

Pb - 17Li 回路技术的初步分析

章毛连^{1,2,3}, 吴宜灿², 何晓雄¹, 黄群英²

(1. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230000; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031; 3. 安徽科技学院, 安徽 凤阳 233100)

摘要: 本文综合国外有关 Pb - 17Li 回路的经验, 结合本人的实践, 就聚变堆包层(包括 Iter - HCLL)的 Pb - 17Li 回路, 主要是对实验用 Pb - 17Li 回路的设计和运行的诸要点做一评述, 同时介绍一些设计中的普遍原则和一些重要数据。

关键词: 聚变堆; Pb - 17Li; 回路技术; 研究

中图分类号: O539

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 3589(2005)03 - 0017 - 06

Preliminary analysis on Technique of Pb - 17Li loop

ZHANG Mao - lian^{1,2,3}, WU Yi - can², HE Xiao - xiong¹, HUANG Qun - ying²

(1. HeFei University of Technology, Hefei 230000, China;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1126, Hefei 230031, China;

3. Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: The paper describes the studies of Pb - 17Li loops abroad Conjoining our own practice. The opinion and comment on several important point of the Pb - 17Li loop design and operation of fusion reactor are given (mainly involving experimental Pb - 17Li loop). At the same time, some general principles and important data on Pb - 17Li loop are introduced.

Key words: Fusion reactor; Pb - 17Li; Loop technique; Research

1 引言

液态金属 Pb - 17Li 作为聚变驱动次临界清洁核能系统(FDS)^[1,2]的双冷核废料嬗变包层(DWTB)^[3]和聚变堆(包括 Iter)Pb - 17Li 自冷包层或双冷包层的载热剂, 氚增殖剂, 中子倍增剂已被广泛使用. 表 1 中列举了世界各国已设计的部分包层. Pb - 17Li 实验回路营造 Pb - 17Li 自冷、双冷包层, Iter 的 Hell 包层在 FDS 或聚变堆中的工况, 进行 TBM(test blanket module)相关材料腐蚀实验、以及 TBM 在进 Iter 前的各项预演实验. 这表明 Pb - 17Li 技术已经发展成为一个全新的技术领域. 为发展聚变堆而设计建造的 Pb - 17Li 实验回路^[4-19]很多. 本文从 Pb - 17Li 的特性出发, 对 Pb - 17Li 回路的技术做一探讨, 对国外有关回路做一评析. 为建造先进、大型 Pb - 17Li 回路提供依据和参考。

2 Pb - 17Li 的特性

2.1 Pb - 17Li 的主要物理特性

熔点 235℃, 沸点密度: 9500kg/m³, 粘性系数: 0.188 (10⁻⁶m²s⁻¹), 比热容: 190J/kg. k 导热系数: 15W/m. k, 传热系数: 1000W/m². k, 电导率: 0.85 * 10⁶ (Ω. m)⁻¹, 电阻率: 1.1765 (Ω. m), 溶解时体积增大 3.5%, Pr 数: 2.38 * 10⁻²。

由于其沸点高, 载热剂可在常压下工作, 聚变堆冷却系统可以不使用高压. 但由于熔点高, 管道、设备

收稿日期: 2005 - 04 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175067); 安徽省教育厅自然科学基金资助项目(2005KJ227)。

