

特约专栏

# 载人潜水器材料技术发展现状

曹福辛

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471039)

**摘要:** 载人潜水器是探索海底资源、执行多种海底任务的必要设备, 载人舱球壳是载人潜水器关键部件, 必须使用高比强、高韧性的材料以保证它具有足够的有效载重和良好的安全性。同其它船用金属材料相比, 钛合金比强度高, 非常适合用于建造潜深 3 000 m 以上载人潜水器载人舱球壳, 而载人舱球壳用钛合金的发展必将促进我国载人潜水器的研制和国产化进程。总结了目前国内外在载人舱球壳材料方面的研究和应用进展, 对国产新型 Ti6321 合金进行了详细介绍。

**关键词:** 载人潜水器; 载人舱球壳; 钛合金

中图分类号: P754.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2011)06-0033-04

## Development of Materials for Manned Deep-Ocean Submersible

CAO Fuxin

(CSIC No. 725 Research Institute, Luoyang 471039, China)

**Abstract:** Manned deep-ocean submersible is the necessary equipment for searching resources in seabed and performing benthonic tasks. The manned cabin is the key component of manned deep-ocean submersibles. It is necessary to develop new materials with high strength/density ratio and enough plasticity in order to manufacture high performance manned cabin. Titanium alloys are very suitable as manned cabin materials because of their good properties. Domestic and international progress in research and application of cabin material is summarized; and the newly developed Ti6231 alloy is introduced in particular.

**Key words:** manned deep-ocean submersible; manned cabin; titanium alloy

### 1 前言

在人类发展的 4 大空间(陆、海、空、天)中, 海洋是第 2 大空间, 它是生物资源、能源、水资源、金属资源的开发基地, 也是现实和最有开发潜力的战略空间<sup>[1]</sup>。利用载人深海潜水器是人类开发海洋空间的重要手段。同航天运载技术一样, 载人潜水器的建造是一个国家综合国力的象征, 是意义深远的战略性前沿高技术。载人舱球壳在几千米大洋深处为人员和设备提供操作和生存空间, 承受巨大的海水压力和上浮下潜的疲劳应力。目前载人潜水器下潜深度从上世纪 70 年代的 2 000 m 达到了如今的 7 000 m 水平, 载人潜水器及耐压球壳部位如图 1。

载人潜水器的关键技术之一是如何使用高强度材料保证耐压球壳结构具有足够的安全裕度。下潜深度加大, 外海水压力随之增大, 必须增加壳体厚度来保证球

壳耐压能力, 这将导致壳体质量剧增, 减小了有效浮力和载重。从下潜深度考虑, 要求壳体材料具有高比强; 从安全考虑, 要求高强度壳体必须同时具有足够的韧性, 尤其在海水介质中的韧性, 以防止发生脆性破坏。用塑性区尺寸  $(K_I/\sigma_s)^2$  表示韧性的大小, 比较了钛合金、多种高强钢和铝合金的韧性(图 2), 结果表明, 钛合金断裂韧性最好, 钢次之, 铝合金最差<sup>[2]</sup>。研究表明, 钛合金比强度高, 非常适合用于建造潜深 3 000 m 以上载人潜水器载人舱球壳。

