西北大学学报(自然科学版)
2026 年 10 月,第 56 卷第 5 期,Oct. ,2026,Vol. 56,No. 5
Journal of Northwest University (Natural Science Edition)

·能源资源的绿色低碳转化与高效利用·

基于热电效应的深井裂采设备温控特性研究

唐巍峰[1],赵有志[1],张　硕[1],区永深[1],张永民[2],褚雯霄[1],王秋旺[1]

1. 西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室,陕西 西安　710049;
2. 西安交通大学 电工材料电气绝缘国家重点实验室,陕西 西安　710049

摘要　深井油气、地热等资源的勘探开发对于实现能源与资源的绿色高效转化至关重要,但井下极端高温(>150 ℃)严重制约了电机、功率芯片等关键电子器件的可靠运行。热电制冷器作为一种基于半导体直接能量转换的主动式固态热控技术,因其结构紧凑、响应快等优点,在极端环境热管理中具有应用潜力。为探究热电制冷器在深井高温环境下的性能极限与能量利用效率,结合实验与数值模拟,系统研究了热电制冷器(thermoelectric cooler, TEC)模块在 80 ℃~150 ℃环境温度、13.6 W 热负荷下的控温特性。实验结果表明:①在环境 120 ℃、热负荷 13.6 W 条件下,热电器件可维持最大冷热端温差达到 62.1 ℃,且冷端表面温度稳定,不超过 80 ℃;②建立了可靠的热电制冷器数值预测模型,获得热电器件内冷端节点温度随输入电流的偏移关系,揭示了最大输入电流与热端温度的非相关性,获得最大制冷量与热端温度之间的近似线性特征,表明存在一个使冷端温度最低的最佳工作电流,且该电流对环境温度不敏感,这对于实现高效能量利用至关重要;③进一步分析了热电器件的热电制冷效率(coefficient of performance, COP)变化,其随电流的增加呈现先增加后降低的趋势,且增幅在低温差时较大,在大温差时较小。研究结论:改善热端散热条件和缓解内部热量堆积是提升 TEC 在深井大温差环境下整体能量转换性能的有效途径。

关键词　深井环境;热电制冷;温控特性;最大温差;热电制冷效率

中图分类号:O472;TB657　　**DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-05-003

The temperature control performance of deep-well fracturing equipment based on thermoelectric cooling technology

Tang Weifeng[1], Zhao Youzhi[1], Zhang Shuo[1], Ou Yongshen[1], Zhang Yongmin[2], Chu Wenxiao[1], Wang Qiuwang[1]

1. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract　The exploration and exploitation of deep-well resources such as oil, gas, and geothermal energy are

收稿日期:2026-01-05　　修回日期:2026-03-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFA0710502)

第一作者:唐巍峰,男,博士研究生,从事传热方向研究,tangweifeng@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者:褚雯霄,男,教授,博士生导师,从事强化传热传质机理、新型热管理系统、储能与节能装备等方向研究,wxchu@xjtu.edu.cn。

crucial for achieving the green and efficient conversion and utilization of energy and resources. However, the extreme high temperatures (>150 ℃) encountered downhole severely constrain the reliable operation of critical electronic components, including motors and power chips. Thermoelectric cooling, an active solid-state thermal control technology based on semiconductor direct energy conversion (electric-to-thermal), holds potential for thermal management in extreme environments due to the advantages such as compact structure and fast response. To investigate the performance limits and energy utilization efficiency of thermoelectric cooler (TEC) in deep-well high-temperature environments, this study systematically examined the temperature control characteristics of a TEC module under ambient temperatures ranging from 80 ℃ to 150 ℃ and a thermal load of 13.6 W, employing a combination of experimental measurements and numerical simulations. Experimental results demonstrate that under a 120 ℃ ambient temperature and 13.6 W thermal load, the TEC device can sustain a maximum temperature difference of 62.1 ℃ between its hot and cold ends, maintaining the cold-end surface temperature stably below 80 ℃. A reliable numerical prediction model was developed and validated. Simulation results revealed the dependence of the cold-end temperature on input current and demonstrated the independence of the maximum input current from the hot-end temperature. An approximate linear relationship between the maximum cooling capacity and the hot-end temperature was identified. Crucially for efficient energy utilization, the study confirmed the existence of an optimal operating current that minimizes the cold-end temperature, and this optimal current was found to be largely insensitive to the ambient temperature within the studied range. Furthermore, the analysis of the coefficient of performance (COP) indicated a trend where it initially increases with input current, reaches a peak, and then decreases. The magnitude of the COP increase was observed to be more significant at smaller temperature differences compared to larger ones. The findings suggest that enhancing hot-end heat dissipation and mitigating internal heat accumulation (due to the Joule effect) are effective strategies for improving the overall energy conversion performance of TECs, particularly under the large temperature differences characteristic of deep-well environments.

Keywords downhole environment; thermoelectric cooling; temperature control performance; maximum temperature difference; COP

随着全球对能源与资源绿色、高效转化需求的不断提升,地壳深层资源(如页岩油、干热岩)的勘探与开发已成为重要的战略方向。然而,相关工程应用中采用的电子设备面临着因高温、高压、振动、强冲击等极端环境[1]导致的性能下降与运行故障问题。在以页岩油、干热岩开采为代表的深井作业中,环境温度随钻井深度每增加 100 m 提升约 1 ℃ ~5 ℃[2],页岩油储层的温度达到 150 ℃ ~185 ℃,而海上油井的深井温度甚至达 200 ℃以上[3]。井下高温环境下,电子设备无法持久、稳定运行,极易导致失效。随着勘探深度与难度的增加,设备下井工作时间逐渐增长,且发热量急剧增加;同时,井下径向空间狭窄,电机、电池、电控组件等设备结构紧凑度高。

因此,深井高温环境下,电子器件须承受外部高温并克服自身产热,这严重影响了装备的有效寿命和能源开采的作业效率[4],实际应用中需要保证井下电子器件在安全温度区间内运行。另一方面,随着钻井深度增加,井下设备回收和更换的时间与经济成本逐渐提高[5]。如何改善深井极端环境下电子设备的工作热环境、缓冲热负载、延长设备工作时间,对于保障深层能源的高效、安全转化具有重要意义,已成为近年来国内外学者关注的研究重点[6-8]。

针对地下能源勘探与开发的电子设备的热管理系统(thermal management system, TMS)可分为主动式和被动式两类,二者的结构特点、热性能和适用限制具有显著差别[3]。如图 1 所示,深井极端环境要求设备尽可能紧凑且减少活动部件,这使得地面常见的传统压缩式制冷无法应用。同时,诸如隔热、相变蓄热等被动式技术因为只能在有限时间内将电子设备温度保持在环境温度以下,很难追求长时间的温控效果,且较厚的隔热层和更多的相变材料将占用更多物理空间,增大井筒直径会带来开发成本的指数级上升。