作者简介: 章毛连(1962 -), 男, 安徽省贵池市人, 研究生, 副教授, 主要从事液态金属回路及特性研究。

应考虑预热, Pb-17Li 也需要预热熔化, 避免冷冻堵塞。

表 1 世界各国已设计的部分包层

名称	国家	结构材料	载热剂	载热剂温度(入口/出口)℃	氚增殖剂	中子倍增剂
FDS - DWTB	中	SS316 或 CLAM	Pb - 17Li	250/370	Pb - 17Li	Pb - 17Li
WCLL	欧	ODS	H ₂ O	265/325	Pb - 17Li	Pb - 17Li
A - DC	美	ODS	Pb - 17Li	460/700	Pb - 17Li	Pb - 17Li
AURO		SiC _r /SiC	Pb - 17Li	450/860	Pb - 17Li	Pb - 17Li
ARIES - RS	美	V - 4Cr - 4Ti	Li	330/610	Li	
ARIES - II	美	V - 5Cr - 5Ti	Li	330/610	Li	
ARIES - ST	美	ODS	Pb - 17Li	550/700	Pb - 17Li	Pb - 17Li
ARIES - AT	美	SiC _r /SiC	Pb - 17Li	654/1100	Pb - 17Li	Pb - 17Li
HCLL	欧	RAFM	he	300/500	Pb - 17Li	Pb - 17Li
Li/V - TBM	俄	V - Cr - Ti	Li	250/650	Li	Be

2.2 Pb-17Li 的热传导性、电导性、蒸气压、比热、表面张力、动态粘滞系数与温度的关系 分别如下图 1, 图 2, 图 3, 图 4, 图 5, 图 6^[20] 所示, 由图可知(1) Pb-17Li 的电阻率低, 导电率高, 可以利用电磁流体的特性制造各种设备和测量仪器, 如电磁泵, 电磁流量计等。(2) 导热性好, 结构材料及设备应考虑承受较大的热冲击, 这对聚变反应堆动态过渡过程是不能忽视的。

