

# DN1250 液氮屏蔽型制冷机低温泵的研制与性能测试

赵月帅, 孙立臣, 邵容平, 闫荣鑫, 孙 伟, 李 征

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 北京卫星环境工程研究所研制了四台 DN1250 口径的液氮屏蔽型制冷机低温泵。该低温泵已经作为大型空间环境模拟系统的高真空主泵投入使用, 满足了热真空试验对高真空的需求, 取得了良好的效果。本文主要针对该低温泵的三种主要性能指标(抽速、降温时间和渡越容量)的设计方法、性能测试方法以及结果进行介绍, 测试结果表明该系列低温泵对氮气的抽速达到了 57000L/s, 降温时间约 330min, 渡越容量达到  $3.0 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{L}$ 。

**关 键 词:** 低温泵; 抽速; 降温时间; 渡越容量; 测试方法

中图分类号: TB752+.53

文献标识码: A

文章编号: 1002-0322(2019)01-0001-05

doi: 10.13385/j.cnki.vacuum.2019.01.01

## Design and performance test of DN1250 LN<sub>2</sub> refrigerator cooled cryopumps

ZHAO Yue-shuai, SUN Li-chen, SHAO Rong-ping, YAN Rong-xin, SUN Wei, LI Zheng

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Four refrigerator cooled cryopumps (DN1250 LN<sub>2</sub>) were designed and manufactured by BISEE. The pumps were used in space environment simulation system to meet the demand of the high vacuum in thermal vacuum test. The design and test method for pumping speed, cool down time and crossover were introduced in this paper. A test system was built to test the main performance of the cryopumps. The experimental results show that the pumping speed for N<sub>2</sub> of the pump is up to 57000 L/s, the cool down time is about 330min, and the crossover is over than  $3.0 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{L}$ .

**Key words:** cryopump; pumping speed; cool down time; crossover; test method

在大型空间环境模拟器中,其真空腔室体积大、结构复杂,待测航天器对真空度要求高、放气量大且对油污染敏感。为了满足各类航天器试验的需求,环模设备的高真空设备必须具有较大抽速和清洁无油的特点。此外,在真空镀膜设备、电子束设备、高能物理研究装置、加速器束流管、表面分析装置等真空设备也有类似的需求。国内外通常采用大口径制冷机低温泵作为高真空主泵来解决此类问题。我国的大中型环模设备自 90 年代以来都采用了低温泵。北京卫星环境工程研究所在上世纪 90 年代初为突破当时国外对我国大口径低温泵的进口限制开始对大口径低温泵进行国产化研制,主要应用于空间环境模拟设备的高真空配置。经过 20 余年的发展,目前已经形成 DN800LN<sub>2</sub>, DN900LN<sub>2</sub>, DN1250LN<sub>2</sub> 以及 DN1320LN<sub>2</sub>

等多种口径的液氮屏蔽型低温泵产品,并在多个大型空间环境模拟设备上得到了应用。本次新研制的 4 台 DN1250LN<sub>2</sub> 低温泵有了新的特点:

1) 与国外莱宝同口径的低温泵相比,低温泵采用成本较低的冷头(Brooks 公司的 Model-1020),实现了相同的抽速和其他主要技术指标;

2) 优化了单百叶窗障板的结构,取得了一次光学密闭和大流导的平衡,同时障板采用了可拆卸的低温真空密封技术,实现了障板的完全可拆,方便了安装和使用;

