

DOI: 10.11973/jxgccl201709002

全海深浮力材料发展综述

何成贵, 张培志, 郭方全, 祁海, 吴芬, 韩伟月

(上海材料研究所, 上海 200437)

摘要: 介绍了微珠复合泡沫材料、玻璃浮球、陶瓷浮球三类全海深浮力材料的抗压强度、密度、吸水性及适用深度范围等; 简述了全海深浮力材料的制备方法, 并对国内外全海深浮力材料的发展现状进行了总结; 提出了如何在满足抗压强度的同时尽可能地降低材料的密度仍是研制高性能全海深浮力材料所需要解决的关键问题。

关键词: 全海深浮力材料; 抗压强度; 密度

中图分类号: TB31

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2017)09-0014-05

Development Review of Full Ocean Depth Buoyancy Material

HE Chenggui, ZHANG Peizhi, GUO Fangquan, QI Hai, WU Fen, HAN Weiyue

(Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: Compressive strength, density, water absorption and the range of applicable depth of three types of full ocean depth buoyancy materials included syntactic foam, glass floatation spheres, ceramic floatation spheres were introduced. The production methods of full ocean depth buoyancy materials were sketched and the development status of full ocean depth buoyancy materials at home and abroad was summarized. How to reduce the density of material as much as possible while satisfying the compressive strength that was the essential problem of fabricating high performance full ocean depth buoyancy materials was put forward.

Key words: full ocean depth buoyancy material; compressive strength; density

0 引言

近年来,我国正在实施远洋深海战略,鼓励对深海的探索与研究。通常,科学家将水深 6 000~11 000 m 的海域称为“海斗深渊”(Hadal Trench)^[1-2],是地球上最深的海洋区域。海斗深渊以温度低、无光黑暗、环境压力大、地质活动频繁、生命奇特等特点构成了地球上最神秘的生态系统^[3-5]。目前,关于海斗深渊的科学研究主要集中在海洋地质、海洋生态及生活在该海域的海洋生物等方面,并已成为国际地球科学尤其是海洋科学研究的前沿与热点。

1960年1月23日,“的里雅斯特”号载人潜水器于马里亚纳海沟下潜至 10 911.84 m 深处,创下了载

人深潜的新世界记录,自此人们展开了挑战万米深渊的进程^[6]。1995年3月,日本研制了“海沟”(kaigo)号万米级无人深潜器,下潜至马里亚纳海沟并首次测得海沟底部的精确深度为 10 911.4 m^[7]。2009年5月31日,美国的伍兹霍尔海洋研究所研制的“海神”(Nereus)号全海深无人深潜器下潜至马里亚纳海沟最深处,是首个抵达海底最深处的自动工具^[8]。这些研究都对海斗深渊的科学研究起到良好的支撑和推动作用。

深海探测与开发离不开深潜装备的支撑,而深潜器则是最主要的深潜设备。深潜器可以分为载人和无人两种,其中无人深潜器包括缆控式深潜器(ROV)、自主型深潜器(AUV)以及混合型无人深潜器(HROV)^[9-10]等。深潜器可以完成深海观测、测量、取样、水下作业等。考虑其服役环境,深潜器一般采用无动力上浮技术,这就需要深潜器在耐压的同时还可以提供一定的浮力,通过配重(压载)设计来控制深潜器的下沉或上浮。当抛卸压载时,由浮力材

收稿日期:2016-08-30;修订日期:2017-08-09

基金项目:上海市科委项目(14DZ1205900;15DZ1203300)

作者简介:何成贵(1994—),男,湖南衡阳人,硕士研究生

导师:张培志教授

料提供的浮力作为保持深潜器匀速上浮的动力,从而保证深潜器与人员的安全。为此,人们开始对深海浮力材料进行研制并将其应用到深潜器等水下装备上,这对保证深潜器的浮力、增大有效载荷、改善深潜器外形及尺寸等方面起着至关重要的作用^[11]。