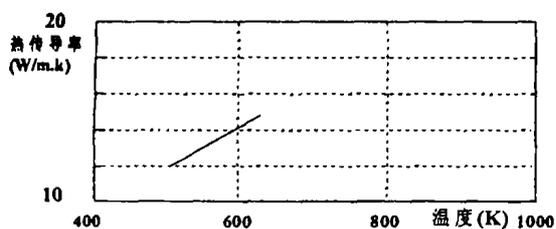


图 1 pb-17Li 热传导率与温度的关系

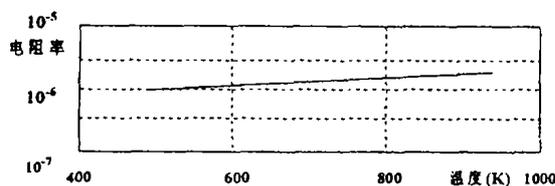


图 2 pb-17Li 电阻率与温度的关系

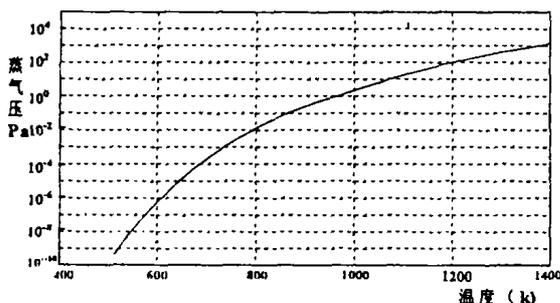


图 3 pb-17Li 蒸气压与温度的关系

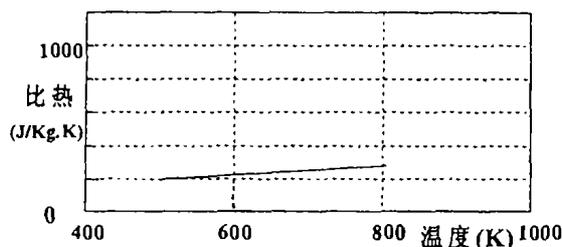


图 4 pb-17Li 比热与温度的关系

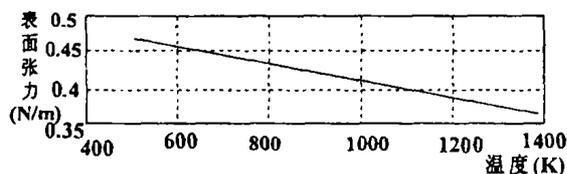


图 5 pb-17Li 表面张力与温度的关系

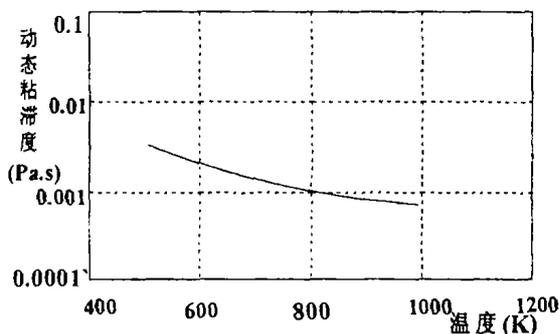


图 6 pb-17Li 动态粘滞度与温度的关系

2.3 合金的化学特性 合金与水和空气没有爆炸性的反应。

2.4 Pb-17Li 的核物理特性

2.4.1 中子学方面 从氚增殖(TBR)和屏蔽方面考察,Pb-17Li 合金中 Pb 的含量很大(99.3. wt%), 由

于 Pb(n, 2n) 反应,其中子倍增能力相对较强,铅是有效的中子增殖材料,而且 Pb-17Li 的中子屏蔽特性也非常好。

2.4.2 磁流体动力学(MHD)方面 内管壁有绝缘层管道的横截面和磁场恒定,液态金属流动压降损失,可以用以下公式来估算:

$$\Delta p = \nu BL \sqrt{\sigma\eta/\alpha}$$

σ 、 η 分别为液态 Pb-17Li 的电导率与粘滞系数。

2.4.3 氦控制方面 氦在共晶体材料 Pb-17Li 中的溶解度很小,对 Pb-17Li 来说,关键的问题是氦渗透。Reimann 和 Malang 提出的从自冷 Pb-17Li 包层中出氦的方法是可行的。该方法是让液态金属 NaK,在 Pb-17Li 和 NaK 双回路蒸汽发生器的管道里缓慢流动。氦从增殖材料渗透过较外面的管道进到 NaK 里,由于氦在液态 NaK 中的溶解度很大,所以渗透的氦先溶解在液态 NaK 里,再流到冷阱被回收。所以对于 Pb-17Li 来说,氦储存不再是可行性的问题。而防止氦在 Pb-17Li 合金中渗透的防氦渗透涂层问题也得到很好的解决。

2.4.4 和结构材料的相容性 液态金属包层的结构材料一般选用铁素体钢、钒合金和碳化硅复合材料。碳化硅复合材料耐高温,耐腐蚀并有非常好的绝缘特性,但制造工艺不理想,实用可行性不大。研究表明^[21-23]液态金属 Pb-17Li 与奥氏体钢、铁素体钢、缘马氏体不锈钢、钒合金的最大兼容温度分别为 400℃/460℃和 650℃。

2.4.5 排热系统方面 自冷包层设计,需要的冷却剂管道少,有简洁性和可靠性方面潜在的优势,但其隐含的缺点就是要用大的液态金属回路来把热和氦从包层分别输送到蒸汽发生器和出氦系统。

表 2 世界各国所建 Pb-17Li 实验回路的比较与分析

名称	国家	结构与类型	形状大小	结构材料	工质	净化系统	覆盖气体	手套箱	实验样品	实验
ALCESTE loop	法	主回路(电磁泵驱动), 净化支路	“8”字形	316L	Pb-17Li	冷阱	Ar	无	环状	动态腐蚀
CLIPPER loop	法	主回路(热对流驱动) 净化支路	“8”字形 3m * 3m	316L	Pb-17Li	冷阱	Ar	无	杆状	动态腐蚀 应力腐蚀 冷阱影响
PICOLO loop	意	主回路(电磁泵驱动), 净化支路	“8”字形	奥氏体钢	Pb-17Li	磁阱	Ar	有	圆柱体	动态腐蚀
LIFUSH loop	意	主回路净化支路	“8”字形	奥/马氏体钢	Pb-17Li		Ar	无		动态腐蚀 应力腐蚀
Anapurna loop	意	主回路(电磁泵驱动), 净化支路	“8”字形	316L	Pb-17Li	冷阱	Ar	有		动态腐蚀 冷阱影响
TULIPLoop		热对流	0.5m * 0.5m		Pb-17Li		Ar	无		动态腐蚀
CAMILLE loop		主回路(电磁泵驱动) 净化支路	“8”字形 1.5m * 3m	马氏体钢	Pb-17Li	冷阱	Ar	无	圆柱体	动态腐蚀 应力腐蚀 冷阱影响
ALEXloop		回路(电磁泵驱动)		300 不锈钢	Li	过滤器	Ar	无	圆管	MHD 研究

