

大深度载人潜水器浮力材料的应用现状和发展趋势

刘坤¹,王金²,杜志元¹,沈鹏¹

(1. 国家深海基地管理中心技术部 青岛 266237; 2. 青岛特来电新能源科技有限公司 青岛 266100)

摘要:在所有海洋装备中,大深度载人潜水器代表深海技术的制高点,而大深度载人潜水器的研制所要解决的关键问题之一就是浮力材料的选择。文章概述浮力材料的分类以及浮力材料在三代大深度载人潜水器上的应用情况,并对能够满足大深度尤其是全海深载人潜水器需求的浮力材料进行对比研究。研究表明:微珠复合泡沫虽然能满足7 000 m载人潜水器的需求,但应用在全海深载人潜水器时存在密度大和吸水率高的缺点,且不能满足1.5倍安全压力要求;陶瓷等新型浮力材料的密度小和吸水率低,是未来浮力材料的重要发展方向。本研究可为大深度载人潜水器浮力材料的选择提供一定的理论支持。

关键词:载人潜水器;固体浮力材料;微珠复合泡沫;陶瓷浮球;深海大洋

中图分类号:TB3;P754.5

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2019)12-0067-04

Application Status and Developing Trend of Buoyancy Materials for Large Depth Manned Submersibles

LIU Kun¹, WANG Jin², DU Zhiyuan¹, SHEN Peng¹

(1. Technology Department, National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China;

2. Qingdao Teltel New Energy Technology Co., Ltd., Qingdao 266100, China)

Abstract: Within all the deep sea investigation platforms, manned submersible represents the highest technology challenge. In the design of the large depth manned submersible, buoyancy material is one of the key issues to be solved. In this paper, the classification of buoyancy materials was summarized, the application of buoyancy materials on the three-generation deep manned submersibles was discussed, and the buoyancy materials with large depths, especially those that met the requirements of deep sea manned submersibles was studied. Through research, the main conclusion was that although the microbead composite foam could meet the requirements of the 7 000 m manned submersible, it had the disadvantages of high density and high water absorption when it was applied to the whole sea deep manned submersible, and could not meet 1.5 times of safety factor requirements. New buoyancy materials such as ceramics have low density and low water absorption, which is an important developing direction of buoyancy materials in the future. This study may lay a foundation for selection of buoyancy materials of the large depth manned submersible.

Key words: Manned submersibles, Buoyancy material, Epoxy resin, Fracture, Deep ocean

收稿日期:2019-05-20;修订日期:2019-11-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0305700)。

作者简介:刘坤,工程师,硕士,研究方向为深海推进技术

0 引言

载人潜水器具有携带潜航员和科学家在海底近距离操纵和观察的特点,已成为深海探测和研究的重要装备之一。继美国、俄罗斯、法国和日本之后,我国也开展了大深度载人潜水器的研究和应用工作,目前已研制“蛟龙”号和“深海勇士”号 2 艘大深度载人潜水器。

载人潜水器具备上浮和下潜的能力,一般采用无动力上浮技术,因此需要浮力材料提供上浮动力^[1]。作为重要的基础材料,浮力材料是大深度载人潜水器的关键核心材料,其性能直接关系到大深度载人潜水器的可靠性和安全性,是大深度载人潜水器技术水平的重要标志之一。因此,研制低密度、高强度和高可靠性的浮力材料具有重要意义。

1 浮力材料的类型

按照应用时间、理化性能和结构形态等特点,浮力材料主要分为三大类,即传统浮力材料、固体浮力材料和玻璃/陶瓷浮球。

1.1 传统浮力材料

传统浮力材料是早期在水面或水下提供浮力的材料,主要包括轻质液体、橡胶和泡沫。轻质液体主要包括汽油、柴油和硅油等,须封装在浮力桶中,密度较高,且易泄漏而造成污染;橡胶主要是中空的橡胶浮球,耐压强度较低;泡沫主要包括泡沫塑料、泡沫玻璃和泡沫铝等,重量轻,且耐压强度低。除轻质液体外,传统浮力材料性都只能在浅海应用,不能满足大深度载人潜水器的需求(表 1)。

