

文章编号:1005-9865(2019)05-0010-06

钛合金载人舱球壳试验压力和应力衡准取值研究

沈允生,李文跃,姜旭胤

(中国船舶科学研究中心 深海载人装备国家重点实验室,江苏 无锡 214082)

摘 要:各国潜水器规范对潜水器载人舱球壳试验压力的规定各有不同,以球壳的中面膜应力作为计算对象,推算各规范和标准关于膜应力在试验压力下的应力衡准。结合“蛟龙号”和“深海勇士号”两型潜水器载人舱球壳的外压试验,对计算应力和实测应力数据分析对比,提出适合钛合金载人舱球壳的试验压力和应力衡准参考值。

关键词:载人舱球壳;试验压力;膜应力;应力衡准

中图分类号:U663.2; P754 文献标志码:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2019.05.002

Parameter research of test pressure and stress criterion for the titanium-alloy manned pressure hulls

SHEN Yunsheng, LI Wenyue, JIANG Xuyin

(China Ship Scientific Research Center, State Key Laboratory of Deep-Sea Manned Vehicles, Wuxi 214082, China)

Abstract: The specifications of the test pressure parameters for the external pressure hull are different in some submersible rules. In this article, the membrane stress of the spherical hull is taken as the object of calculation, and the stress criterion of the membrane stress under the test pressure is calculated according to the rules and standards. After the external pressure test of the manned hulls of the “JIAOLONG” and “Deepsea Warrior”, the parameters of the external pressure test and the stress criterion for the titanium-alloy manned pressure hulls are proposed based on the comparative analysis of the theoretical calculated stress and the measured stress.

Keywords: manned pressure hull; test pressure; membrane stress; stress criterion

随着国家对海洋开发的重视,相关海洋装备得到快速发展,以“蛟龙号”、“海龙号”为代表的一系列潜水器已投入应用,取得大量的科考成果。其中载人潜水器由于可以运载科学家安全抵达海洋深处,具备其它类型潜水器没有的主观优势,受到更多的关注。

载人舱球壳是载人潜水器最关键的部件,它的设计和制造质量是潜水器性能和乘员安全的重要保障。如果载人舱球壳出现问题,严重的话会出现艇毁人亡的重大事故。历史上,曾经有不少探险家因为载人舱球壳的损坏而失去生命^[1]。因此,载人舱球壳制造完成后均需进行静水外压试验考核,以验证载人舱球壳的设计效果,考核载人舱球壳的制造质量和密封性能。关于载人舱球壳外压试验的试验压力,各国的潜水器相关规范不太一致。国内外学者对载人舱球壳试验压力的取值研究未见相关文献,关于试验压力取值的研究多集中于压力容器。刘小宁^[2]应用可靠设计方法对钢制压力容器试验压力进行了研究,并初步分析认为钢制压力容器可进行外压试验,外压试验的试验压力系数为 1.080 8~1.406 5。翟建华等^[3]对外压容器及压力试验进行了研究,得到真空筒体可承受的最大试验应力。结合“蛟龙号”和“深海勇士号”两型潜水器钛合金载人舱球壳的外压试验,以球壳的中面膜应力作为研究对象,通过对实测应力应变数据的分析,提出钛合金载人舱球壳的试验压力和应力衡准的参考值。

收稿日期:2018-12-17

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFF0208402)