2.4.6 安全性方面 Pb-17Li 与水,二氧化碳和混凝土中的水分有明显的反应。但与空气和氮气的反

应非常轻微,化学反应所达到的温度较高。

由于液态金属 Pb - 17Li 的密度较大,所以液态金属 Pb - 17Li 的静态运行压力相对较高,相应地要求管道的结构材料的机械应力较大。液态金属 Pb - 17Li 有较高的熔点,安全性能较高。

3 世界各国所建 Pb - 17Li 实验回路的比较与分析

结果见表 2。

4 Pb - 17Li 回路的技术探讨

Pb - 17Li 回路在聚变堆和 FDS 中所面对的环境:高温、强磁场,Pb - 17Li 中氧含量应低于 10 ~ 20ppm 因此,Pb - 17Li 回路必须耐高温、严密封。

4.1 管道结构材料的选择

必须充分考虑在高温和强磁场下,结构材料与 Pb - 17Li 的共存性、长期运行结构材料的蠕变、腐蚀以及结构材料的热膨胀,热应力和热冲击等。可选择 316L。最好选择 CLAM 钢,活化马氏体钢(LAM)是富有潜力的聚变堆结构材料,其抗辐照肿胀、耐液态金属(Pb - Li 等)腐蚀、热导性、抗蠕变、疲劳性能等都远优于 316ss。CLAM 钢与 Pb - Li 的相容性能、焊接性能、防氚渗性能和绝缘涂层性能都将具有独到之处。

4.2 回路管道的布置

根据回路使用目的和功用,空间的限制,设备的布置,管道的柔性等。考虑热膨胀、力、力矩、应力等对管道及设备的影响,尽可能使管系简单,结构紧凑,从而减少分支、弯头等应力集中或易泄漏部件。管道的柔性依靠布置管道的合适的行程来提供,也可通过管道回路中的弯头、迂回管道等来提供。管系布置要尽可能约束由于电磁泵及其它冲动负载引起的管系振动,要对整个管系的柔性和应力进行分析和评价。管系布置要避免存在极高点 and 极低点,极高点在充 Pb-17Li 时由于未排出气体卷进 Pb - 17Li 中造成气囊,极低点在排 Pb - 17Li 时不能排空形成残留。可采用在极点设置排气管线和低点设置排放管线的方法解决;管系回路布置应避免水平,要有适当的倾斜度(3 ~ 5%)以保证液态 Pb - 17Li 在重力作用下顺利泄放。

4.3 回路管道的连接、支承

回路中所有管道连接不论管径大小,原则上都应采用对接焊接,并进行 x 射线探伤和其它无损试验,保证焊接质量。一般不采用法兰连接,因为法兰连接泄漏危险性大。

管系支承与管内流体无关,Pb - 17Li 的管道支承类同于其它高温管系的支承。

4.4 管道的质量检验

回路管道的所有焊接点进行 100% X 射线探伤;焊缝液态渗漏试验;氩气密封试验;气压试验等。以确保管道质量良好。

4.5 热膨胀、热冲击的对策

4.5.1 热膨胀 Pb - 17Li 及管道在升温过程中要发生热膨胀,可在整个装置的最高点设置一充满惰性气体、能提供附加系统容积的膨胀箱来彻底地适应 Pb - 17Li 的膨胀。

