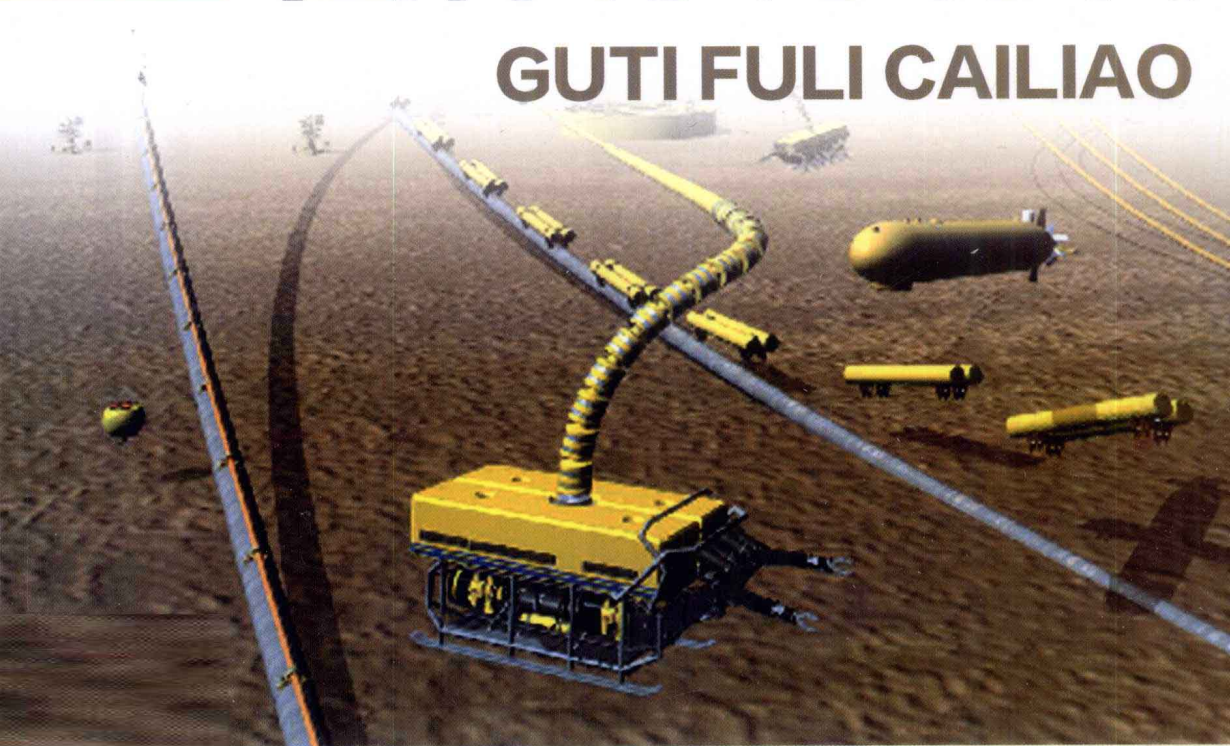





◎ 陈先 周媛 卢伟 主编

固体浮力材料

GUTI FULI CAILIAO



化学工业出版社



◎ 陈先 周媛 卢伟 主编

固体浮力材料

GUTI FULI CAILIAO



化学工业出版社

· 北京 ·

前 言

海洋是全人类的海洋，也是中国人的海洋。它是资源的宝库，不仅种类繁多，而且储量巨大。进入新的世纪，越来越多的国家把大量的人力物力投入到海洋的开发事业中。随着国力的增强，特别是近几十年中国在海洋开发方面取得了惊人的成果。