表 1 传统浮力材料

性能	轻质液体	橡胶	泡沫
密度/(g·cm ⁻³)	0.5~0.9	0.1~0.9	0.1~0.3
耐压强度	高	低	低
吸水率	低	低	一般
使用周期	短	短	短
缺点	易泄漏	蠕变变形	吸水变形
应用深度	全海深	浅海	浅海

1.2 固体浮力材料

为更好地解决深海耐压和结构稳定性的问题,低密度和高强度的固体浮力材料被研制出来,主要包括三大类,即化学泡沫复合材料、轻质合成复合材料和

微珠复合泡沫材料^[2]。化学泡沫复合材料是采用化学发泡方法制成的低密度复合材料,耐压强度极低,且易破裂吸水,仅能在水面和浅海;轻质合成复合材料由复合泡沫和低密度填料(如中空玻璃或塑料)组合改性而成,主要用在 0~4 000 m 的水深范围^[3];微珠复合泡沫材料是固体浮力材料的研究重点,由低密度调节剂和基体树脂复合而成,其中基体树脂主要包括环氧树脂、酚醛树脂和聚氨酯,低密度调节剂主要包括玻璃/陶瓷微珠以及碳、粉煤灰漂珠等^[4]。

1.3 玻璃/陶瓷浮球

球体表面在受力时压力呈均匀分布,且内部压力最小,是理想的承压结构体,因此空心玻璃/陶瓷浮球作为深海浮力体被研制出来。虽然二者都是脆性无机材料,但其弹性模量和耐压强度均远高于金属材料,密度也更小。外径为 0.432 m 的玻璃浮球的质量排水比约为 600 kg/m³,单个玻璃浮球提供的净浮力约为 178 N。陶瓷浮球的质量排水比更低,约为 340 kg/m³,比微珠复合泡沫材料和玻璃浮球都低得多,是理想的浮力材料。此外,玻璃/陶瓷浮球的空腔可作为仪器设备的耐压容器,以节约潜水器空间。但玻璃/陶瓷浮球属于脆性材料,在水下有内爆失效的风险,且一旦内爆往往引起连锁反应,并带来灾难性后果,因此主要在无人潜水器上使用。

2 浮力材料在大深度载人潜水器上的应用

目前大深度载人潜水器已发展到第三代,由于受当时技术水平等的限制,各代载人潜水器的结构、机动范围、操纵性能、作业能力和下潜深度各不相同,应用的浮力材料也有差别,其中浮力材料在一定意义上可作为载人潜水器划代的重要标志。

2.1 第一代载人潜水器浮力材料

为满足深海科学研究的需求,自 20 世纪 20 年代起人类开始建造第一代深海载人潜水器,代表包括美国“Trieste”号和法国“Archimède”号,其中“Trieste”号于 1960 年 1 月 23 日在太平洋马里亚纳海沟下潜到 10 916 m,创造人类下潜深度的纪录^[5]。第一代深海载人潜水器的显著特点为依靠专门的浮力舱提供浮力,浮力舱内填充汽油和煤油等轻质、耐压的液体,但体积较大,不方便建造和运输。

2.2 第二代载人潜水器浮力材料

鉴于第一代载人潜水器的诸多不足,自 20 世纪

60 年代起各国开始第二代大深度载人潜水器的设计和建造工作。第二代载人潜水器的显著特征是能够完成自由航行、上浮和下潜等运动,并且作业能力显著提高,是目前应用最广泛的深海载人潜水

器。第二代载人潜水器的代表包括美国“Alvin”号、法国“Nautile”号、俄罗斯“MIR”号、日本“Shinkai 6500”号和我国“蛟龙”号(表 2)。

表 2 第二代大深度载人潜水器

项目	Alvin	Nautile	MIR	Shinkai 6500	蛟龙
建造年份	1964	1985	1987	1989	2009
下潜深度/m	6 500	6 000	6 000	6 500	7 000
有效载荷/kg	205	200	290	200	220
年下潜次数/次	180	110	20	60	20
质量/t	17	18.5	18.6	26.7	22
长、宽、高/m	7.1、2.5、3.7	9.7、2.8、4.3	7.8、3.6、—	9.7、2.8、4.3	8.2、3.0、3.4
作业时间/h	6~10	8	17~20	12	12
最大航速/kn	2	2.5	5	2.7	2.5
浮力材料	微珠复合泡沫	微珠复合泡沫	微珠复合泡沫	微珠复合泡沫	微珠复合泡沫