3) 自动化程度大幅提高,实现了冷头加热、热氮气吹扫及热沉回温组合的一键快速再生方法,实现了大口径低温泵的快速再生。

本文主要针对该低温泵的三种主要技术指标(抽速、降温时间和渡越容量),对采用较低功

收稿日期: 2018-02-26

作者简介: 赵月帅(1987-),男,山东省滕州市人,硕士,工程师。

通讯作者: 孙立臣,研究员。

基金项目: 国家自然科学基金(U1537109)。

率的冷头进行大抽速低温泵的设计方法、性能测试方法及测试结果进行介绍。

## 1 低温泵原理与结构

低温泵的抽气原理主要是利用低温表面抽除真空容器中的气体来获得和保持真空。低温泵抽除气体的方式主要有两种形式:低温冷凝和低温吸附,如图 1 所示。

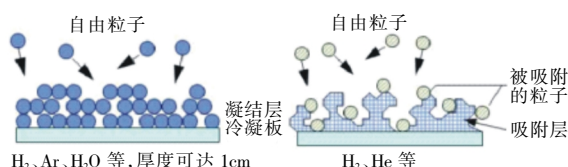


图 1 低温冷凝和低温吸附

Fig.1 Cryocondensation and cryosorption

低温泵主要由泵壳、障板和冷屏、冷头、二级冷板等组成。为了监测到低温泵的使用情况,在障板、冷屏以及二级冷板上安装了硅二极管,可以监测到低温泵内的温度。低温泵是依靠小型制冷机提供冷量,将二级冷板冷却到 12K 以下,使低温表面具备抽气能力;利用液氮提供 80K 左右的冷屏蔽,为二级冷板提供冷背景,并冷凝大量水汽等,保证冷板具备持续抽气能力,提高极限真空;不锈钢泵壳提供密封环境,支撑内部和外部设备及部件,形成泵体;泵口的障板主要是为进入泵内的气体遇冷,并冷凝部分气体,保护冷板不受热冲击。这三部分从外到内温度从高到低,要求互不接触,互相热隔绝,逐层提供冷屏蔽。

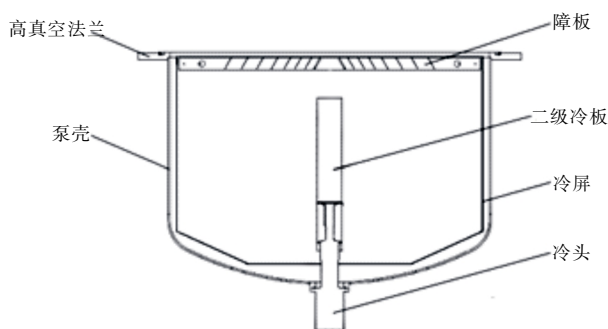


图 2 低温泵内部结构图

Fig.2 Schematic diagram of inside of the cryopump

## 2 主要性能指标的设计方法

### 2.1 对氮气的抽速

对于低温泵而言,低温泵二级冷板对  $N_2$  的冷凝抽速<sup>[1,2]</sup>可以表示为:

$$S = S_{th} \cdot \alpha \cdot A_1 \quad (1)$$

其中, $S$  为低温泵抽速,  $L/s$ ;  $\alpha$  为气体的冷凝

系数;  $A_1$  为二级冷板的外表面积,  $cm^2$ ;  $S_{th}$  为二级冷板外表面单位面积上的最大抽速,  $L/(s \cdot cm^2)$ 。

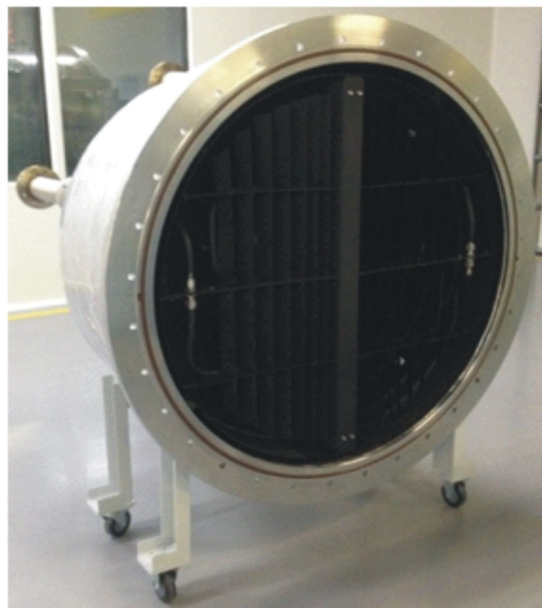


图 3 DN1250LN<sub>2</sub> 低温泵照片

Fig.3 The photograph of the DN1250LN<sub>2</sub> cryopump

$$S_{th} = 3.638 \sqrt{\frac{T_{N_2}}{M}} \quad (2)$$

其中,  $T_{N_2}$  为  $N_2$  温度, K;  $M$  为  $N_2$  的分子量, kg/mol。

### 2.2 降温时间

低温泵二级冷板的降温时间  $t$ , 可以表示为:

$$t = m \int_{T_f}^{T_i} \frac{c(T)}{Q_{eff}(T)} dT \quad (3)$$

其中,  $t$  为低温泵二级冷板的降温时间, s;  $m$  为二级冷板的质量, kg;  $T$  为二级冷板的温度, K;  $T_i$  为二级冷板的初始温度, 通常取为室温, K;  $T_f$  为二级冷板的终了温度, K;  $c(T)$  为温度为  $T$  时铜的比热, J/(kg · K);  $Q_{eff}(T)$  为温度为  $T$  时二级冷板的有效制冷量, W。

在 DN1250LN<sub>2</sub> 低温泵的设计中, 考虑到低温泵降温时的真空度低于  $10^{-1} Pa$ , 在设计低温泵的二级冷板时, 可以忽略低温泵内残余气体的导热、对流以及少量气体的冷凝潜热。

因此, 二级冷板的有效制冷量可以表示为:

$$Q_{eff}(T) = Q_1(T) + Q_2(T) + Q_3(T) \quad (4)$$

其中,  $Q_1(T)$  为二级冷头在温度  $T$  时的制冷功率, W;  $Q_2(T)$  为防辐射屏和障板对温度为  $T$  的二级冷板的辐射热, W;  $Q_3(T)$  为室温环境通过障板对温度为  $T$  的二级冷板的漏热, W。

二级冷头的制冷功率  $-Q_1(T)$  可以通过冷头生产厂商提供的制冷功率曲线查图获得, 负值表示热量由二级冷板向二级冷头传递, 如图 4

所示。

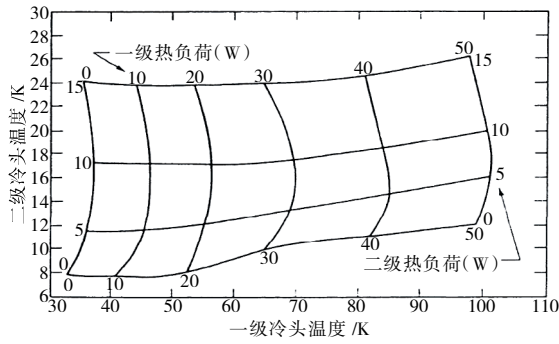


图4 冷头的制冷功率曲线  
Fig.4 The cold power of the cold head

防辐射屏和障板对二级冷板的辐射热  $Q_2(T)$  可以表示为<sup>[3]</sup>:

$$Q_2(T) = \frac{5.67A_1 \left[ \left( \frac{T_{rb}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (5)$$

其中,  $A_2$  为防辐射屏和障板的内表面积,  $m^2$ ;  $\varepsilon_1$  为二级冷板外表面的发射率;  $\varepsilon_2$  为防辐射屏和障板内表面的发射率;  $T_{rb}$  为防辐射屏和障板的温度,  $K$ 。

室温环境对通过障板对二级冷板的漏热  $Q_3(T)$  可以表示为:

$$Q_3(T) = \sigma \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot l \left[ \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

其中,  $\sigma$  为斯提芬-玻尔兹曼常数;  $l$  为漏热系数;  $T_r$  为室温,  $K$ 。

当低温泵的二级冷板温度达到最低时,

$$Q_{eff} = 0 \quad (7)$$

将公式(4)、公式(5)和公式(6)代入公式(7),即可得:

$$Q_1(T_f) = - \frac{5.67A_1 \left[ \left( \frac{T_{rb}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} - \sigma \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot l \cdot \left[ \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

公式(8)可以通过作图法求解出二级冷板的最低温度  $T_f$ , 如图5所示。

二级冷板材料的主要成分为铜(99.95%), 铜的比热和温度有关(如图6所示)。

### 2.3 渡越容量

在低温泵中, 渡越容量被定义为当低温泵的二级冷板达到最低温度并稳定后, 在低温泵的二级冷板的温度不大于 20K 的条件下, 可以瞬时通入的最大气体量(气体通常为氮气)<sup>[5,6]</sup>。