我国地处亚洲大陆，面临太平洋。在长达 1.8 万公里海岸线外有 5000 多个岛屿和一个世界最大的陆棚地带（约 450 万平方公里，相当于我国面积的 1/2），其中蕴藏着大量的宝贵财富，有待人们去开发利用。随着海洋开发科学的兴起，首先需要对陆棚以至深海进行勘探与考察。利用载人或无人潜器在深海中直接进行观察、摄影、测量、取样以至设置必要的仪器设施、水下作业等深潜技术是海洋开发必不可少的。为了解决深潜拖体、深潜器和水下机器人等的耐压性、结构稳定性，提供足够的净浮力，人们开始研制高强度固体浮力材料以替代传统的耐压浮力球和浮力筒。固体浮力材料归类于新材料和海洋通用技术范畴，是发展现代深潜技术重要组成部分，对保证潜器所必需的浮力，对提高潜器的有效载荷，减少其外形尺寸，尤其是在建造大深度的潜器中，有着重要的作用。

本书就固体浮力材料的分类、用途、测试、制造、原材料、配方及性能、设计计算等方面分别进行了详细的介绍，是对作者近 20 年固体浮力材料研发工作的总结。希望能对研究固体浮力材料的同行和选用固体浮力材料的设计人员有所帮助；同时本书也可用作大学老师及相关专业本科生和研究生的参考书。本书是由海洋化工研究院固体浮力材料研究团队，在科技部 21 世纪中心海洋技术领域办的支持下完成的，参与编写的人员如下。

陈先、周媛、卢伟主编并参加编写了第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章。

赵君、吴则华、张育梅参加编写了第 2 章、第 4 章、第 10 章和第 12 章。

卢伟、汪杰、陈皆乐参加编写了第 2 章、第 4 章、第 6 章、第 7 章、第 11 章、第 13 章。

梁忠旭、刘晓洁参加编写了第 2 章、第 5 章、第 10 章。

由于作者的水平所限，书中的谬误在所难免，欢迎读者批评指正。本书在编写过程中得到了化学工业出版社、中国大洋矿产资源研究开发协会、中船重工第 702 研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、上海交通大学等单位的大力支持在此一并表示衷心的感谢！

我国开发海洋、走向深蓝的新长征已经开始，对海洋的观测、探索、开发、利用均离不开固体浮力材料。未来的世纪是海洋的世纪。在不久的将来，万米水下的深海龙宫将留下中国人的足迹。

陈 先
2011 年元月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 固体浮力材料分类及应用	2
1.3 国内外发展现状与趋势	4
1.3.1 国外情况	4
1.3.2 国内情况	6
1.4 展望	8
参考文献	9
第2章 原材料与助剂	11
2.1 树脂	11
2.1.1 环氧树脂	11
2.1.2 聚氨酯树脂	36
2.1.3 不饱和聚酯	55
2.2 固化剂	65
2.2.1 多元胺类固化剂	66
2.2.2 酸酐类固化剂	77
2.2.3 最佳用量与最佳固化条件	84
2.3 助剂	88
2.3.1 稀释剂	88
2.3.2 触变剂	91
2.3.3 表面处理剂	94
2.3.4 增韧剂	96
2.3.5 阻燃剂	99
2.3.6 脱模剂	102
参考文献	106

第3章 固体浮力材料用轻质填料 109

3.1 空心玻璃微珠	110
3.1.1 空心玻璃微珠的性能	110
3.1.2 空心玻璃微珠的制造方法	117
3.1.3 空心玻璃微珠性能测试方法	120
3.1.4 空心玻璃微珠的应用	122
3.2 有机空心填料	124
3.2.1 中空聚合物微球	124
3.2.2 中空聚合物微球的制备方法	129
3.3 陶瓷微球	132
3.3.1 空心陶瓷微球的结构及性能	132
3.3.2 11000m用陶瓷球浮体	136
3.4 玻璃浮球	137
参考文献	139

第4章 化学发泡法固体浮力材料 142

4.1 聚氨酯泡沫	142
4.1.1 基本化学反应	143
4.1.2 泡沫体的形成	145
4.1.3 基本配方及各组分的作用	146
4.1.4 硬质聚氨酯泡沫塑料	147
4.2 环氧泡沫塑料	154
4.2.1 概述	154
4.2.2 原材料	154
4.2.3 环氧泡沫塑料的制造	156
4.2.4 环氧泡沫塑料的结构与性能	158
4.3 聚氨酯-环氧硬质泡沫固体浮力材料	161
4.3.1 概述	161
4.3.2 反应机理	161
4.3.3 原材料	163
4.3.4 制备方法和工艺过程	163
4.3.5 材料性能	164
4.4 聚甲基丙烯酸酯亚胺 (PMI) 泡沫	165
4.4.1 概述	165