因此,开发具备长时间工作、结构紧凑、无活

动部件的主动式制冷技术成为深井极端环境中电子设备热管理研究的关键。热电制冷作为一种主动式固体制冷技术,其区别于传统压缩制冷的最大优势在于器件结构紧凑、无运动部件、制冷速度快且控温精准[9-11]。该技术的实现依托于半导体中热能与电能之间相互转化的 3 种基本效应,即塞贝克(Seebeck)效应、珀耳帖(Peltier)效应和汤姆逊(Thomson)效应。其中,珀耳帖(Peltier)效应表现为当向两种不同的金属所构成的闭合回路中(热电臂)通过直流电时,两个导体接点将分别吸收和放出热量,形成具有一定温差的冷、热端面,改变电流方向时冷热端面将互换,Peltier 效应是热电制冷技术的核心。然而,就单组热电臂而言,其所能提供的制冷量通常少于 1 W,在实际应用中多采用由多组热电臂集成的热电制冷器(thermoelectric cooler,TEC),其制冷量是多组热电臂制冷量的叠加。

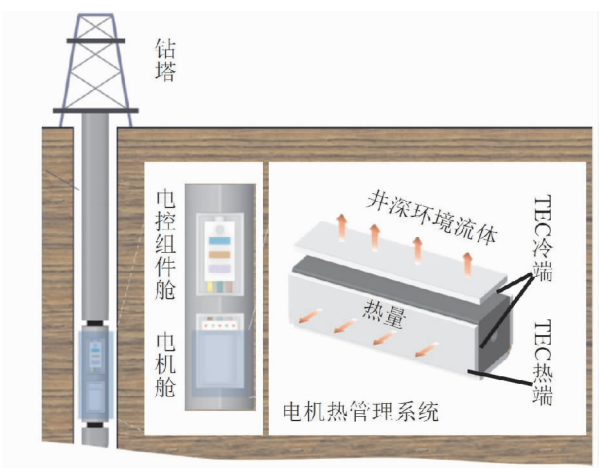


图 1　深井极端环境下的电子设备热管理系统

Fig. 1　TMS for electronic equipment in extreme environment of deep wells

碲化铋(Bi_2Te_3)作为热电冷却中使用最多的商业化材料[12],其研究较为广泛,许多研究人员通过不断改进其结构以提升性能。Poudel 等通过热压纳米粉末,使得 BiSbTe 块体合金的无量纲热电优值(ZT)最高达到 1.4[13];Kim 等通过低能晶界处采用液相压实形成的致密位错阵列的 $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$,使得其 ZT 达到了最高值 1.85[14];Peng 等研究通过晶格分离化策略引入更多 Ag 原子以提升其电性能[12]。Gong 等基于纳米晶 p 型 $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ 和 n 型 Bi_2Te_3 薄膜,制造兼容标准集成电路工艺并能降低功耗的高性能薄膜热电冷却器[15]。然而,由于 Te 元素不易获得且具有毒性,阻碍了其大规模热电应用,因此许多研究者也在研究替代 Bi_2Te_3 的新型材料。Wang 等通过多种合成工艺制造出一种 Ag_8SiSe_6 的菱形石化合物,通过优化淬火条件,其材料的 ZT 达到 0.7,接近常规的 Bi_2Te_3 基热电材料[16]。

因 TEC 具有结构紧凑、无运动部件、控温精准等优势,在需要高可靠性、小型化冷却方案的极端环境(如空间探测[17-21])中展现出应用潜力,尤其是在保障深部能源勘探开发装备电子系统稳定运行方面。然而,由于深井勘探领域的特殊性,目前公开文献较少。现有研究主要采用实验测试和数值模拟的方法,探索了多种基于 TEC 的 TMS 设计方案。例如,在系统集成与热量传递方面,早期研究提出了简单的热传导路径设计,将热量从电子设备经 TEC 传递至与钻杆外壳接触的导热底盘,最终由钻井液带走[22];Boesen 将 TEC 与热管和杜瓦瓶结合提供了更强的隔热性[23]。为强化传热和密封性,后续研究进一步探索了更复杂的集成方案,如将 TEC 与液冷板、热交换器结合,并用翅片铜棒将热量导出至井下环境[24],或通过薄膜 TEC 层直接冷却芯片,并配合热扩散器与散热器(可能采用热管)散热[25];还有研究尝试将 TEC 与散热器[26]或被动冷却(如导热、隔热材料)[27]相结合,以实现无杜瓦瓶的紧凑设计。在性能验证方面,研究者通过实验测试了不同设计方案的降温效果。Soprani 等的测试表明,其设计的系统能在 100 ℃和 170 ℃环境下分别使器件温度低于环境 28 ℃和 18 ℃[27];Gao 等结合纳米气凝胶隔热,在不同温度下测试了 TEC 系统的冷却能力,但只对系统整体的降温能力进行了展示,并未更深入说明[8];Sinha 与 Joshi 则在 140 ℃下进行了实验,并通过模型预测了更高温度下的性能。这些研究(如表 1 所汇总)证实了 TEC 在特定高温条件下具备为井下电子设备提供有效热控制的能力[24]。值得说明的是,这些研究侧重于将 TEC 作为系统的一部分,进行系统级的效果展示,缺乏对 TEC 在特定工作条件下极限性能的系统分析。

然而,现有针对深井高温极端环境(如大于 150 ℃)的研究仍存在一些不足,这在一定程度上限制了 TEC 技术在推动深层能源高效、绿色开采方面潜力的充分发挥。首先,由于深井勘探领域的特殊性,关于 TEC 在实际深井工程应用中的详细性能数据和先进技术的公开文献相对匮乏。其次,现有研究大多针对特定的 TMS 设计方案进行验证,缺乏对 TEC 模块本身在深井高温工作条件

下极限性能的系统性、规律性分析,特别是,鲜有研究深入探讨环境温度和关键运行参数对 TEC 性能指标的具体影响规律。对于实现 TEC 在深井环境下的精准、高效控温而言,电流敏感性分析以及最佳工作电流的确定至关重要,但这方面的研究尤为欠缺。此外,在高环境温度和高热负荷下,TEC 内部(如热电臂)可能因焦耳热效应产生局部热点,影响其能量转换性能和可靠性,对此内部热行为的研究也有待深入。

表 1 基于热电制冷技术的井下电子设备 TMS 汇总

Tab. 1 Summary of TMS based on thermoelectric cooling for downhole electronics

参考文献	发表时间/年份	深井温度/℃	电子设备控温要求/℃	电子设备热功率/W	设备运行时间/h
文献[23]	1983	204	135 ~ 218	N/A	N/A
文献[22]	1999	> 200	N/A	N/A	> 20
文献[25]	2010	> 200	N/A	N/A	N/A
文献[24]	2011	140	N/A	0 ~ 8	N/A
文献[27]	2015	200	< 175	1	60
文献[26]	2018	120	< 150	N/A	N/A
文献[8]	2019	25 ~ 70	N/A	N/A	N/A

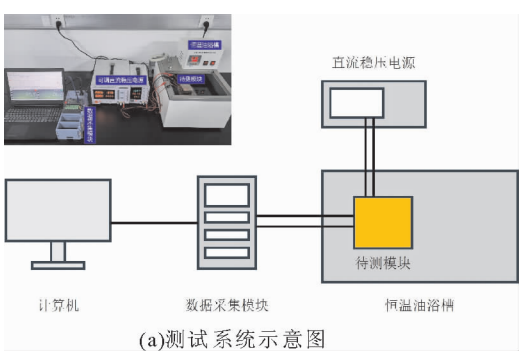
针对上述研究空白,本研究通过实验与数值模拟相结合的方法,系统地探究了 TEC 模块在模拟深井极端高温环境(80 ℃ ~ 150 ℃)下的极限温控性能及其能量转换特性,核心创新点在于系统性地揭示了 TEC 在该高温区间运行的几项关键性能规律,包括 TEC 冷端最低温度、冷热端最大温差、热电制冷效率(coefficient of performance, COP)在内的关键性能参数以及内部温度场随输入电流动态演变,揭示了其内在规律和潜在热点问题。该研究旨在为深井极端环境中基于热电制冷器技术的电子设备 TMS 优化设计和精准、高效控制策略的制定提供关键的理论依据与实验数据,进而保障深层能源勘探开发装备的安全可靠运行,助力实现能源与资源的绿色高效转化。

