

文章编号: 1003-501X(2010)10-0071-06

2 m SiC 反射镜拱形轻量化结构设计

范磊^{1,2}, 杨洪波¹, 张景旭¹, 吴小霞¹, 王富国¹, 司丽娜^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对口径为 2 060 mm 的地基大口径望远镜主反射镜, 选用 SiC 材料和新型拱形轻量化结构进行了详细的轻量化参数设计, 并对支撑环半径进行了优化。对于 Whiffle tree 18 点支撑和 27 点支撑形式, 从静力学(重力作用)和热力学两方面对比分析了两种轻量化结构的镜面变形, 结合 SiC 反射镜的加工工艺, 最终确定 18 点支撑的轻量化结构为首选方案。同时, 就 SiC 反射镜对稳态温度差导致的热变形较敏感的问题, 提出可通过设计与镜体热变形相匹配的支撑结构来满足镜面变形的要求。

关键词: 大口径望远镜; SiC 反射镜; 拱形轻量化; 有限元分析

中图分类号: TH70; TH751

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.10.012

Lightweight Design for 2 m SiC Arch Mirror

FAN Lei^{1,2}, YANG Hong-bo¹, ZHANG Jing-xu¹, WU Xiao-xia¹, WANG Fu-guo¹, SI Li-na^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: For a primary mirror with the diameter 2 060 mm in large aperture based-ground telescope, parameters of new arch light-weighted structure are detailedly designed with the material SiC. Meanwhile, radius of supporting rings is also optimized. According to 18-point and 27-point Whiffle tree support scheme, mirror deformation for two models is analyzed and contrasted individually in statics (gravity effect) and thermodynamics. Considering the processing technic of SiC mirror, the 18-point supporting light-weighted structure is judged to be the preferred scheme at last. However, thermal deformation for SiC mirror is sensitive to the steady temperature difference. Referring to this problem, a measure that the supporting-structure design should be suited to the mirror thermal deformation is provided to achieve the design requirements.

Key words: large aperture telescope; SiC mirror; arch lightweight; finite element analysis

0 引言

光学通光口径的增大能够提高望远镜的集光能力和分辨力, 但同时对主反射镜提出了更高的要求。实心中主反射镜口径的增大会大幅度增加镜体的重量, 为了满足反射镜支撑面形的要求, 主镜室和跟踪架的体积和质量也会随之增大, 从而导致整个望远镜系统的重量和造价成倍增加。因此, 对于 2 m 级大口径望远镜系统, 主反射镜的设计优先考虑轻量化结构。

国内关于 SiC 反射镜的轻量化研究较多, 从镜体的轻量化结构到轻量化孔的形式都取得了一定的研究成果, 但是这些研究都是基于口径在 250 ~1 000 mm 范围的反射镜^[1-3]。对于更大口径的反射镜, 由于支撑点数的增加和加工工艺的限制, 为了达到预期的面形精度要求, 需要对现有的轻量化方案进行一定的修改

收稿日期: 2010-04-30; 收到修改稿日期: 2010-05-26

基金项目: 中国科学院三期创新项目

作者简介: 范磊(1986-), 男(汉族), 内蒙古乌兰察布人。硕士研究生, 主要研究工作是光机电一体化技术。E-mail: fanlei1995@sina.com。

与优化,从而达到设计要求。本文结合实际工程设计了一块直径为 $\varnothing 2\ 060\text{ mm}$ 的 SiC 轻量化主反射镜,以期对后续的工作有一定的指导意义。

1 轻量化结构的选择

实心镜的轻量化结构一般分为传统轻量化结构(单拱形和双拱形)、背部开口式、背部半封闭式和背部封闭式四种。各种轻量化结构示意图如图 1 所示。

Talapatra^[4]和 Vukobratovich^[5]对上述几种镜子的轻量化结构刚度进行了对比研究,发现拱形镜轻量化率较高,通过合理布置镜子材料可达到很高的刚度,同时热变形也较小;结构尺寸相同时,背部封闭式较背部半封闭式结构刚度大,镜面变形量小;当反射镜等效刚度相同时,背部封闭式镜体的厚度比实心镜约薄 20%,而背部开放式的厚度比实心镜厚约 20%。综合考虑上述轻量化结构的优缺点,本文采用单拱形和背部封闭式相结合的轻量化结构。