4.4.2	聚甲基丙烯酰亚胺泡沫制备方法	166
4.4.3	聚甲基丙烯酰亚胺泡沫原料及配方	168
4.4.4	聚甲基丙烯酰亚胺泡沫生产工艺流程	172
4.5	聚氯乙烯泡沫材料	173
4.5.1	概述	173
4.5.2	聚氯乙烯泡沫材料的制备	174
4.5.3	聚氯乙烯泡沫材料的改性	175
4.5.4	改性聚氯乙烯泡沫材料的性能	175
	参考文献	176

第5章 化学发泡法固体浮力材料阻水层 179

5.1	喷涂聚脲弹性体阻水层	179
5.1.1	原料	180
5.1.2	双组分原料体系的制备工艺	182
5.1.3	喷涂聚脲弹性体的性能	185
5.1.4	喷涂前底材的处理	189
5.2	玻璃钢阻水层	190
5.2.1	玻璃钢的材料组成	191
5.2.2	环氧玻璃钢	192
5.2.3	环氧玻璃钢的成型工艺	195
	参考文献	206

第6章 复合泡沫浮力材料 208

6.1	复合泡沫浮力材料与化学发泡浮力材料比较	208
6.2	复合泡沫浮力材料的发展概况	209
6.3	复合泡沫浮力材料的分类、结构及密度	214
6.4	复合泡沫浮力材料的性能	217
6.5	复合泡沫浮力材料的应用	219
	参考文献	221

第7章 复合泡沫浮力材料成型工艺 222

7.1	浇注法	225
7.1.1	真空浇注工艺	225

7.1.2	自动压力凝胶工艺	227
7.1.3	设计及原理	229
7.1.4	浇注件容易出现的问题及其发生的原因分析	232
7.2	真空浸渍法	233
7.2.1	工艺过程	234
7.2.2	浸渍设备	234
7.2.3	浸渍的工艺条件	235
7.3	液体传递模塑法	236
7.3.1	工艺过程及工艺条件	238
7.3.2	常见工艺问题及其解决方法	239
7.4	模压成型法	240
7.4.1	压机和模具	241
7.4.2	成型工艺过程及成型原理	242
7.4.3	模压成型工艺参数	245
7.4.4	制品缺陷、产生原因及预防措施	251
7.5	颗粒堆积法	254
	参考文献	254

第8章 环氧树脂基固体浮力材料结构与性能的关系 256

8.1	固体浮力材料性能的影响因素	256
8.1.1	固化成型过程对固体浮力材料性能的影响	256
8.1.2	环氧胶液的流变性及其对成型工艺和固化物性能的影响	259
8.1.3	环氧固化物化学结构的形成及其对固化物性能的影响	260
8.1.4	环氧固化物的分子运动与结构和性能的关系	264
8.1.5	环氧固化物聚集态结构的形成及其对固化物性能的影响	270
8.1.6	材料界面层的形成、界面层的结构与功能	276
8.1.7	环氧固化物的收缩与内应力	285
8.2	复合泡沫浮力材料力学性能模型	294
8.2.1	复合泡沫浮力材料模量的计算模型	294
8.2.2	复合泡沫浮力材料强度的计算模型	295
	参考文献	297

第9章 固体浮力材料的配方与性能 298

9.1	固体浮力材料的配方	298
-----	-----------	-----

9.1.1	固体浮力材料的配方设计	298
9.1.2	配方的两种表示方法	299
9.1.3	固体浮力材料的配方	299
9.2	固体浮力材料的性能	300
9.2.1	密度	300
9.2.2	力学性能	301
9.2.3	静水压力测试	304
9.2.4	耐交变温度性能	308
9.2.5	粘接强度	308
9.2.6	耐介质性能	309
9.2.7	透波性能	309
9.2.8	耐海水性能	310
9.2.9	耐海洋环境性能	311
9.2.10	介电性能	311
9.2.11	声学性能	312
	参考文献	313