作者简介:沈允生(1980-),男,江苏盐城人,高级工程师,主要从事潜水器总体与结构设计研究。E-mail: dongtaisys@126.com

1 试验压力的规定

各国潜水器规范和压力容器相关标准对于试验压力的规定各不相同。为了便于对比研究,选择载人潜水器用钛合金球壳作为研究对象。根据经典板壳理论,一般根据厚度半径比的大小,将球壳分为薄壳和厚壳,厚度半径比小于 0.05 的壳体为薄壳,反之则为厚壳^[4]。文献[5]中绘制了不同厚度半径比的球壳结构屈服时临界载荷曲线和弹性屈曲载荷曲线,两个曲线存在一个交叉点,在厚度半径比小于该交叉点对应厚度半径比时,球壳弹性屈曲临界载荷要小于等结构屈服时的临界载荷;厚度半径比大于该交叉点对应值时,则相反。对于“蛟龙号”和“深海勇士号”等大深度载人潜水器来说,其载人舱球壳均属于中厚壳,根据文献[5]的分析可知,球壳的极限承载能力是由结构屈服时的临界载荷决定的,通常以球壳的中面应力达到材料屈服强度时的临界载荷作为球壳的极限承载能力。当然,球壳的极限承载能力还必须把球壳非线性屈曲时的临界载荷考虑进来。对于载人舱球壳来说,压力试验是检验球壳设计是否合理、材料或制造是否存在缺陷的必要手段,试验前应尽可能确保球壳在试验压力下不会因为上述原因出现屈曲破坏。为便于比较,本文以球壳的中面膜应力作为比较对象,根据各规范对设计压力下中面膜应力的衡准要求,推导出试验压力下中面膜应力与材料屈服强度的比例关系。

文献[4]分别对薄壳和厚壳的计算方法进行了说明,并将理论计算结果与有限元计算结果和试验结果进行了比较,最终建议大深度球壳的中面膜应力按式(1)进行计算,该公式为根据无矩理论推导出的薄球壳薄膜应力计算公式。

$$\sigma = \frac{PR}{2t} \tag{1}$$

式中: P 为球壳承受的外压, R 为球壳的中面半径, t 为球壳的壁厚。

1) 中国船级社《潜水系统和潜水器入级规范》^[6](下文简称 CCS 规范)

CCS 规范第 2 章第 5 节明确规定:所有承受外压力的耐压壳体,在建成并测量其圆度后,都应进行试验压力为最大工作压力 1.25 倍的外压试验。在第 4 章第 6 节规定,球壳体的中面膜应力应满足式(2)要求。

$$\sigma = \frac{P_j R}{2t} \leq 0.85 R_{eh} \tag{2}$$

式中: P_j 为计算压力,取 1.5 倍的最大工作压力, R 为球壳的中面半径, R_{eh} 为材料屈服强度。则在试验压力下,球壳的中面膜应力应满足式(3)的要求,即

$$\sigma_t = \frac{P_t R}{2t} \leq \frac{0.85 \times 1.25}{1.5} R_{eh} \approx 0.71 R_{eh} \tag{3}$$

2) 俄罗斯《Rules for the classification and construction of manned submersibles, ship's diving systems and passenger submersibles》^[7](下文简称 RS 规范)

RS 规范中,试验压力要求如下:

$$\begin{cases} P_t = 1.25P & H_{op} \leq 300 \text{ m} \\ P_t = (1.25 - (H_{op} - 300)/7\,000)P & 300 \text{ m} < H_{op} \leq 1\,000 \text{ m} \\ P_t = 1.15P & H_{op} > 1\,000 \text{ m} \end{cases} \tag{4}$$

式中: P 为潜水器的最大工作压力, H_{op} 为潜水器的最大工作深度。球壳的中面膜应力应满足式(5)的要求。

$$\sigma = \frac{PR}{2t} \leq [\sigma] \tag{5}$$

式中: $[\sigma]$ 为许用应力。其计算式为:

$$[\sigma] = \begin{cases} R_{eh}/1.5 & \text{受压应力处} \\ R_{eh}/2.0 & \text{受拉应力处} \end{cases} \tag{6}$$

球壳的膜应力均为压应力,则 $[\sigma]$ 取 $R_{eh}/1.5$ 。在试验压力下,球壳的中面膜应力应满足如下公式:

$$\begin{cases} \sigma_t \leq 0.83 R_{eh} & H_{op} \leq 300 \text{ m} \\ 0.77 R_{eh} < \sigma_t < 0.83 R_{eh} & 300 \text{ m} < H_{op} \leq 1\,000 \text{ m} \\ \sigma_t \leq 0.77 R_{eh} & H_{op} > 1\,000 \text{ m} \end{cases} \tag{7}$$

3)美国《Rules for building and classing underwater vehicles, systems and hyperbaric facilities 2010》^[8](下文简称 ABS 规范)

ABS 规范的第三章“General Requirements and Safeguards”中规定:所有承受外压的壳体,完成外部圆度测量后,应进行 1.25 倍设计深度的外压试验,两个循环。关于壳体中面膜应力的计算,ABS 规范未给出明确公式。计算压力下,应力水平的衡准则明确要求:总体膜应力不得大于 $0.8R_{\text{eH}}$ 。

