引用格式：李亚澍，祝　薇，邓　元. 消防机器人热防护材料与技术研究进展[J]. 材料工程，2026，54(3)：67-80.
LI Yashu，ZHU Wei，DENG Yuan. Research progress in thermal protection materials and technologies for firefighting robots [J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(3)：67-80.

消防机器人热防护材料与技术研究进展

李亚澍，祝　薇*，邓　元*
（北京航空航天大学 材料科学与工程学院，北京 102206）

摘要：消防机器人作为一种可以替代消防员进入火场进行灭火施救的关键装备，逐渐受到广泛的关注，其智能化与自主化已成为主要发展趋势。然而，消防机器人在火场作业中将面临复杂的热环境挑战，其核心控制部件以及为实现智能化自主作业加装的传感器也面临高温失效的风险。因此，高效可靠的热防护材料与技术对于保障消防机器人稳定运行至关重要。本文聚焦消防机器人热防护问题，重点综述了防热涂层、隔热材料、相变储能材料等关键热防护材料的应用现状，并系统梳理了整体热防护方案和核心部件防护设计等热防护技术的研究进展。同时，总结了现有技术的不足，主要包括材料耐高温极限与轻量化矛盾、长期稳定性与成本控制等方面仍尚需研究，并从智能化热防护系统、传感器集成与数据融合及动态热管理调控这几方面对未来研究方向进行展望，以期推动消防机器人的工程化应用。

关键词：消防机器人；热防护；隔热材料；多层隔热结构；相变储热材料
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000330　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000330
中图分类号：TB32；TB35　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)03-0067-14

Research progress in thermal protection materials and technologies for firefighting robots

LI Yashu，ZHU Wei*，DENG Yuan*
（School of Materials Science and Engineering，Beihang University，Beijing 102206，China）

Abstract：As critical equipment capable of replacing firefighters in fire suppression and rescue operations，firefighting robots have garnered increasing attention，with intelligence and autonomy becoming major developmental trends. However，such robots face significant challenges in complex thermal environments during firefield operations，where core control components and sensors for autonomous functionality are at risk of thermal failure. Thus，highly efficient and reliable thermal protection materials and technologies are essential to ensure stable robot performance. This paper focuses on thermal protection for firefighting robots，reviewing key materials including thermal protection coatings，thermal insulating materials，and phase-change energy storage materials，while systematically analyzing research progress in integrated thermal protection strategies and critical component protection design. Current limitations are summarized，particularly the trade-off among high-temperature resistance，lightweight properties，long-term stability issues，and cost constraints. Future research directions are proposed，emphasizing intelligent thermal protection systems，sensor integration with data fusion，and dynamic thermal management，aiming to advance the engineering applications of firefighting robots.

Key words：firefighting robot；thermal protection；thermal insulation material；multi-layer insulation structure；phase change thermal storage material

火灾由于其高温、浓烟、毒气及结构坍塌风险对人员生命与财产造成了严重威胁[1]。在消防救援的过程中，消防员常需深入火场核心区域，面临近千摄氏度的高温炙烤与热辐射侵袭，生命安全受到严重威胁[2]。据统计，全球每年因火场极端热环境导致的消防员伤亡案例中，有超过60%的案例与火场高温热暴

露直接相关。为降低人员伤亡风险，消防机器人逐渐成为火场救援的关键技术装备，而其发展也从早期的远程操控型向智能化、自主化方向演进[3]。目前新一代智能消防机器人需要满足其在室内火场环境中完成目标识别、自主寻的、路径规划等智能化、自主化作业需求，因此一方面消防机器人需满足室内火场高温高热环境的应用需求，另一方面消防机器人为实现智能化、自主化作业所加装的核心控制部件及外置传感器等面临高温失效的风险，为此需要对消防机器人进行热防护研究。

热防护主要是指通过技术手段或材料应用，对物体、设备或系统进行保护，使其在高温、热辐射、火焰等极端热环境中免受损害，维持正常功能或延长耐受时间，其核心目标是阻隔、吸收或耗散热能，避免内部结构因过热而失效，广泛应用于航空航天[4]、消防救援[5]等领域。热防护材料与技术的发展主要起源于航空航天领域，如超音速飞机[6]、航天飞行器[7]等装备由于其严酷的工作热环境使得其热防护需求迫切。消防救援领域的热防护研究主要源于消防装备的热防护研究，目前针对消防防护服[8]、消防手套[9]、消防靴[10]等消防装备均有热防护相关研究。近年来，随着消防机器人的发展，针对消防机器人的热防护研究应运而生。不同于其他消防装备柔性、短时间热防护等特点，消防机器人因其需要在火场中较长时间工作，且需要具备一定的力学强度，因此消防机器人的热防护需要针对其特点进行相应的研究。

本文旨在梳理现阶段关于消防机器人热防护问题的相关研究。目前针对消防机器人热防护的相关研究主要包括热防护材料和热防护技术这两个方向。本文将从消防机器人的发展现状出发，着重梳理消防机器人用热防护材料和热防护技术的最新进展，并提出消防机器人热防护研究目前存在的不足以及未来的研究方向，希望能为消防机器人未来的工程化应用提供新的思路。

1 消防机器人的发展及其面临的热环境挑战

火场的高温高热环境使得消防员面临生命安全的威胁，采用消防机器人辅助和代替消防员进行灭火和施救可以避免将消防员陷入危险之中，因此近年来国内外针对消防机器人进行了大量的研究工作。国际上针对消防机器人技术的研究可追溯至1986年，日本东京消防部门首次将“彩虹5号”灭火装置投入实战[11]。2012年弗吉尼亚理工学院研发的CHARLI-2型智能装备因突破性设计引发业界关注，该设备专为美国海军舰船火灾处置研制，开创了人机协同灭火新模式[12]。澳大利亚研发的智能灭火平台配备90 m超远程水炮系统，同步集成烟雾净化装置提升火场能见度；美国伍斯特理工学院开发的SAFFiR系统已列装海军部队，重点执行舰船损害管制评估与应急处置任务[13]。我国消防机器人研究的开展同样相对较早，第一台消防灭火机器人于1995年由应急管理部上海消防研究所制造成功[14]。2002年，应急管理部上海消防研究所、上海交通大学及上海市消防救援局共同研制出了履带式、轮式灭火机器人，该消防机器人具有行走、攀爬、跨越障碍物、灭火和探测火场等功能[15]。目前，多家消防救援单位已配备相关的消防机器人，并在石化火灾、隧道事故等特殊场景取得实战应用成果[16]。

消防机器人的研究进展可划分为三大历史阶段，分别是人工操控阶段、半智能化阶段和全自动化阶段[14]。人工操控阶段以远程手动控制或程序化控制为核心特征，存在环境感知滞后、应急响应迟延等问题。半智能化阶段通过引入传感器融合技术实现环境动态感知，我国当前主流产品正处于该阶段。全自主化阶段不需要操作员的控制，操作员只需要将本次消防任务的目标进行设定，使机器人实现火情自主研判与最优处置方案生成，该阶段对物联网、传感器等技术集成度要求极高，目前仍处于研发阶段。基于人工智能及物联网、传感器等新兴技术的发展，未来消防机器人研究的发展方向和目标主要以全自动化阶段为主，要求消防机器人具有在火场中智能化、自主化作业的能力，因而需要针对消防机器人加装多种类型的传感器以实现其自主化作业的要求。然而，基于消防机器人在火场作业所面临的复杂热环境挑战，消防机器人的核心控制部件及外部加装的多种类型的传感器也将面临高温失效的风险。

