

100 kWe 月面核电站方案研究

刘凯旋,张威震,解家春,吕 征

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部,北京 102413)

摘 要:随着太空探索活动的深入开展,在月球表面建立有人基地成为必然选择。与常规化学能或太阳能相比,月面核电源具有诸多优点,是月球基地的最佳能源选择之一。本文提出了电功率 100 kWe 的核反应堆电源系统方案,给出了该方案的关键系统参数。针对反应堆模块,展开方案选型、参数优化、常规物理参数分析、初步热工分析和特种临界安全分析等工作。计算结果显示:燃料包壳温度小于使用限值,掉落事故工况下有效增值因数均小于 0.98。该设计方案满足各项技术指标和设计准则。

关键词:月表核反应堆;核电源;反应堆物理计算;热电转换;快堆

中图分类号: TL 413 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.02.017

Scheme Research on 100 kWe Lunar Surface Nuclear Power Plant

LIU Kaixuan, ZHANG Weizhen, XIE Jiachun, LYU Zheng

(Department of Reactor Engineering Technology and Research,
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: With the development of space exploration activities, the establishment of manned bases on moon surface has become an inevitable choice. Compared with conventional chemical or solar energy, lunar surface reactor power source has many advantages, which makes it one of the best energy options for a lunar base. In this paper, a scheme of 100 kWe nuclear reactor power system is proposed, and the key system parameters of the scheme are given. In terms of the reactor modules, much work has been carried out, e.g., scheme selection, parameter optimization, analyses of the conventional physical parameters, preliminary thermal-hydraulic analysis, and special critical safety analysis. The calculation results show that the temperature of the fuel cladding is less than the use limit, and the effective increment factors under drop accident conditions are less than 0.98, which indicates that the scheme meets the technical specifications and design requirements.

Key words: lunar surface nuclear reactor; nuclear power; physical calculation for nuclear reactor; thermoelectric conversion; fast reactor

0 引言

随着人类空间探索需求的日益增加和载人航天技术的逐渐成熟,载人登陆月球和建设月球基地已经成为了各国近期重点目标。受到太阳光照的影响,长周期大型月球基地必须采用核能作为能量来源。月球表面核电站不受日照条件和地理条件的限制,环境适应性强,能量密度高,结构紧凑,被认为是月球基地最理想的能源供给方案^[1-2]。美国、

俄罗斯在太空探测的星表核电源方面开展了大量的研究:美国提出了诸多创造性的月面核电站方案,如 SNAP-8^[3]、SNAP-3^[4]、SP-100^[5]、HOMER^[6-7]、HOMER-15^[8]、Kilopower^[9]、FSP^[10]等,其中电功率约 40 kWe、采用斯特林转换的星表裂变电源(FSP)方案和电功率为 1~10 kWe 的 Kilopower 空间核电源方案为美国近期研究的重点;俄罗斯则一直把热离子型空间核反应堆电源和兆瓦级核电推

收稿日期:2020-01-10;修回日期:2020-03-26

作者简介:刘凯旋(1991—),男,博士研究生,主要研究方向为特种核动力。

通信作者:解家春(1979—),男,博士,主要研究方向为堆设计、空间核动力。

进空间核动力飞船作为主要工作内容。

本文在分析国内外星表核电源方案的基础上,结合国内核反应堆技术发展水平,侧重经济性和技术成熟度,开展电功率 100 kWe、寿期大于 10 a 的月面核电站系统方案研究,进行反应堆方案和系统系统设计,并对方案关键参数进行初步分析,以期对月面核电站研究奠定一定的基础。

1 系统选型研究

1.1 堆型

反应堆按中子能谱可分为热中子堆、超热中子堆和快中子堆。这三种堆型各有其特点,一般情况下都能满足设计需求。快堆不需要慢化剂,布置更加紧凑,这样堆芯的质量和体积较小,还可以减少径向反射层的厚度与质量,而且快堆中子泄漏率最大,更适合采用堆外控制方式进行控制,可以简化堆芯结构,提高可靠性。因此,本方案采用快中子谱反应堆。