全海深深潜器是指能在所有深度海域服役工作的深潜器,最大下潜深度在 11 000 m 左右。因此,全海深浮力材料的抗压强度要大于 11 000 m 深度下的环境压力(约 110 MPa),并能适用于各类全海深装备,如全海深深潜器、全海深着陆器等。全海深浮力材料的性能要求主要包括:(1)耐压能力,抗压强度需达到 110 MPa 以上;(2)密度(质量排水比),浮力材料的密度关系到其单位体积提供浮力的大小,密度越小,单位体积可提供的浮力越大,这对提高深潜器的有效载荷具有十分重要的意义;(3)材料稳定性,即浮力材料能稳定持续地为深海装备提供浮力。通常,密度低的浮力材料具有低的抗压强度,而随着抗压强度的升高,浮力材料的密度也要随之增大。因此,如何在满足抗压强度的同时尽可能地降低材料的密度是研制优异浮力材料所需解决的问题。目前,美国、日本等国家已有万米级深潜器下水服役的案例,在全海深浮力材料研制领域处于领先地位,并已开发出了微珠复合泡沫材料、玻璃浮球、陶瓷浮球等全海深浮力材料,其中微珠复合泡沫材料的密度为 $0.56 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,陶瓷浮球的密度为 $0.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。然而,国内对于全海深浮力材料研究的起步较晚,近几年因全海深深潜器研制的需求,全海深浮力材料的研究得到了广泛的重视。因此,为了给相关研究人员提供参考,作者主要对浮力材料的分类、全海深浮力材料的制备方法 & 国内外的的发展概况进行了阐述。

1 浮力材料的分类

1.1 传统浮力材料

常用的传统浮力材料包括用橡胶、轻金属合金等材料封装后的低密度液体、泡沫塑料、泡沫玻璃、泡沫铝、橡胶浮球等。这些材料的制备工艺相对简单、成本低廉,在湖、河、近海等浅水区域有着广泛的应用,但同时存在一些缺陷,如:封装的低密度液体一旦泄漏将造成严重的污染;泡沫塑料、泡沫玻璃、泡沫铝等材料的弹性模量小、强度低,不能满足深海(大于 6 000 m)的需求^[13]。

1.2 固体浮力材料

为了更好地解决深潜器的耐压和结构稳定性等

问题,并能够提供足够的浮力,人们研制出了固体浮力材料(SBM, solid buoyancy material),其实质是一种低密度、高强度的多孔结构材料,属于一种复合材料^[14]。

固体浮力材料可分为化学泡沫复合材料、轻质合成复合材料和微珠复合泡沫材料三大类。化学泡沫复合材料是一类采用化学发泡法制成的泡沫复合材料,虽具有比较低的密度,但其抗压强度极低,易发生破裂渗水而失去浮力,因此常用于水面及浅海等区域。轻质合成复合材料也称三相复合泡沫材料,是由复合泡沫与低密度填料如中空塑料或大径玻璃球经组合改性而制成的,目前主要应用于 4 000 m 深的海域^[15]。微珠复合泡沫材料是目前固体浮力材料研究的重点与热点,抗压强度远优于其他两类材料,可应用于各个深度水域,是理想的全海深浮力材料之一,但其密度高于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (适用于 11 000 m),并且树脂基体存在吸水的可能,会导致材料的浮力下降。

1.3 玻璃与陶瓷浮球

球体是一种理想的承压结构物体,这是因为球壳表面所受压力均匀分布,内部压力最小。早期,人们也进行了球体浮力材料的研发,如橡胶浮球、轻金属及其合金(如铝、钛等)空心浮球等,但由于制备的工艺水平较低、材料的抗压强度不高,通常只能应用于 0~500 m 的水域。玻璃和陶瓷虽然属于脆性无机材料,但其抗压强度和弹性模量均远高于金属材料,且密度更小,因此可以成为一种优异的耐压浮力材料。随着机械加工和制备工艺水平的提高,近年来已成功制备出具备全海深耐压能力的玻璃及陶瓷浮球,并在全海深深潜器、着陆器等水下探测装备上相继得到应用。玻璃浮球因其良好的光学特性、非磁、非导电性等特点而在水下照明、摄影成像设备封装上得到广泛的应用。外径 432 mm 玻璃浮球的质量排水比约为 $0.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,单个玻璃浮球提供的净浮力为 178 N。陶瓷浮球的质量排水比更低,为 $0.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,比微珠复合泡沫材料和玻璃浮球的均低得多,是一种理想的浮力材料。此外,陶瓷半球壳、陶瓷筒形件等也可作为仪器封装用耐压容器,为深潜器释放更多的有效载荷空间。但是,一旦玻璃和陶瓷浮球在水下发生内爆失效,将会释放出巨大的能量,这可能造成连锁反应以及难以估量的后果。