消防机器人全面智能化的趋势使得消防机器人在大型室内空间中自主灭火和救援成为可能。室内火场环境复杂，火场温度可达1000 ℃以上，且火场具有强烈的光热辐射及烟雾和燃烧气体。火场危险级别分类主要分为惯例、普通及危急三类[17]。其中，惯例状态为消防员在火灾现场进行较远距离射水作业时的状态，该状态下温度低于60 ℃，热流密度小于1.5 kW/m^2；普通状态为在距着火建筑外围较近范围内进行灭火救援行动的状态，此状态下的温度介于60～300 ℃之间，热流密度高于1.5 kW/m^2，但小于13.6 kW/m^2；危急状态发生在受限空间内的全面燃烧甚至轰燃，以及高热值燃油全面燃烧的火灾现场，火场温度为300～1100 ℃，热流密度大于13.6 kW/m^2，在极端条件下甚至达到200 kW/m^2。

基于火场高温高热的威胁，消防机器人的内部控制系统及外露传感器面临高温失效的风险，因此需要针对消防机器人的内部控制系统及外露传感器进行相应的热防护，使其核心部件能够在外部高温火场环境中正常工作，从而保障消防机器人在火场中正常完成智能感知、自主避障、集群作业等功能。

2　消防机器人用热防护材料研究

热防护材料是一类用于极端高温环境下保护设备和结构免受热损伤的功能性材料，广泛应用于航天器、高速飞行器、工业设备等领域，其具有耐高温、低热导率以及优异的热机械性能等特点。针对消防机器人面对火场高温环境的应用需求，消防机器人热防护材料主要包括防热涂层、隔热材料和相变材料(PCM)等。

2.1　热防护材料传热学基本原理

热防护材料是指用于在高温或极端热环境下保护设备、结构或人员免受热损伤的一类特种材料，其核心作用是通过物理或化学机制减缓或隔绝热量传递，确保被保护对象在高温条件下的安全性和功能性。热量传递主要有三种形式，包括热传导、热对流、热辐射。热量通过媒介在两个物体间传递，或穿过单个物体，并且不引起任何形式的流体运动，称为热传导或导热。导热过程中能量高的粒子将能量传递给相邻的能量低的粒子。在气体和液体中，导热是由物质中随机运动分子之间的碰撞和扩散进行能量传递引起的；在金属中导热是由自由电子的能量传递引起的；在晶体中导热则是由晶格中振动的分子之间的能量传递引起的。物体与其相邻的运动流体(液体或气体)之间的传热则叫作热对流或对流换热。产生对流换热的方式有两种：一种是强制对流换热，流体的流动是由风机、泵或者风的作用引起；另一种是自然对流换热，流体运动由冷、热流体的密度差引起。此外，当存在温差的物体之间并不存在介质，这时热量可以通过电磁波或者光子进行传递，这就是热辐射。太阳对地球大气层的传热，以及热量从太空飞船的表面传递给深冷的太空都是热辐射的例子，辐射换热发生在任何两个存在温差的物体之间，并伴随着其他形式的传热[18]。

热防护材料除了需要阻隔热量传递之外，还可通过相变实现热量存储进行控温，又或实现热量的高效利用。当前热能的储存方式主要有三种，分别为显热储能、潜热储能和化学反应储能[19]。显热储能的原理比较简单，即利用材料自身的热容在升/降温时进行热量存储与释放。这种储能技术运行简单、成本低廉，但缺点是利用材料热容的储热密度小、热量存储与释放的过程中温度无法保持恒定，变化幅度一般都比较大。化学反应储能通过化合物的可逆化学反应循环储存和释放热量，是一种高密度的热量存储方式。反应过程中无污染，环境友好，但该储能技术相对复杂，成本高且技术难度较大，整体效率偏低。潜热储/放热的基本原理是利用相变材料相变过程中的潜热，也称作相变储能。相较于前两种储热方式，潜热储能具有储能密度大，储/放热过程温度近似恒定的优点，且实现原理简单，在能源电力、建筑节能、制冷低温、工业生产及航空航天等领域均具有广阔的应用价值。同样地，相变储能因其温度近似恒定的优点可以应用于消防机器人热防护领域以实现部件的控温。

2.2　常用热防护材料分类与进展

2.2.1　防热涂层

防热涂层是一种涂覆在材料表面的功能性涂层，用于保护基体材料在高温、热辐射或极端热环境下不发生氧化、烧蚀、热疲劳或结构失效，其广泛应用于航天器、燃气轮机、航空发动机以及消防机器人等极端高温环境下的设备。防热涂层按防护机制可分为热障涂层、烧蚀防热涂层、辐射散热涂层、抗氧化涂层等。其中，热障涂层是一种涂覆在高温金属部件表面的陶瓷基防护涂层，由陶瓷层和金属黏结层构成，用于保护金属部件，显著降低基底材料的温度，从而延长其使用寿命，其常见的制备方法有大气等离子喷涂(APS)、电子束物理气相沉积(EB-PVD)和激光熔覆(LC)等[20]。烧蚀防热涂层通过自身质量损失时所发生的化学吸热、相变等实现对基体的热防护，辐射散热涂层采用高红外发射率材料以辐射形式进行主动散热从而阻止基体温升过快。

防热涂层作为一种涂覆在高温金属部件表面的功能性防护涂层，可以应用于消防机器人外部基材表面，以保护机器人外部基体材料，使其能够在超过自身耐温极限的条件下长期稳定工作。目前，针对防热涂层对消防机器人的热防护效果已有相关仿真研究。王潇等[21]通过有限元仿真，建立了由防热涂层、外置铝架、隔热保温材料、内置铝架组成的热防护结构模型，分析了在外部温度为 850 ℃时 15 min 内不同防热涂层材料的热防护结构内部温度变化情况，得出防热涂层材料的热防护性能从高到低的排序为 MgO、氧化钇稳定氧化锆气凝胶涂层、SiO_2、Si_3N_4、$MgZrO_3$、Al_2O_3、NiCrAl 和 ZrO_2。同时探究了防热涂层厚度对热防护结构热防护性能的影响，当热防护结构选用隔

热保温材料为玻璃纤维、防热涂层材料为Si_3N_4时，防热涂层的最佳厚度为5 mm。张辉等[22]针对消防机器人底盘车身热防护结构设计进行研究，建立了由防热涂层、基体、隔热保温层、内置底板组成的热防护结构模型。选择氧化锆（YSZ）陶瓷、莫来石陶瓷、$MgZrO_3$和稀土锆酸盐$La_2Zr_2O_7$这几种材料作为防热涂层材料，通过正交实验的方式对不同防热涂层材料、基体材料和隔热保温材料组合的热防护性能进行仿真分析，得出$MgZrO_3$（防热涂层材料）、石英纤维（隔热保温材料）与Q235（基体材料）是热防护性能最优的组合。同时通过响应面优化的方式，计算了防热涂层厚度、隔热保温层厚度与底盘温度关系，并提出了兼顾热防护性能和材料使用成本的防热涂层最优厚度。然而，防热涂层应用于消防机器人不仅仅要考虑其对基体材料的保护作用，同时也需要考虑其与基体间的界面结合力问题及其在实际火场环境中的失效问题。目前消防机器人防热涂层的研究多处于仿真层面，实验研究及测试验证还相对较少，针对消防机器人服役环境下防热涂层的热防护效果与界面可靠性问题也尚需研究。