1.2 核燃料

根据调研,目前用于星表核反应堆的燃料主要有 UO_2 、UN 和 U-ZrH 燃料。为获得较高的热电转

换效率,星表核反应堆的运行温度一般高于 1 000 K,从安全考虑不宜使用 U-ZrH 燃料。而 UN 燃料目前还处于研发阶段,技术成熟度较低。 UO_2 的国内加工制造技术更加成熟,实验数据和性能参数更加全面,应用经验也更多。因此,本方案首先使用 UO_2 作为燃料材料。

1.3 结构材料

为了简化堆内不同结构材料与冷却剂、不同金属材料之间的接触相容问题,考虑将燃料包壳和其他结构部件使用相同的材料。空间核反应堆对结构材料的要求,需要具有良好的中子物理特性和合适的热物理特性,还必须具有高强度、耐高温、抗蠕变、相容性好、耐受辐照效应等性能。316 不锈钢辐射性能好,来源广泛,易加工成型,被广泛应用于核电站的反应堆中。经综合考虑,本方案反应堆部分使用 316 不锈钢作为包壳和结构材料的首选材料。

1.4 冷却剂

一般可用于快堆冷却剂的液态金属有 Li、Na、K、NaK-78(22%Na+78%K,质量分数)。空间核反应堆常用的冷却剂热物理性质参数见表 1。

表 1 空间堆常用冷却剂热物理性质参数

Tab.1 Thermophysical property parameters of common coolant used for space nuclear reactors

物理性质	Li	Na	K	NaK-78
标准熔点 $t_m/^\circ\text{C}$	179	97.81	63.65	-11
标准沸点 $t_b/^\circ\text{C}$	1 314	882	757	784
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	474	818	704	805
定压比热容 $c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	4 227.71	1 255.76	770.20	—
导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	48.02	62.79	30.93	60.58
导温系数 $a/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	2.24×10^{-5}	6.25×10^{-5}	5.69×10^{-5}	5.89×10^{-5}

NaK-78 合金室温下为液态,这使得 NaK-78 合金具有充装方便和易于保持液态并避免熔化-凝固问题的特点,简化了试验操作。月表如果需要加热,NaK-78 所需的热量也是最少的,且 NaK-78 合金与 SS-316 在材料相容性较好,本方案拟采用 NaK-78 作为首选堆芯冷却剂。

1.5 反射层材料

选择径向反射层时,需要尽量保持堆芯体积

小,易于地面处理,并满足发射安全要求。目前大多数空间堆采用 Be 和 BeO 作为反射层材料。遵循尽量简化堆芯结构的原则,本方案反应堆部分计划只采用转鼓控制反应性。与 BeO 相比,Be 的宏观散射截面更低,但 Be 的延展性更好,对温度、辐照引起的膨胀和开裂不敏感,因此,采用 Be 作为反射层的主要材料。而对于燃料棒内的轴向反射层,由于温度更高且为了减小温度引起的材料膨胀效应,拟采用 BeO 作为轴向反射层材料。

1.6 反应性控制

反应性控制方式可分为堆内控制和堆外控制。堆外控制鼓方式,通过改变径向反射层内的中子泄漏和吸收反应速率实现对堆芯的反应性控制,在机械结构上更易实现,技术比较成熟。因此,本方案首选控制鼓作为主要的反应性控制方式。 $\text{Be}/\text{B}_4\text{C}$ 控制鼓在空间堆中较为常见,通常将 B_4C 吸收体做成横截面放置在圆柱形控制鼓的一侧,吸收体转到靠近堆芯的一侧时,中子吸收增强,反应性下降;吸收体转到远离堆芯的一侧时,中子吸收减弱,反应性上升。通过堆芯物理和控制程序的设计,控制鼓既能调节堆芯功率,也能实现启动和迅速关停反应堆等操作。

1.7 能量转换系统

本方案的功率指标为 100 kWe,考虑到传输损耗和系统内部负载,能量转换系统实际输出的电功率应该大于 100 kWe。参考 FSP 能量转换系统 83.3% 的电输出效率,得出能量转换系统应产生不低于 120 kWe 的电功率。本方案使用斯特林循环将堆芯热能转换为电能。国内在自由活塞式斯特林发电机的研制上已经开展相关论证和技术分析工作,目前已经在研自由活塞式斯特林发电机的功率大于 15 kW,转换效率大于 25%,如图 1 所示。因