对于 DN1250LN<sub>2</sub> 低温泵而言, 低温泵的渡越

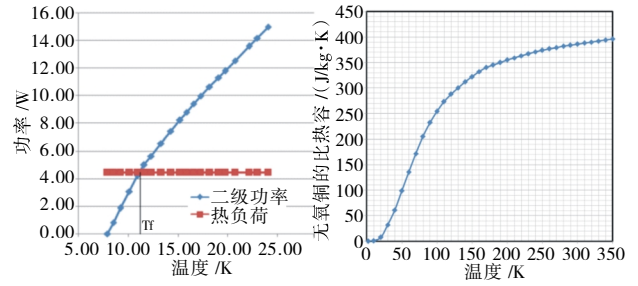


图5 二级冷板的终了温度的计算

Fig.5 Final temperature of the cryopanel

图6 铜的比热

Fig.6 The specific heat  $c$  of copper

容量通常通过热平衡法来计算, 为了简化计算, 在设计时作出如下假设:

- 1) 忽略障板和防辐射屏对瞬时通入的气体的冷却作用;
- 2) 忽略二级冷板中活性炭的吸热作用;
- 3) 忽略低温泵二级冷头在瞬时的制冷功率;
- 4) 忽略冷头和二级冷板的温度不均匀性。

在计算中认为瞬时通入气体的冷凝热(包含显热和潜热)完全由二级冷板的铜板所吸收。这样瞬时通入气体时, 二级冷板的热平衡方程可以用公式(9)表示:

$$Q_{c, N_2} = Q_{0, c} \quad (9)$$

其中,  $Q_{c, N_2}$  为通入气体的冷凝热,  $J$ ;  $Q_{0, c}$  为冷头和二级冷板从最低温度达到 20K 时冷板所能吸收的热量,  $J$ 。

液氮的饱和蒸汽压曲线如图7所示<sup>[4]</sup>。

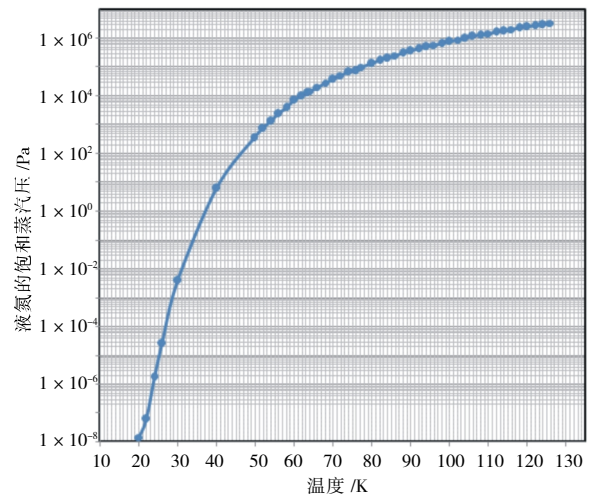


图7 液氮的饱和蒸汽压曲线

Fig.7 Saturation vapor pressure of LN<sub>2</sub>

在 20K 时, 液氮的饱和蒸汽压近似约为  $1.44 \times 10^{-8} Pa$ , 公式9的左边可以分为2部分:

- 1)  $N_2$  从室温降温到二级冷板温度时所放出的热量  $Q_n$ ;
- 2)  $N_2$  凝华时放出的潜热  $Q_s$ 。

$$Q_{c, N_2} = Q_n + Q_s \quad (10)$$

其中,

$$Q_n = \int_{T_f}^{T_r} \frac{CMc_{N_2}(T)}{RT_r} dT \quad (11)$$

其中,  $C$  为低温泵渡越容量的设计值,  $\text{Pa} \cdot \text{L}$ ;  $R$  为气体常数,  $8314 \text{Pa} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $c_{N_2}(T)$  为温度为  $T$  时  $N_2$  的比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $Q_s$  为  $N_2$  的凝华潜热,  $\text{J}$ 。