防热涂层在动态火场中可能出现裂纹、涂层剥落等现象，从而影响防热涂层在动态火场环境下的热防护性能。由于动态火场存在高温、高热辐射、强冲击等复杂环境，防热涂层在该复杂环境下存在失效的风险。目前针对消防机器人防热涂层的相关研究主要以仿真研究为主，其在模拟环境服役过程中的实验验证较少，尚未发现针对其在动态火场中失效行为的相关研究。而热障涂层作为防热涂层中的典型代表，其在高温高热及强热冲击下的失效行为一定程度上可以代表防热涂层在动态火场中的失效行为，因此本文以应用于航空发动机等领域的热障涂层的失效机制为代表说明防热涂层在复杂热环境下的失效机制。在高温高热及强热冲击下，热障涂层可能产生高温氧化、陶瓷层相变、体积膨胀、热生长氧化层（TGO）生成等行为进而导致热障涂层的失效。刘佳琪等[23]总结了*M*CrAlY金属黏结层的高温失效行为，并分析其失效产生的原因。在高温氧化过程中黏结层可能产生Al_2O_3相转变，产生体积变化，进而形成孔隙甚至开裂。在高温氧化过程中黏结层容易产生脆性相析出，从而造成界面失效。同时在高温环境下基体中的硫元素向黏结层表面扩散，产生偏析从而降低涂层的界面韧性。罗宇晴等[24]研究了LaZrCeO热障涂层的失效机理，在热循环的作用下，黏结层中的Al向外扩散，形成热生长氧化物，同时金属黏结层中Ni元素和Co元素在高温下扩散，形成脆性相，降低了涂层韧性进而导致涂层失效。范佳宾等[25]研究了在热冲击条件下多元稀土掺杂氧化锆热障涂层的失效过程与机理，在高温作用下晶粒长大，孔隙率降低，产生纵向裂纹，并且高温氧化作用产生连续氧化物，产生横向裂纹。在热冲击的过程中，高温氧气和燃气通过裂纹快速进入涂层深处，造成黏结层氧化，在热应力的作用下导致涂层脱落。因此，防热涂层应用于消防机器人热防护时，也应综合考虑涂层工作环境及其可能产生的失效行为，从而提升机器人热防护系统的稳定性和可靠性。

2.2.2 隔热材料

隔热材料是一类通过低导热系数或热反射特性阻碍热量传递的功能性材料，广泛应用于建筑、工业设备、航空航天等领域。隔热材料通过热反射、多孔结构、真空阻隔等机制以实现热阻隔，其核心指标为低导热系数（通常＜0.1 W/(m·K)），同时需要兼顾轻量化、耐温性等特性。

由于隔热材料具有较低的导热系数，可以提供较大的热阻，从而可以隔绝火场中大量的热量，因此隔热材料成为消防机器人热防护体系的重要组成和关键因素。并且出于消防机器人在火场环境中灭火和施救的实际工作需要，其隔热材料必须是防火材料，否则会造成机器人工作过程中燃烧的风险。近年来，国内外针对消防机器人热防护的隔热材料进行了大量的研究。Sevinchan等[26]对不同的隔热材料进行了传热分析，如图1(a)所示，探究了19种不同隔热材料传热速率随环境温度的变化情况，其中真空绝热板、气凝胶毡、酚醛泡沫和聚氨酯表现出较高的隔热性能，真空绝热板在－25 ℃时的传热速率最低。同时研究了其中三种隔热材料岩棉、玻璃纤维和挤塑聚氨酯在低温和高温环境下作为机器人隔热罩的隔热性能，如图1(b)～(d)所示，岩棉作为隔热材料的隔热罩传热速率最低，隔热性能最好，能效最高。虽然岩棉具有质量大、结构刚性强的特点，但综合其隔热性能及其优异的防火性能，仍然可以认为岩棉是此类应用场景中相对较优的隔热材料。

隔热材料在消防机器人的实际应用过程中除了要保证其具有极低的导热系数之外，还需要兼顾其高温稳定性和机械强度。北京凌天智能装备集团[27]设计了一种机器人用抗高温材料，采用玻璃纤维、陶瓷纤维、纳米气凝胶毡、石棉布以及含镐硅酸铝针织毯这几种絮状材料，采用充气离心转动混合的方式，将上述几种不同的絮状物按照一定的比例混合均匀。该混合材料的优势在于综合了不同隔热材料的优势，其中玻璃纤维增加机械强度，陶瓷纤维提供高温稳定

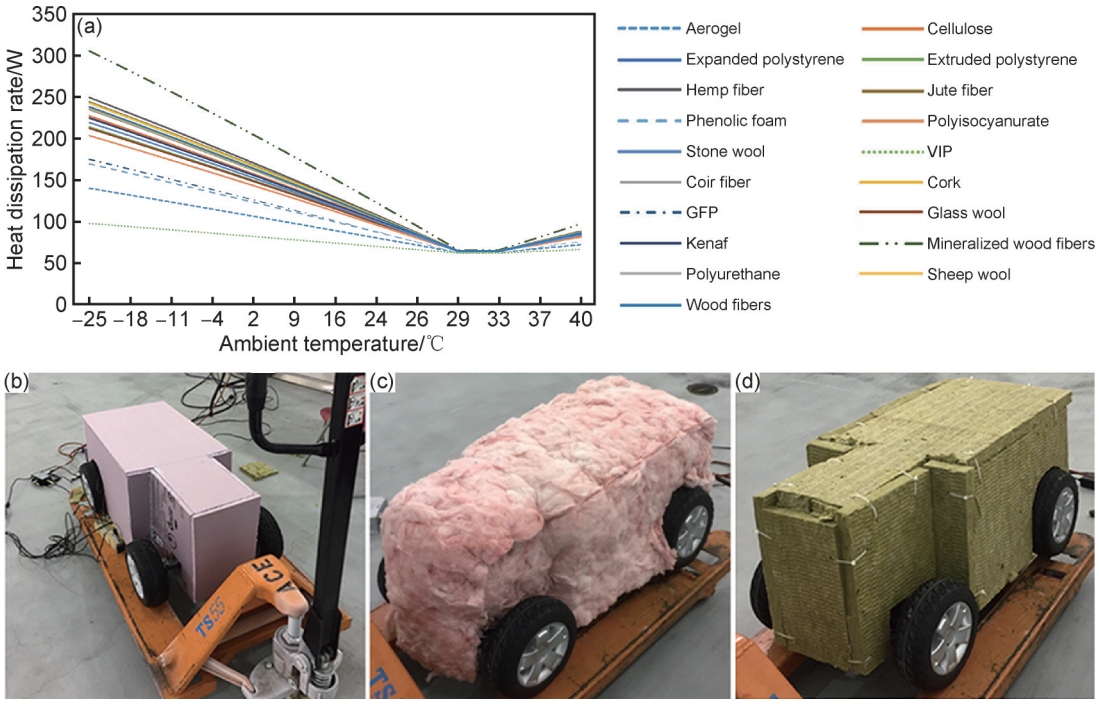


图1　消防机器人隔热材料传热[26]

(a)隔热材料传热速率与环境温度的关系;(b)挤塑聚氨酯隔热罩;(c)玻璃纤维隔热罩;(d)岩棉隔热罩

Fig.1　Heat transfer of insulation materials for firefighting robots[26]