此,能量转换系统拟采用 8 台电功率不低于 15 kWe 的自由活塞式斯特林发动机,热电转换效率拟定不低于 25%,算出堆芯热功率为 480 kWe。

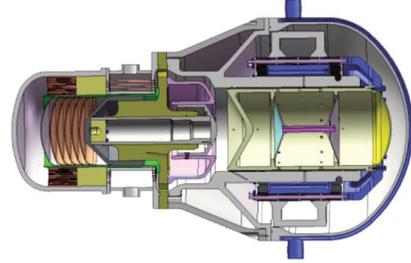


图 1 15 kWe 斯特林发电机结构图
Fig.1 Structure of 15 kWe Stirling generator

2 方案设计

2.1 堆芯结构

反应堆筒体简单考虑为圆筒形,包络尺寸为 $\Phi 52.0 \text{ cm} \times 78.4 \text{ cm}$,如图 2 所示。堆芯方案采用 199 根两种 ^{235}U 富集度的 UO_2 燃料棒,外层 48 根燃料棒的 ^{235}U 富集度为 50%,内部 151 根燃料棒的 ^{235}U 富集度为 89%。为保证反射掉落事故下能满足临界安全要求,在燃料芯块中添加质量分数为 3.2% 的 Gd_2O_3 作为谱移吸收体材料,可满足在最坏的掉落环境中,堆芯有效增殖因数 k_{eff} 仍然小于 0.98。

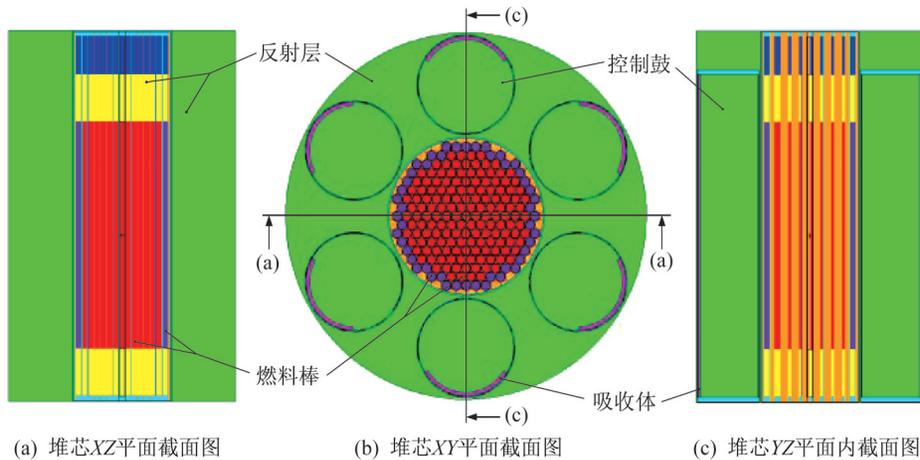


图 2 堆芯结构

Fig. 2 Structure of the reactor core

6 个较大的圆柱形转动控制鼓组成反应性控制系统,控制鼓主体材料使用和径向反射层相同的金属 Be,表面覆盖阳极氧化处理的 BeO 薄膜。吸收体主体材料为 B_4C ,厚度 1.0 cm。控制鼓周围的 Be 反

射层使用 0.5 mm 的 316 不锈钢筒体包裹,控制鼓筒体与反射层筒体之间留有 0.5 mm 的空隙,填充 He 气。计算确定径向反射层厚度为 13.8 cm,轴向反射层厚度为 10.0 cm,控制鼓吸收体厚度为 0.5 cm。

2.2 反应堆物理分析

计算出反应堆的初始剩余反应性和停堆深度,

见表 2。初始剩余反应性约为 $3.5559\% \Delta k/k$, 停堆深度约为 $12.4796\% \Delta k/k$, 两种情况下的 k_{eff} 都能满足设计准则。