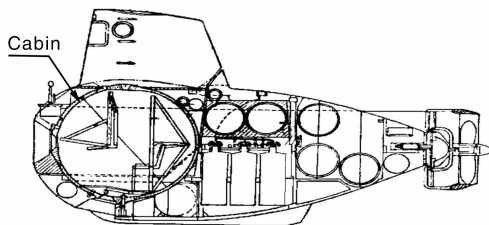


图 1 “阿尔文号”载人潜水器结构及载人舱球壳部位  
Fig. 1 Structure of “Alvin” deep manned submersible

本文介绍了国内外载人潜水器载人舱球壳用材的发展状况和材料主要性能。

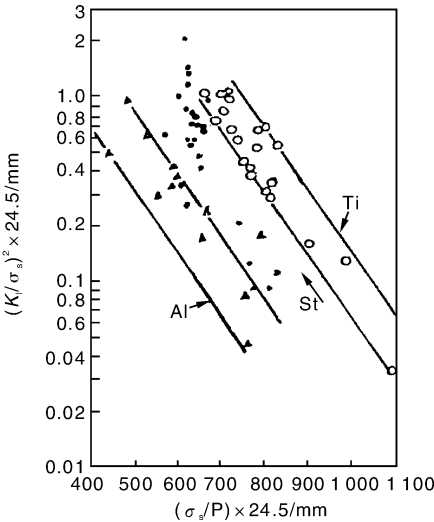


图 2 钛合金、高强度钢、铝合金韧性对比

Fig. 2 Comparison of toughness for Ti alloy, high strength steel and Al alloy

2 国外潜水器载人舱球壳材料进展

国外对载人潜水器技术及其应用十分重视，各国研发的潜水器潜深及采用的材料如表 1 所示。1985 年法国“Nautilé”号载人潜水器，潜深 6 000 m，能直接考察

世界海洋 98 % 的海底；1984 年日本建成“Shinkai6500”潜水器，潜深 6 500 m，调查能力覆盖日本 200 海里水域的96 %；1972 年美国建成了“Alvin”号潜水器，潜深 6 500 m；俄罗斯的 CONSUL 号潜水器潜深为 6 000 m。2007 年我国建成潜深 7 000 m 载人潜器（“蛟龙号”），是当前国际上下潜深度最深的载人潜器。在未来深海科学研究系统中，日本认为载人潜水器是其基本工具和核心构成，并考虑将载人潜器分为 5 个深度级别：①11 000 m；②6 500 m；③4 000 m；④2 000 m；⑤500 m。

各国的潜水器用材经历了从高强度钢向钛合金的发展过程。目前潜深超过 3 000 m 的载人潜水器载人舱球壳材料几乎全部采用钛合金材料。用于潜水器载人舱球壳材料的典型性能见表 2<sup>[3]</sup>。

表 1 世界各国潜水器潜深及采用材料

Table 1 Summary of manned deep-ocean submersibles and cabin materials				
Nation	Name	Depth/m	Years	Cabin materials
U. S. A	Alvin	4 000	1971	Ti-6211
	Seacliff	6 000	1981	Ti-6211
Japan	しんかい 2000	2 000	1981	TC4 ELI
	しんかい 6 500	6 500	1989	TC4 ELI
France	Nautilé	6 000	1985	TC4
Russia	Mir- I	6 000	1988	BT6 (TC4ELI)
	Mir- II	6 000	1988	BT6 (TC4ELI)

表 2 各种潜水器载人舱球壳用材料性能指标

Table 2 Properties of different cabin materials

Materials		Density/ g · cm <sup>-3</sup>	R <sub>p0.2</sub> /MPa	R <sub>m</sub> /MPa	A/%	Elastic modulus Kg · mm <sup>-2</sup>	Strength/Density /MPa · g <sup>-1</sup> · cm	Application
Titanium alloys	TC4 ELI	4. 42	820	890	10	11 500	19. 0	Flotative ball of “Aivin”, Cabin of “しんかい 6 500”, Cabin of “Dragon”
	6Al-2Nb-1Ta-0. 8Mo	4. 49	685	785	12	12 000	15. 0	Cabin of “Aivin”, cabin of “Seacliff”
Steel	NS90	7. 85	≥880	about 980	—	21 000	11. 5	2 000 m cabin

3 中国载人潜水器载人舱球壳材料发展状况

中国的潜水器技术研究始于 20 世纪 60 年代中期，目前已成功研制出 1 000，6 000 m 的无人无缆潜水器和 7B8 军用潜水器，7 000 m“和谐”号载人潜水器，鱼鹰 1 号、2 号载人潜水器，QSZ-II 担任常压潜水装具等，目前正在开展 4 500 m 载人潜水器的国产化研制<sup>[4]</sup>。载人舱球壳材料经历了从船体钢向钛合金的发展，主要载人潜水器及载人舱球壳材料见表 3。