第10章 固体浮力材料产品标准及测试方法 314

10.1	固体浮力材料产品标准	314
10.1.1	美国军标 MIL-S-24154A	314
10.1.2	海洋化工研究院企业标准 Q/HHY221—2005	318
10.2	固体浮力材料性能的测试方法	320
10.2.1	密度	320
10.2.2	拉伸强度	321
10.2.3	压缩性能	322
10.2.4	剪切性能	324
10.2.5	弯曲性能	326
10.2.6	冲击强度	329
10.2.7	硬度	330
10.2.8	吸水性	331
10.2.9	耐全方位静水压强度	333
10.2.10	热导率	335
10.2.11	电阻率	335
10.2.12	介电常数和介电损耗角正切	337
	参考文献	341

第11章 固体浮力材料的设计计算 342

11.1 失效形式	342
11.2 深潜器用固体浮力材料的设计思想	343
11.3 设计载荷和安全系数	344
11.4 固体浮力材料的结构设计	345
11.4.1 浮力材料质量和质心设计指标的确定	346
11.4.2 浮力材料的结构设计与分析	347
11.4.3 浮力材料的强度分析	350
11.5 浮力材料的安装要求	355
参考文献	356

第12章 应用领域及实例介绍 357

12.1 深海运载和作业装备用浮力材料	358
12.1.1 载人潜器	360
12.1.2 潜水钟	361
12.1.3 有缆无人遥控潜水器 (ROV)	361
12.1.4 无缆自治潜水器 (AUV)	363
12.1.5 自治远程潜器	364
12.1.6 有缆和无缆混合型水下机器人“北极 ARV”	365
12.1.7 水下滑翔机	365
12.1.8 水下布缆机	367
12.2 海洋石油系统用浮力材料	367
12.2.1 海洋石油开采隔水管	368
12.2.2 输油管线	370
12.2.3 大型海上锚泊系统	371
12.3 海洋调查监测系统	371
12.3.1 潜标系统	372
12.3.2 海床基海洋环境监测系统	374
12.3.3 海底观测站	374
12.4 海洋采矿系统	375
12.4.1 海底集矿机	375
12.4.2 扬矿子系统	376
12.5 浮标系统	378
12.5.1 海洋浮标	378

12.5.2 综合浮标	379
12.6 其他应用	380
参考文献	381

第13章 国内外固体浮力材料的发明专利简介..... 383

13.1 国内发明专利	383
13.2 国外发明专利	387
参考文献	388

第 1 章 绪 论

1.1 概述

一般来说,能够提供浮力的材料通称为浮力材料。传统的浮力材料一般使用封装的低密度液体(如汽油、氨、硅油等)、泡沫塑料、泡沫玻璃、泡沫铝、金属锂、木材和聚烯烃材料等。封装的低密度液体易漏,容易污染海域。泡沫塑料、泡沫玻璃、泡沫铝和木材的模量、强度较小,不能满足深海下使用。金属锂的强度和模量能满足深海下使用,但是其与水会反应,且价格昂贵。浅海用浮力材料通常采用软木、浮力球、浮力筒及具有一定强度的合成泡沫塑料或合成橡胶。

本书介绍的固体浮力材料(solid buoyancy material)与浮力筒、合成橡胶、一般泡沫材料等传统的浮力材料相比(见表 1-1),具有以下优点。

表 1-1 各种浮力材料的比较

类别 项目	浮力筒	合成橡胶	一般泡沫材料	固体浮力材料
密度/(g/cm ³)	0.5~0.9	0.1~0.9	0.1~0.3	0.4~0.7,可调
耐压强度/MPa	—	—	<3,强度低	全海深
吸水率/%	密封好,不吸水	不吸水	慢慢吸水	不吸水
使用周期	短	短	短	长
可加工性	不可加工	可机加工	不可加工	可机加工
维修性	易生锈,不易维修	蠕变变形,不可维修	吸水变形,不可维修	可后期维修
应用水深	浅海	浅海	水面或浅海	最大深度全海深