ABS 规范中,没有对球壳的计算压力提出相关的规定,但对球壳的极限承载压力提出了要求,即极限承载压力必须大于 1.5 倍的最大工作压力。为与上文的计算对应,采用 ABS 规范计算中面膜应力时,计算压力取 1.5 倍的最大工作压力,按式(1),则在试验压力下,球壳的中面膜应力应不得大于 $0.67R_{\text{eH}}$ 。

上述规范关于载人舱球壳的试验压力系数和中面膜应力的取值要求详见表 1。

表 1 试验压力系数 η 和中面膜应力的取值

Tab. 1 Pressure factor η of the pressure test and the value of membrane stress

规范	适用范围	压力系数 η	中面膜应力/屈服强度
中国 CCS 规范	未明确具体范围	1.25	≤ 0.71
	$H_{\text{op}} \leq 300 \text{ m}$	1.15	≤ 0.83
	$300 \text{ m} < H_{\text{op}} \leq 1\,000 \text{ m}$	1.15~1.25	0.77~0.83
俄罗斯 RS 规范	$H_{\text{op}} > 1\,000 \text{ m}$	1.15	≤ 0.77
	全海深	1.25	≤ 0.67

2 “蛟龙号”载人舱球壳外压试验分析

2.1 设计说明

“蛟龙号”载人潜水器最大工作深度为 7 000 m,考虑海水密度等,球壳设计时,最大工作压力取71 MPa。球壳内径为 2.1 m,材料选用 BT-6 钛合金(俄罗斯牌号),球壳上开孔结构包括:一个出入人孔,一个主观察窗,两个副观察窗,一个集成多个小开孔的电缆穿舱件安装盘。

设计之初,由于没有现成的标准和规范,经过评估分析确定了相关的设计参数和应力衡准。应力衡准要求如下:在计算压力下,壳板的中面膜应力不大于材料屈服强度 R_{eH} ,开孔部分局部中面周向应力不大于1.15 倍材料屈服强度 R_{eH} 。经过理论计算和有限元分析,当球壳壁厚取 76 mm 时,设计结果满足要求,应力水平满足应力衡准要求。

2.2 球壳的试验过程

根据载人舱球壳的设计参数和设计结果,试验压力取 1.1 倍的最大工作压力,即 78 MPa。图 1 为载人舱球壳试验照片。为了验证球壳的设计结果和建造质量,试验时,在载人舱球壳典型位置和总体结构不连续位置(即开孔加强孔座与球壳连接位置)布置了应变片,其中壳体上的应变片均为内外对应布置。图 2 为应变片布置图。

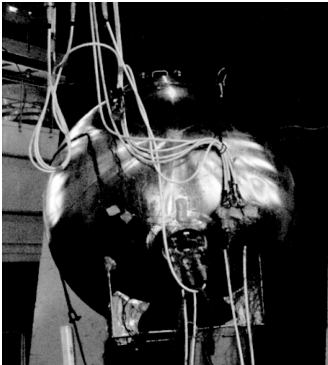


图 1 “蛟龙号”载人舱球壳

Fig. 1 Manned hull of “JIAOLONG” submersible

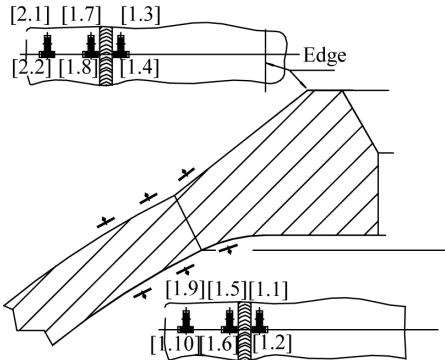


图 2 出入人孔孔座与球壳连接区域应变片布置

Fig. 2 Arrangement diagram of the strain gages at the joint area of the hull and the access hatch coaming