4.5.2 热冲击 系统运行在高温及热端与冷端大温差工况下,快速停止或因设备故障使整个系统温度突然变化时,材料将受严重的热冲击。特别是用热传导性低的奥氏体不锈钢作结构材料的系统将产生非常大的过渡热应力。解决方法为设计衬套或形成滞流区,如图 7、图 8 所示使温度不同的 Pb - 17Li 不直接与管壁接触,在衬套或滞流区内充分混合。

4.6 管道的堵塞

4.6.1 Pb - 17Li 的熔点为 235℃,高于室温,当系统的局部温度低于熔点时,回路就会出现堵塞 解决措施:在 Pb - 17Li 回路管道设计加热装置。可采用电阻加热器,并在管道外部加保温层。

4.6.2 Pb - 17Li 中杂质析出使回路管道堵塞,主要杂质为锂铅的氧化物 可采用冷阱、热阱、磁阱来净化 Pb - 17Li。

4.7 Pb - 17Li 的净化

净化设备:冷阱、热阱、磁阱。

4.7.1 冷阱 利用 Pb - 17Li 中杂质的溶解度随温度下降而减少的特性,控制温度,使杂质在低温下沉

淀、析出,再用不锈钢丝网捕集,以去除杂质而使 Pb-17Li 纯化。冷阱结构可分成冷却区、沉淀区、过滤区,如图 9 所示纯化效果与流量、温度及 Pb-17Li 滞留时间有关。

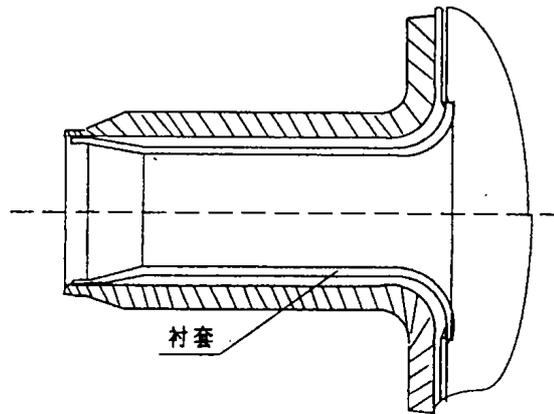


图 7 抗热冲击的容器接管

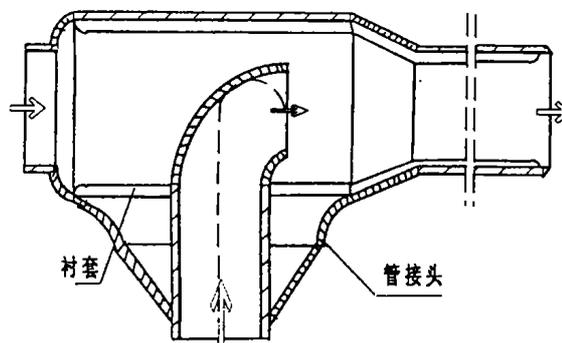


图 8 不同温度 pb-17Li 汇合点 T 形混合器

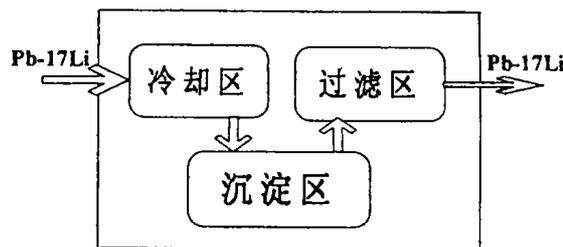


图 9 冷阱的结构示意图

冷阱要能够把进来的 Pb-17Li 温度降低到低于其氧化物或其它杂质的饱和温度,同时又能使 Pb-17Li 温度维持在比其凝固点高的某限定值;能为杂质沉淀提供足够的停留时间;能为沉淀物的颗粒长大提供足够的表面积;能为沉淀物提供足够的容积以容纳其在冷阱寿命期间内预计可能累积的杂质容量。