(1) 能承受海洋环境全方位静水压力(水深每增加 100m,水压增加 1MPa),在规定的使用深度以内,不发生破坏,具有优良的耐压性能。

(2) 固体浮力材料密度低,其自身的密度只有水的一半左右或更低,能为各种水下作业系统提供足够的净浮力,从而提高其工作性能。

(3) 低的吸水率和高得体积弹性模量,使它在较大的水压下能提供稳定的浮力,保证其配重设备的安全可靠工作。

(4) 具有良好的耐候性和耐腐蚀性,能保证在水下复杂的海洋环境下正常使用。

(5) 能解决各种水下作业系统在深海的耐压性、结构稳定性；同时，当机械动力停止或发生意外如脐带缆断裂时，或当完成海底观测任务，需要回收观测装置时，可保证系统或装置自动上浮，不至于丢失，以保证生命及财产安全。

(6) 优异的理化性能，如绝缘、隔热、阻燃、隔声等。

(7) 具有优良的可机械加工性能，可按设计的形状、尺寸、曲面等通过机加工任意加工成型，材料性能各向同性，便于现场安装时打磨修补，便于装配。

(8) 材料密度可控，美观实用。

(9) 材料无毒无害无味，对环境无污染。

由此可见，固体浮力材料是一种新型的特种海洋工程材料，它兼具轻质耐压特性，全面突破了传统浮力材料密度大、强度低及不可机加工的局限，通过配方设计，可获得任意密度的材料，且在较低密度的情况下，能在深海使用，因此，该材料一问世，便得到了迅速的发展，特别是在海洋领域各种水下作业系统中得到广泛地应用。

1.2 固体浮力材料分类及应用

从宏观来看，固体浮力材料实质上是一种低密度、高强度、少吸水的固体物质。从材料内部微观结构分析，它是一种中空的或多孔结构材料。综合分析，大体上分三大类：化学发泡法固体浮力材料、纯复合泡沫浮力材料和合成复合泡沫材料。化学发泡法固体浮力材料是利用化学发泡法制成的泡沫复合材料。纯复合泡沫浮力材料是由空心玻璃小球混杂在树脂中形成的，空心玻璃小球占 60%~70% 的体积。合成复合泡沫材料由复合泡沫与低密度填料比如中空塑料或大径玻璃球组合改性而成。其中，纯复合泡沫浮力材料的最低密度极限是 $0.4\text{g}/\text{cm}^3$ 左右，合成复合泡沫材料的最低密度极限是 $0.275\text{g}/\text{cm}^3$ ，而化学发泡法固体浮力材料的最低密度极限是 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 左右，该极限值不包括用于海面提供浮力的材料。当然，上述最低密度极限为理想值，实际上是较难实现的。复合泡沫 (syntactic foams) 一词来自希腊语 “syntaxis”。复合泡沫塑料由环氧树脂及其他热固性树脂和轻质填料混合而成。轻质填料是指玻璃微珠或其他材料的中空微珠，以 $5\sim 300\mu\text{m}$ 的粒径均匀地分散在主体树脂中。

在海洋技术领域，除了三明治结构外，目前通常情况常用的固体浮力材料主要有以下几种：聚氨酯泡沫材料、共聚物泡沫材料、复合泡沫材料和合成复合泡沫材料 (见图 1-1)。

(1) 聚氨酯泡沫材料 由聚氨酯泡沫材料制作的浮筒材料，成本可以得到很好的控制，但其主要应用在水面及水面下深度小于 100m 水中。在水下用这种泡沫材料必须由其他材料完全包覆以保证其与水完全隔离，因为这种泡沫具有吸水性，如果长时间直接与海水接触，在水压作用下，材料会吸水。