方程 9 的右侧可以表示为:

$$Q_{0,c} = m \int_{T_f}^{T_r} c(T) dT \quad (12)$$

其中,  $T_{cr}$  为测试渡越容量时二级冷板的最高温度, 通常按标准取为  $20\text{K}$ 。

### 3 低温泵测试系统的搭建

低温泵的测试系统原理图如图 8 所示: 系统包括低温泵、干泵、测试容器、真空规、气体流量计和阀门等<sup>[7,8]</sup>。皮拉尼规、BA 规和气体流量计由北京航天计量测试技术研究所计量, 硅二极管、PT100 以及低温仪表由中国科学院理化技术研究所低温计量中心计量。低温泵的二级冷板和障板上安装了 4 个硅二极管测温传感器, 低温泵的防辐射屏上安装了 3 个 PT100 测温传感器, 为了简化图表的显示, 本文中提到的二级冷板的温度或者防辐射屏和障板的温度均为这些传感器测试值的平均值。

测试系统的结构和尺寸严格按照行业标准 JB/T11081-2011 中流量法测试低温泵性能参数的要求进行搭建, 具体对低温泵的抽速、渡越容量及降温时间的测试流程也按照标准的要求进行。

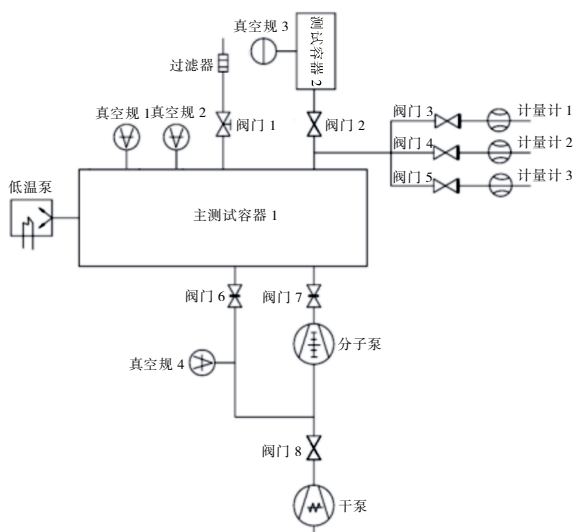


图 8 低温泵测试系统

Fig.8 The test system for cryopumps

### 4 测试结果与讨论

图 9 给出了低温泵的抽速曲线。测试结果显

示低温泵抽速在  $10^{-4}\text{Pa}$  到  $10^{-3}\text{Pa}$  之间基本是恒定的, 在  $10^{-2}\text{Pa}$  期间低温泵的抽速有些上升。低温泵抽速的值约为  $57500\text{L/s}$  到  $58000\text{L/s}$ 。

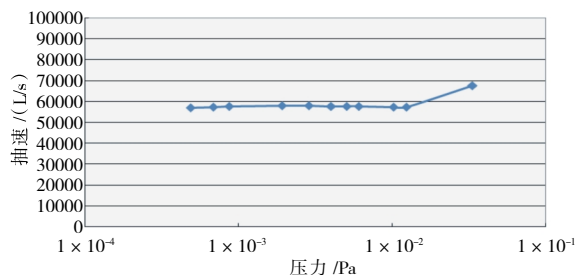


图 9 DN1250LN<sub>2</sub> 低温泵对氮气抽速测试结果

Fig.9 Pumping speed test of the DN1250LN<sub>2</sub> cryopump

图 10 给出了低温泵二级冷板以及障板和防辐射屏的温度曲线, 低温泵二级冷板降温到  $20\text{K}$  的时间约为  $330\text{min}$ 。

