

除氢材料在高真空多层绝热设备中维持高真空行为研究

于洋^{1,2}, 朱鸣², 陈叔平¹, 古纯霖², 张波², 黄宇巍³

1 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050

2 中国特种设备检测研究院, 北京 100029

3 郑州轻工业大学能源与动力工程学院, 郑州 450001

高真空多层绝热低温设备夹层内的绝热材料及金属材料会向真空夹层内释放出氢气, 导致绝热真空恶化, 严重影响设备的绝热性能。本工作搭建了吸氢材料吸气性能测试实验装置, 通过测量已知夹层体积内真空度随时间的变化, 对比分析了 Ag-Z 型银吸气剂和高效催化除氢剂 (ECG) 的吸气性能, 并获得了两种吸氢材料的吸附等温曲线。研究表明, 两种吸氢材料的吸附过程均符合 BDDT 理论中的第一种类型, 即 Langmuir 吸附。本实验采用定容法测得 Ag-Z 型银吸气剂累计吸气体积为 63.084 mL/g, 平均吸气速率为 0.132 mL/(g·h)。ECG 累计吸气体积为 366.276 mL/g, 平均吸气速率为 1.353 mL/(g·h), 分别是 Ag-Z 型银吸气剂的 5.81 倍和 10.25 倍。两组实验中平均吸气速率均随着加注氢气初始压力的升高而先增加后降低。两种除氢材料最大吸附速率均发生在第一次加注初始阶段, 平衡压力均随加注氢气的初始压力增大而升高。实验结果为两类吸氢材料在低温设备储运行业的应用提供了依据。

关键词 高真空多层绝热 吸氢材料 吸气性能 绝热性能 高效催化除氢剂 (ECG) Ag-Z 型银吸气剂 吸附等温曲线

中图分类号: O643; TQ424 文献标识码: A

Research on Maintaining High Vacuum in High Vacuum Multilayer Insulation Equipment of Hydrogen Getters

YU Yang¹, ZHU Ming², CHEN Shuping¹, GU Chunlin², ZHANG Bo², HUANG Yuwei³

1 College of Petroleum and Chemical, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2 China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China

3 College of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

The insulation materials and metal materials in high vacuum multilayer insulation cryogenic equipment released hydrogen into the interlayer for a long time, which led to the deterioration of the insulation vacuum and seriously affect the insulation performance of the container. In this paper, an experimental device was set up through testing the change of vacuum degree, then compared the adsorption performance of Ag-Z getter and high efficiency composite hydrogen getter (ECG). The adsorption isotherm curves of hydrogen getters were obtained. The research defined that the adsorption process of hydrogen getters accords with the first type of BDDT theory, namely Langmuir adsorption. The cumulative insulation capacity of Ag-Z getter was 63.084 mL/g, and the average adsorption rate was 0.132 mL/(g·h). And ECG was 366.276 mL/g and 1.353 mL/(g·h), which was 5.81 times and 10.25 times of Ag-Z getter, respectively. Moreover, with the increased of initial H₂ pressure the average adsorption rate of each group increased and then decreased. The maximum adsorption rate of the two hydrogen getters occurred in the first hydrogenation, and the equilibrium pressure of the hydrogen getters increased with the initial pressure of H₂. The experimental results provided a basis for the application of two kinds of hydrogen getters in cryogenic equipment and transportation industry.

Key words high vacuum multi-layer insulation, hydrogen absorption material, inspiratory performance, heat-insulating property, efficient catalytic hydrogen getter (ECG), Ag-Z getter, adsorption isotherm curve

0 引言

高真空多层绝热低温设备广泛应用于能源、航空航天、医疗等领域, 具有巨大的发展潜力。随着科技的发展, 工业上对低温设备的使用要求也越来越高, 行业从业者多采用高真空多层绝热方式来对其所存储的低温物质进行保温。其中多层绝热材料的主要作用是削减内外容器的辐射传热和热传导, 高真空在这种绝热方式中的作用是减弱气体分子对流传热及热传导, 高真空的好坏是影响高真空多层绝热低温设备绝热性能的主要因素。存储容器的不锈钢、绝热材料以及支撑结构等向真空环境放气以及设备漏气, 导致高真空被破坏, 容器的绝热性降低, 加快设备内低温物质的蒸发速率, 会造成经济损失和安全隐患。因此吸气剂成为维持高真空必不可少的工具之一。已有研究表明, 放出的气体中 70% 以上是氢气^[1-2], 剩余的气体主要为氮气、氧气、水蒸气等, 在低