(a)relationship between heat transfer rate and ambient temperature;(b)extruded polyurethane insulation cover;(c)glass fiber insulation cover;(d)rock wool insulation cover

性,而纳米气凝胶毡能提高优良的隔热性能,石棉布和含镐硅酸铝针织毯则增强材料的耐用性能,因此该种材料具有良好的综合性能,可以使得机器人在外部高温环境中具备良好隔热性能的同时兼顾机械强度和耐用性。

真空绝热板(VIP)作为一种新型高效的隔热材料,其在机器人隔热领域也有相关研究。Midhun等[28]自制了以气相二氧化硅、微/纳米纤维素晶体、炭黑和玻璃纤维组成的真空绝热板,其结构如图2(a)所示,研究了基于真空绝热板的被动相变热管理系统(PTMS)的隔热性能,并与商用的纤维素纤维(CFI)隔热材料进行对比。结果表明,制备的真空绝热板导热系数为0.0062 W/(m·K),约为商业纤维素纤维的1/7。图2(b)展示了不同隔热材料配置下热防护结构的安全工作时间,与纤维素纤维相比,基于真空绝热板的热管理系统具有更长的安全工作时间,展现了真

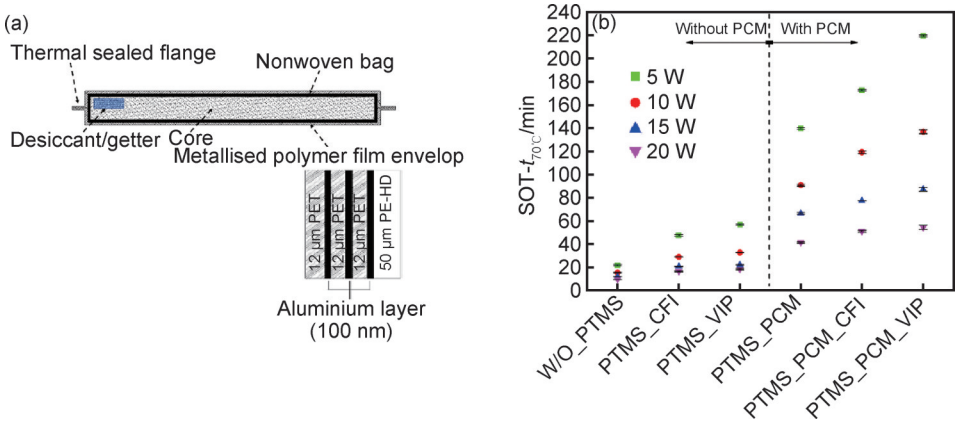


图2　基于真空绝热板的热防护系统[28]

(a)真空绝热板示意图;(b)不同隔热材料配置下热防护结构的安全工作时间

Fig.2　Thermal protection systems based on vacuum insulation panels[28]

(a)sketch map of a vacuum insulation panel(VIP);(b)safe operating time (SOT)of thermal protection structure under different insulation material configurations

空绝热板相比于纤维素纤维具有更好的隔热性能，可以保障机器人在高温环境中的正常工作。

2.2.3 相变材料

相变材料主要可以分为固-固相变材料、固-液相变材料、固-气相变材料和液-气相变材料4类，其中目前研究和应用最为成熟的是固-液相变材料。固-液相变材料利用材料的固-液相变潜热，相较于其他相变方式具有相变过程易于控制、成本低廉、相变温度范围较宽等优点，已成为实验研究和实际应用中最具价值的储能方式。固-液相变材料主要包括无机相变材料和有机相变材料。无机相变材料具有化合物结晶水容易挥发，热量储存和释放过程循环可逆性差，对容器有一定的腐蚀作用，难以实现重复稳定使用等缺点。而相比无机相变材料，有机相变材料具有腐蚀性小、稳定性好，可实现多次循环稳定使用，易于工业化等优点，是目前使用较为广泛的一种相变材料。

目前常用的相变材料主要以有机相变材料为主，通常其热导率较低，需要采用高导热填料对相变材料进行改性以增强其导热性能。导热填料作为影响相变材料导热性能的主要组成部分对相变材料的控温能力有着十分重要的影响。韩延龙[29]以伺服电机驱动器为研究对象，研究了以相变材料为基础的热防护结构对驱动器的热防护效果。针对石蜡相变材料对比了添加不同质量分数的多壁碳纳米管的复合相变材料对系统的控温效果，发现加入质量分数为2%的碳纳米管时相变材料的控温效果最好，可使伺服电机驱动器的安全工作时间达到97 min，相比于未使用碳纳米管进行改性的相变材料控温系统延长了30 min。同时还针对三种不同相变点的石蜡相变材料对部件的控温效果进行研究。结果表明，相变点为60 ℃时，元器件在70 ℃以下具有最长的工作时间，而相变点为44 ℃时，元器件能够保持更低的温度，从而降低器件失效的风险。

相变材料的含量和堆积方式对内部元器件的控温性能同样具有十分重要的影响。王潇等[30]针对救援机器人内部元器件的热防护问题设计了基于相变胶囊多层堆积的热防护结构，建立了相变胶囊-热障保温复合结构仿真模型，通过改变相变胶囊尺寸和堆积方式，设计了相变胶囊单层堆积结构、双层堆积结构和大小胶囊混合堆积结构，探究了相变材料含量和堆积方式对热防护效果的影响。结果表明，应用相变材料的相变胶囊复合结构具有更优秀的热防护性能，且大尺寸相变胶囊堆积的单层结构表现出更优的热防护效果。总的来看，目前应用于消防机器人的相变控温材料已有相关研究进展，相变材料的填料种类、相变温度、含量和堆积方式等均对机器人核心部件的控温能力具有十分重要的影响。

在针对消防机器人内部元器件进行相变控温设计的过程中，需要综合考虑相变材料的相变温度、含量和堆积方式等因素，从而实现元器件的高效控温。首先需要根据不同元器件的安全工作温度选取相变点在其安全工作温度以下的相变材料，利用相变材料的控温作用将元器件温度维持在其安全工作温度以下。同时需要考虑元器件自身的发热量，结合相变材料的相变潜热选取适当的相变材料含量。同时对于固-液相变材料需要考虑相变材料的封装方式，防止相变材料的泄漏。使用相变微胶囊则需要考虑微胶囊的堆积方式，选取堆积密度较高的堆积方式可以提高微胶囊的使用效率。

防热涂层、隔热材料、相变材料作为不同功能的热防护材料，其在机器人防热设计和制造的过程中发挥着不同的作用。隔热材料对机器人整体隔热起主要作用，因其较低的导热系数，在热传导的过程中可以形成较大的热阻，从而实现机器人高效隔热；防热涂层则主要制备于机器人外部基材表面，通过其优良的隔热性能阻止外部基材温升过高，从而提升外部基材的高温稳定性；相变材料通过其相变作用吸收热量，同时在相变过程中其温度可以维持在相变温度附近，利用上述特点，在机器人热防护的过程中，一方面可以将其应用于隔热结构中通过相变作用吸收外部传入的热量，另一方面可以利用其控温作用将其应用在机器人核心部件的热防护中，针对核心部件进行高效控温，从而延长部件的安全工作时间。