“九五”期间，我国通过对国内外 TC4ELI，Ti6211 等潜水器载人舱球壳用钛合金材料的对比选材研究，对材料的抗冲击 a<sub>k</sub> 值，断裂韧性 K<sub>IC</sub>，K<sub>ISCC</sub> 和焊接性能提出了更高的要求，开发出具有优良韧性和焊接性的

Ti6321 合金，其名义成分是 Ti-6Al-3Nb-2Zr-0. 8Mo。

表 3 中国主要载人潜水器及载人舱球壳材料

Table 3 Manned deep-ocean submersible and cabin materials in China			
Name	Depth/m	Time	Cabin materials
Submersible	600	1988	785 MPa Grade Steel
Dragon	7 000	2007	BT6 (TC4ELI)

3. 1 力学性能

Ti6321 合金和 TC4ELI 合金的力学性能见表 4<sup>[1,5-6]</sup>。

3. 2 焊接性能

载人舱球壳上有许多大孔（观察窗、密封舱口、贯通连接件），需要进行焊接，要求材料焊接性能好。表 5 是 Ti6321 合金和 TC4ELI 合金的焊接接头性能，可

以看出 Ti6321 合金接头强度低于 TC4ELI，而冷弯、冲击和韧性均比 TC4ELI 好<sup>[5-10]</sup>。

表 4 合金的力学性能实测  
Table 4 Mechanical properties of TC4ELI and Ti6231 alloy

Size	Position	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	$a_{kv}/\text{KJ} \cdot \text{m}^{-2}$	$K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	$K_{ISCC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Bending angle/(°)	Low cyclic fatigue	
										- 1. 75 %	- 1. 2 %
TC4ELI 38 - 48 mm <sup>[1]</sup>	-	872 ~ 892	947 ~ 950	15 ~ 16	33 ~ 41	294 ~ 392	88. 4	55. 8	105 (D = 5 t)	1 000	5 000
Ti6321 , 30 - 48mm <sup>[5]</sup>	-	785 ~ 885	880 ~ 925	15 ~ 16	34 ~ 50	770 ~ 816	117	84	180 (D = 5 t)	1 034	5 075
Ti6321 , 90mm <sup>[6]</sup>	Surface	815	910	15	47	709	130	-	-	-	-
	Central section	798	875	17	49	637					

表 5 Ti6321 与 TC4ELI 焊接接头性能对比  
Table 5 Comparison of mechanical properties of Ti6231 and TC4ELI joints

	TC4ELI <sup>[7-10]</sup>	Ti6321 <sup>[5]</sup>
Methods	EB	TIG
$R_m/\text{MPa}$	971 ~ 994	825 ~ 900
$R_{p0.2}/\text{MPa}$	870 ~ 908	780 ~ 865
$A/\%$	10. 7 ~ 14. 3	11 ~ 13
$a_{kv}/\text{KJ} \cdot \text{m}^2$	245 ~ 259	750 ~ 1 050
Bending angle/°	105 (d = 10 a)	90 (d = 8 a)
$R_m(\text{joint})/R_m(\text{base})$	1	1
$K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	90 (TIG)	97. 99 ~ 133. 1
$K_{ISCC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	60 ~ 66. 4 (TIG)	72. 34 ~ 102. 3

3. 3 疲劳裂纹扩展性能

疲劳裂纹扩展速率试验按 GB6393 - 86 进行，试样材料为 Ti6321 合金板 (22 mm)，试样形式为 CT 试样。试验仪器为 INSTRON1343 型电液伺服万能试验机，试验环境为大气，试验温度是 22 ~ 26 ℃，控制方式为载荷控制，载荷波形为正弦波，载荷比为： $r = 0. 1$ ，加载频率 10 Hz。 $da/dN - \Delta k$  表达式为：