表 2 寿期初剩余反应性和停堆深度

Tab.2 Excess reactivity and shutdown margin at the beginning of service life

堆芯状态	控制鼓	k_{eff}	$\rho/(\% \Delta k/k)$
寿期初、冷态	吸收体全部向外	1.03687 ± 0.00029	3.5559 ± 0.0270
寿期初、冷态	吸收体全部向内	0.88905 ± 0.00023	-12.4796 ± 0.0291

根据反应性温度效应计算结果,全堆多普勒效应/能谱效应为 $0.788\% \Delta k/k$, 材料膨胀效应为 $-1.051\% \Delta k/k$, 全堆总的温度效应仅为 $-0.256\% \Delta k/k$ 。与其他小型快堆相比,本方案全堆负温度效应较小,主要因为燃料使用温度较低,侧反射层使用了较多的金属 Be, 燃料温度低的正多普勒效应不大,而侧反射层的负能谱效应明显。因此,全堆具有较小的负温度效应,这种特点有利于反应堆反应性控制。

计算得出燃料芯块内最大快中子累计注量为 $1.8738 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 。堆芯筒体和反应堆容器内的最大快中子累计注量分别为 $9.8792 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 和 $2.8074 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$, 小于设计限值(中国实验快堆反应堆容器内大于 0.1 MeV 的中子注量限值为 10^{22} n/cm^2)。燃料燃耗深度在寿期内直线上升,燃料总体燃耗为 19.89 GWd/t(U) , 相对较浅,且寿期末 k_{eff} 下降到 1.02263 ± 0.00026 , 大于 1.02 , 满足设计要求。

根据 MCNP 轴向功率密度计算结果,可得到如图 3 所示的功率密度轴向分布情况。轴向功率密度曲线以 $z=0$ 处为轴呈对称分布,最高约 63 W/cm^3 , 功率密度数值沿原理活性区中平面方向迅速下降,但靠近轴向反射层处略有上升。轴向功率不均匀因子寿期初为 1.1921 , 寿期末为 1.1912 , 均小于 1.2 。堆芯总的功率不均匀因子寿期初为 1.3238 和 1.3201 , 堆芯功率分布展平效果良好,对热工计算较为有利。

2.3 系统结构与布置

月面核电站系统结构如图 4 所示。每个控制鼓采用独立驱动机构,以增强反应性控制的灵活性。屏蔽体材料初步考虑采用钨金属、水或 B_4C 粉末等。热电转换系统拟采用 4 台斯特林转换器,每台转换

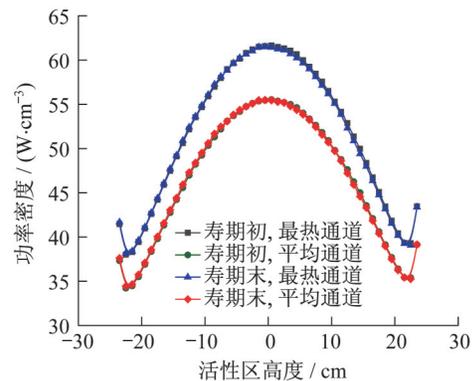
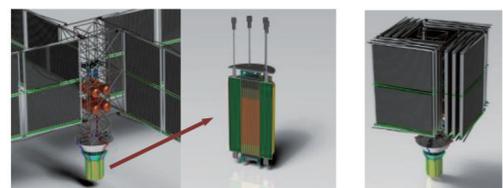


图 3 堆芯轴向功率密度分布(热态,寿期初-寿期末)

Fig.3 Axial power density distribution of the reactor core (hot state, beginning-end of service life)

器包括两台 15 kWe 自由活塞式斯特林发动机,采用双机对置的方式,以减少工作时可能产生的震动。余热排放系统包括 4 片热管式辐射器翼板,单片翼板展开总长约为 18 m , 高度为 4 m , 完全折叠后最大宽度小于 4 m 。



(a) 堆芯结构 (b) 总体布置(折叠)

图 4 星表核电源系统结构

Fig.4 Schematic diagram of the structure of lunar surface nuclear power system

2.4 初步热工分析

初步热工分析的目的在于验证反应堆方案的合理性,计算结果如图 5 所示。燃料棒最高温度约为 987 K , 芯块整体平均温度约为 892 K , 最低温度约为 801 K , 与冷却剂入口温度持平,这也间接表明下