温条件下这些气体可以被分子筛和活性炭等物理吸附剂冷凝吸收^[3-4]。对于氢气, 低温设备行业通常采用抑制材料释放氢气和提高吸氢剂的性能等方式来保持低温容器夹层内较高的真空度, 从而延长低温容器的使用寿命^[5-6]。因此吸氢剂的用量、选择和吸附性能对低温设备的寿命起着决定性作用。

常见的吸气剂有非蒸散型吸气剂、分子筛、活性炭和过渡金属氧化物等, 非蒸散型吸气剂需在 573.15 K 以上的高温环境下保持 30 min 后方可激活使用^[7], 然而其在低温设备中激活较为困难, 因此低温从业者通常采用 PdO、Ag₂O 等^[8-10]过渡金属氧化物来除去低温容器真空夹层中的氢气。文献 [11-12] 提出将较为廉价的 CuO 作为吸氢剂, 由于 CuO 需要一定的温度 (433.15 K) 才能与氢气发生氧化还原反应从而将其除去, 这对在低温环境下工作的设备较为不利。金属氧化物吸气剂的吸氢特点是与氢气发生反应, 从而达到除氢的目的^[13]。吸氢剂普遍存在价格较为昂贵、应用条件对低温设



请扫描二维码访问本文网络展示页面以获取补充信息 (Supplementary Information)

国家重点研发计划项目 (2017YFC0805601)

This work was financially supported by the National Key R&D Project (2017YFC0805601).

备比较苛刻等缺点。因此,获得价格低廉、使用方便和性能优良的吸氢剂成为低温容器行业的研究热点。本工作选取了两种不同成本且容易获取的吸氢剂进行对比研究,主要对吸氢量、吸氢速率和经济性进行讨论,以期获得吸氢性能较好、价格低廉的吸氢剂,为工程实际应用提供技术支撑。

1 实验

Ag-Z 型银吸氢剂是一种较为廉价的吸氢材料,目前逐渐取代了市场上较为昂贵的 PdO,深受行业内制造商的青睐。

表1 吸氢材料实验方案

Table 1 Scheme of hydrogen absorbing materials

吸氢剂类型	吸氢剂用量/g	分子筛量/g	实验加氢量/Pa	加氢次数
Ag-Z 型银吸氢剂	9.93	1 600	0.12、1.5、5、18	4
ECG	1.90	1 600	0.89、2、4.3、5、9.4	5

注:5A 分子筛不吸附 H₂,工程上通常放入它们来吸附其他气体

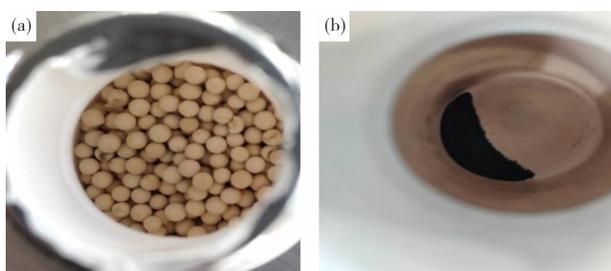


图1 样品实物图片:(a)Ag-Z 型银吸氢剂;(b)高效催化除氢剂(ECG)
Fig.1 Picture of samples:(a) Ag-Z getter;(b) efficient catalytic hydrogen getter (ECG)

2 结果与讨论

2.1 两种吸氢材料吸气时真空度的变化规律

判定吸氢剂吸附性能的好坏,通常要通过实验测得它的等温曲线。由气体的质量守恒方程和理想气体状态方程得到式(1),通过逐步法^[15]算出其累计吸附量,然后算出此吸氢材料的吸附速率,获得其吸附等温线。

$$Q_n = Q_{n-1} + \frac{T_0}{P_0 TG} [(P_{b1} - P_{b2} + P_{b3})V_1 - (P - P_{e2} + P_{e1})V_2] \quad (1)$$