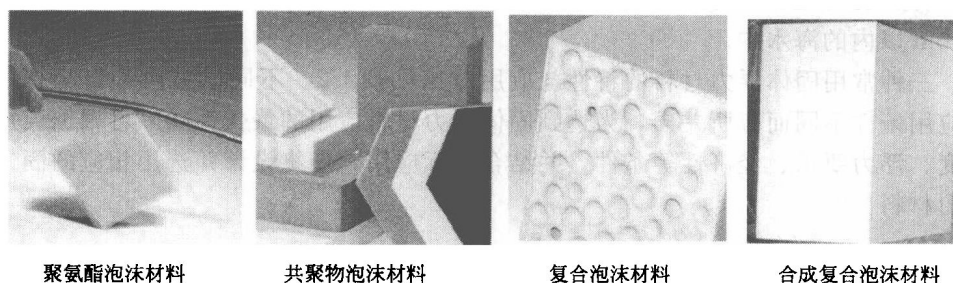


图 1-1 常用的固体浮力材料

(2) 共聚物泡沫材料 交联式共聚泡沫体是坚硬的闭孔泡沫体，能在无需完全外壳封闭的情况下承受海水静压力。这种泡沫体通常被加工成块状或者片状，但在加工及测试之前，必须考虑很多关键因素。此种共聚物材料的低密度泡沫适合于短期应用。如果长期应用于连续的水静压力载荷环境中，这种材料将会发生塑性蠕变、变形以及体积缩小，因此会降低浮力。该材料的密度范围为 $0.04 \sim 0.4 \text{g/cm}^3$ ，工作最大水深可达 600m。

(3) 复合泡沫材料和合成复合泡沫 复合泡沫材料是一种新型固体浮力材料，这种材料优点是在极低密度的情况下能保持足够的强度，具有高压缩强度质量比，低蠕变和低吸水率的特性。从而使为深海中的设备提供浮力、提供保护成为可能。

这种材料的密度很低主要是因为是在基体材料中均匀分散着大量的空心玻璃微球体。这些微球体的表面经过优化处理，经过先进的化学加工工艺，与材料有机的融合在一起，进一步强化了整个材料性能。空心玻璃微珠是一种外观为灰白或灰色具有坚硬外壳的球形中空颗粒，其主要成分是 SiO_2 和 Al_2O_3 ，壁厚为其直径的 $8\% \sim 10\%$ 。

对基体材料的要求是粘接力强、吸水率低、热性能及电性能优良，环氧树脂是首选对象。因为其具有良好的粘接强度，热稳定性、尺寸稳定性和加工性能比较突出。材料的合成过程中还要添加稀释剂、固化剂、表面改性剂。在基体引入了大量直径在 $20 \sim 150 \mu\text{m}$ 的空心玻璃微体之后，整个材料的密度会降低至 $0.38 \sim 0.65 \text{g/cm}^3$ 。这时的材料称之为纯复合泡沫材料。

为进一步降低材料的密度，一些较大的空心球体添加进来，这些微球体材料不同于上面所述的玻璃微球体，它们是一种高强度的纤维合成球体。它们的尺寸相比较更大一些，外径从 $10 \sim 110 \text{mm}$ 。包含三种成分之后的复合泡沫材料的密度可以达到 $0.275 \sim 0.560 \text{g/cm}^3$ ，这时包含了三种成分的材料称之为合成复合泡沫材料。

纯复合泡沫材料的密度范围在 $0.38 \sim 0.65 \text{g/cm}^3$ ，可以应用于任意海水深度。

合成复合泡沫材料的密度范围从 $0.275 \sim 0.560\text{g/cm}^3$ ，一般被用在水下 4000m 以内的海水中。

三种常用固体浮力材料的特性与应用对比见表 1-2。不同材料由于自身特性和应用条件不同而有所差异，为达到固体浮力材料应用的最佳性能，可根据应用深度、浮力要求、经济性等条件，并结合实际应用，最终设计并选用相应的固体浮力材料。