2.3 球壳试验结果分析

试验时,根据各测量片的应变测量值可知,加卸载时的应变-压力关系均呈线性,回复性良好。根据最大试验压力(即 78 MPa)应变测试数据计算得出每个测点的主应力,其中外贴片应力计算时考虑压力效应等进行了修正。计算应变时,材料性能参数取球壳材料实测数据,弹性模量 E 取 1.24×10^5 MPa,泊松比 μ 取 0.3。计算中面膜应力时,球壳内径和厚度均按实测值,材料屈服强度 R_{eH} 取名义值,对于“蛟龙号”载人舱球壳, R_{eH} 取 800 MPa。

由于试验时所得到的应力为球壳内外表面的应力,因此球壳的中面膜应力实测值,需根据内外表面的实测应力值计算得出。根据文献[9]中弹性力学公式可求得承受内、外压作用下的厚壁球形壳体主应力方程式,厚球壁的应力沿壁厚分布如图 3 所示,其应力沿厚度分布接近线性。文献[4]中分别对 CCS 规范钛合金球壳应力计算公式、拉梅公式和有限元计算结果进行比较分析,结果表明:在厚度半径比小于 0.1 范围内,截面应力沿厚度方向的分布基本是线性变化。因此,为简化计算,文中面膜应力实测值取球壳内外表面实测应力的平均值。

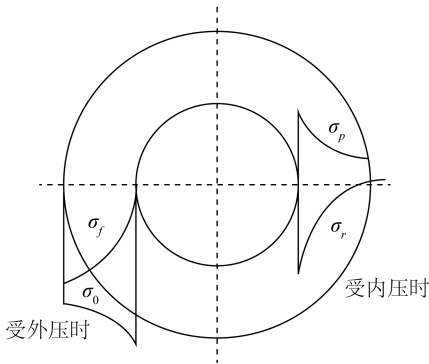


图 3 厚壁球壳应力分布
Fig. 3 Stress profile of the thick spherical shell

由表 2 可知,根据试验时内外表面应力实测值所得到的中面膜应力实测值与理论计算值比值为 1.030, 相差不超过 5%,在工程误差范围内,该偏差可能是测量系统误差、测量应力估算过程中弹性模量、泊松比的选取与实际球壳不完全一致等因素引起的。在试验压力下,球壳中面膜应力实测值约为 $0.709R_{eH}$,孔座与球壳连接部位中面周向应力实测值约为 $0.775R_{eH}$,为壳体中面膜应力计算值的 1.124 倍。

表 2 试验压力下实测应力与计算值及屈服强度的比值

Tab. 2 Ratio of the measured stress to the calculated stress and the yield strength under test pressure

部位	中面膜应力 实测值/计算值	连接部位实测值/ 中面膜应力计算值	中面膜应力实测 值/屈服强度	连接部位实测 值/屈服强度
中面	1.030	1.124	0.709	0.775

3 “深海勇士号”载人舱球壳试验分析

3.1 球壳设计说明

“深海勇士号”载人潜水器的最大工作深度为 4 500 m,考虑海水密度和超深等因素,载人舱球壳的最大工作压力取 46 MPa。球壳内径为 2.1 m,选用 TC4ELI 钛合金材料,球壳上开孔结构包括:一个出入人孔、一个主观察窗、四个副观察窗和两个集成多个小开孔的电缆穿舱件安装盘。

载人舱球壳设计时参照 CCS 规范,安全系数取 1.5,应力衡准如下:最大工作压力下,远离开孔处壳体平均膜应力应不超过材料屈服强度的 2/3;不计局部应力集中的平均膜应力和弯曲应力的组合应力应不超过材料屈服强度的 3/4;计及局部应力集中的壳体任一点处的最大峰值应力应不超过材料屈服强度;但如果最大峰值应力是压应力,则最大峰值压应力可允许超过材料屈服强度,但应不超过材料抗拉强度。

TC4ELI 钛合金材料的性能参数如表 3 所示。根据规范和有限元软件的计算,当球壳厚度取 53 mm,应

力水平和极限承载强度均满足 CCS 规范要求。

表 3 TC4ELI 厚板材料技术指标

Tab. 3 Mechanical properties of the TC4ELI plate					
性能	R_{eH}/MPa	R_{m}/MPa	$A/(\%)$	$Z/(\%)$	冷弯角
指标	≥ 795	≥ 862	≥ 12	≥ 25	$D=10\text{ t}, 105^\circ$

