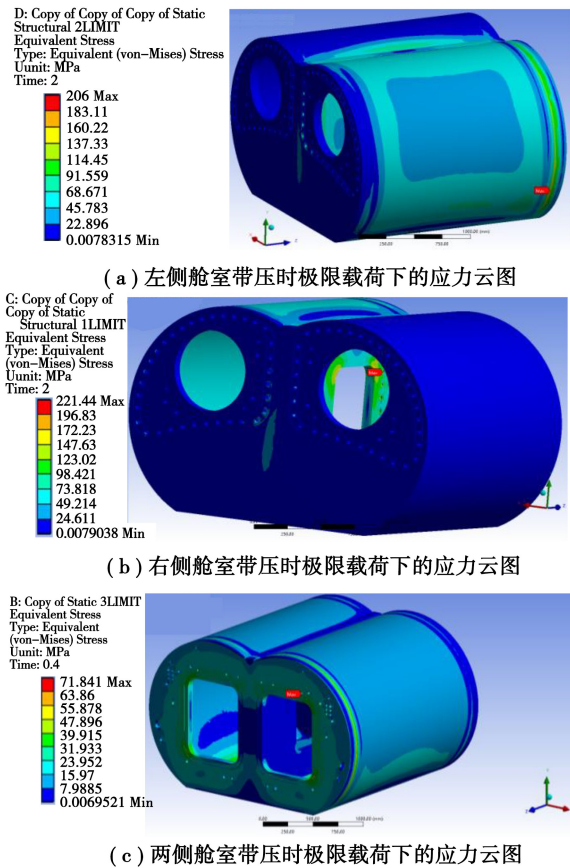


图 5 人舱在极限载荷下的应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of man lock under ultimate load

根据极限载荷法,由图 5 计算结果能得到极限载荷下的收敛解,3 种工况下的一次应力加二次应力最大应力和分别为 206 MPa、221 MPa、71 MPa,分别位于舱体前面板左侧、两舱室中间隔板、舱体前面板上部。

根据弹性分析法,由图 6 计算结果看,3 种工况下的最大三向主应力之和分别为 259 MPa、265 MPa、268 MPa,分别位于舱体中间隔板与后面

板连接处、中间隔板与后面板连接处、前面板右侧与弧板连接处。

舱体板材为 SA-516M Gr. 485,许用应力为 138 MPa,屈服强度为 255.6 MPa,泊松比为 0.3。

由图 5、图 6 得到的 3 种工况下舱体应力计算结果,对设计的人舱舱体在 3 种工况下进行评定,见表 3,根据分析结果可知,人舱结构强度均满足要求。

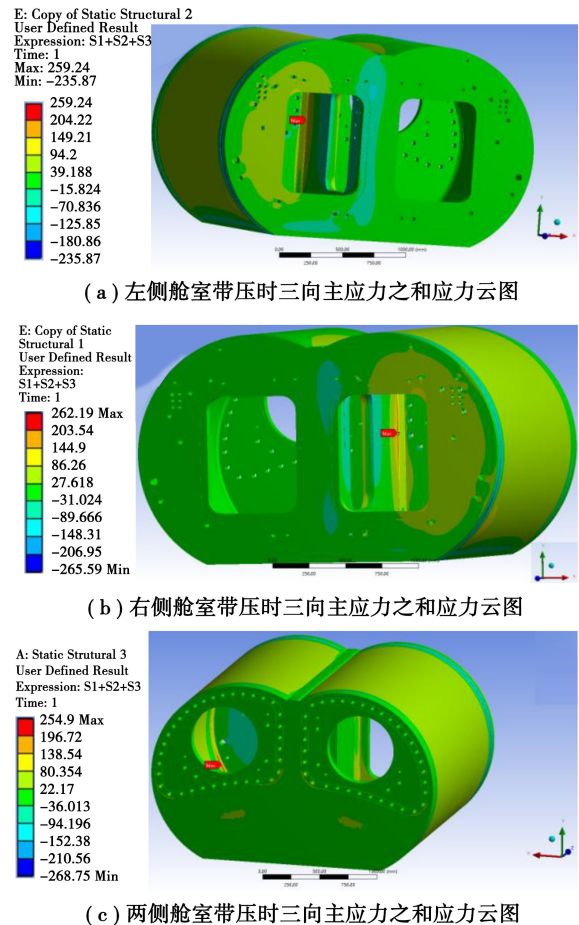


图 6 人舱三向主应力之和

Fig. 6 The sum of the three principal stresses on the man lock

表 3 舱体应力评定

Table 3 Lock body stress assessment

名称	应力形式	最大应力值/MPa	评定结果
左侧舱室带压	一次加二次应力	206	<3×138
	三向主应力和	259	<4×138
右左侧舱室带压	一次加二次应力	221	<3×138
	三向主应力和	265	<4×138
两侧舱室均带压	一次加二次应力	71	<3×138
	三向主应力和	268	<4×138