2 全海深浮力材料的制备方法

目前可用于全海深的浮力材料主要包括玻璃微

珠复合泡沫材料、玻璃浮球、陶瓷浮球等。

微珠复合泡沫材料是通过在树脂基体中填充空心微球而形成的复合材料^[16],是一种两相复合泡沫材料。微珠复合泡沫材料的成型工艺包括振动浇注、抽真空浇注、模压成型等。微珠复合泡沫材料中的空心微球通常可以分为有机质微球和无机质微球两大类,无机质空心微球包含玻璃、陶瓷、碳、粉煤灰漂珠等,有机质空心微球则为环氧、酚醛、可发性聚苯乙烯球等。树脂基体常用的有环氧树脂、酚醛树脂、聚氨酯等^[17]。全海深浮力材料所用树脂要求同时具备密度小、强度高、耐压、耐海水腐蚀等多种性能,低密度填充剂则多选择高性能空心玻璃微珠。目前已开发的适用全海深的微球复合泡沫材料是以空心玻璃微珠(微米级)为填充剂,环氧树脂为基体树脂,空心玻璃微珠的体积分数为60%~70%^[18]。常用的制备方法为:先将经偶联剂表面处理的空心玻璃微珠加入到环氧树脂中,搅拌均匀直至玻璃微珠被环氧体系完全浸润,之后放入真空搅拌器内进行真空搅拌至脱泡完全,然后将混合好的物料进行注模,升温模压一段时间后待其固化,冷却后脱模即可。

玻璃空心浮球通常选用硼硅酸盐玻璃为原材料,先铸造成型半球壳,之后对半球赤道密封平面进行精密磨削加工,在真空下将两半球壳进行密闭结合,再用丁基胶和密封带处理接缝,即可长效保持球内的真空状态^[19]。陶瓷空心浮球通常选用氧化铝、氮化硅、碳化硅等为原材料。半球壳成形既可采用粉末压制、注浆、凝胶注模等传统工艺,也可采用3D打印技术,经烧结后对赤道平面进行精加工,之后通过树脂进行粘接。此外,还可以通过旋转注浆法制备无缝陶瓷空心球。

3 国内外全海深浮力材料发展概况

3.1 国外的发展概况

在微珠复合泡沫材料的研制进程中,通过提高空心微球强度、改进微球与树脂基体复合工艺等方法使其抗压强度不断提高,从而可满足全海深服役的需求。美、日、俄等国家均已研制出可以应用于6 000~7 000 m深度的高强固体浮力材料。美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)研制的“海神”号11 000 m级无人深潜器所使用的高强微珠复合泡沫材料的密度为 $0.62 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,该材料已应用到全海深深潜探测器上^[20]。美国Emerson & Cuming公司研制的7 000 m级浮力材料的密度为 $0.56 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,我国

“蛟龙号”载人潜水器用的就是这种材料,该公司所研制的DS型浮力材料的密度为 $0.5\sim 0.56 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,最大下潜深度可达到11 000 m。

日本海洋技术中心于20世纪80年代建造了载人潜水器“深海6500”,1995年建造了11 000 m级无人深潜器“海沟”号。“海沟”号深潜器上所使用的微珠复合泡沫材料包括两种不同粒径的空心玻璃微珠,采用级配方式将小球填充到大球之间,实现堆积密度的最大化^[21]。俄罗斯海洋技术研究所也研制出密度 $0.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、耐压强度70 MPa的深潜用微珠复合泡沫材料。法国的GALL等^[22]对玻璃微珠复合泡沫材料相关性能(抗压强度、弹性模量等)的测试方法进行了改进和规范,对评估和验证这类材料的可靠性具有重要的作用。

