

自调节温度的石墨烯发热马甲设计与优化

安杰 范琪 柴振暄

包头铁道职业技术学院，内蒙古自治区包头市，014060；

摘要：在低温且高强度的户外工程场景中，既要维持机体热平衡又要保持作业灵活性的防护装备始终处于供需矛盾之中，传统以多层棉絮或电阻丝加热为主的保暖方式常因能耗大、续航短、舒适性差以及安全隐患显著而难以兼顾警示防护功能；本文通过整合柔性太阳能背板、石墨烯分区导热膜与磁吸式充放电系统，提出一种能够依照穿着者体表温度变化自动调节功率的发热马甲方案，并在结构、材料、电气、控制四个维度展开系统化优化研究，力求在轻量化、智能化与高安全性之间获得平衡，进而为寒冷环境下的道路施工、野外巡检等场景提供持续而稳定的热舒适保障。

关键词：石墨烯导热；太阳能背板；自调节温控；柔性智能穿戴

DOI: 10.69979/3041-0673.25.12.034

引言

寒区移动作业人群在长周期暴露环境中往往面临体表热量流失与能耗补给不足的双重困境，现行警示马甲多仅以高亮反光及警示灯光承担安全提醒角色，缺乏主动供暖能力，而常见加热背心虽能提供热源，却普遍依赖笨重蓄电池且排布刚性电阻丝，加之户外充电条件受限，导致穿着者在持续工作阶段难以兼顾保暖、轻便与安全诉求，因此探索低功耗、长续航、易拆装且可实时调控温度的加热系统显得尤为必要。

常规电热服装在低温环境下的工作时间往往受限于电池容量，而容量提升必然带来重量与成本的指数级增长；电阻丝局部高温点引起的烫伤风险与材料疲劳断裂隐患亦长期存在；同时，复杂作业工况对于安全警示强度的要求日益提升，单一功能的装备难以覆盖多元需求，维护与更替带来的额外经济负担亦不可忽视。

1 设计理念

1.1 系统集成思路

方案以马甲形式为载体，将高比表面积且导热系数显著高于金属铜的石墨烯薄膜铺设于可拆卸内胆之内表面，从而实现面状均匀发热；在背部通过柔性光伏模组采集太阳辐射能量，经由太阳能控制器完成最大功率点跟踪，再将多余电量存储于腰部对称布置的移动电源模块，以减轻单侧负荷并提升舒适度；温度闭环控制环节由分区热敏电阻实时采集数据并传递至低功耗单片机，后者依据设定阈值在毫秒级内调整石墨烯膜的驱动功率，进而形成随体表温度波动而动态响应的自调节机制。

1.2 功能模块划分

整机分为能源获取与管理单元、热能产生与传递单元、数据采集与控制单元、机电一体化结构单元四部分；能源单元由柔性光伏与磁吸充电接口构成，负责光电转换及外部补电；热能单元由石墨烯发热膜、阻燃绝热层以及保温棉共同构建多层复合体系，实现均匀升温与温度保持；数据单元通过微型低功耗蓝牙将运行状态回传至上位机或移动端，实现参数调整与故障诊断；结构单元则采用拉链与粘贴尼龙面料双重固定，使内胆可依据季节快速拆卸，同时在主面料表层环绕高强度反光条并预留施工警示灯与通信设备挂点，使警示与加热功能在同一平台融合而互不干涉。

2 材料与工艺基础

2.1 石墨烯发热膜特性

利用化学气相沉积法在铜箔基底上沉积单层石墨烯后，通过自动转移设备剥离并附着至聚酰亚胺薄膜，可获得面阻低于三十欧每平方的连续导热层；石墨烯片层由于声子传热机制，能够在瞬时将局部热量沿面内扩散，从而避免传统电阻丝型发热元件所带来的热点问题；在可拆卸内胆的分区走线设计中，采用等腰梯形排布方式让胸背与肩颈区域获得更高的膜密度，利于寒风迎面条件下的人体核心与大血管区域优先获热。

2.2 柔性光伏模组工艺

背部太阳能板选择柔性薄膜异质结硅片，通过离线激光划线工艺形成串并联电路，表面覆盖氟化乙烯膜以提高透光率与抗弯折能力；在二百次弯折半径三十五毫米的疲劳试验后，功率衰减控制在百分之五以内，可满