式中:Q_n 为第 n 次加氢达到平衡时的累计吸附量(n ≥ 1),mL/g; Q_{n-1} 为第 n-1 次加氢时达到平衡时的累计吸附量,mL/g; T₀ 为 273 K; P₀ 为大气压强,Pa; T 为实验系统温度,K; G 为吸氢材料质量,g; P_{b1} 为加气系统的初始压强,Pa; P_{b2} 为加气系统加气后的压强,Pa; P_{b3} 为加气系统在加气过程中由于漏放气所产生的压强,Pa; V₁ 为加气容器、波纹管 and 变通的体积之和,L; V₂ 为真空夹层的体积(排除绝热材料和分子筛体积后),L; P 为实验系统的平衡压强,Pa; P_{e2} 为实验系统上一组加氢实验的平衡压强,Pa; P_{e1} 为实验系统实验过程中由于漏放气所产生的压强,Pa。

为了排除实验过程中实验系统以及加气系统的漏放气量对本实验的影响,在本次实验开始前,首先测得两个系统的漏放气速率,如图 2 所示。根据式(2)^[15],最终测得实验系统的漏放气速率为 1.461 × 10⁻⁷ Pa · m³/s(夹层内包含 1.6 kg 分子筛)。加气系统的漏放气速率为 6.018 × 10⁻⁷ Pa · m³/s。两个系统均满足实验要求。

Ag-Z 型银吸氢剂由分子筛掺杂银离子^[14]制作而成,本次实验使用的 Ag-Z 型银吸氢剂产自国内某化工公司,实验用量为 9.93 g。

ECG 为黑褐色粉末状固体,是一种高效的吸氢剂,由一氧化钼和其他金属氧化物等组成,与氢气发生化学反应后产生水及金属纯净物。在此过程中产生的水蒸气被真空夹层内的 5A 分子筛吸附。本次实验 ECG 用量为 1.90 g,产自国内某化工公司。两种材料实物如图 1a、b 所示。两种吸氢材料实验方案如表 1 所示。

$$q = \frac{\Delta P_1(t)}{\Delta t} VK \quad (2)$$

式中:q 为真空夹层的漏放气速率,Pa · m³/s; Δt 为测试期间后 1/3 时间段的时长,s; ΔP₁(t) 为测试期间后 1/3 时间段的压强变化,Pa; V 为真空夹层的体积,m³; K 为真空夹层容积的修正系数,真空绝热取 1,真空多层绝热取 0.9。

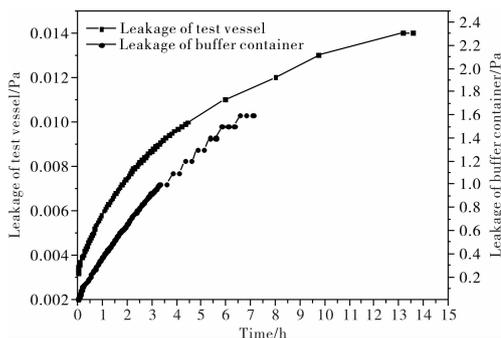


图2 实验系统及加气系统漏放气速率
Fig.2 The leakage and outgassing rate of experimental system and gas filling system

根据实验测得的平衡压力和累计吸氢量得出 Ag-Z 型银吸氢剂和 ECG 的吸附等温线,如图 3 所示。根据 BDDT 吸附等温线的分类,本次实验测得的两种吸氢材料吸附等温线均为第一类吸附等温曲线(Langmuir 等温线),其特点为前期吸附速率较快,随着氢气浓度增加,吸附量增多,吸附速率逐渐减缓。此时吸氢材料随着吸附氢气量的增加逐渐接近其饱和吸氢量。