3.2 球壳的试验过程

载人舱球壳外压试验压力根据 CCS 规范要求,取 1.25 倍的最大工作压力,即 57.5 MPa。外压试验时,进行了应变测量,测点分布在球壳典型位置、赤道焊缝、出入舱口和观察窗等孔座与球壳连接部位的内外表面,共计 112 个应变片^[10]。图 4 为载人舱球壳试验时的照片,图 5 为赤道焊缝的应变片布置图。

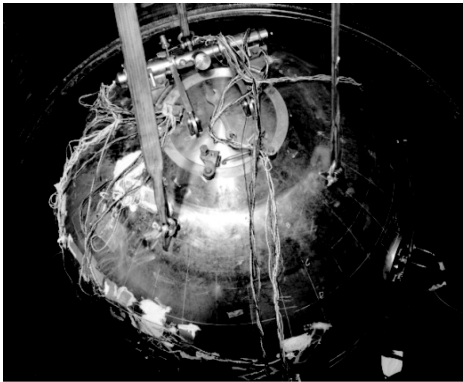


图 4 “深海勇士号”载人舱球壳

Fig. 4 Manned hull of "Deepsea Warrior "

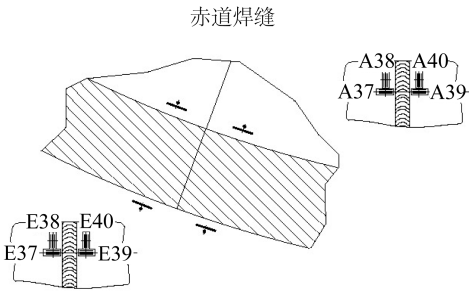


图 5 赤道焊缝位置应变片布置

Fig. 5 Arrangement diagram of the strain gages at the equator weld area

3.3 球壳的试验结果分析

根据各档压力下的应变数据,绘制出各测量片的应变-压力曲线。图 6 分别给出了最大试验压力(即 57.5 MPa)下各测量片的应变-压力曲线。从曲线可以看出,各测量片加卸压时的应变-压力关系均呈线性,回复性良好。

根据最大试验压力的应变数据,计算得出每个测点的主应力,其中外贴片应力计算时考虑压力效应等进行了修正。计算应变时,弹性模量 E 取 1.15×10^5 MPa,泊松比 μ 取 0.3。计算中面膜应力时,球壳内径和厚度均按实测值,材料屈服强度 R_{eH} 取名义值,即 795 MPa。

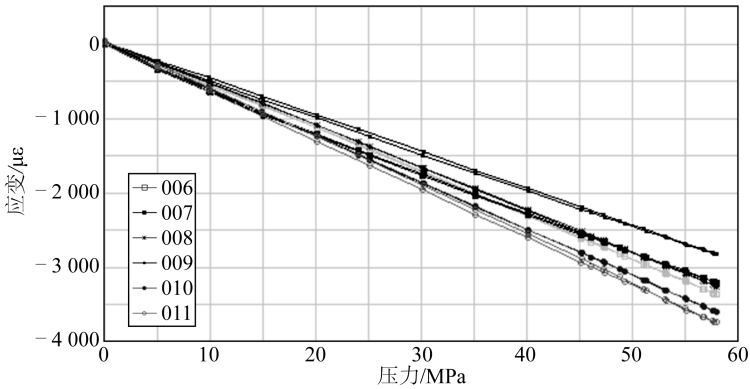


图 6 应变片压力-应变曲线

Fig. 6 Pressure-strain curve of No.006~011

由表 4 中可以看出,中面膜应力的实测值与理论计算值相差不超过 5%,在工程误差范围内。在试验压力下,球壳的中面膜应力实测值约为 $0.732R_{\text{eH}}$,孔座与球壳连接部位的中面周向应力实测值约为 $0.829R_{\text{eH}}$,为中面膜应力计算值的 1.151 倍。

表 4 试验压力下实测应力与计算值及屈服强度的比值

Tab. 4 Ratio of the measured stress to the calculated stress and the yield strength under test pressure

部位	中面膜应力 实测值/计算值	连接部位实测值/ 中面膜应力计算值	中面膜应力 实测值/屈服强度	连接部位 实测值/屈服强度
中面	1.017	1.151	0.732	0.829