在机器人防热材料的设计和制造过程中可以针对机器人在不同火场下的应用场景综合应用几种不同种类的热防护材料以实现机器人综合热防护。如针对主要应用于惯例条件下的机器人，由于其外部火场环境温度较低，低于机器人外部基材的最高使用温度，因此可不考虑使用防热涂层对其进行热防护，仅使用适当厚度的隔热材料即可达到热防护效果，对外部基材可进行适当的表面处理或制备具有防腐蚀、疏水等性能的涂层。针对较高危险等级的火场应用条件如普通或危急条件，可以在综合成本及结构轻量化要求的考虑下适当增加隔热材料厚度或选用导热系数较低的隔热材料以增大隔热结构的热阻。同时根据机器人外部基材的最高工作温度选取合适的防热涂层对其进行热防护。对于机器人内外装载的温升敏感或发热较严重的元器件可以采用相变材料对其进行控温，从而提高机器人在高温高热环境中工作的可靠性。

2.3　热防护材料的性能评价方法

热防护材料的性能评价方法主要包括材料本征性能指标测试以及实际应用场景模拟测试。热防护的材料本征性能指标测试主要有导热系数、比热容、热扩散率、耐高温性能、阻燃性能、机械强度等。材料具有低热扩散率表明热量传递慢，核心部件的温升较缓，具有低的热导率可建立大的内外温差，起到隔热作用，因此在消防机器人热防护设计的过程中应选用低导热系数和热扩散率的材料进行外界隔热。导热系数的主要测试方法包括稳态法和非稳态法。稳态法主要有热板法、热流计法等，瞬态法主要有热线法、激光闪射法（LFA）等。比热容是单位质量的物质升高单位温度所需的热量，常用的测试方法有差示扫描量热法（DSC）、绝热量热法等。耐高温性能是材料在高温下保持物理、化学性能稳定的能力，其本质是材料抵抗高温破坏的综合性能，可针对材料在高温下的热稳定性、热机械性能、抗氧化性等多方面指标进行综合评价。阻燃性能是材料抑制火焰蔓延或自熄的能力，常用极限氧指数（LOI）、UL94 等级评价。材料的机械强度指材料抵抗外力（拉伸、压缩、弯曲等）而不破坏的能力，包括抗拉强度、抗压强度、抗弯强度等。

由于消防领域热防护材料主要应用于火场环境，其工作状态相对特殊，因此针对消防领域热防护研究所使用的热防护材料与结构，其热防护性能的评价不仅仅包括基本性质的评价，同时还需要考虑针对实际应用场景进行模拟测试。针对消防热防护材料的实际应用场景模拟测试主要包括火焰喷射、高温环境测试、热辐射与热冲击等。Li 等[31]针对基于多晶莫来石纤维板的热防护结构的热防护性能进行了火焰模拟测试，使用火焰喷射器作为火源，火源的最高温度约为 1200～1300 ℃。使用火焰喷射器连续燃烧热保护结构 30 s，使用红外测温仪来测量热保护结构背面的温度。结果发现，随着多晶莫来石纤维板厚度的增加，隔热率也随之增加，在 40 mm 厚度时趋于稳定；同时将多晶莫来石纤维板的厚度保持在 40 mm 恒定，测试内部温度随时间的变化，结果发现随着时间的增加，内部温度也缓慢上升，然后趋于稳定，这也证明了其热防护结构的有效性。Wang 等[32]制备了基于相变材料的消防手套结构，并针对消防手套的热防护性能进行了高温环境模拟测试。分别采用直接接触热源测试以及辐射对流热源测试两种测试方案，如图 3 所示。直接接触热源测试主要将样品直接放置在加热台上进行直接接触测试，热台的表面温度控制在 200 ℃左右（图 3(a)）。辐射对流热源测试则是在箱式炉中模拟危险条件和轰燃条件两种不同的火场环境条件（图 3(b)）。对于危险条件测试，炉子目标温度设置为 200 ℃，加热元件的热流密度约为 10 kW/m^2。对于轰燃条件测试，炉子目标温度设置为 300 ℃，加热元件的热流密度约为 15 kW/m^2。通过直接接触热源测试以及辐射对流热源测试分别模拟了消防手套在不同热源作用下的热防护性能，此种测试方法同样可以应用到消防机器人热防护性能的测试中。

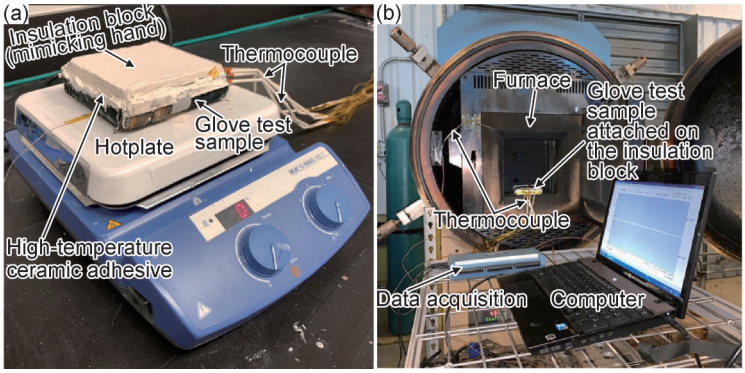


图 3　消防手套的热防护性能测试[32]

（a）直接接触热源测试；（b）辐射对流热源测试

Fig.3　Thermal protective performance testing of firefighting gloves[32]

(a)direct contact test; (b)radiant and convective heat sources test

此外，Wang 等[33]分别采用低水平热辐射测试和火灾暴露测试这两种测试方法，针对结合相变材料的消防防火服的热防护性能进行了测试。低水平热辐射测试使用能量储存测试仪（SET）模拟了低水平热辐射下的热暴露过程，仪器主要包括储热装置、自动数据采集装置和燃烧分析模型，具体部件主要包括辐射热源、可行驶可移动托盘和传感器组件，传输盘与样品保持装置相结合，通过移动轨道来控制织物的热暴露时间。数据采集设备使用水冷量热仪记录织物样品背面的热通量。皮肤烧伤预测模型集成到控制

软件中，以预测二度烧伤时间。火灾暴露测试使用热防护性能测试仪（TPP-CSI 206）模拟火灾场景中对流与辐射复合热环境，其主要部件包括燃烧器、石英管、热源预屏蔽装置、样品架和铜片热量计。铜片热量计传感器收集传递到样品表面的热流，记录热流变化曲线，通过与反应热能与二度烧伤时间关系的斯托尔标准曲线进行比较，两条曲线交点对应的时间为二度烧伤时间，从而评价织物的热防护性能。

3 消防机器人热防护技术研究

消防机器人由于需要在高温火场下工作，其内部控制部件以及为了实现目标识别、自主寻的等功能所加装的外置传感器，面临在火场环境中高温失效的风险。目前针对机器人整体及内部控制部件主要采用多层隔热结构进行热防护，而对于外置核心部件则需要采用散热控温技术以实现其高效热防护。

3.1 整体热防护方案

目前针对消防机器人的整体热防护方案的研究大多采用多层隔热结构来实现。多层隔热结构是一种用于极端温度环境的隔热材料，广泛应用于航天器、卫星、低温设备等领域，它由多层隔热材料组成，以减少热传导和辐射。多层隔热结构具有高效隔热、轻量化、适应性强、可定制性强、耐久性良好等优点。