1 研究方法

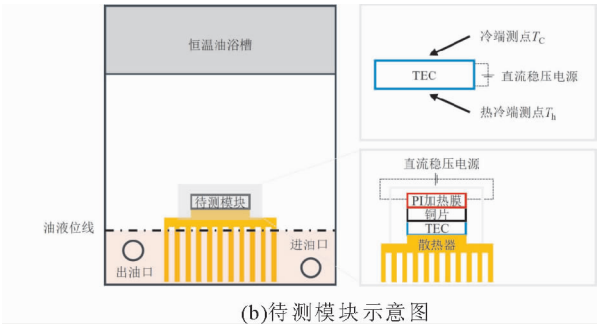
本研究结合了实验测试与数值模拟两种方法。旨在通过测量与模拟,深入理解 TEC 在模拟深部能源开采环境下的能量转换特性与极限性能,为开发高效、可靠的热管理系统提供依据,以支持深层能源与资源的安全、高效勘探与转化。

1.1 实验系统

如图 2 所示,本研究搭建了高温环境热电器件性能测试系统,主要由恒温油浴槽(HH-502),可调直流稳压电源,待测模块以及数据采集模块组成。采用油浴加热导热油方法模拟井下高温环境,将 TEC 的冷端贴附在具有平直四壁的模拟电机表面,尺寸为 35 mm × 112 mm;TEC 的热端浸没在导热油中,从而实现将热量自电机侧传导至高温油浴环境,并最终通过油路外部循环耗散,保证油温稳定。为探讨热电制冷特性,假设电机由于内部热耗散而形成的表面热功率分布均匀,采用尺寸为 40 mm × 40 mm 的聚酰亚胺(PI)柔性加热膜(R = 7.2 Ω)模拟电机热源,其散热量在被 TEC 冷端吸收后,经热端并借由铜散热器向高温循环油浴中放热。采用横河数据采集器(GM90PS,日本)进行温度(Omega T 型)采集,热电偶标定后其测量精度为 ±0.1 ℃。为确保热源温度分布足够均匀,在加热膜和 TEC 之间布置一块纯铜片,并将多个热电偶测点分别布置在铜片与 TEC 之间、TEC 与铜散热器之间。实验中在 TEC 的冷热端均匀涂抹导热硅脂(λ = 6.0 W · m^{-1} · K^{-1}),并采用机械夹紧的方式,以降低接触热阻。



(a)测试系统示意图



(b)待测模块示意图

图 2　高温环境热电器件性能测试系统

Fig. 2　The high temperature environment thermoelectric device performance test system

1.2　实验流程与参数

在上述测试系统中测试 72005/128/060B 型号 TEC 在高温环境中的极限制冷性能。实验进行过程中,先开启恒温油浴槽,待油浴温度和 TEC 冷、热端温度均达到稳定后,开启电加热膜并保持输入电压恒定,以模拟实际电机的恒定热功率。待 TEC 冷、热端温度均达到稳定后,开启 TEC 并通过调节输入电流改变 TEC 制冷量,过程中保持油浴温度和加热膜的热功率恒定。所有温度、电流等数据均在传感器示数稳定维持至少 20 min 后采集记录。每次实验重复 3 次,相对标准偏差小于 1% 的测量数据视为可靠数据,取数据的平均值作为其结果。为方便阅读理解,若无特殊说明,下文温度均用摄氏度(℃)表示。

对电机负载实际工况进行分析,电机长效安全运行温度为 80 ℃以下,实际井下作业过程中电机处于 120 ℃高温环境,外界与电机表面之间的换热量可按牛顿冷却公式计算

$$Q_{amb} = hA(T_{amb} - T_{motor}) \tag{1}$$

式中:Q_{amb} 为热环境与电机表面之间的对流传热量,W;h 为表面传热系数,$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,工程经验上取 200;$A$ 为电机对流传热表面积,m^2,实际测量为 0.015 68 m^2;T_{amb} 和 T_{motor} 分别表示环境温度和电机表面温度,K。假设电机处于 120 ℃ 热环境中,则由式(1)计算得到对流传热量为 125.4 W。此外,电机热控系统设计容量可按下式计算

$$Q_{total} = Q_{amb} + Q_{motor} \tag{2}$$

式中:Q_{total} 为电机热控系统设计容量,W;Q_{motor} 为电机热功率,W,在室温环境中测得为 7.6 W。

进一步,假设电机表面热流均匀分布,按单位面积热功率折算得到模拟实验中电加热膜的热功率

$$Q_{heat} = \frac{Q_{total}}{A_{motor}} \cdot A_{heat} = 13.6 \tag{3}$$

式中:A_{heat} 和 A_{motor} 分别为电加热膜和电机的表面积,m^2。此计算过程忽略了在钻井、下潜等过程中的热效应。

1.3　数值仿真模型

为进一步探究 TEC 对电机表面的局部温控特性及开展更广泛的参数分析,引入数值计算方法。经典热电制冷模块能量转换理论在 20 世纪 50 年代末被整理提出[28],建立在珀耳帖(Peltier)效应、傅里叶(Fourier)导热和焦耳(Joule)热效应三者之间的能量平衡上,将热量传递视作一维过程,即只沿热电臂高度方向传热。该理论包含 3 点假设:① 热电材料物性不随温度改变;② 热电臂因直流电产生的 Joule 热各有一半分配到冷、热端;③ 忽略 Thomson 效应。基于上述假设,集成有 n 组热电臂的 TEC 冷端所能吸收的热量和热端产生的热量以及输入电功率可分别通过下式计算:

$$Q_c = n\left[\bar{\alpha} I T_c - \bar{\lambda}\frac{A}{L}(T_h - T_c) - \frac{1}{2}I^2\bar{\rho}\frac{L}{A}\right], \tag{4}$$

$$Q_h = n\left[\bar{\alpha} I T_h - \bar{\lambda}\frac{A}{L}(T_h - T_c) + \frac{1}{2}I^2\bar{\rho}\frac{L}{A}\right], \tag{5}$$

$$P = n\left[I^2\bar{\rho}\frac{L}{A} + \bar{\alpha} I(T_h - T_c)\right] \tag{6}$$

式中:Q_c、Q_h、P 分别为 TEC 的冷端吸热量、热端放热量及输入电功率,W;T_h、T_c 分别表示 TEC 的平均热端、冷端温度,K;n 为 TEC 所含热电臂组数;$\bar{\alpha}$、$\bar{\lambda}$、$\bar{\rho}$ 分别为热电材料的塞贝克(Seebeck)系数($V \cdot K^{-1}$)、热导率($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)和电阻率($\Omega \cdot m$),它们均被视作常数;$I$ 表示输入电流,A;A、L 分别表示沿热电臂高度方向的横截面积(m^2)和长度(m)。