反射镜轻量化孔的形式有很多,主要分为三角形、扇形、六边形、圆形等。很多学者^[1,3,6]对比分析了各种轻量化孔形式的轻量化率和对应的镜面变形量,一般有如下的规律,如表 1 所示。

由上表不难看出,扇形孔和三角形孔是一般轻量化孔结构的首选形式。至于圆形孔,它是六边形孔的一种简化,轻量化率较低且质量分布具有一定的不均匀性。由于有中心孔的多点支撑反射镜肋板分布不太均匀,因此,本文选用扇形孔为主轻量化孔,局部选用三角形孔来加强镜体刚度。

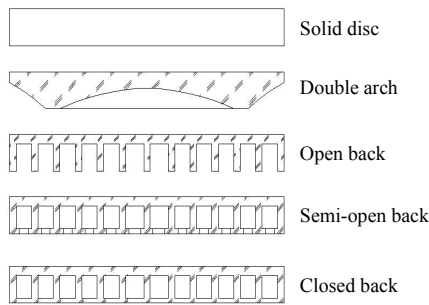


图 1 反射镜轻量化结构示意图

Fig.1 Scheme of light-weighted mirror structure

表 1 轻量化孔结构性能比较

Table 1 Contrast among the light-weighted holes

Performance	Best	Better	Good
Lightweight rate	Sector	Hexagon	Triangle
Stiffness	Triangle	Sector	Hexagon
Antideformation for ATG	Sector	Hexagon	Triangle
Antideformation for RTG	Triangle	Sector	Hexagon

PS: ATG=Axial temperature gradient; RTG=Radial temperature gradient

2 轻量化结构参数的确定

2.1 径厚比的选择

径厚比会影响镜面变形,同时也直接影响镜体的轻量化率。Roberts 给出了平板实心镜径厚比选择的经验公式(1):

$$\delta = \frac{3\rho g a^4}{16 t^4} = \frac{3\rho g \Delta^2 D^2}{256 E} \quad (1)$$

式中: δ 为镜面最大变形量(单位: μm), ρ 为材料密度(单位: kg/m^3), a 为反射镜半径(单位: m), E 为材料弹性模量(单位: MPa), t 为镜厚(单位: m), Δ 为径厚比。

取 δ 为 $0.16\ \mu\text{m}$ ($\lambda/4$, $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$), 根据式(1)计算得径厚比 $\Delta=6.5$, 即镜厚 $t=316.92\ \text{mm}$ 。根据前面叙述的背部封闭式反射镜的厚度比实心镜约薄 20%的经验理论, 取镜厚 $t=253.54\ \text{mm}$, 考虑到 SiC 材料比刚度较大, 可以适当放大径厚比, 故初步取镜厚为 $190\ \text{mm}$, 对应的径厚比 $\Delta=10.84$ 。

2.2 面板厚度的确定

在压力作用下, 光学加工时轻量化孔会发生弹性变形, 导致去除量下降, 最终使光学表面出现“网格效应”, 从而影响系统的成像质量。Vukobratovich 对该效应进行了详细的研究, 并给出了如下经验公式(2):

$$\delta_{\max} = \frac{PB^4}{\psi[Et_t^3/12(1-\nu^2)]} \quad (2)$$

式中: B 为轻量化孔内切圆直径(单位: mm), P 为加工时的工作压力(单位: kPa), E 为材料的弹性模量(单位: MPa), δ_{\max} 为镜面最大变形(单位: nm), ν 为泊松比, t_f 为前面板厚度(单位: mm); ψ 为轻量化孔影响因子, $\psi_{\text{triangle}}=0.001\ 51$, $\psi_{\text{square}}=0.001\ 26$, $\psi_{\text{hex}}=0.001\ 11$ 。

取 $B=85\text{ mm}$, $P=65\text{ kPa}$, $\delta_{\max}=63.28\text{ nm}$ ($\lambda/10$), 计算得 $t_f=11.8\text{ mm}$ 。为了减小热应力的影响, 可以在磨制镜面时施加小于 65 kPa 的压力^[7], 因此取面板厚度为 $t_f=10\text{ mm}$ 。同时考虑整镜的刚度和热传导的均匀性, 取后面板厚度 $t_b=10\text{ mm}$ 。