表 1-2 三种常用固体浮力材料的特性与应用对比

名称	特性	应用范围
聚氨酯泡沫	密度范围 $0.05 \sim 0.25\text{g/cm}^3$ ，工作深度不超过 200m	管道漂浮；系泊浮筒；浮船，管线绝热；软管吊绳；短时应急浮材
共聚物泡沫	密度范围 $0.04 \sim 0.4\text{g/cm}^3$ ，工作深度 600m 以上	ROV 浮材；脐带漂浮；大型海底结构的空隙填充；管道绝热；潜水舱浮材；海底系泊浮筒
复合泡沫塑料	纯复合泡沫塑料密度范围 $0.46 \sim 0.65\text{g/cm}^3$ ；工作深度为全海洋深度；合成复合泡沫塑料密度范围 $0.275 \sim 0.56\text{g/cm}^3$ ；工作深度 4000m 以内	多用于深水领域。如立管装置的浮力块；深水 ROV 浮力块；脐带漂浮；深水管线漂浮块

1.3 国内外发展现状与趋势

目前，深海勘探、开发主要以深潜技术为基础，利用潜器、水下机器人等在深海进行观察、测量、取样以致安装必要的仪器设施、水下作业等。高强度固体浮力材料是现代深潜技术的重要组成部分之一，对保证潜器浮力、增大潜器有效载荷、减少外形尺寸等方面有着重要的作用。

化学发泡法固体浮力材料，如硬质聚氨酯泡沫、聚氨酯-环氧泡沫等，是伴随其相关发泡助剂、增强材料等的发展而发展的，仅限于水面及浅海使用。随着复合泡沫固体浮力材料的问世，其具有的压缩强度高、密度低、浮重大、不吸水、耐腐蚀等诸多优良品质和良好的机加工性能，大大拓宽了传统浮力材料的服务水深和应用领域范围，受到人们广泛关注和重视，成为国内外海洋技术科技工作者一直关注并进行大量研究的焦点。随着关键技术的突破，复合泡沫固体浮力材料得到了迅速的发展和推广应用。本节重点介绍复合泡沫固体浮力材料的国内外发展现状与趋势。

1.3.1 国外情况

由于高强度固体浮力材料是深海开发的重要配重材料，在深海作业系统中起到极为关键的作用，所以美、英、日、俄等工业先进国家从 20 世纪 60 年代就开始研制，以用于大洋深海海底的开发事业，并已在民用、商业及军事等领域得到

广泛应用，在众多深海设备中发挥着重要作用，如海底埋缆机、声多卜勒流速剖面仪平台、零浮力拖体、无人遥控潜水器、载人潜器等。

美国早期研究情况：美国海军应用科学实验室研制的固体浮力材料，当密度为 0.35g/cm^3 时，压缩强度为 5.5MPa 。美国洛克希德导弹空间公司研制了两种用途的固体浮力材料，一种是用于浅海的 OPS (offshore petroleum system) 级固体浮力材料，密度 0.35g/cm^3 ，压缩强度 5.6MPa ，可潜水深 540m ；另一种是深潜 SDQ (submersible deep quest) 级固体浮力材料，密度为 $0.45\sim 0.48\text{g/cm}^3$ ，压缩强度 25MPa ，可潜水深 2430m 。

目前，美国 Emerson & Cuming 公司研制了 7000m 载人潜水器用固体浮力材料，密度为 0.561g/cm^3 ，能用于 7000m 水深。美国伍兹霍尔海洋研究所已研制成功“海神号”机器人潜艇，已潜入太平洋 11000m 海深探秘（图 1-2），所装备的高强度固体浮力材料密度为 0.62g/cm^3 ，能抵抗 11000m 深水的压力。

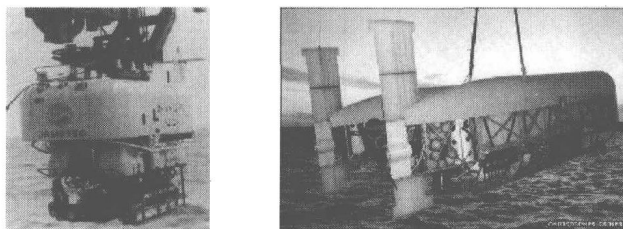


图 1-2 日本“海沟号”和美国“海神号”（黄色部分为浮力材料）

日本海洋技术中心（JAMSTEC）对固体浮力材料的研制开发大体分为三个时期，第一时期是 1970 年水深 300m 的潜水作业；第二时期是 20 世纪 80 年代初研制载人潜水器“深海 6500”；第三时期是 1987 年开始研制 1995 年下水的 11000m 深水下机器人“海沟号”。