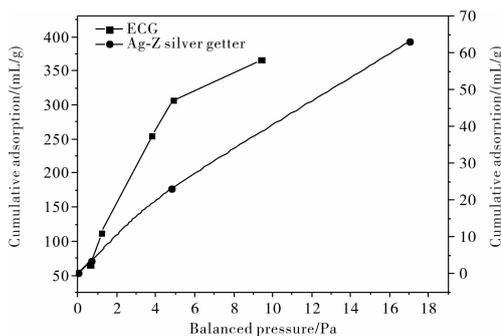


图3 平衡压力和吸附量之间的关系
Fig.3 Relationship between equilibrium pressure and adsorption capacity

Ag-Z 型银吸气剂吸附性能实验中 4 次加氢气后真空夹层的初始压强分别为 0.12 Pa、1.5 Pa、5 Pa、18 Pa, 达到平衡的时间分别为 50.30 h、132.17 h、108.95 h、187.20 h。ECG 进行了 5 次加氢实验 5 次加氢后真空夹层氢气的初始压强分别为 0.89 Pa、2.0 Pa、4.3 Pa、5.0 Pa、9.4 Pa, 达到平衡的时间分别为 27.82 h、18.13 h、31.42 h、84.00 h、108.83 h。根据式(1)可得, Ag-Z 型银吸气剂的累计吸附量为 63.084 mL/g, 平均吸附速率为 0.132 mL/(g·h)。ECG 的累计吸附量为 366.276 mL/g, 平均吸附速率为 1.353 mL/(g·h), 分别是 Ag-Z 型银吸气剂的 5.81 倍和 10.25 倍。吸氢材料每组加氢

后达到吸附平衡压力和阶段平均吸附速率的具体情况如表 2 所示。

经计算得到 Langmuir 吸附等温曲线的直线型关系式如式(3)所示, 得出 P_e 和 P_e/Q_n 关系式, 并对本实验得到的两种等温曲线与 Langmuir 等温式进行拟合, 自变量为 P_e , 因变量为 P_e/Q_n , 拟合结果如图 4a、b 所示。

$$\frac{P_e}{Q} = \frac{1}{SQ} + \frac{P_e}{Q_n} \quad (3)$$

式中: Q_n 为吸氢材料的饱和吸附量, mL/g; Q 为每次实验平衡时吸氢材料的吸附量, mL/g; S 为吸附系数; P_e 为平衡压强, Pa。

表 2 吸氢材料的吸附性能

Table 2 Adsorption performance of hydrogen material

吸氢剂的类型	吸附平衡压力/Pa	吸附平衡时间/h	累计平衡吸附量/(mL/g)	阶段平均吸附速率/(mL/(g·h))
Ag-Z 型银吸气剂	<0.05	50.3	0.143	0.003
Ag-Z 型银吸气剂	<1	132.2	3.409	0.018
Ag-Z 型银吸气剂	4.8	109.0	23.097	0.068
Ag-Z 型银吸气剂	17	187	63.084	0.058
ECG	<1	27.82	65.320	2.347
ECG	1.2	18.73	111.490	2.465
ECG	3.8	31.42	254.980	4.567
ECG	4.9	84.00	306.857	0.618
ECG	9.4	108.83	366.276	0.546

注: 吸氢剂解封后应立即放入实验容器的夹层中, 然后开始抽真空, 尽量避免吸氢材料与空气接触

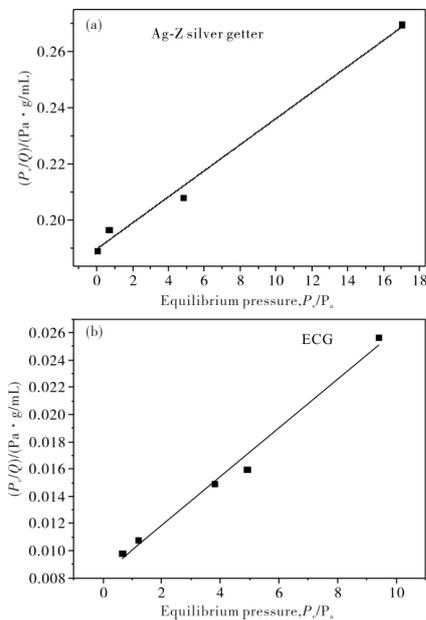


图 4 与 Langmuir 等温式拟合结果: (a) Ag-Z 银吸气剂; (b) ECG

Fig. 4 Fitting results with Langmuir isotherm: (a) Ag-Z getter fitting; (b) ECG fitting