除微珠复合泡沫浮力材料外,玻璃、陶瓷浮球及耐压罐体的研制对于深潜设备的发展也具有重大意义。德国的Nautilus公司研制的VITROVEX[®]系列玻璃浮球已在深海探测平台上得到广泛的应用,如海底着陆器、各类潜水器等,既可作为浮力材料,也可作为各类深海探测所需携带仪器的封装容器。该玻璃浮球是以硼硅玻璃3.3(SCHOTT DURAN[®])为原材料,按照使用深度来设计壁厚,从而形成一套适应全海深的浮力球系列产品。其中,适用于深度12 000 m浮球的密度为 $0.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

WHOI研制的“海神”号11 000 m级无人深潜器中首次使用了陶瓷浮球^[23]及陶瓷耐压罐^[24](仪器封装容器,密度不大于 $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),并成功地下潜至马里亚纳海沟底部,这是结构陶瓷在深海浮力材料及耐压外壳上的实际应用中迈出的第一步,这将极大地推进结构陶瓷在深潜设备上的大量应用。

早在1964年,一家名为COORS PORCELAIN的公司便已具备制造外径254 mm、使用深度达6 097 m的99.9%氧化铝陶瓷无缝空心球的能力。但是,由于每个球之间的结构性能相差太大,因此将其应用于载人潜水器的风险太大^[25]。

20世纪90年代后期,为研制新的11 000 m级无人深潜器“海神”号,WHOI不满足仅使用微珠泡沫复合材料作为浮力材料的现状,开始寻找一种可以用于11 000 m深度的无缝陶瓷浮球。目前,具备这种无缝陶瓷浮球生产能力的只有Deep Sea Power&Light(DSPL)公司和Arvada陶瓷定制技术(CTC)有限公司。“海神”号中采用的是来自DSPL公司的外径92 mm无缝陶瓷浮球^[26]。两家

公司生产的无缝陶瓷浮球均采用旋转注浆成型技术进行制备。旋转注浆成型技术是将两个石膏半球充当模具,向模具中注入一定量的陶瓷浆料后在特制的设备上无规旋转,以保证石膏模能均匀地吸附浆料。DSPL公司制备外径92 mm陶瓷浮球的设计壁厚为1.5 mm,其理论极限抗压强度和屈服强度可达到设计工作压力的2倍以上,并且陶瓷浮球的密度仅为 $0.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

3.2 国内的发展概况

与深潜技术发展多年并处于领先水平的其他国家相比,国内相关领域工作开展的很晚,直到20世纪80年代后期^[27-28]才开始对浮力材料进行探索性研究,与发达国家间的差距非常显著。

近年来,深潜探测研究事业得到国家的大力支持,国内一批高校、科研院所均已展开微珠复合泡沫材料的研制工作。王啟峰等^[29]通过调整空心玻璃微珠的加入量,制备的微珠复合材料密度为 $0.61\sim 0.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、抗压强度为 $40.04\sim 68.96 \text{ MPa}$ 。龙宇飞等^[30]研究了硅烷偶联剂改性空心玻璃微珠对制备微珠复合泡沫材料性能的影响,发现端基为巯基的硅烷偶联剂对空心玻璃微珠的改性效果最好,所制备固体浮力材料的吸水率仅有 0.35% ,低于纯环氧树脂的平衡吸水率,抗压强度可达到 62.15 MPa 。鄢柳柳等^[31]通过模压工艺制备了短切碳纤维/空心玻璃微珠(K46)/环氧树脂复合材料,当碳纤维质量分数为 4% 时,复合材料的密度为 $0.59\sim 0.67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、抗压强度为 $57.2\sim 68.9 \text{ MPa}$ 、饱和吸水率小于 1.15% 。张帆等^[32]研究了以偏高岭土、矿渣与钠水玻璃反应生成的地聚物为基体材料,填充空心玻璃微珠制备无机非金属固体浮力材料,浮力材料的密度和抗压强度分别为 $0.78 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 17.0 MPa ,具有较低的吸水率同时可耐 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温。但这些研究工作多处于实验室阶段,目前国内具备批量生产微珠复合泡沫材料的厂商只有海洋化工研究院、湖北海山科技有限公司、青岛海洋新材料科技有限公司等^[33]。然而,以上几家商品化的浮力材料均只适用于小于 6000 m 深度的海域,“蛟龙号”载人深潜器中采用的是进口微珠复合泡沫材料,但目前国外对于密度低于 $0.56 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的浮力材料是禁止出口至中国的。