2.3 筋板厚度的确定

根据结构工艺要求, 综合考虑整镜的刚度, 初步选定筋板的厚度 $t_w=12\text{ mm}$, 然后在下面的有限元模型中对其进行验证, 并根据分析结果逐步进行设计和优化。

2.4 反射镜支撑孔径的确定

在实际反射镜支撑系统中, 一般都将支撑点扩大为支撑圆盘。参考国内外 2 m 级望远镜主反射镜支撑结构, 取支撑孔直径为 80 mm 。

2.5 反射镜拱形面角度的确定

反射镜拱形面角度是指拱形镜边缘斜面与光轴平面所成的角度。如果该角度太大, 会导致镜面边缘区域的支撑刚度下降, 成为类似悬臂梁的结构; 如果角度太小, 既起不到轻量化的效果同时也会增大反射镜外圈的重量, 从而产生较大的变形。因此需对实心拱形镜的拱形角度进行分组对比。

在重力作用下, 施加相同约束: 约束支撑圈, 支撑半径取经验值($R_1=0.422\ 7R_0$, $R_2=0.816\ 5R_0$, R_0 为反射镜半径)。分别计算拱形面角度在 0° 到 50° 范围内, 实心镜镜面的变形, 最终选取拱形面角度为 35° 。表 2 所示为拱形角度与镜面变形的关系。

表 2 拱形角度与镜面变形的关系
Table 2 Arch angle vs. deformation of mirror surface

Arch angle/ $^\circ$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
PV value /nm	32.73	31.58	32.51	32.17	33.20	31.12	33.98	32.39	39.82	53.42	63.4
RMS value /nm	4.96	4.92	5.01	4.83	4.63	4.70	4.79	4.58	5.62	9.85	12.17

3 反射镜底支撑点分布的确定

3.1 反射镜支撑形式的选择

对于 2 m 级望远镜来说, 主反射镜底支撑一般采用由三点支撑演化而成的多点 Whiffle tree 支撑形式。其结构的支撑点数一般为 6 点、9 点、18 点、27 点等。综合各方面的因素, 本文分别选用 18 点和 27 点支撑反射镜, 希望经过分析和对比选取一个更合理的轻量化结构。

该反射镜拟采用类似 SOFIA 望远镜主反射镜的“A-frame”侧支撑结构或与之类似的“双脚”支撑。故在反射镜的设计中需综合考虑结构的排布, 但具体侧支撑形式不是本文研究的重点, 其支撑结构的设计与支撑点位置的优化还需要进一步分析。

3.2 反射镜支撑圈半径的优化

多点支撑下的 Whiffle tree 结构各支撑点对应的支撑环半径对于反射镜的面形有着至关重要的影响。如图 2 所示, 分别为 18 点和 27 点 Whiffle tree 支撑点分布示意图。

借助 Hyperworks 软件的 Hypermorph 优化模块, 以镜面变形量为目标函数, 对支撑圈半径进行多次优化, 迭代计算后的结果如表 3 所示。

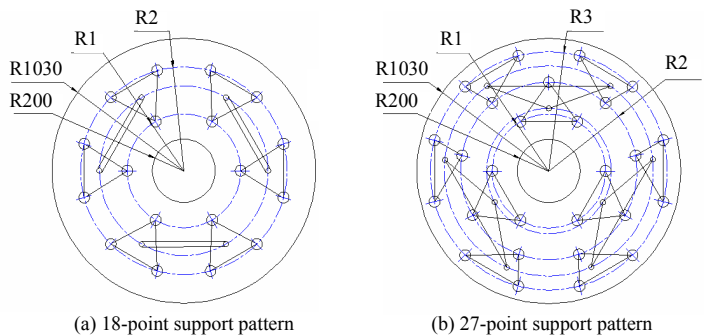


图 2 Whiffle tree 支撑点分布图

Fig.2 Distribution of Whiffle tree support points

表 3 支撑圈半径优化结果

Table 3 Result value of the optimization

Support form	Support ring	Initial value/mm	Optimization results/mm	Max deformation/nm
18-point support	R1	435.38	432.2	41.25
	R2	841.00	826.7	
27-point support	R1	342.99	378.5	33.65
	R2	687.01	637.8	
	R3	1 030.00	857.9	