由表 2 可知, 两次吸氢材料实验的最大平均吸附速率均发生在实验 3nd (3nd 表示第 3 次加氢实验) 时, 实验 1st、2nd (1st、2nd 分别为第 1、2 次加氢实验) 加 H₂ 量较少, H₂ 浓度较低, 从而导致吸氢材料的平均吸附速率很慢, 但随着氢气浓度增大, 吸氢材料的吸附速率开始变快。实验 4th (4th 表示第 4 次加氢实验, 以此类推) 开始加氢时, 两种吸氢材料的吸附速率开始放缓, 因为化学吸附为单分子层吸附^[16], 吸附只能进行一次, 此时吸氢材料逐渐接近其饱和吸附量。图 4a、b 为与 Langmuir 等温式线性拟合结果, 拟合后得到 ECG 和 Ag-Z 型银吸气剂的回归系数分别为: $R^2 > 0.995$, $R^2 > 0.991$ 。回归系数 R^2 越接近

于 1, 说明自变量和因变量之间的相关性越强, 拟合效果越好, 再次证明了本次实验结果与 Langmuir 吸附较为吻合。两种吸氢材料的吸氢等温式如式(4)和式(5)所示。根据公式求得它们的吸附系数以及饱和吸附量, 如表 3 所示。

$$Q_{Ag-Z} = \frac{5.316P_e}{1+0.03732P_e} \quad (4)$$

$$Q_{ECG} = \frac{120.54P_e}{1+0.27P_e} \quad (5)$$

表 3 两种吸气剂的吸附特性

Table 3 Measured adsorption characteristics of the two getters

	吸附系数 S	饱和吸附量 Q_n /(mL/g)	总吸附比/%
Ag-Z 型银吸气剂	0.073 2	72.623	86.87
ECG	0.270 2	446.430	82.05

2.2 两种吸氢剂的吸氢性能对比

从图 5a 可以看出, 两种吸氢材料的最大吸氢速率均发生在实验 1st 初始阶段。在吸氢材料未与氢气接触时, ECG 粉末表面存在大量的有效活性位点, 加入氢气后, 氢气与吸氢材料碰撞时有较大的驱动力, 因此快速发生了化学反应^[17-18]。同理, 如图 5b 所示, Ag-Z 型银吸气剂在加入氢气后, 先将氢气分子通过范德华力吸入自身的微孔中, 然后与微孔中的不同含银氧化物发生化学反应, 反应产生的水直接被自身微孔道吸收^[16, 19-20]。Ag-Z 型银吸气剂实验 1st、2nd、3rd 和 4th 的吸附量分别为 0.143 mL/g、3.257 mL/g、19.697 mL/g 和 39.987 mL/g; ECG 实验 1st、2nd、3rd、4th 和 5th 的吸附量分别为 65.320 mL/g、46.17 mL/g、143.49 mL/g、51.877 mL/g 和 59.419 mL/g。从图 6 可知, Ag-Z 型银吸气剂吸附实验 3rd 和 4th 被认定为快速吸气组, 两次加氢实验达到平衡的时间分别为 84 h 和 108.83 h, 平均吸氢速率分别为 0.068 mL/(g·h) 和 0.058 mL/(g·h)。ECG 吸附实验 1st、2nd 和 3rd 被认定为快速吸气组, 三次加氢实

验达到平衡的时间分别为 27.82 h、18.73 h 和 31.42 h, 平均吸氢速率分别为 2.347 mL/(g·h)、2.465 mL/(g·h) 和 4.567 mL/(g·h)。ECG 快速组前两次加氢实验的平均吸氢速率分别是 Ag-Z 型银吸气剂快速组的 34.51 倍和 42.5 倍。Ag-Z 型银吸气剂实验 1st 和 2nd 被认定为慢速吸气组, 两次加氢实验达到平衡的时间分别为 50.3 h 和 132 h, 平均吸氢速率分别为 0.003 mL/(g·h) 和 0.018 mL/(g·h)。ECG 实验 4th 和 5th 为本组实验的慢速吸气组, 两次加氢实验达到平衡的时间分别为 44.1 h 和 52.2 h, 平均吸氢速率分别为 0.618 mL/(g·h) 和 0.546 mL/(g·h), ECG 慢速吸气组加氢实验的平均吸氢速率分别是 Ag-Z 型银吸气剂的 206 倍和 30.33 倍。