第二代载人潜水器使用微珠复合泡沫材料作为浮力体,使潜水器的重量大大减轻,体积更小,外部流线型也更好,因此机动性能和作业能力远优于第一代载人潜水器,能够满足携带科学家进行深海观察和作业等的需求^[6]。第二代载人潜水器已获得广泛应用,如美国“Alvin”号年平均下潜 180 次,目前已下潜超过 5 000 次。

2.3 第三代载人潜水器浮力材料

第三代载人潜水器又称全海深载人潜水器,由技术国际领先的水下工程公司和探险机构相继研制,主要包括卡梅隆团队的 Deepsea Challenge, DOER Marine 公司的 Deepsearch, Hawkes Ocean Technologies 公司的 Deep Flight Challenger 等^[7]。第三代载人潜水器的主要技术特点包括:下潜速度明显提高,平均下潜和上浮速度超过 5 kn^[8];重量明

显减轻,第二代载人潜水器均为 20 吨级,而第三代载人潜水器被控制在 10 吨级。为满足上述要求,第三代载人潜水器的浮力材料须具有极低密度、较高强度和较高可靠性,然而能够在全海深使用的微珠复合泡沫材料普遍存在密度偏高和吸水率大的缺点,因此须开发新型浮力材料。

3 大深度载人潜水器浮力材料的发展趋势

目前国际已商品化的全海深浮力材料主要包括 Trelleborg Offshore 生产的 DS-39, Engineered Syntactic Systems 生产的 HZ-45, Ron Allum Deep-sea Services 生产的 DR11,我国海洋化工研究院有限公司和中国科学院理化技术研究所也在进行全海深浮力材料的研制工作(表 3)。

表 3 全海深浮力材料

生产商	型号	密度/(g·m ⁻³)	破碎压力/MPa	全海深安全系数
Trelleborg Offshore(美国)	DS-39	0.61	137.8	1.25
Engineered Syntactic Systems(美国)	HZ-45	0.72	165.0	1.50
Ron Allum Deepsea Services(美国)	DR11	0.69	152.0	1.38
海洋化工研究院有限公司(中国)	—	0.676~0.700	142.0	1.29
中国科学院理化技术研究所(中国)	—	0.68	155.0	1.41

目前已研制成功的全海深浮力材料普遍密度大、吸水率高且不能满足 1.5 倍耐压安全系数要求,因此须进一步发展新型的轻质、高强度和高可靠性

的浮力材料。较有发展前景的浮力材料包括陶瓷浮力材料、无缝陶瓷空心浮球和碳纳米管增强复合泡沫浮力材料等。

3.1 陶瓷浮力材料

陶瓷浮力材料目前受到广泛关注,其由很多耐压陶瓷圆筒组成,与传统的微珠复合泡沫材料相比密度更低和强度更高,是具有良好发展前景的浮力材料,DOER Marine 公司正在研究其使用可行性。

3.2 无缝陶瓷空心浮球

采用旋转注浆成型技术,以 2 个石膏半球充当模具,向模具中注入定量陶瓷浆后进行无规则旋转,保证陶瓷浆均匀吸附在石膏模具上,最后烧制成中空的无缝陶瓷空心浮球。具备无缝陶瓷空心浮球生产能力的企业包括 Deep Sea Power & Light (DSPL)公司和 Custom Technical Ceramics(CTC)公司,其中 DSPL 公司生产的无缝陶瓷空心浮球的外径为 91 mm,壁厚为 1.5 mm,材料为 99.9%氧化铝陶瓷,单个浮球的质量为 140 g,排水量为 404 g,质量排水比为 0.35,可承受约 210 MPa 的外部外压,每个浮球外面包裹 5 mm 厚的聚氯乙烯(PVC)材料以提供抗冲击防护。