4 反射镜镜面变形分析

SiC 比刚度大，导热系数高，是理想的反射镜材料，但镜坯制备难，加工工艺复杂同样限制了大尺寸 SiC 反射镜的应用。现阶段利用任何工艺制造大尺寸的单块 SiC 镜体都是非常困难，一般都根据镜体的旋转对称性，采用凝胶注模成型技术制作几块素坯，然后应用新型反应连接工艺将素坯烧结成整镜。

根据上述设计的反射镜参数，综合考虑 SiC 镜体的加工工艺(18 点拟采用六块素坯，径向筋 60°对称；27 点采用三块素坯，径向筋 120°对称)，建立反射镜轻量化模型，如图 3。图 3(a)为 18 点支撑轻量化反射镜，图 3(b)为 27 点支撑轻量化反射镜，图 3(c)是反射镜整体模型。

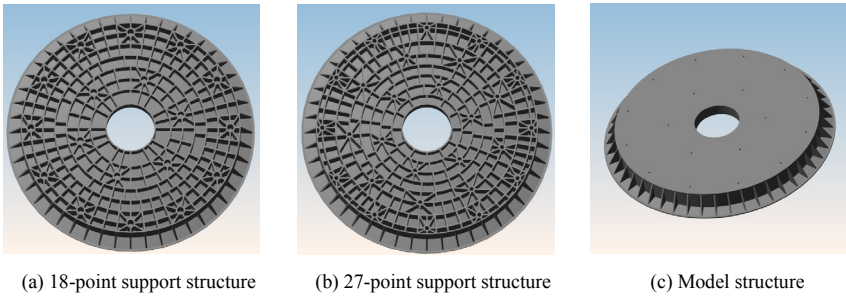


图 3 反射镜轻量化模型

Fig.3 Model of lighting-weighted mirror

轻量化前的实心镜质量为 1 381.33 kg。经计算轻量化后 18 点模型总重为 447.80 kg，27 点轻量化模型总重为 455.60 kg，对应的轻量化率分别 67.6%和 67.0%，均满足轻量化率不小于 60%的设计指标。

当光轴指向天顶时，借助于有限元分析软件 MSC.Patran/Nastran，对两种模型分别进行静力学和热力学分析对比。

4.1 静力学分析比较

光轴指向天顶时，镜体由自重产生的变形最大。取 SiC 弹性模量 $E=392\ 000\ \text{MPa}$ ，密度 $\rho=3.05\ \text{g/cm}^3$ ，在 1g 重力的作用下，对两个模型分别分析计算，其中模型的 Z 轴为光轴方向，重力方向为-Z 轴。两个模型分别施加对称约束，计算获得如图 4 所示镜面变形云图。

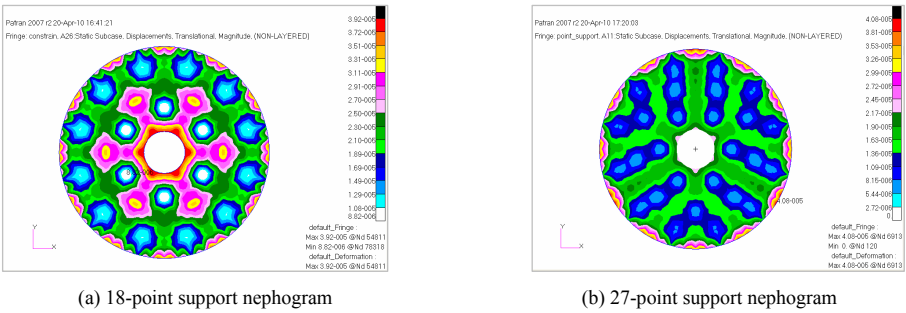


图 4 镜面变形云图(单位: mm)

Fig.4 Mirror deformation nephogram

拟合后的面形结果如下: 18 点支撑时的 PV 值为 34.40 nm, RMS 值为 5.70 nm; 27 点支撑的 PV 值为 28.27 nm, RMS 值为 4.71 nm。可见两块反射镜的面形结果均满足光学设计要求($PV=\lambda/10$, $RMS=\lambda/40$, $\lambda=632.8\text{ nm}$)。但是考虑到 27 点支撑模型的机械结构要比 18 点支撑模型的结构复杂, 装调也困难, 因此, 单从静力学变形考虑, 18 点支撑结构更适合于实际应用。