由于火场环境较为恶劣，机器人电子元器件在高温火场中面临高温高热的威胁。因此，消防机器人的整体外部隔热系统大多采用多层隔热结构以实现高效隔热。同时，采用多层隔热结构作为消防机器人的外壳也可以提供一定的力学强度。唐飞[34]设计了一种整体三层的热防护结构，主要包括表层、中间隔热层及底层，其中表层材料使用耐高温合金钢，底层材料使用钛合金，而中间隔热层材料则使用微孔绝热板和气凝胶毡的组合。这种 80 mm 厚的热防护结构可保证在外界环境温度 1000 ℃下，热防护结构内部的温度在 30 min 内不超过 50 ℃。Li 等[31]设计了一种用以定点消防的耐高温机器人，其热防护结构主要由两层耐高温合金钢夹着一层厚度为 40 mm 多晶莫来石纤维板组成。

目前针对消防机器人的整体热防护方案已有许多创新设计，研究人员通过数值模拟和实验研究等多种方式探究消防机器人用多层隔热结构设计参数对其热防护性能的影响，从而实现机器人高效热防护。Stefan 等[35]设计了一种具有热辐射屏蔽作用的双层不锈钢隔热罩，通过数值模拟和实验研究了双层不锈钢隔热罩对作用在一定温度梯度下消防机器人的影响。结果表明，在外部最高温度为 350 ℃的条件下，双层隔热罩使第二层温度降低至单层的 50%，证明了多层设计的有效性。不锈钢双层结构通过空气层隔离外部热辐射，显著降低了隔热结构内层温度。Alhaza 等[36]提出并发展了一种新的室内消防机器人概念，机器人外壳采用五层复合结构，分别是银涂层、铝板、阻燃材料层、空气层和隔热板。其中镀银涂层反射外部 50% 以上的热辐射，2 mm 厚的铝合金板可以抵御外部冲击，阻燃材料层采用低导热性纤维织物，5 mm 的空气层可以阻隔热传导，隔热板为 13 mm 厚的非易燃材料，从而可以进一步隔绝残余热量。采用上述多层隔热技术，使得消防机器人可承受外部高达 700 ℃的高温约 60 min。通过多层热防护结构设计同时实现对热传导和热辐射的阻隔作用，从而实现消防机器人高效热防护。此外，Sucuoglu 等[37]提出一种用于消防机器人热防护的隔热结构，该隔热结构由防热涂层、基板和隔热材料三部分组成，以 5 mm 厚的镀锌钢板作为基板，基板表面涂覆 5 μm 厚的立方氮化硼涂层，并在基板内部使用 50 mm 硅气凝胶作为隔热材料。经过隔热计算和分析，当环境温度接近 1450 ℃时，机器人壳体内部温度约为 34 ℃，展现了极好的隔热性能。

多层隔热结构中隔热层的性能对多层隔热结构的影响较大。由于常见的隔热材料大多以柔性隔热材料为主，在实际加工过程中常常需要将柔性隔热材料填充到壳体中，因此隔热材料在填充过程中分布是否均匀成为影响多层隔热结构性能的重要因素。常建[38]设计了新型多层隔热结构，整体结构分为金属隔热层、热屏蔽涂层、隔热空腔和内壳层，其中隔热空腔又分为填充层和压缩层。同时采用一种新型的隔热材料填充方法，通过充气填充、震动填充、压缩填充、真空填充四个填充步骤将耐高温纤维棉絮填充到隔热结构内部预留的空腔中，使得高温纤维棉絮材料在空腔内排布均匀，从而提高了隔热结构的隔热性能。

多层隔热结构可以与散热控温技术联用共同对机器人内部部件进行热防护。Fujita 等[39]提出了一种可安装的耐辐射隔热外罩，如图 4(a)所示，辐射耐热外罩由铝框架和铝涂层防火布构成，防火布表面涂敷的铝涂层可反射表面 90% 的辐射热，结构背面带有可以喷水的雾化喷嘴，剩余的 10% 辐射热通过喷洒在外壳背面的水气化吸热以及自然对流去除。实验研究了在隔热结构外部施加 20 kW/m^2 的热通量时隔热结构内部的温度变化情况，图 4(b)显示了隔热结构配合 1/60 占空比间歇喷水时隔热结构内部温度变化情况，结果显示使用该隔热结构配合 1/60 占空比间歇喷水，内部温升仅有 5.3 ℃，具有较好的热防护效果的同时

可以节省较多水量。通过多层隔热结构与喷淋冷却技术相结合，有效降低了隔热结构内部的温升情况，从而保证消防机器人内部部件的正常稳定工作。此外，周操等[40]设计了一种用于消防机器人的热防护板，通过内部凹槽回字形管道的设置，能够通过输入冷水带走热防护板的热量，回字形凹槽增加了管道内水的吸热时长及吸热面积，提高了吸热效率，能够使消防机器人在1000 ℃的火场中，车体内部的温度控制在40 ℃以内，有效降低车体内部的温度，保证车体内部元器件的正常工作。同时相变材料作为一种有效的电子器件控温方式也可以与多层隔热材料结合起来以实现内部电子器件的热防护。王哲夫[41]构建了以一定数量的反射屏和隔热材料组成的多层隔热结构，通过有限元仿真探究了不同反射屏位置和隔热材料厚度对多层隔热结构隔热性能的影响，得出了多层隔热结构最佳厚度和反射屏位置参数。同时，在隔热结构内部引入相变材料，针对不同发热功率的电子器件热防护效果进行仿真分析，结果表明在外部多层隔热结构结合内部相变材料的作用下，电子器件的最高温度均可以维持在40 ℃以下，表明该热防护方案具有比较良好的热防护效果。通过在隔热结构内部引入相变材料，实现了对内部发热元件的有效散热控温，避免了在外部存在隔热结构的情况下内部发热元件温度的持续升高。

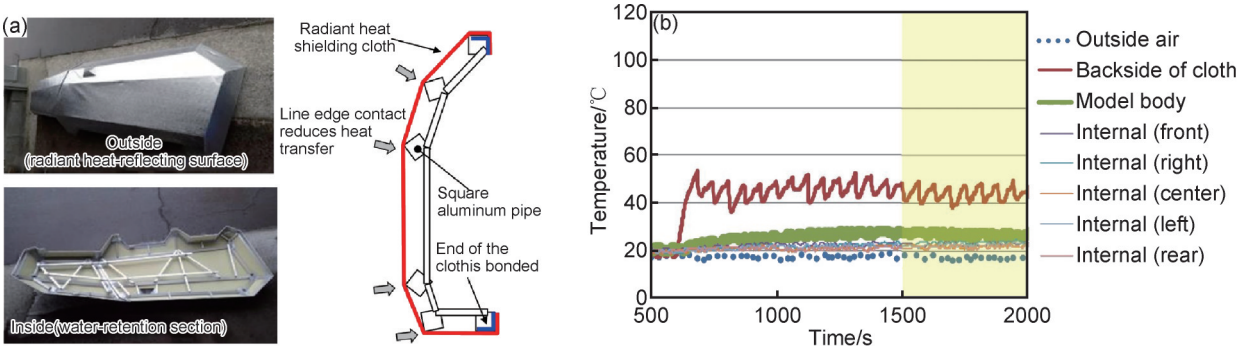


图4　消防机器人耐辐射隔热外罩[39]

(a)隔热外罩图；(b)隔热结构内部温度变化情况

Fig.4　Radiation-resistant thermal insulation enclosure for firefighting robots[39]

(a)structural schematic of insulation enclosure；(b)internal temperature distribution within insulation structure