俄罗斯海洋技术研究所（IMTP）也研制出用于 6000m 水深自动潜水器用固体浮力材料，密度为 0.7g/cm^3 ，耐压 70MPa 。

在 20 世纪 90 年代前，深潜用高强度固体浮力材料的制备技术只为国外少数厂商掌握，且价格昂贵。据报道，美国建造 Alvin 号深潜器时，浮力材料的价格约为 8 万美元/立方米，该深潜器在浮力材料上就耗资 110 万美元。

据文献材料和材料剖析，国外研制的高强度固体浮力材料大多由粘接树脂和轻质填料组成。其中粘接树脂主要有环氧树脂，聚氨酯，酚醛树脂等。成型工艺可采用：振动浇注，抽真空浇注，模压等方法。轻质填料主要是空心玻璃微球，除玻璃外，还可以用陶瓷、碳和有机聚合物等材料制备空心球。

国外的高强度固体浮力材料采用高强度树脂作为基材，根据不同的使用水深，填充不同的浮力调节介质，选用适当的工艺方法加工而成。为了达到足够的耐压强度和尽可能轻的要求，使用相同材质的两种大小不同的微小球体，较小的

微小球体放在较大的微小球体之间，形成类似于晶体排列状。同时，为了提高浮力材料的抗冲击性和耐侵蚀性，其外表面浇注厚度为 13~15mm 的聚乙烯或者 ABS（丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物）外壳。现在，美国、日本和俄罗斯等国家已经解决了深海用低密度、高强度固体浮力材料的技术难题，并已形成系列标准。客户可以选用标准部件，也可以根据需要提出要求，由公司的专业人员根据使用条件，设计满足耐压要求的各种各样复杂形状的结构件。

欧、美、澳等国外企业如美国的 Cumming corp. 公司、澳大利亚 Matrix 公司、欧洲的 Balmoral Offshore Engineering 公司、Trelleborg Offshore 公司、Marine Subsea Group 公司等，所开发的浮力材料广泛应用于水下潜器、航天航空、海洋石油开采等领域。图 1-3 为美国 Trelleborg Offshore 公司的浮力材料产品。



图 1-3 Trelleborg Offshore 公司的浮力材料产品

1.3.2 国内情况

相对于美国、日本、俄罗斯等深潜技术发达的国家而言，我国固体浮力材料的研究开发起步较晚，与发达国家相比存在较大差距。最初多采用金属浮筒和玻璃浮球提供浮力，其提供的净浮力小，而且形状固定。后发展为采用聚氨酯泡沫、环氧树脂泡沫或其他发泡塑料，但由于其表面的泡孔，以及其内部很难达到 100% 闭孔，在水下使用吸水很严重，因此在实际使用时，必须外表面包覆阻水层或玻璃钢，阻止海水的渗入，可靠性较差。所用合成泡沫塑料的密度一般为 $0.5 \sim 0.6 \text{ g/cm}^3$ ，压缩强度为 4MPa，仅用于水面或浅海短期使用。

到了 20 世纪 80 年代初，哈尔滨船舶工程学院（现哈尔滨工程大学）、航天部 673 所等单位对复合泡沫固体浮力材料曾做过一些探索性的研究工作。1984 年，哈尔滨船舶工程学院（现哈尔滨工程大学）在实验室试制了 500~600m 固体浮力材料，其方法是采用直径 3~4mm 的中空玻璃小球与 20 目、30 目、40 目、60 目、100 目中空玻璃微珠按最佳比例配合，用环氧树脂粘接，制作材料的密度为 0.55 g/cm^3 。用这种环氧粘接空心玻璃球工艺制作的固体浮力材料，其密度很难小于 0.5 g/cm^3 。另外，当时这种耐压强度高的中空玻璃微珠难于制作，国内货源有困难，价格昂贵，因而未能实现工业生产。