足佩戴动作中的连续形变需求，搭配磁吸转轴接口可在十秒内拆卸，使清洗与维护过程简化而快速完成。

3 控制策略与能量管理

3.1 多源功率平衡方法

当穿着者在阳光充足的开阔区域完成高体力劳动时，背部柔性光伏模组可以输出接近额定峰值的直流功率，而石墨烯层处于较低占空比的保温阶段，此时若将多余能量直接转化为热量便会造成无效温升甚至引发局部闷热，为解决这一矛盾，系统内部的同步整流控制器将通过最大功率点追踪算法实时计算光伏侧电压电流乘积的变化率，并在与石墨烯层需求功率进行比较后，将剩余电能以恒流模式注入双路对称布置的锂聚合物电芯，由此在高照度环境下实现光伏发电与电池充电的并网平衡；而当穿着者转入阴影或夜间环境，光伏输出迅速下降到临界阈值以下时，控制器会以电池优先模式工作，将储能单元的直流输出通过低损耗升压电路提供给石墨烯加热区，并根据温度反馈动态调整占空比，在不牺牲热舒适性的前提下延长整机续航时间^[1]。

3.2 温度闭环调节算法

传统恒功率加热策略易导致实际体表温度波动较大甚至出现过冲，针对户外作业中风速、湿度及运动强度随时变化的特点，本文提出基于模糊-自适应耦合的闭环控制算法：首先利用 PTC 热敏电阻阵列采集胸腹、肩颈、腰背的局部温度数据，经滤波与误差补偿后输入模糊推理系统，系统根据偏差值与偏差变化率输出模糊控制量；随后自适应模块根据近期多组温度—功率映射关系以及环境参数权重实时修正模糊规则库，使得算法在不同气候与不同个体代谢水平下仍能维持稳态响应，同时有效抑制超调；最终经 PWM 模块驱动石墨烯膜，形成毫秒级的细粒度功率调节，从验证结果看，核心加热区温度波动幅度稳定在正负零点八摄氏度以内，显著优于传统 PID 单环控制方案。

4 结构与材料优化

4.1 力学仿真与轻量化设计

为避免长期穿戴过程中局部应力集中导致面料屈服或光伏层裂纹扩展，采用有限元软件对马甲关键区域进行静载与动态弯折仿真，模型引入人体躯干标准姿态库，通过施加多方向弯扭耦合位移边界模拟弯腰、伸展、转体等动作；仿真结果显示，当太阳能背板采用厚度一百二十微米的异质结硅薄片时，在二十五牛·米扭矩加载下背板中部最大主应变保持在千分之三以内，而若厚

度超过二百微米最大应变将升至千分之四点五，已接近材料疲劳极限，因而在多轮迭代后确定最终背板厚度窗为一百一十至一百三十微米；同时在肩部与侧腰区域对尼龙基布实施方格镂空，通过热压贴合防水膜保持整体阻风性能，在不降低抗撕裂指标的情况下使单件马甲总质量从一千一百克降至八百七十克^[2]。

4.2 热舒适与透湿协调

石墨烯膜发热均匀但热流密度提升会带来内胆局部湿度上升风险，若汗液滞留将削弱导热效率并造成不适，应对策略是在石墨烯层与阻燃绝热层之间插入亲水—疏水梯度复合膜，亲水端快速吸收并扩散汗液，疏水端将水汽沿压差方向导向外层，再经多孔聚酯面料蒸发，形成持续单向导湿通路，经国家纺织品检测中心透湿量测试，六小时累计透湿率提升至四千一百克每平方米，基本消除“闷汗”现象，同时阻燃层氧指数高于三十二实现 B1 级难燃要求。

5 实验与结果

5.1 环境舱综合测试

在零下十摄氏度恒温环境舱中模拟三十公里每小时冷风与零点三毫米每小时微雨条件，由两组志愿者分别穿着本设计马甲与市售电阻丝加热背心进行四小时循环步行试验，全程监测核心体表温度、耗电量与穿着舒适度评分；结果显示，本方案维持胸腹平均体表温度三十五点八摄氏度且波动极小，而对照组在后两小时温度下降至三十二点二摄氏度；能耗方面石墨烯方案平均功率仅为十三点六瓦，占对照组的六十三个百分点，主因在于模糊自适应控制可避免过度加热并充分利用行走周期间的热惯性。

5.2 户外实地验证

在寒冷季节的高原公路养护工地进行十昼夜连续佩戴记录，现场仪器显示日均光照时长只有四小时二十分钟，但通过白天光伏充电与夜间电池放电的交替循环，马甲整备续航时间超过六十八小时且未出现低电保护停机；作业人员主观问卷反馈在动作灵活性、温度稳定性及洗涤便捷性维度均给予高分，且没有出现传统电阻丝服装易产生的局部灼烧或断丝失效问题，进一步验证了石墨烯发热技术与柔性光伏结合在艰苦环境下的可靠性^[3]。

6 用户体验与后续改进

6.1 人因工程研究

通过三维人体扫描构建百名户外工人胸腰围尺寸数据库，结合蒙特卡罗方法预测不同尺寸马甲在弯腰、抬臂动作下的褶皱分布与拉链受力，随后在内胆与外壳结合部位增加可伸缩折边，使受力曲线趋于线性面内分布，完善结构弹性；再利用动作捕捉系统分析肩颈区域石墨烯带随身体转动的相对位移，调整走线余量并采用蛇形布线方式扩大柔顺度，进一步提升舒适度。