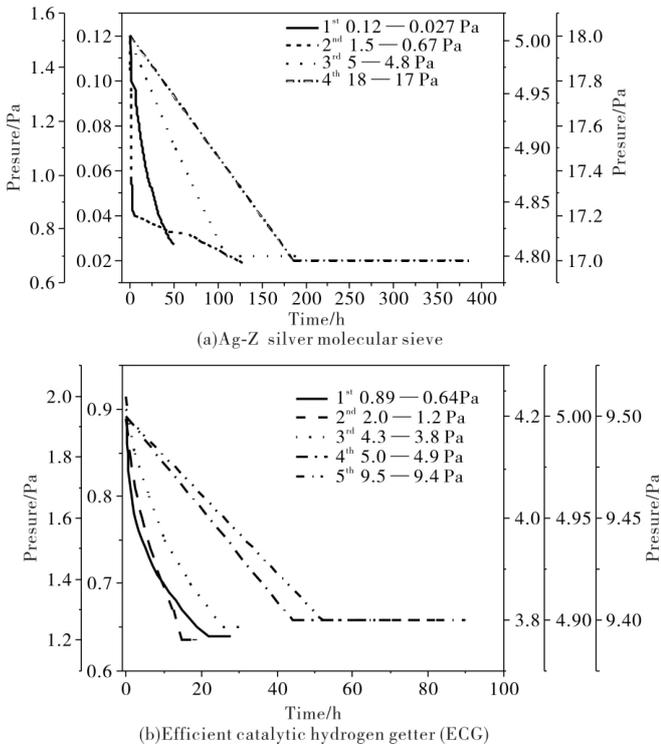


图5 真空夹层内 H₂ 压强随时间变化曲线图
Fig.5 The curve of H₂ pressure in the vacuum interlayer with time

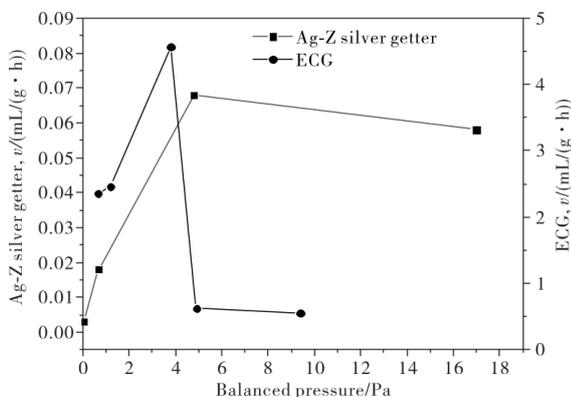


图6 每组加氢实验平均吸附速率变化
Fig.6 Change of average adsorption rate of each group of hydrogenation

3 结论

(1) 两种吸氢材料的吸附性能实验的吸附等温线均与 BDDT 理论中的第一种类型等温曲线(Langmuir 等温线) 较为

吻合。特点是前期吸附速率很快, 吸附容量不断增大, 最后趋于吸附平衡, 累计吸附量不再增加, 为一种典型的化学吸附; (2) 低温设备选用吸气剂时, 可以根据两种除氢材料的实际情况调整相应的用量, 建议用量为 Ag-Z 型银吸气剂与 ECG 质量比为 6:1; (3) 两次实验中的最大吸氢速率均出现在实验 1st 的初期, 最大平均吸氢速率均发生在实验 3rd。但随着氢气浓度增加, 平均吸附速率开始下降, 吸氢材料渐渐地接近其饱和和吸附量。