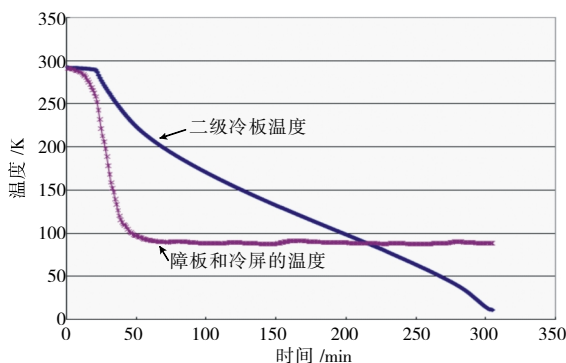


图 10 DN1250LN<sub>2</sub> 低温泵降温时间测试结果

Fig.10 Cool down time test of the DN1250LN<sub>2</sub> cryopump

图 11 给出了测试低温泵渡越容量时二级冷板的温度曲线。渡越容量的值约为  $3.0153 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{L}$ , 测试容器 2 中的气体在  $3\text{s}$  内完全进入主容器。测试曲线表明了低温泵二级冷板的温度从  $12\text{K}$  升到了约  $19.7\text{K}$ , 约 10 分钟之后低温泵二级冷板的温度就可以回到约  $12\text{K}$  达到低温泵正常的工作状态, 测试结果表明低温泵的渡越容量超过了  $3.0 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{L}$  的设计指标。

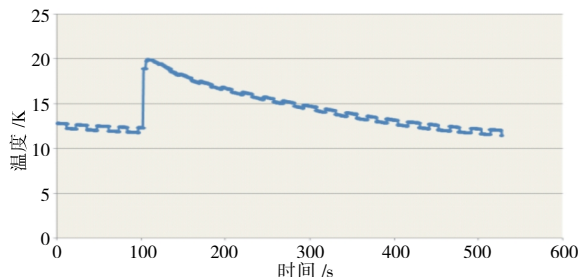


图 11 DN1250LN<sub>2</sub> 低温泵渡越容量测试结果

Fig.11 Crossover test of the DN1250LN<sub>2</sub> cryopump

### 5 小结

本文介绍了大口径低温泵三种主要性能参

数(对氮气的抽速、降温时间和渡越容量)的设计方法,这个方法的有效性在 DN1250LN<sub>2</sub> 低温泵的测试中得到验证。低温泵的抽速为 57000L/s,降温时间为 330min,渡越容量超过  $3.0 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{L}$ 。低温泵的性能目前已经在大型环模设备的试验中得到验证,其性能参数能够满足环模设备对低温泵性能的需求。

## 参考文献

- [1] Gilankar S G. Experimental verification of capture coefficients for a cylindrical cryopanel of closed cycle refrigerator cryopump [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2008.
- [2] 达道安.真空设计手册第 3 版[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [3] Kimo M Welch. Recommended practices for measuring the performance and characteristics of closed-loop gaseous helium cryopumps [J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 1999, 17(5):3081-3095.
- [4] 杨乃恒. 真空获得设备[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
- [5] Baechler, W.G. Cryopumps for research and industry[J]. Vacuum, 1987, 37(1-2): 21-29.
- [6] Häfner, H. U., H. H. Klein, et al. New methods and investigations for regenerating refrigerator cryopumps [J]. Vacuum, 1990,41(7-9):1840-1842.
- [7] Ikegami, K., S. Nakajima, et al. Design and performance characteristics of refrigerator-cooled cryopumps for the RIKEN ring cyclotron[J]. Vacuum,1988,38(2):99-102.
- [8] Juhnke, C., H. H. Klein, et al. The crossover of refrigerator-cooled cryopumps [J]. Vacuum, 1993,44(5-7): 717-719.

## 《真空》杂志顺利通过国家新闻出版广电总局 第一批学术期刊认定

为严格学术期刊出版资质,优化学术期刊出版环境,促进学术期刊健康发展,根据国家新闻出版广电总局《关于规范学术期刊出版秩序 促进学术期刊健康发展的通知》和《关于开展学术期刊认定及清理工作的通知》,2014 年国家新闻出版广电总局组织开展了学术期刊认定工作。经过各省、区、市新闻出版广电局,中央期刊主管单位初审上报,总局组织有关专家严格审定,并经公示,国家新闻出版广电总局于 2014 年 12 月 10 日正式公布了第一批认定学术期刊名单,《真空》杂志顺利通过认定。

此次公示的学术期刊共 5756 种,最终获得认定的共 5737 种(详见国家新闻出版广电总局网站 <http://www.gapp.gov.cn/news/1663/231784.shtml>、<http://www.gapp.gov.cn/news/1663/233978.shtml>)。

(真空杂志社)

## 中国知网与真空杂志社联合声明

真空杂志已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播真空杂志全文。著作权使用费及稿酬一并支付。作者提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

(中国知网、真空杂志社)