4 人舱压力试验

为了保障设备的可靠性,确保其在复杂环境下能够稳定、安全地运行,人舱在出厂之前必须经过严格的承压试验和气密性试验。这些试验的主要目的是检验舱体的承压能力,确保其能够承受预定的压力范围,同时检查人舱整体的气密性,以防止在带压作业过程中出现漏气或渗水的情况。只有通过这些试验,人舱才能满足设备出厂要求,被允许投入使用。这些措施是保障盾构施工顺利进行的重要一环。

4.1 水压试验

在舱门安装完成后,对舱体进行承压试验,选用水作为介质,分别对主舱、副舱进行水压试验,试验水压为 9.9 bar,水温为 17℃,压力表量程为 0~25 bar,压力表精度等级为 1.6。

人舱水压试验过程:关闭舱门并封堵管口,向舱内逐步注满水至压力达到 9.9 bar 后停止加压,静止保压 30 min,然后逐步减压到 7.61 bar,静止保压 15 min 后逐步将压力降为零,试验结束后,对舱体进行彻底的清洁和干燥,以防止锈蚀或损坏。实际水压试验压力曲线如图 7 所示,主舱、副舱分别经 9.9 bar 水压试验,均无泄漏、无异常变形和响声,试验结论合格,舱体结构强度满足需求。

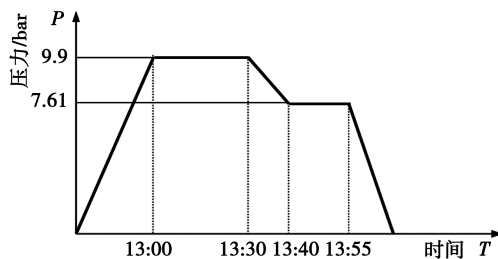


图 7 实际水压试验压力曲线

Fig. 7 Actual water pressure test pressure curve

4.2 气密性试验

在人舱管路等附件安装完成后,对人舱进行整体气压试验以检验管道系统和舱室气密性,选用压缩空气作为介质,分别对主舱、主舱加副舱进行气密性试验,试验压力为 6.6 bar,介质温度为 23℃,压力表量程为 0~16 bar,压力表精度等级为 1.6。

气密性试验过程:关闭进入人舱的舱门,打开加压阀向舱内加压,观察流量计示数控制进气流量,待压力稳定达到 6.6 bar 后停止加压,静止保压 60 min,然后减压到 5.07 bar,静止保压 30 min 后将压力降为 0,试验结束后,对舱体进行必要的清洁和维护工作,确保其长期稳定运行。实际气密性

试验压力曲线如图 8 所示,主舱、主舱加副舱分别经 6.6 bar 气密性试验,均无泄漏、无异常变形和响声,试验结论合格,舱室气密性满足需求。

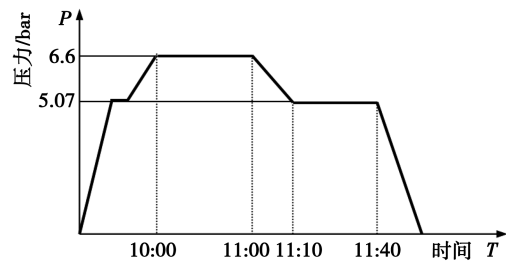


图 8 实际气密性试验压力曲线

Fig. 8 Actual airtightness test pressure curve

5 结论

(1) 本文研究的一种可拆卸双舱并联结构人舱,满足在 6 bar 压力环境的 3+3 人带压进舱作业需求。研究的人舱应用于意大利西西里新铁路隧道项目 ZTE9360 型号盾构机,以解决长距离、全断面岩石地层掘进中高风险的带压进舱作业问题,为项目的高效、安全推进提供了强有力的保障。

(2) 本文采用极限载荷法和弹性分析法对人舱结构强度进行严格校核,计算结果符合美国机械工程师协会(ASME)规范,以确保人舱在各种极端条件下的稳定性。通过水压试验,验证了人舱在最大 9.9 bar 水压下的结构强度,并通过气密性试验,验证了人舱在最大 6.6 bar 气压下的气密性能,以确保在带压环境下的人舱能够稳定、安全运行。

(3) 本文研究的双舱八门对称式人舱结构简单,各项配置齐全,设备安全可靠,可广泛应用于 9 m 级、13 m 级、15 m 级等大直径盾构上,能够有效提高带压进舱作业的效率 and 设备的可靠性,为盾构机的安全施工提供了技术支持。

参考文献(References)

- [1] 丁智,张默爆,张霄,等.饱和土地区不同直径盾构穿越既有隧道的理论研究[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(4):1447-1462. (Ding Zhi, Zhang Mobao, Zhang Xiao, et al. Theoretical research on shield tunnels with different diameters crossing through existing tunnels in saturated soil area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55 (4): 1447-1462. (in Chinese))
- [2] 陈健,黄永亮.超大直径泥水盾构施工难点与关键技术总结[J].地下空间与工程学报,2015,11(增2):637-644. (Chen Jian, Huang Yongliang. Summary