对于特定的 TEC,当冷热端温差为零时,将达到最大制冷量:

$$Q_{c,max} = n\left[\bar{\alpha} I_{max} T_c - \frac{1}{2}{I_{max}}^2\bar{\rho}\frac{L}{A}\right] \tag{7}$$

式中:$Q_{c,max}$ 为 TEC 最大制冷量,W;I_{max} 为此时的输入电流,A。此时热电臂内 Joule 效应已经成为影响 TEC 整体制冷性能的主导因素之一,因为 Peltier 效应产生的总制冷量有相当大一部分被 Joule 效应产生的热量所抵消。

材料的热电转换效率通过无量纲热电优值 ZT(式中简记为 η_{ZT})来表征

$$\eta_{ZT} = \frac{\bar{\alpha}^2}{\bar{\rho}\bar{\lambda}} \frac{T_h + T_c}{2} \tag{8}$$

ZT 值越高,意味着材料的热电性能越好。目前商用 TEC 大多采用碲化铋(Bi_2Te_3)基热电材料[29],其 ZT 值一般在 1.0 左右。降低材料的电阻率和热导率,提升 Seebeck 系数,将有助于提升热电制冷能力。

在给定冷热端温度下,TEC 的热电制冷效率 COP(式中简记为 η_{COP})通过下式计算

$$\eta_{COP} = \frac{Q_c}{P} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \frac{(1 + ZT)^{0.5} - \frac{T_h}{T_c}}{(1 + ZT)^{0.5} + 1} \tag{9}$$

显然,COP 与热电臂组数无关,意味着 TEC 模块上集成的热电臂数量只对模块最大制冷量产生叠加影响,而不影响制冷效率。在给定温差下,COP 随 ZT 的增大而增大,且极限值与逆卡诺循环效率一致。因此,提高材料性能是提高 TEC 制冷效率并扩大其应用前景的关键。然而,尽管目前热电材料具有更高的 ZT,但在实际工程中 TEC 的 COP 值低于按 ZT = 0.5 估算得到的 COP 值,这种偏差主要归因于寄生损耗,例如热电模块与流体之间的热阻以及模块内的其他热泄漏[30]。

需要指出的是,由于引入热电材料常物性的假设及忽略 Thomson 效应的影响,上述经典理论计算出来的 TEC 制冷性能与实际测量值之间的误差可能超过 10%[31]。因此有不少学者对经典理论的热平衡方程进行修正,即考虑 Thomson 效应影响[32-34],并将材料热物性随温度分布的变化也考虑在内[35]以提高模型准确性。部分研究提出将理论模型拓展到三维空间以表征温度分布沿热电臂纵向和横向的变化,进一步修正材料热物性随空间和温度分布的变化[36],但代价是更高的平均计算成本。然而,预测性能和实际测量值之间的误差大小仍在工程可接受范围内,因此上述经典理论在实际生产过程中仍得到广泛应用。

综上所述,同时考虑到节省计算成本,本研究将采用经典热电制冷模块能量转换理论进行数值计算以预测 TEC 制冷性能,将 TEC 中导热问题视作沿热电臂长度方向的一维导热问题,但在材料热物性设置上采用了对参考点进行 3 次样条插值的方式(详见下文)以应对温度变化引起的物性变化。本文采用商业仿真软件 COMSOL Multiphysics 5.6 完成 TEC 的物理建模(见图 3),并对其在特定工况下的温度场、电场等多个物理场进行耦合求解。为了预测高温下 TEC 的极限制冷性能,包括其所能维持的最大冷热端温差和最大制冷量,需要根据 TEC 自身的温度分布对输入电流给予反馈,这将通过 COMSOL Multiphysics 5.6 中的一般通用优化功能来实现。

图 4 展示了基于一般优化功能实现对 TEC 最大输入电流(I_{max})结果输出的流程图,可以实现输出一个维持 TEC 冷热端最大温差(dT_{max})时所需要的最大输入电流(I_{max}),其中控制变量即输入电流(I)初始值为 1,取值范围是 0.1 ~ 10。本模型基于热电效应多物理场接口[37],采用全耦合求解器,采用稀疏非线性优化器(sparse nonlinear optimizer,SNOPT)作为优化算法。

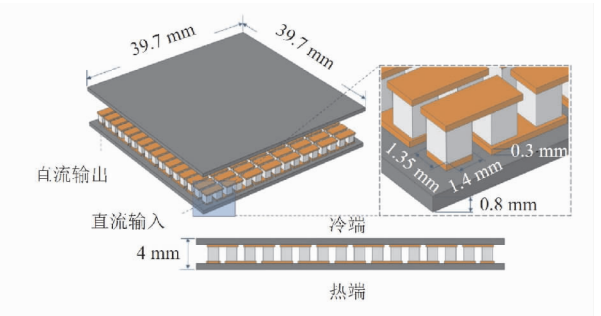


图 3 TEC 物理模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the TEC model

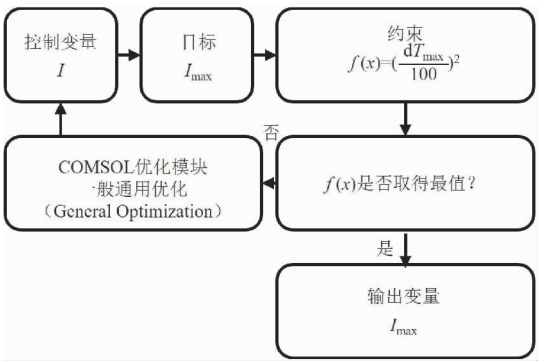


图 4 通过一般优化功能实现对 TEC 最大输入电流结果输出的流程图

Fig. 4 The output of TEC's maximum input current realized through the general optimization function

数值计算所用材料的物性取自 COMSOL Multiphysics 5.6 软件材料库,其中热电材料选用碲化铋(Bi_2Te_3),Seebeck 系数、热导率、电阻率样点取值详见表 2,均采用 3 次样条插值方法计算。对 TEC 的热端给定恒温边界条件(80 ℃ ~ 150 ℃),冷端给定恒定边界热源(Q = 13.6 W),其余

边界设为绝热边界。

表 2　碲化铋(Bi_2Te_3)基热电材料热物性

Tab. 2　Properties of Bismuth Telluride (Bi_2Te_3) based thermoelectric materials

温度/K	Seebeck 系数/($V \cdot K^{-1}$)	热导率/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
200	1.68×10^{-4}	2.40	1.43×10^{5}
250	1.92×10^{-4}	1.90	1.43×10^{5}
300	2.10×10^{-4}	1.60	1.43×10^{5}
350	2.25×10^{-4}	1.60	1.43×10^{5}
400	2.37×10^{-4}	1.75	1.43×10^{5}

1.4　数值可靠性验证

如图 5 所示,构建 6×10^4 ~ 90×10^4 共 5 组不同网格单元数模型,在热端温度恒为 50 ℃条件下,以 72005/127/060B 型 TEC 平均 ZT 值和冷热端最大温差(ΔT_{max})为评价指标。可以看出,随着网格单元数增加,平均 ZT 值和 ΔT_{max} 逐渐平稳,这是由于 TEC 的温度梯度变化较大的区域主要集中在热电臂内,但模型中热电臂高度小于 2 mm,在保证该区域网格质量的前提下,网格疏密程度对仿真结果并不会产生显著的影响。因此,在上述网格数范围内,两个指标的变化均小于 0.1%。综合考虑计算精度和效率,最终选用 23×10^4 网格单元数作为计算网格。