最近几年,国内开始筹备发展万米级的全海深深潜探测平台,“彩虹鱼”号载人深潜器已经处于研制阶段,并预计将于2020年进行海试。因此,对全

海深浮力材料的研制和国产化工作有着十分迫切的需求,目前海洋化工研究院和中科院理化技术研究所均已在此领域取得了一些成果。海洋化工研究院已研制出适用于 11000 m 深度的 $300 \text{ mm}\times 400 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}$ 的标准浮力块^[34],并通过了 140 MPa 的压力试验,随后将跟随“彩虹鱼”号研制团队进行海试验证。中科院理化技术研究所分别制备了密度为 $0.64 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.68 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的适用于 11000 m 深度的微珠复合泡沫材料试样^[35],其中密度 $0.64 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 浮力块试样在 140 MPa 保压24 h后的吸水率为 1.6% ,密度 $0.68 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 浮力块试样在 155 MPa 保压24 h后的吸水率为 0.6% 。任素娥等^[36]也已研制出密度为 $0.64\sim 0.99 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、抗压强度为 $59\sim 118 \text{ MPa}$ 的玻璃微珠复合泡沫浮力材料。

上海材料研究所于2014年开始进行陶瓷浮球的研制,通过成型和烧结得到氮化硅陶瓷半球壳,对半球壳赤道平面进行精密磨削加工后,将两半球壳在真空下合封,得到空心整球。目前,所制得的陶瓷浮球的密度不大于 $0.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,并在所内完成了 210 MPa 的地面压力筒试验,实现了陶瓷浮球的小规模产业化生产,可提供外径 $\phi 100 \text{ mm}$ 和 $\phi 135 \text{ mm}$ 两种规格的产品。现已为“彩虹鱼”号提供产品,经 140 MPa 压力测试后陶瓷浮球仍然完好,并于2016年12月在马里亚纳海沟进行了 11000 m 全海深试验。

相对于美国“海神”号中所使用的陶瓷浮球,上海材料研究所研制的陶瓷浮球具有以下优势:(1)采用氮化硅陶瓷(Si_3N_4)制备,比“海神”号中所采用氧化铝陶瓷的综合性能更优,稳定性更高;(2)采用了热等静压(HIP)技术,可消除陶瓷材料中的缺陷,进一步提高其可靠性,而“海神”号所使用的无缝陶瓷浮球没有使用热等静压技术。

4 结束语

三类全海深浮力材料的性能各有优劣,在实际使用时可根据需要进行选择。例如,将陶瓷浮球与微珠复合泡沫材料搭配使用可以提高浮力并降低陶瓷浮球因潜在内爆而造成损伤的风险。

目前,国内在全海深浮力材料领域的研究尚处于初始阶段。所制备微珠复合泡沫材料的密度偏高,这跟高性能空心玻璃微珠原料无法自给有一定关系。虽然已制备出性能良好的陶瓷浮球,但在产品性能可靠性方面还有待深入研究。深潜探测发展的目标是更大深度的海域,而在各类无人、载人深潜