冷阱内要保持良好的密封,便于维修、装卸及更换滤网。

4.7.2 热阱 利用高温下填料对氧亲和力大,使锂铅氧化物和其它较稳定杂质氧化物与填料发生化学作用,把冷阱 Pb-17Li 进一步纯化的装置。热阱纯化效果与温度、流量、滞留时间有关。

4.7.3 磁阱 也是一种净化 Pb-17Li 的设备。

4.8 覆盖气体

回路中所有 Pb-17Li 的自由液面都采用惰性气体覆盖把 Pb-17Li 与大气隔开,防止大气进入系统以免 Pb-17Li 与大气反应。常选用比重大,热传导率小,价格便宜的氩气作为覆盖气体。

4.9 管道的清洁

回路管道应清洗、干燥、严密封。确保管道洁净、确保 Pb-17Li 的高纯度。

5 结论

Pb - 17Li 回路技术的研究将为研制性能良好 Pb - 17Li 回路仪器设备提供依据,将为建造更先进、大型 Pb - 17Li 回路作准备,将为设计建造聚变堆包层模块打下坚实基础。

参考文献:

- [1] Yican Wu Fus Eng and Des. 63 - 64(2002) 73 - 80.
- [2] Wu, Y. C. ; Qian, J. P. ; Yu, J. N. J. Nucl. Mater. 307 - 311 (2002) 1629 - 1636.
- [3] Wu, Y. C. ; Zhu, X. X. ; Zheng, S. L. ; Ke, Y. ; Huang, Q. Y at Fus Eng and Des. 63 - 64 (2002) 73 - 80.
- [4] M. Broc, T. Flament, P. Fauvet and J. Sannier, J. Nucl. Mater. 155 - 157 (1988) 710.
- [5] Proc. 4th Int. Conf. On Liquid Metal Engineering and Technology, SFEA, Avignon(1988). 527.
- [6] M. Broc, P. Fauve T. Flament, A. Terlain and J. Sannier Proc. 4th Int. Conf. On Liquid Metal Engineering and Technology (SFEA, Avignon1988).
- [7] H. U. Borgstedt , H. D. Rohrig J. Nucl Mater. 179 - 181(1991). 596.
- [8] J. Sannier , M. Bore, T. Flament and A. Terlain, Fusion Eng. Design 14(1991). 299.
- [9] Sannier, T. Flament and A. Terlain, Fusion Techology, eds. B. E. Keen et al (North. Holland, 1991). 901.
- [10] F. Tortorelli, Fusion Eng. Desigh 14(1991). 335.
- [11] V. Coen, H. Kolbe and L. Orecchia, J. Nucl. Mater. 155 - 157(1988). 740.
- [12] At ENEA site of Brasimone, J. Nucl. Mater. 307 - 311(2002) 1391 - 1395 (Italy).
- [13] T. L. Sander et al Fusion Tech. 1985, 8:251.
- [14] C. B. Reed et al. Fusion Tech. 1985, 8:257.
- [15] Keiji Miyazaki et al . Nucl. Fusion. 1986, 4:447.
- [16] Keiji Miyazaki et al . . Fusion Aech. 1986, 10: 830.
- [17] Keiji Miyazaki et al . Nucl. Tech. 1983, 4:773.
- [18] Dai Kai Sze ,et al. APEX interim report , November 1999.
- [19] H. U. Bougstedt, M. Grundmann, J. Konys. J. Nucl. Mater. 155 - 157 (1988) 690 - 693.
- [20] O. K. Chopra, D. L. Smith, J. Nucl. Mater. 155 - 157 (1988) 715 - 721.
- [21] H. U. Bougstedt, H. D. Roehrig, J. Nucl . Mate, 176(1990).

(责任编辑: 奚 鹏)