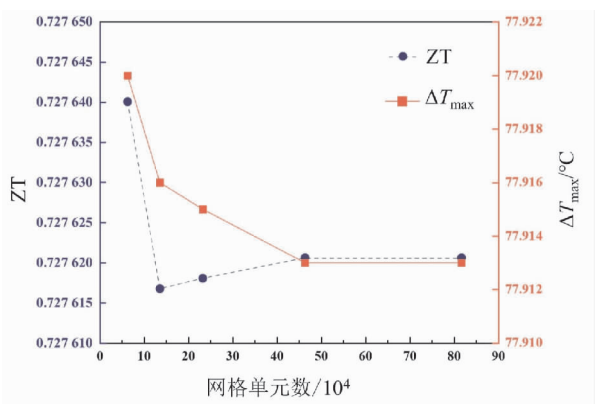


图 5　网格无关性验证

Fig. 5　Mesh independence verification

采用 72005/128/060B 型 TEC 模型的实验测试结果对仿真预测数据进行校验,以验证模型准确性,对比结果如表 3 所示。其中最大输入电流(I_{max})、最大输入电压(U_{max})以及最大冷热端温差均在制冷量为 0 时获得,而最大制冷量($Q_{c,max}$)则是在最大冷热端温差(ΔT_{max})为 0 时获得。分别对比不同温度环境下的 ΔT_{max}、I_{max}、U_{max} 及 $Q_{c,max}$ 值,表明模型计算结果与实验测试结果的偏差均不超过 15%,验证了该数值模型的可靠性,可用于后续高温工况的性能规律探究。

表 3　72005/128/060B 型 TEC 的数值计算结果与实验数据比较

Tab. 3　Comparison of numerical calculation results with data from experiments (72005/128/060B)

T_h/℃	数据来源	ΔT_{max}/℃	I_{max}/A	U_{max}/V	$Q_{c,max}$/W
	实验标定	90.3	5.8	20.5	64.3
80	数值计算结果	90.8	5.0	20.3	54.8
	最大相对误差		14.8%		
	实验标定	95.3	5.8	22.2	69.4
100	数值计算结果	95.8	5.0	21.9	59.2
	最大相对误差		14.7%		
	实验标定	100.3	5.8	23.8	74.5
120	数值计算结果	101.2	5.0	23.6	63.6
	最大相对误差		14.6%		
	实验标定	105.3	5.8	25.4	79.7
140	数值计算结果	105.4	5.0	25.2	68.0
	最大相对误差		14.7%		

2　结果与讨论

2.1　高温环境电机的热电制冷性能分析

2.1.1　高温环境 TEC 制冷性能变化规律研究

基于前文分析,TEC 的制冷能力取决于输入电流的大小,在一定温度下,必然存在最佳运行电流使得 TEC 以最佳工况运行,维持着最低的冷端温度。首先,实验过程中保持油浴循环温度(T_{oil})稳定在 120 ℃,维持 TEC 冷端处的外加热源散热功率(Q_s)为 13.6 W,将 TEC 的输入电流从零逐渐以 0.3 A 间隔递增,测定每一电流工况下达到稳态时 TEC 的冷热端温度和电功率,进而推算出冷热端温差(ΔT)和总体 COP,结果如图 6 所示。可以看出,随着输入电流的增大,TEC 的制冷量逐渐增大,冷端温度逐渐降低,冷热端温差随之增大,总体 COP 却随之降低;直到输入电流达到 3.4 A,冷端温度达到最低值 79.5 ℃,对应冷热端温差为 59.7 ℃。随后进一步增大电流,冷端温度不降反升。如前文分析,主要原因在于此时 Peltier 效应产生的制冷量不足以维持冷端最低温度,Joule 效应产生的热量已经影响到了 TEC 整体制

冷性能。

需要指出的是,当电流超过 3.7 A 后,尽管冷热端温差继续增大,但 TEC 已偏离该温度下的最佳运行工况,此时温差持续增大是热电臂内部 Joule 热效应产生热量堆积的结果。在输入电流达到 4.3 A 时,冷热端温差达到最大值 63.9 ℃,随后出现下降趋势。实际上,结合前文分析可知,此时 TEC 的运行状态已开始从能维持最低冷端温度的最佳运行工况向冷热端温差为零的最大制冷量工况转变。

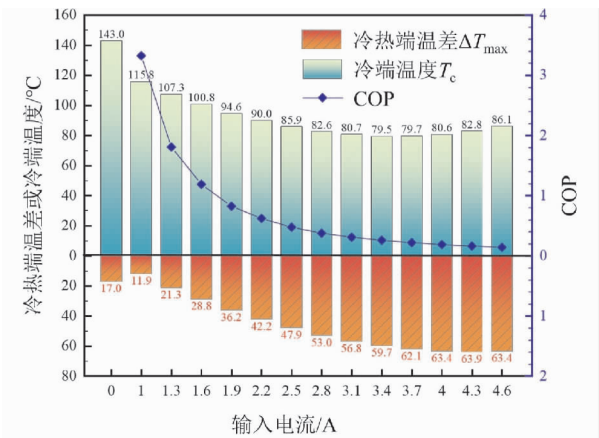


图 6 TEC 的冷端温度、冷热端温差和 COP 随输入电流的变化(Q_s = 13.6 W, T_{oil} = 120 ℃)

Fig. 6 TEC's cold end temperature, difference of temperature and COP change with the input current (Q_s = 13.6 W, T_{oil} = 120 ℃)

2.1.2 不同环境温度下 TEC 最佳工况分析

随着钻采装置下沉,环境温度越来越高,恶劣的外环境必然导致电子设备 TMS 的制冷性能恶化,并对 TMS 的有效性和可靠性提出更高要求。在前文 120 ℃油浴循环实验的基础上,进一步测量了 TEC 在 80 ℃ ~ 150 ℃温度区间内的制冷性能。图 7 所示为 TEC 所能维持的冷端最低温度($T_{c,min}$)和冷热端最大温差(ΔT_{max})随油浴温度(T_{oil})的变化,测试过程维持 80 ℃ ~ 150 ℃油浴循环温度,此时冷端外加热源散热功率(Q_s)恒为 13.6 W。可以看出,随着循环油浴温度(T_{oil})升高,TEC 冷端最低温度和冷热端最大温差均逐渐提升,但是后者较前者的提升幅度小得多。例如,循环油浴温度从 90 ℃提升到 100 ℃、从 100 ℃提升到 110 ℃时,TEC 冷端最低温度分别升高 10.5 ℃、8.4 ℃,而冷热端最大温差仅仅分别升高 0.9 ℃、0.6 ℃。整体上看,循环油浴温度每升高 10 ℃,TEC 冷端最低温度升高约 10 ℃,但冷热端最大温差的变化相较之下并不显著。这是由于 TEC 的热端通过铜散热器与油浴循环相连,油浴循环温度较为恒定,此时铜散热器与油浴循环一起形成一个具有很大等效热容量的热沉,极大地削弱 TEC 冷端温度对热端温度的影响。