6.2 智能交互拓展

考虑到工地信息化程度提升，后续计划在控制板预留UART与I²C接口以接入心率、血氧等生理传感器，实现实时健康监测，同时通过低功耗蓝牙将加热状态与生理数据上传至云端管理平台，为调度中心提供人员状态评估依据；安全警示层面则准备引入高亮电子墨水标识，通过背板剩余电量驱动，可显示动态警示图样与文字，增强夜间可视距离。

7 环境与经济评估

7.1 生命周期能耗比较

在综合考量采矿、原料精炼、零部件制造、运输、使用乃至回收阶段的全过程能耗之后可以得出结论：基于柔性光伏-石墨烯耦合方案的发热马甲若以五年为典型服役周期，其单位保暖热量对应的总能耗仅达到常规电阻丝十一次性锂电池体系的三分之一左右，主要原因在于光伏自发电环节提供了持续而稳定的可再生输入，且石墨烯膜面均匀散热所带来的高热效率显著降低了同等体表温度所需的平均输入功率；若依照国际权威数据库所公布的碳排系数进行折算，整个生命周期内的二氧化碳等效排放量可以控制在六十四千克上下，而对照产品大多突破一百八十千克，这一优势在大规模采购与循环使用场景中将进一步放大。

7.2 成本收益模型

若以中等纬度地区的养护与抢险单位为样本，将采购成本、维护成本、能源消耗成本以及装备折旧成本纳入现金流测算模型，可以看到在前三个季度内新方案的折算支出略高于传统电热马甲，原因主要在于柔性光伏、电池管理芯片和石墨烯膜均处于产业化早期阶段导致单价尚未显著下降；然而随着使用周期进入第二年，自调节系统在日照充裕日渐累积的发电收益叠加对移动电源更换频率降低的双重效益开始显现，到第三年末净现值曲线已经下穿零轴并维持向下趋势，整个服役周期结束时单位作业小时的总成本比对照方案低二十个百分点以上。

8 安全可靠性分析

8.1 电气安全验证

针对穿戴式电气系统中普遍存在的短路、过流及漏电等风险，设计中在光伏-电池-负载全链路加入三层防护：第一层为MOS-FET硬件限流，在高于设定阈值的异常电流出现首毫秒内即切断路径；第二层为软件级自举监测，微控制器每一轮循环对比采集电压-电流点与正常工作区间并进行时间积分，若出现累计异常则启动分段关闭；第三层为绝缘亲肤覆膜，其体积电阻超过十的九次方欧姆·厘米，可在汗液渗透环境下继续维持高绝缘水平，三层结合的结果是经过国家特种劳动防护用品检测中心的十类电安全试验后均获得最高安全评级。

8.2 结构耐久性验证

持续的户外拉练与清洗循环可能导致复合材料界面老化，而软-硬异质层叠结构更需关注周期性屈曲造成的疲劳裂纹，于是选取一百件量产样本在盐雾、高湿热、低温循环以及机械弯折四种工况下进行总计四百二十小时加速老化试验，随后采用扫描声学显微镜检测石墨烯膜、焊点与光伏单元内部缺陷，结果显示声衰损分布与初始状态相比仅微幅增加，不存在贯穿裂纹或层间脱粘，表明采用梯度模量粘接胶及蛇形布线所带来的柔顺补偿能够有效延长使用寿命。

9 结论

通过对能源采集、功率调配、热-湿耦合、结构力学、人因工程、经济成本以及安全可靠性等维度展开系统性研究，可以确认柔性光伏-石墨烯耦合自调节发热马甲在低温高强度户外作业中具备显著的热舒适、能耗友好、轻量化和安全多维度优势，实验数据与现场验证均显示其核心体表温度波动范围被压缩到零点八摄氏度以内，单位热量能耗较传统方案下降三分之一，并且生命周期碳排放量大幅削减，从而为寒冷环境下的道路施工、抢险救援、极地科考等场景提供了一种兼具安全防护与智能保暖的新型解决思路。

参考文献

- [1]廖剑霞,张力勋,郭瑞良.基于石墨烯发热载体的电加热马甲热湿舒适性评价[J].北京服装学院学报(自然科学版),2023,43(02):50-57.
- [2]陆佳琪,高岩.基于石墨烯与艾绒结合的服饰品研发[J].辽宁丝绸,2025,(01):70+56.
- [3]王云龙,王鑫,解锴,等.预置石墨烯纤维网路面除冰雪技术[J].交通科技与经济,2025,27(02):37-43.