- of Key Technologies and Construction Difficulties in Large Diameter Slurry Shield Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11 (Supp. 2): 637-644. (in Chinese))
- [3] 何川, 陈凡, 黄钟晖, 等. 复合地层双模盾构适应性及掘进参数研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 43-52. (He Chuan, Chen Fan, Huang Zhonghui, et al. Tunneling parameters and comparison of adaptability for compound strata of dual-mode shield machine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (1): 43-52. (in Chinese))
- [4] 刘泓志, 曹英贵, 代镇洋, 等. 穿越多种典型地层的跨海超大直径泥水盾构选型及针对性设计: 以青岛胶州湾第二海底隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(4): 793-800. (Liu Hongzhi, Cao Yinggui, Dai Zhenyang, et al. Selection and Targeted Design of Cross-Sea Ultralarge Diameter Slurry Shield Tunneling Through Various Typical Strata: A Case Study of Jiaozhou Bay Second Submarine Tunnel in Qingdao, China [J]. Tunnel Construction, 2024, 44 (4): 793-800. (in Chinese))
- [5] 陈健, 刘红军, 闵凡路, 等. 盾构隧道刀具更换技术综述[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 36-46. (Chen Jian, Liu Hongjun, Min Fanlu, et al. Technical Review of Cutter Replacement in Shield Tunneling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (10): 36-46. (in Chinese))
- [6] 孙金鑫, 钟小春, 孙鹤明, 等. 砂卵石地层盾构带压开舱泥膜闭气能力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 445-452. (Sun Jinxin, Zhong Xiaochun, Sun Heming, et al. Study on Airtightness of Filter Cake during Hyperbaric Intervention in Shield under Sandy Gravel Stratum [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17 (2): 445-452. (in Chinese))
- [7] 徐阳, 师文豪, 王源, 等. 曲线盾构隧道掘进地表沉降计算模型[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(3): 160-169. (Xu Yang, Shi Wenhao, Wang Yuan, et al. Theoretical Model for Surface Settlement Induced by Curved Shield Tunneling [J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56 (3): 160-169. (in Chinese))
- [8] 施筭. 土压平衡盾构在富含水砂层中加压开舱技术[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(1): 154-160. (Shi Sun. Hyperbaric Intervention of an Earth Pressure Balance Shield in Water-Rice Sand Stratum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50 (1): 154-160. (in Chinese))
- [9] 韩维畴, 王太平, 孙富强, 等. 复杂条件下土压平衡盾构机洞内加固带压开舱施工技术[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增1): 942-950. (Han Weichou, Wang Taiping, Sun Fuqiang, et al. Construction Techniques of Reinforcement at Excavating face and Hyperbaric Intervention of Earth Chamber of EPB shield machine in Complicated Conditions [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57 (Supp. 1): 942-950. (in Chinese))
- [10] 于宝敏, 季玉国. 国内盾构开舱技术现状与风险管控[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(4): 683-693. (Yu Baomin, Ji Yuguo. State-of-art and Risk Management of Shield Chamber Opening Technology [J]. Tunnel Construction, 2018, 38 (4): 683-693. (in Chinese))
- [11] 陈健, 薛峰, 苏秀婷, 等. 高水压大直径盾构隧道刀盘配置与刀具更换关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 168-177. (Chen Jian, Xue Feng, Su Xiuting, et al. Key Technologies of Cutterhead Configuration and Cutter Replacement for Large-diameter Shield under High Water Pressure [J]. Tunnel Construction, 2020, 40 (7): 168-177. (in Chinese))
- [12] 张英明, 忽慧涛, 张伯阳. 饱和带压开舱技术相关设备及操作研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(4): 201-206. (Zhang Yingming, Hu Huitao, Zhang Boyang. Study of Equipment and Operations Related to Saturated Hyperbaric Intervention Technology [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52 (4): 201-206. (in Chinese))
- [13] European Committee for Standardization. Tunnelling machines-Air locks-Safety requirements (EN 12110:2014)[S]. 2014.
- [14] 张磊, 胡震. 大深度载人潜水器载人舱球壳极限承载能力计算公式研究现状分析[J]. 中国造船, 2022, 63(5): 125-135. (Zhang Lei, Hu Zhen. Analysis on the Research Status of the Formula for Ultimate Bearing Capacity of the Spherical Shell of the Large-depth HOV's Manned Submersible [J]. Shipbuilding of China, 2022, 63 (5): 125-135. (in Chinese))
- [15] American Society of Mechanical Engineers. ASME Boiler and Pressure Vessel Code[S]. 2019.
- [16] Directive of the European Parliament and of the Council on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of pressure equipment (recast; Text with EEA relevance) (EU/EC 2014/68/EU-2014) [S]. 2015.