4.2 热力学分析比较

地基大口径望远镜主反射镜所处的热环境没有空间望远镜反射镜恶劣, 周围热环境对反射镜的影响也相对较小, 主要是反射镜所处环境的不同而产生的稳态温度差导致的镜面变形。由于地基望远镜的工作温度范围较大, 因此分别计算稳态温差在 $-30\sim 30^{\circ}\text{C}$ (参考温度为 20°C) 范围的镜面变形(不考虑重力作用), 计算结果如表 4 所示。

表 4 热载荷下的镜面变形
Table 4 Mirror deformation for thermal load

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$		-30	-25	-20	-18	-15	-10	-5	0	5	10	15	25	30
18-point support	PV /nm	84.20	75.36	67.10	<u>63.63</u>	57.93	49.50	40.52	32.77	24.10	15.64	7.01	7.01	15.64
	RMS /nm	20.66	18.60	16.53	<u>15.71</u>	14.47	12.41	10.30	8.28	6.12	4.14	2.09	2.09	4.14
27-point support	PV /nm	86.06	77.25	68.72	<u>65.52</u>	59.99	51.33	42.44	34.75	26.10	17.52	8.81	8.81	17.52
	RMS /nm	20.77	18.63	16.62	<u>15.76</u>	14.48	12.50	10.33	8.29	6.16	4.16	2.11	2.11	4.16

由表中数据可以看出, 温度对反射镜的影响要远比重力大, 当环境稳态温度为 -18°C 时, 镜面变形已接近设计要求的最大值。这主要是由于 SiC 的热膨胀系数较大($\alpha=2.5$)引起的。对于地基大口径望远镜来说, 由于大气湍流的影响, 通过温控设备对环境温度强制调节有时会影响系统的光学成像。因此在不采取热控措施的前提下, 通常采用合理设计支撑结构的柔性环节来达到补偿热变形量的目的。这也将是下一步的工作重点。

对比表中数据可知, 稳态温差作用时, 18 点支撑的热变形要小于 27 点支撑, 对应支撑结构的热匹配设计也较 27 点支撑容易。因此, 从热力学变形角度分析, 18 点支撑的反射镜结构要优于 27 点支撑的结构。

4.3 结构工艺性比较

从总体结构工艺性看, 两种方案都满足设计要求, 具有一定的可加工性。但相比较而言, 18 点支撑的轻量化结构对称性好, 筋板分布均匀, 整镜可由六块镜坯反应烧结而成, 每块素坯的制备尺寸相对较小, 容易实现; 27 点支撑的结构对称性较差, 整镜需三块镜坯反应烧结连结, 素坯尺寸较大, 增加了制备的难度。因此, 18 点支撑的反射镜结构要优于 27 点支撑的结构。

5 结 论

本文详述了 2 m SiC 拱形轻量化反射镜的参数设计, 并针对 18 点支撑和 27 点支撑的反射镜结构进行了静力学、热力学以及结构工艺性的分析对比, 结果表明, 18 点支撑的轻量化结构更适合实际应用。由于 SiC 自身的比刚度较大, 因此反射镜在重力作用下的面形变形较小, 但同时由于该材料的热膨胀系数较大, 导致由稳态温差引起的热变形很大。因此, 为了达到镜面变形的设计要求, 需要根据材料与结构的热匹配性, 合理设计反射镜的支撑结构。这也将是下一步工作的重点。

参考文献:

[1] 韩媛媛, 张宇民, 韩杰才, 等. 碳化硅反射镜轻量化结构优化设计[J]. 光电工程, 2006, **33**(8): 123-126.
HAN Yuan-yuan, ZHANG Yu-min, HAN Jie-cai, *et al.* Optimum design of lightweight silicon carbide mirror [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, **33**(8): 123-126.

[2] 张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(5): 577-581.
ZHANG Xue-jun, LI Zhi-lai, ZHANG Zhong-yu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2007, **36**(5): 577-581.