3.2　核心部件热防护设计

消防机器人为了实现自主寻的、姿态动作控制等功能的正常工作需加装传感器或核心元器件，对于其中暴露在外围的传感器和部件以及一些温升敏感的元器件需要进行专门的热防护，因此需要针对局部部件热防护问题考虑采用散热和控温技术，从而延长关键部件的安全使用时间，保证其能够在外界高温火场环境中正常工作。

对于消防机器人来说，其实现识别、通讯、避障等功能所需要的外置部件主要有天线、监测系统、传感器及照明系统等。对于传感器的热防护装置[42]，如图5(a)所示，采用防护前盖、隔热层隔热、水冷结构及风冷结构进行热防护。当消防机器人进入火场，结构处于热防护状态，内部设备舱中的冷源为传感器冷却水进行冷却，此时风冷不启动；需要传感器工作时，前盖打开，同时风冷启动，其在传感器前方形成风幕，对传感器前端进行冷却，此时风冷和水冷同时作用，保证传感器在高温环境(1000 ℃)下正常工作。通过隔热层结合风冷和水冷的方式，有效降低了传感器在火场工作过程中的温升，提高其工作安全性和稳定性。对于耐高温天线结构[43]，如图5(b)所示，针对同轴电缆上半部分包裹隔热层，其下部包围有液体冷却装置，从而将外部的高温与连接耐高温天线的电路部分形成很好的隔绝，可以将同轴电缆另一端温度保持在60 ℃以下。对于高温照明系统[44]，如图5(c)所示，使用导热系数较低的隔热层隔绝系统周围的大部分热量，采用热反射和热吸收的方式将红外光滤除，只通过可见光。通过这两种方式，仅有少量热量通过衬套和滤光结构传递至内部，此时通过水冷头将热量带走，避免光源超温，使得照明系统能够在1000 ℃火场或高温环境下持续正常工作。对于耐高温监测系统[45]，如图5(d)所示，采用三层结构进行热防护，外壳采用导热系数较低的微孔绝热板和气凝胶毡隔绝外界向内部传递的大部分热量，在中壳和内壳间填充气凝胶毡来隔绝部分热量，而对于镜头前方采用热反射玻璃将工作波段外的光线反射至探测系统外，只通过工作波段的光线。通过这样的方式，仅有少量热量传递至内部，此时通过水冷管将这些热量带走，避免内

部超温，从而能够实现在1000 ℃火场或高温环境下持续实时成像30 min。通过多层隔热结构与水冷结合避免了监测装置温度超过其安全工作温度，同时采用热反射玻璃这种透明隔热材料以确保在满足其热防护性能的同时保证其正常工作状态，从而实现消防机器人监测装置在外界高温环境下的正常工作。

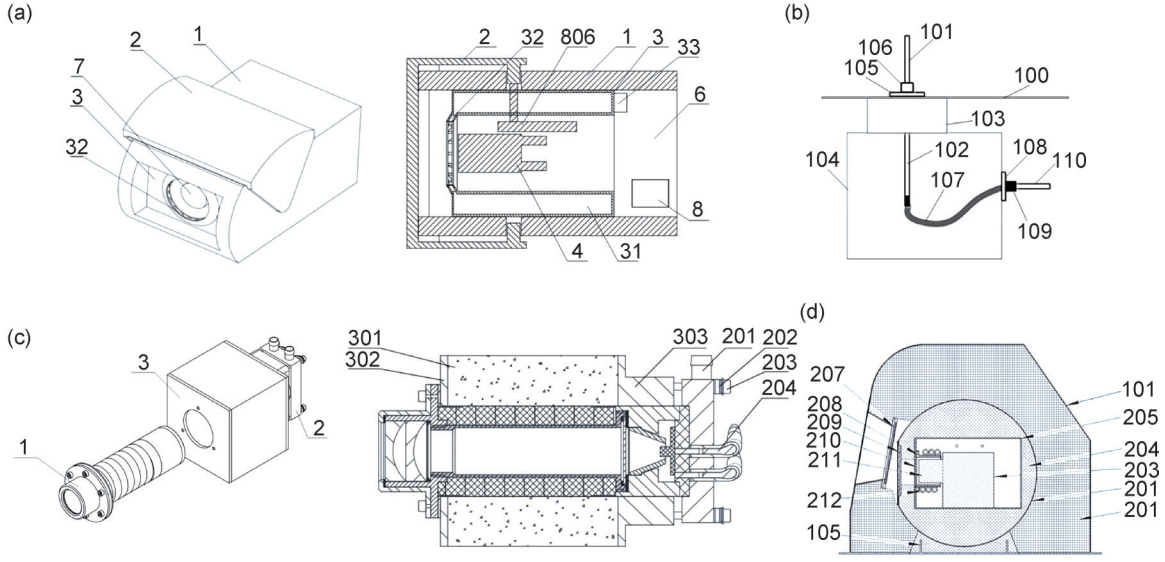


图5 消防机器人外置部件热防护专利

(a)传感器热防护[42]；(b)高温天线[43]；(c)高温照明系统[44]；(d)高温摄像系统[45]

Fig.5 Patent for thermal protection of external components on firefighting robots

(a)sensor thermal protection[42]; (b)high-temperature antenna[43]; (c)high-temperature lighting system[44]; (d)high-temperature imaging system[45]

孙柯[46]研究了核电站紧急救灾机器人电子器件的热防护方法，采用了液体循环冷却的方式对内部的电子器件进行散热，实验表明，冷却液流速越大，内部器件的平衡最高温度越小。同时采用数值模拟的方式建立冷板模型，探究了冷却液初始温度、入口速度以及流道结构对冷却效果的影响，结果表明冷却液与热源之间温差越大，入口速度越大，对电子器件的冷却效果越好。对于流道结构来说，加入扰流道后冷板冷却效果增加，同时叉排排列的扰流道压力损失小于正排排列的扰流道。通过对冷板冷却参数及流道结构的调控，实现了机器人电子器件的高效散热，从而保证了核电站紧急救灾机器人的正常安全工作。陈海[47]设计了一种消防机器人用耐高温传感器的热防护结构。通过在安装壳上设置升降内筒，在升降内筒上滑动连接固定内筒，使信息采集机构通过升降内筒滑动，通过向固定内筒中持续通入正压冷却气体，使温度较低的气体能够进入安装壳中，进而使传感器能够在较低的温度环境中进行工作，提升传感器的耐热性。正压冷却气体进入安装壳内堆积在升降外筒和升降内筒之间起到隔热效果，能够减少信息采集机构在高温环境中的升温速度，提升信息采集机构的耐热性。一种耐高温相机热防护结构[48]中使用两层冷却板分别通入冷却液和冷却气体，可以对相机本体进行高效的散热，并对镜头部位进行风冷，相机镜头前采用耐高温玻璃对镜头进行热防护，以提供高质量的图像采集和分析。上述核心部件热防护设计大多采用外部隔热配合水冷和风冷等主动热管理的方式，除此以外，以相变控温技术为代表的被动热管理技术也可以与外部隔热结构结合起来，共同对内部部件进行热防护。Midhun等[28]研究了基于硬脂醇相变材料的被动热防护系统对电子器件的安全工作时间的影响，结果表明，真空绝热板与相变材料的协同效应将电子器件的安全运行时间提升41.63%。