端反射层在轴向温度变化很小。燃料包壳最高温度约为 872 K, 小于 873 K, 中国实验快堆采用 316 类不锈钢燃料包壳, 运行状态最高可使用温度不超过 973 K, 可认为本方案燃料包壳温度满足许用限值。

NaK 冷却剂流道入口温度 800 K, 出口温度约

862 K, 流体域平均温度约为 835 K, 由燃料棒入口至出口产生约 36.8 kPa 的压降。FSP 相关研究表明, NaK 回路在小于 140 kPa 压降和低于 850 K 温度的工作条件下, 对回路的腐蚀较弱, 不会影响系统正常运行。因此, 可认为本方案堆芯冷却剂运行压力、堆芯压降和流量较为合理。

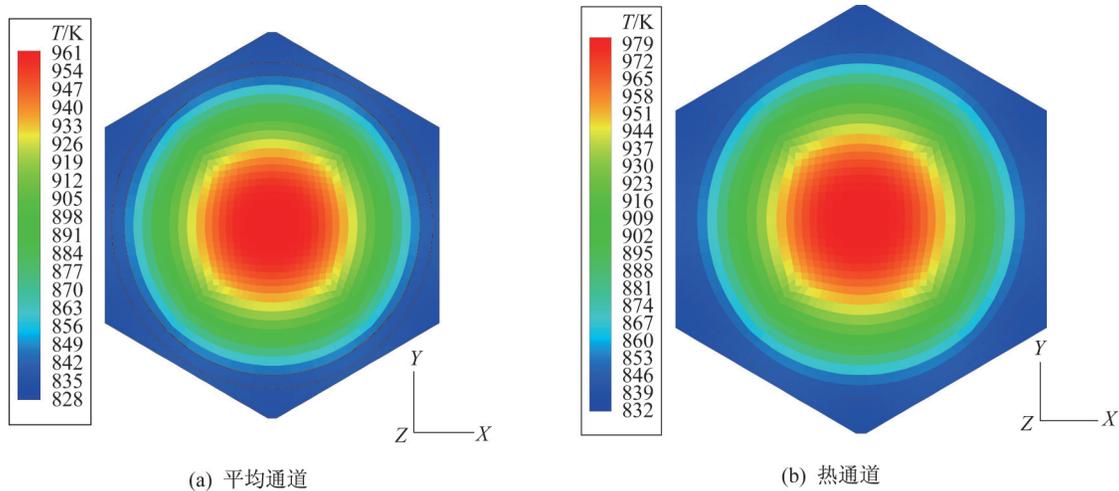


图 5 通道中平面温度分布云图

Fig.5 Contours of the plane temperature in the channel

2.5 特殊临界安全分析

反应堆电源在发射过程中可能发生事故而掉落, 由于掉落之后周围环境的复杂性, 可能导致堆芯发生临界安全问题。美国在 FSP、HOMER 等星表堆的设计方案中均要求反应堆掉落地面时 k_{eff} 小

于 0.985。保守考虑, 本方案将此设计准则定为 k_{eff} 小于 0.98。初步考虑最坏的情况, 即反应堆容器发生破损, 反射层和控制鼓脱落, 堆芯 NaK 冷却剂流失, 且渗入淡水或海水, 堆芯筒体外被湿沙或干沙包围。计算结果见表 3。

表 3 掉落事故临界计算结果

Tab.3 Critical calculation results of crash accidents

序号	掉落环境	反应堆状态			k_{eff}
		反射层与控制鼓	堆外环境	堆内填充	
1	沙漠+下雨	脱落	干沙	淡水	0.974 27 ± 0.000 28
2	河滩	脱落	湿沙	淡水	0.936 66 ± 0.000 28
3	海滩	脱落	湿沙	海水	0.935 96 ± 0.000 28
4	深海	脱落	海水	海水	0.900 50 ± 0.000 28
5	江河	脱落	淡水	淡水	0.903 97 ± 0.000 28