- [3] 刘辉, 于清华, 裴云天. 大口径反射镜轻量化结构比较及面形分析[J]. 光电工程, 2009, **36**(11): 70-74.
LIU Hui, YU Qing-hua, PEI Yun-tian. Light-weighted Structure Contrast and Deformation Analysis of the Large Mirror [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, **36**(11): 70-74.
- [4] Talapatra D C. On the self-weight sag of arch-like structures in the context of light-weight mirror design [J]. **OPTICA ACTA**(S0030-3909), 1975, **22**(9): 745-759.
- [5] Vukobratovich D. Optimum Shapes for Lightweighted Mirrors [J]. **Proc. of SPIE**(S0277-786X), 1982, **332**, 419-432.
- [6] 郭喜庆, 王悦勇. 大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析[J]. 光学 精密工程, 2000, **8**(6): 518-521.
GUO Xi-qing, WANG Yue-yong. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2000, **8**(6): 518-521.
- [7] 王富国, 张景旭, 杨洪波, 等. 1.2 m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. 光学 精密工程, 2009, **17**(1): 85-91.
WANG Fu-guo, ZHANG Jin-xu, YANG Hong-bo, *et al.* Lightweight design and analysis for a 1.2m SiC primary mirror [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2009, **17**(1): 85-91.
- [8] WILSON R N. **Reflecting Telescope Optics II, Manufacture, Testing, Alignment, Modern Techniques** [M]. Berlin: Springer, 1999: 242-259.
- [9] Parks Robert E, Wortley Richard W, Cannon James E. Engineering with lightweight mirrors [J]. **Proc. of SPIE** (S0277-786X), 1990, **1236**: 735-743.
- [10] 张舸, 赵汝成, 赵文兴. 碳化硅陶瓷新型反应连接技术[J]. 光学 精密工程, 2008, **16**(6): 1037-1041.
ZHANG Ge, ZHAO Ru-cheng, ZHAO Wen-xing. Novel reaction-formed joint technology for reaction bonded silicon carbide ceramics [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, **16**(6): 1037-1041.

欢迎订阅 2011 年《低温与特气》

《低温与特气》创刊于 1983 年, 是由光明化工研究设计院主办、全国特种气体信息站协办的国内外公开发行的科技期刊, 国内统一刊号 CN21-1278/TQ, 国际标准刊号 ISSN 1007-7804, 广告经营许可证号 2102112003000026。

《低温与特气》是国内同时报道低温与制冷技术以及特种气体领域有关理论探讨、应用实践、技术展望等方面最新研究成果的专业技术性期刊, 同时也是我国特气行业唯一公开发行的科技期刊。本刊设有综述评论、工艺与设备、应用技术、分析与测试、特气制备、气瓶检验、安全技术、技术讲座、行业信息等栏目, 以技术性和实用性为主, 兼具学术性和信息性。读者对象为石油化工、制冷、电子、航空航天、环保、医药、食品等行业的科研人员和工程技术人员, 以及高等院校相关专业师生。

本刊曾获 1998 年度化工系统优秀信息成果三等奖、第六届全国石油和化工行业优秀期刊二等奖、首届《CAJ-CD 规范》执行优秀奖, 并被《中国期刊网》及《万方数据网》全文收录, 也是《美国化学文摘 (CA)》、《中国化学化工文摘》录用期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊。

本刊采用国际期刊界通行的大 16 开本胶印, 封皮及插页全彩色印刷, 广告页面设计精美, 内文印刷字迹清晰, 图表均采用电脑制作。欢迎订阅、投稿及刊登广告。

《低温与特气》为双月刊, 逢双月末出版。2011 年国内每期定价 15 元, 全年 90 元 (含邮费), 国内读者可在全国各地邮局订阅 (邮发代号 8-261), 也可直接从编辑部订阅。国外读者可通过中国出版对外贸易总公司 (北京 782 信箱, 邮编: 100011) 订阅, 国外发行代号: DK21015。

邮局汇款: 地址: 大连市甘井子区甘北路 34 号 收款人: 《低温与特气》编辑部 邮 编: 116031

电 话: 0411-85961022 85961021 (兼传真) E-mail: dwytq@qq.com

银行汇款: 开户行: 工商银行大连甘井子支行 账 户: 光明化工研究设计院 账 号: 3400201109008900290