参考文献

- Rosa E C, Kenneth D S, Donald F. *Getters Cowgill Journal of Vacuum Science & Technology* 2014 32(6) 60.
- Choi J, Pan L, Zhang F, et al. *Surface Science* 2015 640 150.
- Fu X L. *Cryogenics* 1994(1) 11 (in Chinese).
符锡理. *低温工程*, 1994(1) 11.
- Xie S W, Deng D, Wang R S. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology* 2013 33(6) 547 (in Chinese).
谢斯卫, 邓冬, 汪荣顺. *真空科学与技术学报* 2013 33(6) 547.
- Chen S J, Wang R S, Wei W, et al. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology* 2009(4) 100 (in Chinese).
陈树军, 汪荣顺, 魏蔚, 等. *真空科学与技术学报*, 2009(4) 100.
- Yu Y, Chen S P, Zhu M, et al. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology* 2020 40(4) 313 (in Chinese).
于洋, 陈叔平, 朱鸣, 等. *真空科学与技术学报*, 2020 40(4) 313.
- Zhou C, Li D T, Zhou H, et al. *Materials Reports A: Review Papers*, 2019 33(2) 438 (in Chinese).
周超, 李得天, 周晖, 等. *材料导报: 综述篇*, 2019 33(2) 438.
- Belousov V M, Vasylyev M A, Lyashenko L V, et al. *Chemical Engineering Journal* 2003 91 143.
- Zeng Y W. Study on the hydrogen absorption characteristics of the oxidation treatment in high vacuum multilayer adiabatic structures. Master's Thesis, Shanghai Jiao Tong University, China 2009 (in Chinese).
曾宇梧. 一氧化钡在高真空多层绝热结构中的吸氢特性研究. 硕士学位论文, 上海交通大学 2009.
- Wang J, Zhan Y, Wei W, et al. *Vacuum* 2016 131 44.
- Wang J, Zhan Y, Wang W, et al. *Vacuum* 2018 49 87.
- Xie S W. Study on the characteristics of getter in high-vacuum multilayer insulated cryogenic container. Master's Thesis, Shanghai Jiao Tong University, China 2009 (in Chinese).
谢斯卫. 高真空多层绝热低温容器内吸气剂的吸气特性研究. 硕士学位论文, 上海交通大学 2013.
- Wang X J, Xie Y B, Ning P, et al. *Materials Reports A: Review Papers*, 2018 32(12) 4089 (in Chinese).
王学谦, 谢怡冰, 宁平, 等. *材料导报: 综述篇*, 2018 32(12) 4089.
- Yan Y Y, Wang Q, Huang Z, et al. *Journal of Atomic and Molecular Physics* 2014 31(5) 701 (in Chinese).
闫跃阳, 王茜, 黄整, 等. *原子与分子物理学报*, 2014 31(5) 701.
- Wang F, Zhou W M, Luo X M, et al. *Performance test method of vacuum insulation cryogenic equipment*, China Standards Press, China, 2011 (in Chinese).
王芳, 周伟明, 罗晓明, 等. *真空绝热深冷设备性能实验方法*, 中国标准出版社 2011.
- Zhao J G. *Application of adsorption*, Chemical Industry Press, China, 2005 (in Chinese).
赵继国. *吸附作用应用原理*, 化学工业出版社 2005.
- Lowell S, Shields J E, Morral J E. *Journal of Engineering Materials and Technology* 1985 107(2) 180.
- Liu Q S, Zheng T, Wang P, et al. *Chemical Engineering Journal* 2010, 157(23) 352.
- Wang X, An L P, Zhang X T, et al. *Materials Reports A: Review Papers*, 2018 32(1) 93 (in Chinese).
王霞, 安丽平, 张晓涛, 等. *材料导报: 综述篇*, 2018 32(1) 93.
- Da D A, Xiao X Z, Liu Y K, et al. *Vacuum design manual*, National Defense Science and Technology Press, China 2006 (in Chinese).
达道安, 肖祥正, 刘玉魁, 等. *真空设计手册*, 国防科技出版社 2006.