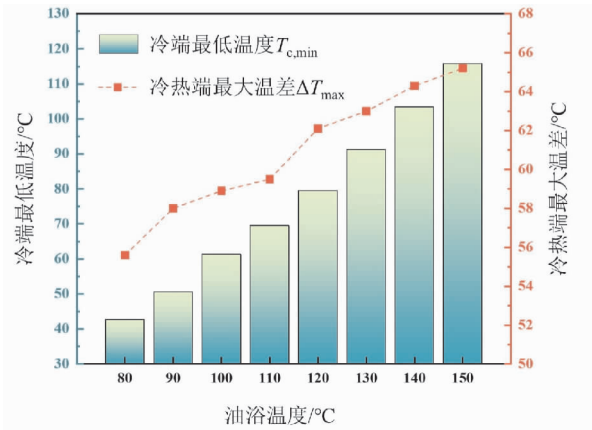


图 7 TEC 冷端最低温度和冷热端最大温差随油浴温度的变化(Q_s = 13.6 W)

Fig. 7 TEC's min. cold end temperature and max. difference of temperature change with the oil bath temperature (Q_s = 13.6 W)

图 8 所示为 TEC 的最佳电流(I_{opt})及整体 COP 随油浴温度(T_{oil})的变化趋势。可以看出,在油浴温度 80 ℃ ~ 150 ℃范围内,TEC 最佳工作电流几乎保持在 3.4 A 不变。这意味着在恒定的散热条件下,改变环境温度不会影响 TEC 的最佳运行电流,只会使得 TEC 冷端温度和冷热端温差整体提升或降低,该结论与传统热泵的性能变化趋势相似,即冷热端温差越大,系统整体 COP 越低。

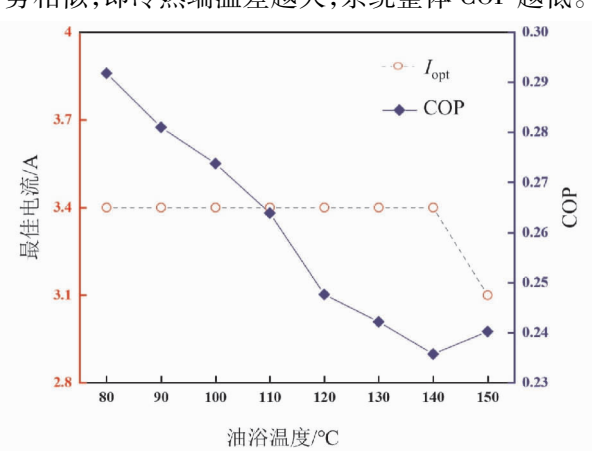


图 8 TEC 最佳电流和 COP 随油浴温度的变化(Q_s = 13.6 W)

Fig. 8 TEC's optimum current and COP change with the oil temperature (Q_s = 13.6 W)

经此分析,可以认为在固定散热条件下,提升

环境温度,不会改变 TEC 最佳运行工况,只会使 TEC 的工况点发生整体向上“平移”。因此,改善热端散热条件是提升 TEC 整体制冷性能的有效途径。为此,一般通过主动方式(如水冷、风冷等)[38-40]或被动方式(如热管、散热器等)[41-43]释放热端积累的热量,前者因引入额外能耗而降低整体能效,而后者散热能力十分有限。近年来出现了一些新颖的解决办法,例如,将热电臂的热端设计成双异质半导体结构,使热端的能量以光子的形式释放出来,从而减少了热端散热,提高了装置的冷却能力[44]。

2.2　极端环境 TEC 内热点分布特性数值研究

本研究还通过数值计算模型捕捉到极端环境下 TEC 运行时的内部温度场变化。当有直流电通过时,热电臂内部 Peltier 效应与 Joule 效应两者之间存在竞争关系,随着电流大小变化,二者在热电制冷中的主导地位也将发生变化。在较高输入电流下,Joule 效应的作用往往很明显,电臂自身产热量大幅增加,甚至影响到了 TEC 内部温度场和热点分布。因此,本研究通过数值计算观察到 TEC 内部局部温度场变化,如图 9 所示为热端温度恒为 120 ℃且冷端施加了 13.6 W 散热源的工况时,TEC 部分结构的温度分布随输入电流的变化。不难看出,随着输入电流从 1 A 逐渐增加到 7 A,TEC 的热点发生了偏移。当电流从 1 A 逐渐增加到 3 A 过程中,热电臂内部 Peltier 效应占据主导,TEC 制冷量逐渐增大,冷端温度逐渐降低,热电臂上半区域温度普遍降低,表现为图中代表相对低温的蓝绿色区域向下扩张,此过程中热点保持在热端。然而,当电流增加到 4 A 时,在热电臂内 Joule 效应的影响逐渐显现,热电臂上半部分温度开始上升,表现为图中代表相对低温的蓝绿色区域向上收缩而代表相对高温的橙黄色区域向上扩张。进一步增加电流至 6 A,发现热点从 TEC 热端偏移到了热电臂内部某个区域,如图 9(8 A)中红色区域标记。随着电流进一步增大,Joule 效应占据主导,热电臂呈现出两端低温、中间高温的温度分布特性,此时,热电臂内部的热传导方向不再是从下部分传导至上部分,而是从中间往上下两部分传导,且 TEC 整体导热也不再是从热端向冷端的单向一维导热。未来可在 TEC 内部填充相变材料吸收热点处额外的热量,以减少热电臂内部热量堆积,缓和这一现象,以进一步改善 TEC 在高电流下的制冷性能。

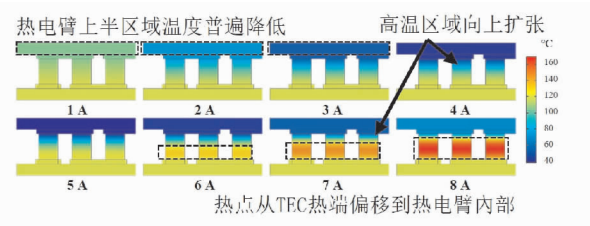


图 9　TEC 内部温度分布随输入电流的变化(T_h = 120 ℃, Q_s = 13.6 W)

Fig. 9　Temperature distribution inside TEC changes with input current (T_h = 120 ℃, Q_s = 13.6 W)

2.3　TEC 最大制冷量与 COP 数值预测

通过数值计算模型,进一步预测不同温度下 TEC 的制冷性能,探讨 TEC 最大制冷量的变化规律。其中,为 TEC 冷端设置热功率恒为 13.6 W 的边界热源,热端设为恒定温度,改变输入电流,当冷热端温差缩小到 0 ℃时即可取得最大制冷量($Q_{c,max}$),结果如图 10 所示。由于冷端存在散热源,TEC 的最大制冷量较空载工况(如表 3)更低。数值计算结果表明,随着热端温度的升高,最大制冷量也随之增大,而对应的最大输入电流几乎不变。另外,从图 10 的增长趋势来看,最大制冷量与热端温度(T_h)之间存在近似线性的关系。

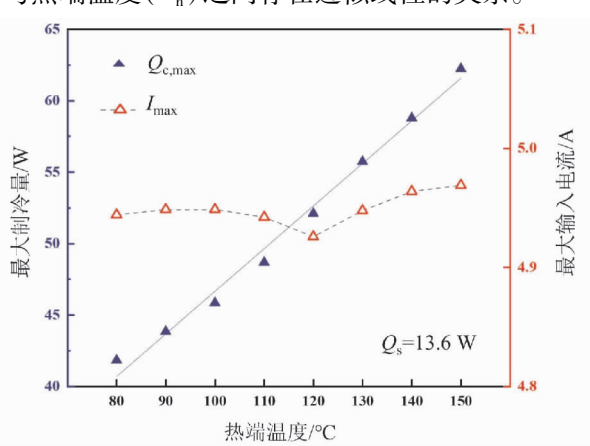


图 10　TEC 的最大制冷量和对应的最大输入电流随热端温度的变化(Q_s = 13.6 W)