器的研制中制备高强轻质浮力材料是其中至关重要的一环,因此实现高性能浮力材料的国产化对推动我国深海探测研究事业的发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] WOLFF T. The hadal community, an introduction[J]. Deep Sea Research, 1959, 6(2): 95-124.
- [2] WOLFF T. The concept of the hadal or ultra-abysal fauna[J]. Deep Sea Research, 1970, 17(6): 983-1003.
- [3] ZOBELL C E. Bacterial life at the bottom of the Philippine Trench[J]. Science, 1952, 115: 507-508.
- [4] FRYER P. Evolution of the Mariana convergent plate margin system[J]. Reviews of Geophysics, 1996, 34 (1): 89-125.
- [5] LESLEY E B, LEVIN L A. Living deep: A synopsis of hadal trench ecology[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43(5): 137-143.
- [6] 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.
- [7] “海沟”号无人潜水器[EB/OL]. (2009-11-13) [2016-08-20]. http://uzone.univ.cn/news2_2008_83296.html.
- [8] BOWEN A D, YOERGER D R, TAYLOR C, *et al.* The nereus hybrid underwater robotic vehicle for global ocean science operations to 11 000 m depth[J]. Oceans, 2008(s1): 1-10.
- [9] 陈建平. 发展我国载人深潜器的几点思考[J]. 机器人技术与应用, 2001(2):33-36.
- [10] 沈明学, 胡震, 刘正元. 一种新型潜水器 HROV 及其关键技术综述[J]. 海洋工程, 2006, 24(3):119-123.
- [11] 李乐, 于良民, 李昌诚, 等. 固体浮力材料及其性能研究现状[J]. 材料导报, 2012, 26(9):66-69.
- [12] 程鹏, 王元超. 提高浮力材料性能的研究[J]. 哈尔滨船舶工程学院学报, 1993, 14 (4):64-69.
- [13] 朱志斌, 吴平伟. 深海探测用高强轻质浮力材料的研究与发展[J]. 现代技术陶瓷, 2009, 30(1):15-20.
- [14] 陈先, 张树华. 新型深潜用固体浮力材料[J]. 化工新型材料, 1999(7):15-17.
- [15] 张世政, 于良民, 李昌诚, 等. 深潜用固体浮力材料的研究进展[J]. 广州化工, 2012, 40(18):8-10.
- [16] KATZETAL H S. Handbook of Filler and Reinforcements for Plastics [M]. New York: Vammpramrd Reinhold Company, 1978:281-295.
- [17] 李鹏, 刘德安, 杨学忠. 微球复合泡沫材料的研究和应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2000(4):21-24.
- [18] 刘文栋, 戴金辉, 吴平伟, 等. 混合空心玻璃微珠制备固体浮力材料及性能研究[J]. 材料开发与应用, 2014(6):31-36.
- [19] PAUSCH S, BELOW D, HARDY K. Under high pressure; Spherical glass flotation and instrument housings in deep ocean research[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43(5):105-109.
- [20] 黄炳坤. 固体浮力材料制备及性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [21] YANO Y, TAKAGAWA S. Study on buoyancy material by engineering ceramics[J]. Report of Japan Marine Science and Technology Center, 2004, 49:81-87.
- [22] GALL M L, CHOQUEUSE D, GAC P Y L, *et al.* Novel mechanical characterization method for deep sea buoyancy material under hydrostatic [J]. Polymer Testing, 2014, 39(10):36-44.
- [23] WESTON S, OLSSON M, MEREWETHER R, *et al.* Flotation in ocean trenches using hollow ceramic spheres[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43(5):110-114.
- [24] STACHIW J D, PETERS D, MCDONALD G. Ceramic external pressure housings for deep sea vehicles[J]. Oceans, 2006, 2:1-7.
- [25] STACHIW J D, PETERS D. Alumina ceramic 10 in flotation spheres for deep submergence ROV/AUV systems [J]. Oceans, 2005, 1:164-171.
- [26] 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.
- [27] 白战争, 赵秀丽, 罗雪方, 等. 空心玻璃微珠/环氧复合材料的制备及性能研究[J]. 热固性树脂, 2009, 24(2): 32-35.
- [28] 王健, 郭永奎, 高玉坤, 等. 空心玻璃微珠/环氧树脂复合材料的性能与应用[J]. 塑料制造, 2011(9): 52-54.
- [29] 王啟鋒, 杜竹玮, 陈先, 等. 环氧树脂基固体浮力材料的研制及表征[J]. 精细化工, 2005, 22(3):174-176.
- [30] 龙宇飞, 王鹏, 李瑞, 等. 硅烷偶联剂改性空心玻璃微珠/环氧树脂固体浮力材料的制备及性能研究[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(10):17-22.
- [31] 鄢柳柳, 徐任信, 王钧, 等. 碳纤维增强轻质耐压复合材料的制备及性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(7):38-41.
- [32] 张帆, 单丹, 胡芝娟, 等. 无机非金属固体浮力材料的研制[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8):2398-2403.
- [33] 刘伟. 深潜用环氧基固体浮力材料性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [34] 刘志良. 打破“天花板”走向“大众化”[N]. 中国船舶报, 2015-07-08.
- [35] 王平, 严开祺, 潘顺龙, 等. 深水固体浮力材料研究进展[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(2):223-229.
- [36] REN S E, TAO X, GENG H T, *et al.* Preparation and performances of hollow glass microsphere/epoxy resin buoyancy materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(s1):299-302.

欢迎来稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告