计算时, 干沙密度取 1.7 g/cm^3 , 海水密度取 1.023 343 g/cm^3 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$); 湿沙假设为 64% 干沙和 36% 海水的混合物, 密度为 2.06 g/cm^3 (参考 FSP^[13]); 河水或淡水则直接使用纯水的参数, 密度为 1.0 g/cm^3 。对于含水的材料, 使用 MCNP 计算时考虑其热化截面。对于被堆外包裹材料的模型, 径

向、轴向均按 50 cm 厚度处理, 该厚度大于中子在介质中 3 倍扩散长度以上, 因此, 可认为是无限厚度介质。

针对发射掉落事故下各种反应堆模型的临界计算结果表明: 在合理假设而不过度保守考虑的各种计算模型中, k_{eff} 始终小于 0.98 的设计限值, 且具

有一定裕量。

3 结束语

本文提出了一套采用 NaK-78 冷却快堆、斯特林活塞式发电机热电转换、月表土壤屏蔽、电功率 100 kWe 适用于月球基地或火星基地的核反应堆电源系统方案,并重点针对反应堆模块,展开了方案选型、常规物理参数分析等工作。计算分析结果表明:本方案反应堆能够满足各项技术指标和设计准则,具有安全可靠、技术研发风险低等特点。

参考文献

- [1] 姚成志,胡古,赵守智,等.火星表面核反应堆电源方案研究[J].原子能科学技术,2016,50(8):1449-1455.
- [2] 靳洋,刘世超,何小斌,等.空间核电源电力系统功率因数校正技术的研究[J].上海航天,2018,35(4):114-119.
- [3] 张明,蔡晓东,杜青,等.核反应堆空间应用研究[J].航天器工程,2013,22(6):119-126.
- [4] PEARSON J B, STEWART E T, REID R S. Experimental evaluation of the thermal performance of a

water shield for a surface power reactor [C]//AIP Conference Proceedings. 2007: 430-437.

- [5] BENNETT G L, HEMLER R J, SCHOCK A. Status report on the US space nuclear program [J]. Acta Astronautica, 1996, 38(4): 551-560.
- [6] POPA-SIMIL L. Advanced nuclear compact structures for power generation on Mars [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 241-286.
- [7] POSTON D I. The heatpipe-operated Mars exploration reactor (HOMER) [C]//AIP Conference Proceedings. 2001: 797-804.
- [8] POSTON D I, KAPERINICK R J, GUFFEE R M, et al. Design of a heatpipe-cooled Mars-surface fission reactor [C]//AIP Conference Proceedings. 2002: 1096-1106.
- [9] GIBSON M A, OLESON S R, POSTON D I, et al. NASA's kilowatt reactor development and the path to higher power missions [R]. NASA/TM-2017-219467, 2017.
- [10] Fission Surface Power Team. Fission surface power system initial concept definition [R]. NASA/TM-2010-216772, 2010.

(上接第 108 页)

初期放电比能量可以达到 $180.0 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2 C 放电容量为 0.2 C 容量的 91.0%, 2 C-30% DOD 循环 1 500 次放电终压仅下降 6.60 mV, 可以满足下一代大功率 SAR 卫星的供配电需求, 大幅降低电源系统重量, 提高卫星储能系统的利用率和平台的有效载荷能力。

参考文献

- [1] 李国欣. 新型化学电源技术概论 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2007: 325-327.
- [2] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 1-6.
- [3] 张晓峰, 张文佳, 郭伟峰, 等. 国外 SAR 卫星电源系统

分析与启示 [J]. 航天器工程, 2015, 24(3): 107-113.

- [4] 乔明, 朱立颖, 李小飞, 等. SAR 卫星电源系统设计与仿真研究 [J]. 航天器工程, 2015, 24(2): 45-50.
- [5] 杨双景, 赵长江. 一种大功率 SAR 卫星电源系统设计 [J]. 航天器工程, 2017, 26(3): 57-63.
- [6] 陈筠力, 李威. 国外 SAR 卫星最新进展与趋势展望 [J]. 上海航天, 2016, 33(6): 1-19.
- [7] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载 SAR 技术的现状与发展趋势 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229-240.
- [8] GU M, BELHAROUAK I, GENC A, et al. Conflicting roles of nickel in controlling cathode performance in lithium ion batteries [J]. Nano Letters, 2012, 12: 5186-5191.