4 结 语

随着材料制造工艺、加工水平和设计水平的提升,学术界已有相关的讨论,建议随着载人潜水器作业深度的增加,可以适当降低设计安全系数或者提高材料的许用应力,载人舱球壳试验压力的取值也进行相应的调整。根据试验压力和应力衡准的对比和载人舱球壳试验结果的分析可以得出以下结论:

1)在国内外的潜水器规范中,对于载人舱球壳,试验压力的取值为 1.1~1.25 倍最大工作压力,但在试验压力下,壳体中面膜应力的衡准表述各有不同,俄罗斯 RS 规范中允许值最高达到 $0.83R_{eH}$,ABS 规范则最为保守,为 $0.67R_{eH}$ 。

2)“蛟龙号”和“深海勇士号”载人舱球壳的试验压力取值是合理的,实测应变-压力关系均呈线性;实测的壳体中面膜应力均接近 $0.71R_{eH}$,满足 CCS 规范的要求;开孔加强孔座与球壳连接处边缘中面周向应力的实测平均值与壳体中面膜应力的比值约为 1.15 倍。

3)随着深度的增加,根据安全系数、许用应力等,可适当调整载人舱球壳外压试验压力的取值,但应不小于 1.1 倍最大工作压力,且在试验压力下球壳的应力应满足应力衡准的规定。

4)为确保载人舱球壳的安全性,根据上述两型载人舱球壳的实测应力数据,结合 CCS 规范的要求,建议在试验压力下载人舱球壳的应力衡准如下:球壳的中面膜应力不大于 $0.71R_{eH}$,开孔加强孔座与球壳连接处边缘的应力不大于 1.15 倍中面膜应力。应注意的是,本文中提到的应力衡准仅适用于中厚壳,对薄壳的适用性尚待研究。

参考文献:

[1] 沈允生,潘彬彬,崔维成,等. 大深度载人舱钛合金球壳加工制造工艺探讨[C]//中国造船工程学会学术论文集. 2012 (9):111-115. (SHEN Yunsheng, PAN Binbin, CUI Weicheng, et al. Discussion on the manufacturing process of the titanium-alloy manned hull of deepsea submersible[C]//Collected papers of CSNAME. 2012(9): 111-115.(in Chinese))

[2] 刘小宇. 钢制压力容器试验压力的研究[J]. 石油化工设备技术, 2004, 4(25): 4-7.(LIU Xiaoning. Study on test pressure of steel pressure vessel[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2004, 4(25):4-7. (in Chinese))

[3] 翟建华,王泰升,郭彦书,等. 外压筒体压力试验校核应力的讨论[J]. 化工设备与管道, 2001, 6(38): 39-40. (ZHAI Jianhua, WANG Taisheng, GUO Yanshu, et al. Discussion on checking stress in external pressure cylinder test[J]. Chemical Equipment and Piping, 2001, 6(38): 39-40. (in Chinese))

[4] 李文跃. 大深度潜水器耐压球壳结构设计与分析研究[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2016.(LI Wenyue. Design and analysis on spherical pressure hull structure of deep submersible[D]. Wuxi: CSSRC, 2016.(in Chinese))

[5] 某载人潜水器钛合金耐压球壳极限强度与可靠性研究报告[R]. 上海: 上海交通大学. 2012. (Research report on ultimate strength and reliability of pressure hull of titanium alloy about a manned submersible[R]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese))

[6] 中国船级社. 潜水系统和潜水器入级规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014-03-01.(Rules for the classification and construction of diving systems and submersibles[S]. Beijing: People’s Communications Press, 2014-03-01.(in Chinese))

[7] Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the classification and construction of manned submersibles, shipies 2010 and passenger submersibles[S].2004:82.

[8] American Bureau of Shipping. Rules for building and classing underwater vehicles, systems and hyperbaric facilities 2010[S]. 2009.

[9] 丁伯民,黄正林.高压容器(化工设备设计全书)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.(DING Bomin, HUANG Zhenglin, High pressure vessel (Chemical equipment design) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese))

[10] TC4ELI 载人舱球壳静水外压试验检测报告[R]. 无锡: 中国船舶科学研究中心. 2015.(Test report of TC4ELI manned hull under external pressure[R]. Wuxi: CSSRC, 2015.(in Chinese))