(责任编辑 向秀涛)



Yang Yu, master student, Lanzhou University of Technology, research on multi-layer hydrogen getters in high vacuum multi-layer insulation equipment maintained high vacuum performance. He has published three papers and applied for four patents; and obtained the second prize of the 7th National Process Equipment and Practice Competition; the second prize of the “Zoran Cup” of the Chinese University Student Mechanical Engineering Innovation and Creativity Competition; the 5th China “Internet Plus” Silver Medal in the Gansu Province and the third prize of the China Undergraduate Mechanical Engineering Innovation and Creativity Competition; first-class master scholarship (10% of the school).

于洋,兰州理工大学硕士研究生,研究方向为多类型吸氢剂在高真空多层绝热设备中维持高真空性能研究,发表论文5篇;申请专利4项;全国第七届过程装备与实践大赛二等奖;中国大学生机械工程创新创业大赛“卓然杯”二等奖;第五届中国“互联网+”大学生创新创业大赛甘肃赛区银奖;中国大学生机械工程创新创业大赛三等奖;研究生一等奖学金(全校10%比例)。



Ming Zhu, senior engineer, working at China Special Equipment Inspection and Research Institute. He has obtained a doctorate degree in refrigeration and cryogenic engineering from Shanghai Jiao Tong University from September 2007 to March 2012. Then he entered China Special Equipment Inspection and Research Institute for post-doctoral workstation. As the first author, he has published more than 10 papers in academic journals at home and abroad. The research work mainly focuses on

the national key development of hydrogen energy and LH₂ storage and transportation, and basic theory and application research on the performance improvement for structural safety and reliability of cryogenic containers. As the main person, he presided over the science and technology plan projects of the State Administration for Market Regulation, and undertakes research tasks for the National 13th Five-year Key Subject.

朱鸣,高级工程师,就职于中国特种设备检测研究院。2007年9月至2012年3月在上海交通大学获得制冷及低温工程专业工学博士学位,毕业后进入中国特种设备检测研究院博士后工作站进行博士后工作站研究。以第一作者在国内外学术期刊上发表论文10余篇。研究工作主要围绕国家重点发展的氢能源低温液氢储运容器,开展关于低温容器性能提升及结构安全可靠性的基础理论和应用研究,主持市场监管总局科技计划项目,承担国家十三五重点研发专项课题任务等。



Shuping Chen, professor and doctoral tutor of Lanzhou University of Technology. He has long been engaged in low-temperature storage and transportation equipment, LNG technology, and vacuum leak detection technology, etc. Undertook more than 60 projects under the National 863 Program, Science and Technology Major Projects in Gansu Province and National Natural Science Foundation Projects and Enterprise Projects; obtained 5 provincial and bureau-level science and technology awards, and served as a member of the Lanzhou University of Technology Professor Advisory Committee and Lanzhou 510 Research Institute Member of the Academic Committee of the National Key Laboratory of Vacuum Cryogenic Technology and Physics and member of the Cryogenic Vessel Working Group of the National Boiler and Pressure Vessel Standardization Technical Committee. He has published more than 80 papers in authoritative journals at home and abroad such as *Cryogenics*, *Journal of Aerospace Engineering*, and *Chinese Journal of Chemical Industry*, etc. He has obtained the second prize of Gansu Provincial Science and Technology Progress Award, the second prize of Excellent New Products and New Technology Achievements, and the third prize of National Machinery Industry Science and Technology Award, etc.

陈叔平,兰州理工大学教授,博士研究生导师。长期从事低温贮存技术与设备、低温传热技术、LNG技术、真空检漏技术等方面的科研工作。承担国家863计划项目、甘肃省科技重大专项、国家自然科学基金项目及企业合作项目60多项;获省部级、厅局级科技奖励5项,兼任兰州理工大学教授咨询委员会委员,兰州510所真空低温技术与物理国家级重点实验室学术委员会委员,全国锅炉压力容器标准化技术委员会低温容器工作组委员。在*Cryogenics*、*Journal of Aerospace Engineering*、《化工学报》等国内外权威期刊发表论文80多篇。科研成果获甘肃省科技进步二等奖、优秀新产品新技术成果二等奖、国家机械工业科技三等奖。