I 段： $da/dN = 1. 783\ 6 \times 10^{-11} \Delta k^{5. 110\ 7}$   
II 段： $da/dN = 3. 531\ 0 \times 10^{-6} \Delta k^{1. 326\ 9}$

其中  $da/dN$  为疲劳裂纹扩展速率， $\Delta k$  为疲劳裂纹扩展门槛值。

与日本的 TC4ELI 合金板材 (30 mm) 扩展速率进行比较，Ti6321 合金疲劳裂纹扩展速率在  $\Delta k < 46\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  时 ( $da/dN = 5 \times 10^{-4}\ \text{mm/c}$ )，裂纹扩展速率与 TC4ELI 相当；而在应力强度因子  $\Delta k > 46\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  时，Ti6321 合金的裂纹扩展速率比 TC4ELI 合金低近 1 个数量级，也就是说随着应力场强度因子的增大，Ti6321 合金抗裂纹扩展力较强，这从 Ti6321 合金断裂韧性明显高于 TC4ELI 合金也可得到印证。

4 结 语

我国虽是一个海洋大国，但人均资源很少。随着社

会经济的发展，迫切需要对海洋矿产资源、生物资源、生态环境等进行调查，并且在海洋开发技术、探测技术方面在世界上占有一席之地，赶上日本、美国、法国等发达国家。过去 20 多年来，我国在持续开展大洋勘察工作的同时，深海科学研究和技术开发也得到了快速发展，我国已经初步建立了深海勘察、深海多金属结核矿物开采、运载和冶炼等高技术平台，形成了一定的技术储备。载人球壳用钛合金厚板材料技术的发展必将促进我国载人潜水器的研制和国产化进程。

参考文献 References

[1] Wu Shiguo (吴时国). Suggestion of China HOV development . (关于发展我国载人深潜器的建议)[J]. *Ocean Science*(海洋科学), 2001, 11: 1 - 5.

[2] Sun Jianke (孙建科), Meng Xiangjun (孟祥军), Chen Chunhe (陈春和), *et al.* 我国船用钛合金研究、应用及发展[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 2002, 38(Suppl): 33 - 36.

[3] Cui Weicheng (崔维成). *Get in Deep Ocean*(走进深海大洋)[M]. Shanghai: Popular Science Press, 2007.

[4] Cui Weicheng (崔维成), Xu Qinan(徐芭南), Liu Tao(刘涛), *et al.* “和谐”载人深潜器的研制[J]. *Ship Science and Technology*(舰船科学技术), 2008, 30: 17 - 25.

[5] Cao Fuxin (曹福辛). *Summary Report on the Research and Application of 785 MPa Grade Titanium Alloys for Manned Deep-Ocean Submersibles and Warship*(潜水器和舰船用 785MPa 级钛合金应用研究报告)[R]. Luoyang: Luoyang Ship Material Research Institute 1990.

[6] Yu Wei(余巍). *Annual Summary Report of the Research on Shell of 4 500 m Manned Deep-Ocean Submersibles*20(4500 米深潜器载人球壳研制年度总结报告)[R]. Luoyang: Luoyang Ship Material Research Institute 2010.

[7] Wu Shidong. Titanium Alloy in 6 500 m HOV[J]. *Heat treatment*, 1990, 30(2): 93 - 96.

[8] Zhao Fuchen. Manufacture Titanium Shell of HOV[J]. *Cynoct-pobnne*, 1991(7): 6 - 9.

[9] Wu Shidong. Titanium Shell of HOV[J]. *Mitsubishi Heavy In-*

*dustries Technical Review*(三菱重工技报), 1986, 23(4): 440  
-444.

[10] Endo Michimasa, Yokota Kimio, Sasano Ryoichiro, *et al.* Re-  
search of the Manufacturing Technique of Pressure Hull for Man-  
ned Deep-Ocean Submersibles[J]. *Journal of the Society of Na-  
val Architechts of Japan*, 1984, 156: 425 -435.