美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOD)研制的全海深无人潜水器“海神”号安装 1 670 个 DSPL 公司生产的陶瓷浮球作为浮体单元^[9-10],无缝陶瓷空心浮球在“海神”号上的使用证明了其可行性。与此同时,有专家质疑“海神”号的故障是由陶瓷浮球破碎导致的,但原因尚未查明。因此,无缝陶瓷空心浮球的安全性和可靠性尚须验证,这是其在全海深载人潜水器上应用的首要问题。

3.3 碳纳米管增强复合泡沫浮力材料

自 1991 年被发现至今,碳纳米管被持续研究,因其具有优异的力学性能、物理性能和化学性能,被认为是复合材料的理想增强体^[11-12]。通过对微珠复合泡沫材料的制备进行改进,在空心玻璃微球的表面生长碳纳米管,然后将其添加至环氧树脂基体中,从而制备成碳纳米管增强复合泡沫浮力材料。研究显示,碳纳米管的质量百分比为 0%~0.8%时,碳纳米管增强复合泡沫塑料的压缩模量比简单复合泡沫塑料提高 35%~40%^[13]。

4 结语

目前应用最广泛的浮力材料是微珠复合泡沫浮力材料,其基本能满足 7 000 m 以内深度的深海

载人潜水器的需求,但因其密度大和吸水率高等缺点,不能满足全海深载人潜水器的设计需求。因此,亟须开发能够满足全海深载人潜水器需求的新浮力材料,可对现有的微珠复合泡沫浮力材料进行改进,进一步减小材料的密度,以获得更高的耐压强度,同时保持较低的吸水率,如碳纳米管增强复合泡沫浮力材料即通过添加碳纳米管增强浮力材料的性能,此外,可开发新型浮力材料,如陶瓷浮力材料和无缝陶瓷浮球等,但其可靠性有待进一步提高。

参考文献

- [1] 潘彬彬,崔维成,叶聪,等.蛟龙号载人潜水器无动力潜浮运动分析系统开发[J].船舶力学,2012,16(Z1):58-71.
- [2] 何成贵,张培志.全海深浮力材料发展综述[J].机械工程材料,2017,9(41):14-18.
- [3] 高昂,胡明皓,王勇智,等.深海高强浮力材料的研究现状[J].材料导报,2016,30(S2):80-83,91.
- [4] 何成贵.氮化硅陶瓷空心浮力球的制备及性能研究[D].上海:上海材料研究所,2017.
- [5] MICHEL J. In the trenches topside remembrances by the chief of the boat, DSV Trieste[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43(5): 20-22.
- [6] 崔维成,郭健,潘彬彬.全海深载人潜水器用浮力材料的初步研究[J].船舶力学,2018,22(6):736-757.
- [7] 李浩.第三代全海深载人潜水器阻力性能及载人舱结构研究[D].北京:中国舰船研究院,2014.
- [8] 李志伟.第三代全海深载人潜水器部分关键技术研究[D].无锡:中国船舶科学研究中心,2013.
- [9] WESTON S, OLSSON M, MEREWETHER R, et al. Flotation in ocean trenches using hollow ceramic spheres[J]. Marine Technology Society (Into the Trench: Celebrating the Golden Anniversary of Man's Deepest Dive), 2009, 43(5): 110-114.
- [10] WESTON S, STACHIW J, MEREWETHER R, et al. Alumina ceramic 3.6 in flotation spheres for 11 km ROV/AUV systems[J]. Oceans, 2005, 1: 172-177.
- [11] 裴雷振,贾非,亚斌,等.碳纳米管增强固体浮力材料性能研究[J].塑料科技,2017,45(5):32-35.
- [12] 杨旭东,杨昆明,邹田春,等.球磨对碳纳米管增强泡沫铝基复合材料压缩与吸能性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(6):1518-1524.
- [13] ZEGEYE E F, WOLDESENBET E. Processing and mechanical characterization of carbon nanotube reinforced syntactic foams[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31(15): 1045-1052.