Fig. 10　TEC's max. cooling capacity and max. current change with the hot end temperature (Q_s = 13.6 W)

从式(7)可以看出,当最大输入电流不变时,最大制冷量可以视作冷端温度的单值线性函数,而在最大制冷量工况下冷端温度与热端温度相同,才会有图 10 所示的最大制冷量随热端温度发生线性变化,不同温度下热物性的变化是导致图中工况点稍微偏离直线的主要原因。

同时,本模型还计算了相应工况下的 COP 值,图 11 所示为热端温度恒为 120 ℃、冷端施加了 13.6 W 散热源的工况时,维持一定冷热端温差下 TEC 的 COP 值随电流的变化趋势。分析可知,在各工况下 TEC 运行的 COP 均随着输入电流的增加而呈现出先快速增加后缓慢降低的趋势,所有工况下 COP 均低于 1,且绝大部分情况下的 COP 低于 0.5,维持大温差如 70 ℃工况下的 COP 甚至小于 0.1。如前文描述,限制 TEC 在实际工程中推广应用的主要因素之一,就是其相较于传统制冷技术具有较低的能源利用效率,吸收一定值的热量,往往需要消耗一倍以上的电能。各温差工况下的 TEC 最大 COP 增幅不尽相同,且呈现出 COP 增幅在低温差较大而在大温差下较小的特点。例如,冷热端温差从 30 ℃降低到 20 ℃,最大 COP 从 0.54 增加到 0.79,增加了 0.25,而当温差从 70 ℃降低到 60 ℃时,最大 COP 从 0.07 增加到 0.15,仅增加了约 0.08。

图 11 所示为固定冷热端温差(ΔT)时 TEC 的 COP 值随输入电流的变化。可以看出,COP 取到最大值时对应的最佳工作电流并不相同,且随着冷热端温差的降低,TEC 运行 COP 取最大时对应的最佳工作电流不断减少。主要原因在于,要维持较小的温差,TEC 要产生的制冷量较少,所需输入电流更低。

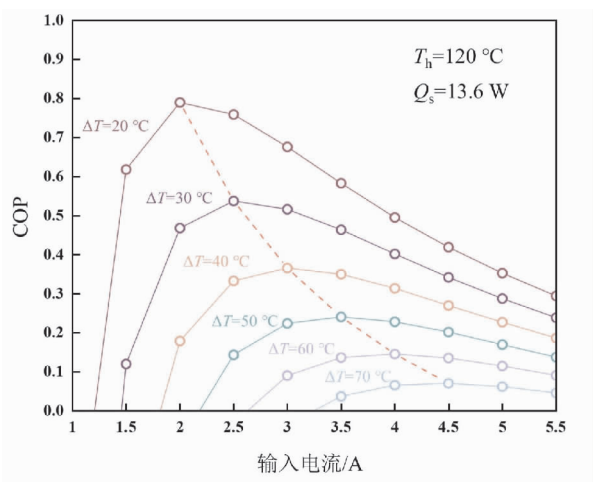


图 11 在固定冷热端温差下 TEC 的 COP 随输入电流的变化(T_h = 120 ℃, Q_s = 13.6 W)

Fig. 11 TEC's COP changes with the input current under constant difference of temperature (T_h = 120 ℃, Q_s = 13.6 W)

因此,与传统热泵制冷技术相比,TEC 在冷热端温差越小的情况下,具有更大的能源效率和节能潜力。在实际深井探测、开采工程应用中,电子设备内环境和深井外环境之间往往存在着很大温差,因此当采用 TEC 的热管理系统还需要考虑系统耗能时,一般耦合被动热防护(如杜瓦瓶、隔热棉等)、相变吸热材料、热管等其他制冷技术,以尽可能降低 TEC 冷热端温差。

3 结论

本研究通过实验与数值模拟相结合的方法,系统评估了热电制冷器在深井极端高温环境(80 ℃~150 ℃)下作为一种直接能量转换(电热转化)器件用于电子设备热管理的可行性与关键性能特性。

1)TEC 具有高效的温控能力。在模拟 120 ℃井下环境、13.6 W 热负荷下,可维持最大 62.1 ℃的温差,将电子设备表面温度控制在 80 ℃安全区间内。研究发现,环境温度升高(80 ℃至 150 ℃)时,TEC 冷、热端温度整体抬升,而最大温差增幅相对较小,并发现存在一个最佳工作电流 3.4 A,在此电流下可获得最低冷端温度,且该电流值对环境温度变化不敏感。这表明,改善热端散热是提升系统整体制冷性能和能效的关键途径,这一发现对于优化 TEC 的能量利用效率至关重要。

2)揭示了高输入电流下 TEC 内部的热行为特性。随着电流增大,焦耳热效应加剧,导致热电臂内部(而非热端)形成高温热点,热量传递模式也由单向传导转变为双向传导。这表明,通过内部集成相变材料进行热缓冲可能是改善高电流性能的一个潜在方向。

3)TEC 最大制冷量随热端温度升高近似线性增长,对应的最大输入电流基本保持不变。COP 随电流先升后降,且在大温差下显著降低(普遍低于 1.0),最佳 COP 对应的工作电流随温差减小而降低。为提升深井高温环境下基于热电制冷技术的热管理系统的整体能效,下一步可探索与被动散热或其他制冷技术的耦合方案,以期在实际应用中实现更优的综合 COP。

参考文献

[1] 麻世鸿, 何峻杰, 王秋旺, 等. 应用于深井脉冲源装备的有序堆积相变胶囊热防护数值研究[J]. 科学通报, 2023, 68(2/3): 282-292.
Ma S H, He J J, Wang Q W, et al. Numerical investigation of the thermal protection mechanisms of phase change capsules with orderly stacked layouts applied to pulse power sources in deep wells[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(2/3): 282-292.

[2] Hyne N J. Nontechnical guide to petroleum geology, exploration, drilling, and production[M]. 2nd ed. Tulsa, OK: PennWell Corporation, 2001.

[3] Lv Y G, Chu W X, Wang Q W. Thermal management systems for electronics using in deep downhole environment: A review[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 139: 106450.

[4] Marshall G J, Mahony C P, Rhodes M J, et al. Thermal management of vehicle cabins, external surfaces, and onboard electronics: An overview[J]. Engineering, 2019, 5(5): 954-969.

[5] Watson J, Castro G. A review of high-temperature electronics technology and applications[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(12): 9226-9235.

[6] Ma Y P, Shang B F, Hu R, et al. Thermal management of downhole electronics cooling in oil & gas well logging at high temperature[C]//2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). IEEE, 2016: 623-627.

[7] Tang S, Liang Z, Zhu Y L. Numerical investigation on heat transfer characteristics in electronic cavity of downhole measurement-while-drilling system[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2021, 13(1): 011022.

[8] Gao W K, Liu K, Su Y N, et al. Active cooling method for downhole systems in high temperature environment[C]// SPE Western Regional Meeting. SPE, 2019: D021S002R004.

[9] Cai Y, Wang Y, Liu D, et al. Thermoelectric cooling technology applied in the field of electronic devices: updated review on the parametric investigations and model developments[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 238-255.

[10] Zhao D L, Tan G. A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(1/2): 15-24.

[11] Enescu D, Virjoghe E O. A review on thermoelectric cooling parameters and performance[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 903-916.

[12] Peng J Y, Liu D R, Bai S L, et al. Lattice plainification and intercalation advances power generation and thermoelectric cooling in n-type Bi2(Te, Se)3[J]. Advanced Energy Materials, 2025, 15(18): 2404653.

[13] Poudel B, Hao Q, Ma Y, et al. High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys[J]. Science, 2008, 320(5876): 634-638.

[14] Kim S I, Lee K H, Mun H A, et al. Dense dislocation arrays embedded in grain boundaries for high-performance bulk thermoelectrics[J]. Science, 2015, 348(6230): 109-114.

[15] Gong T R, Ma C W, Li L H, et al. High-performance planar thin-film thermoelectric cooler based on sputtered nanocrystalline Bi2Te3/Bi0.5Sb1.5Te3 thin films for on-chip cooling[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(11): 17008-17017.

[16] Wang B, Li S W, Luo Y B, et al. A new thermoelectric Ag8SiSe6 argyrodite for room temperature application: Sensitivity of thermoelectric performance to cooling conditions[J]. Materials Advances, 2024, 5(9): 3735-3741.

[17] 郭栋才, 盛强, 杨鹏, 等. 基于热电效应的高效环控系统[J]. 化工学报, 2020, 71(S1): 404-410.
Guo D C, Sheng Q, Yang P, et al. Environmental control system based on thermoelectric cooler[J]. CIESC Journal, 2020, 71(S1): 404-410.

[18] 李运泽, 魏传锋, 袁领双, 等. 应用热电制冷器的微型航天器主动温度控制及仿真[J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 149-152.
Li Y Z, Wei C F, Yuan L S, et al. Simulation of micro spacecraft active temperature control system using thermalelectic cooler[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(10): 149-152.

[19] 余延刚, 陈玮玮, 李鑫郡, 等. 基于热电制冷的机载电子设备冷却舱内自然对流特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(4): 634-642.
Yu Y G, Chen W W, Li X J, et al. Research on characteristics of natural convection in cooling chamber of airborne avionics based on thermoelectric refrigeration[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4): 634-642.

[20] 张磊, 沈苑, 祁见忠, 等. 基于热电制冷的某舱外载荷两级控温设计[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(4): 380-386.
Zhang L, Shen Y, Qi J Z, et al. Two-stage thermal

control design of an extravehicular load based on TEC [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(4): 380-386.

[21] 王小群, 杜善义. 热电制冷技术在航空航天领域的应用[J]. 中国航天, 2006(10): 22-24.

[22] Turner W E, Seppa R, Turner W E. Cooled electrical system for use downhole: US09/064898[P]. 1999-08-03.

[23] Borg-Warner Corporation. Downhole thermoelectric refrigerator: US06/333609[P]. 1983-03-01.

[24] Sinha A, Joshi Y K. Downhole electronics cooling using a thermoelectric device and heat exchanger arrangement [J]. Journal of Electronic Packaging, 2011, 133(4): 041005.

[25] Baker Hughes Inc. Downhole tool with thin film thermoelectric cooling: US12/184684[P]. 2010-02-04.

[26] 赵标伟. 随钻录井仪井下耐高温控制系统设计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018:11.

[27] Soprani S, Engelbrecht K, Nørgaard A J. Active cooling and thermal management of a downhole tool electronics section[C]// Refrigeration Science and Technology. International Institute of Refrigeration, 2015: 4684-4691.

[28] Vineyard G. Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling[J]. Physics Today, 1959, 12(5): 42.

[29] Lou L Y, Yang J M, Zhu Y K, et al. Tunable electrical conductivity and simultaneously enhanced thermoelectric and mechanical properties in n-type Bi2Te3 [J]. Advanced Science, 2022, 9(27): 2203250.

[30] Mao J, Chen G, Ren Z F. Thermoelectric cooling materials[J]. Nature Materials, 2021, 20(4): 454-461.

[31] Rowe D M. Thermoelectrics handbook: Macro to nano [M]. Boca Raton: CRC Press, 2018: 21.

[32] Chen W H, Liao C Y, Hung C I. A numerical study on the performance of miniature thermoelectric cooler affected by Thomson effect [J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 464-473.

[33] Du C Y, Wen C D. Experimental investigation and numerical analysis for one-stage thermoelectric cooler considering Thomson effect[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(23/24): 4875-4884.

[34] Huang M J, Yen R H, Wang A B. The influence of the Thomson effect on the performance of a thermoelectric cooler[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(2): 413-418.

[35] Mitrani D, Salazar J, Turó A, et al. One-dimensional modeling of TE devices considering temperature-dependent parameters using SPICE[J]. Microelectronics Journal, 2009, 40(9): 1398-1405.

[36] Wang X D, Huang Y X, Cheng C H, et al. A three-dimensional numerical modeling of thermoelectric device with consideration of coupling of temperature field and electric potential field [J]. Energy, 2012, 47(1): 488-497.

[37] Jaegle M. Multiphysics simulation of thermoelectric systems-modeling of Peltier-cooling and thermoelectric generation[C]// COMSOL Conference 2008 Hannover, 2008. https://www.comsol.com/paper/multiphysics-simulation-of-thermoelectric-systems-modeling-of-peltier-cooling-and-thermoelectric-generation-5256.

[38] Tian X X, Asaadi S, Moria H, et al. Proposing tube-bundle arrangement of tubular thermoelectric module as a novel air cooler[J]. Energy, 2020, 208: 118428.

[39] Bulman G, Barletta P, Lewis J, et al. Superlattice-based thin-film thermoelectric modules with high cooling fluxes [J]. Nature Communications, 2016, 7: 10302.

[40] Chowdhury I, Prasher R, Lofgreen K, et al. On-chip cooling by superlattice-based thin-film thermoelectrics [J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(4): 235-238.

[41] He W, Zhang G, Zhang X X, et al. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler[J]. Applied Energy, 2015, 143: 1-25.

[42] Ibañez P M, Bermejo B J, Martín G C, et al. Thermoelectric cooling heating unit performance under real conditions[J]. Applied Energy, 2017, 200: 303-314.

[43] Huang Z W, Liu M Q, Chen H B, et al. Oriented thermal conductive and dimensionally stable phase change composite for hot-side thermal management of thermoelectric coolers [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 252: 115078.

[44] Yang Z, He B, He X, et al. Enhancement of thermoelectric cooling by hot-end electroluminescence [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 267: 115871.

(编 辑 邵 煜)

通信作者简介



褚雯霄,西安交通大学能源与动力工程学院教授,博士生导师,获得国家级海外高层次青年人才、西安交通大学“青年拔尖人才 A 类”计划资助。主要从事强化传热传质机理、新型热管理系统、储能与节能装备等方向研究。在 *Nature Communications*、*Energy Conversion and Management* 等 SCI 期刊发表论文 60 余篇,授权发明专利 8 件。主持并参与国家自然科学基金青年项目、“十四五”国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金重点项目等,主持航天五院西安分院、中科院光学精密机械研究所、中兴通讯等产学研项目多项。担任 *Energy Storage and Saving* 期刊执行编辑。