4 结论与展望

4.1 研究总结与不足

消防机器人在现代消防救援、抢险救灾中扮演着日益重要的角色，其能够替代消防员深入危险复杂的火场环境执行侦察、灭火、搜救等任务，对于保障消防员生命安全、提升救援效率具有重大意义。然而，火场极端的高温、强热辐射等严酷热环境对消防机器人的结构完整性、功能稳定性以及核心部件（如控制系统、传感器等）的正常运行构成了严峻挑战，有效的热防护是确保消防机器人安全可靠运行的关键前提。本综述系统梳理了当前消防机器人热防护领域的研

究现状与进展，首先阐述了热防护材料研究所需遵循的传热学基本原理，重点分析了几类常用热防护材料的研究进展，包括利用热阻隔绝热量传递的防热涂层和传统隔热材料，以及利用潜热吸收热量的相变储热材料，探讨了它们的防护机理、优缺点及最新发展动态。同时强调了建立科学、全面的热防护材料性能评价方法的重要性，涵盖了材料本征性能指标测试和面向实际应用场景的模拟测试两个层面，为材料的筛选与优化提供了依据。进一步地，本综述探讨了消防机器人的热防护技术研究，从系统层面分析了整体热防护方案的设计思路，强调了多重防护策略（如涂层、隔热层、冷却系统等）的集成应用，重点关注了针对机器人内部核心部件的精细化综合热防护设计，以确保在高热流密度和长时间作业中关键功能的稳定，从而增强其在复杂火灾场景中的应用效果。

现阶段针对消防机器人热防护的研究还处于起始阶段，实际应用大多集中于整体多层隔热结构以及水冷、风冷等传统主动热管理方式。针对当前消防机器人热防护所面临的技术及应用难题，一方面需要考虑材料的耐高温极限与轻量化之间的矛盾，如何在满足消防机器人整体轻量化要求的同时，兼顾材料的隔热性能，成为一个亟待解决的重要问题。此外，材料在火场复杂环境下的长期稳定性也是制约消防机器人热防护技术进一步发展的关键因素。材料在火场复杂多重环境影响下的性能保持，直接关系到消防机器人的安全性和可靠性。消防机器人热防护材料在高温环境下的长期稳定性与可靠性，可以从材料体系设计、结构优化、动态热管理等方面进行考虑。一方面，开发和选用具有优异耐高温性能及高温稳定性的热防护材料，并通过合理的结构设计协调优化热防护材料在实际工作过程中的高温可靠性；另一方面，可以考虑针对机器人进行动态热管理设计，针对不同的外部环境状态实时调整机器人热防护策略，从而提高机器人热防护系统的长期稳定性和可靠性。同时，消防机器人整体材料及部件热防护的成本控制也是其规模化应用面临的重要挑战。高性能热防护材料的研发和应用往往伴随着较高的成本，这可能限制其在实际消防场景中的广泛应用。因此，如何在保证性能的前提下，降低材料和技术的成本，是推动消防机器人热防护技术发展的另一重要方向。降低消防机器人热防护成本以实现规模化应用，一方面需要研发高性能低成本的热防护材料，通过优化制备工艺，提高气凝胶等高性能隔热材料的生产效率，同时针对成本较低但隔热性能不满足高温高热环境使用需求的隔热材料，进行材料改性或制备多层复合材料以提高其隔热性能；另一方面也可以通过优化机器人热防护结构设计，提高各部分热防护材料的利用效率，从而节约热防护材料用量并减少材料浪费。同时，随着 3D 打印等一体化成型技术的不断发展，采用一体化成型技术制备消防机器人热防护结构也有望减少材料浪费，提高其生产效率从而实现消防机器人规模化应用。综上所述，消防机器人的热防护研究领域仍存在巨大的提升空间和广阔的发展前景，突破现有的技术瓶颈，实现消防机器人热防护的进一步创新与应用，是当前亟须解决的关键问题。

4.2　未来研究展望

未来，消防机器人智能化、自主化作业成为主要发展方向，对消防机器人的智能化控制与多传感器融合等方面提出了更高的要求。因此，针对消防机器人热防护领域还有许多新的方向和思路有待进一步研究。

4.2.1　智能化热防护系统

依托于近些年来不断发展的传感器与物联网技术，机器人热防护系统正朝着更加智能化的方向迈进。通过结合机器人视觉、温度传感、气体传感等多种技术，机器人能够实现对外部环境的实时监测与数据分析，根据不同的外部环境状态，系统可以实时调节外部隔热系统和内部散热控温系统的运行状态，从而实现高效精准的热防护。随着人工智能技术的持续进步，具备图像识别、环境感知、自动化控制、路径规划等多种功能的智能消防机器人，亦有望推动热防护系统的智能化发展。此外，智能防隔热材料作为一种智能材料，能够感知外部刺激并产生响应驱动，可以应用于智能热防护系统实现智能化热防护。例如研发以形状记忆合金为基体的多层复合隔热材料，利用其形状记忆与隔热性能的协同作用，使得材料能按需提供可调的隔热能力，为智能热防护设计提供新的思路。

4.2.2　传感器集成与数据融合

智能消防机器人在复杂的室内灭火救援场景中，必须具备强大的环境自主感知能力，这是实现自主避障、路径规划及集群作业等高级功能的基础。特别是在热防护方面，机器人需要精确测量外部环境及自身关键部件的温度，并依据实时数据动态调整热防护策略，以实现高效的智能热管理。随着多传感器融合技术的研发与应用，消防机器人集成多种类型的传感器有望能够实时、精准地捕捉火场温度分布、机器人关键部件温升变化等信息。通过数据融合，构建动态热管理模型，使消防机器人能根据环境与自身温度状态调整其热防护策略，同时提出预警与优化调控，提前

预判高温对机器人核心部件的影响，动态规划机器人作业路径与任务分配，从而提升消防机器人在极端火场环境中的可靠性和使用寿命。

4.2.3 动态热管理调控

灭火救援机器人在动态环境下执行任务的过程中，其热防护策略必须能够动态适应。在火场高温环境下，热防护功能应侧重于隔热，而在离开火场回到室温条件时，则需要转向散热。为满足这种切换需求，引入智能热管理技术至关重要，其中热开关提供了一种可行的实现途径。热开关是一种通过改变导热通路的热阻而实现热量传递控制的装置，在热路中起着断开、闭合的作用，已在建筑节能、系统储能、空间飞行器部件热管理等领域得到应用[49]。其基本结构通常包括热端、冷端和桥接端。桥接端断开时，热开关呈高热阻状态（隔热）；桥接端连通时，则呈低热阻状态（导热/散热）[50]。通过热开关结构可以实现机器人隔热散热的自主动态切换，从而对消防机器人整体和核心部件进行动态的热管理调控。通过集成热开关结构，有望实现消防机器人隔热与散热模式的自主、动态切换，从而对机器人整体及核心部件实施有效的动态热管理。

参考文献

[1] 廖曙江. 大空间建筑内活动火灾荷载火灾发展及蔓延特性研究[D]. 重庆：重庆大学，2002.
LIAO S J. The fire growth and spreading characteristic research of unfixed fire loads in large space buildings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.

[2] FULLAGAR H, NOTLEY S R, FRANSEN J, et al. Cooling strategies for firefighters: effects on physiological, physical, and visuo-motor outcomes following fire-fighting tasks in the heat[J]. Journal of Thermal Biology, 2022, 106: 103236.

[3] 高翌乔，梁池森，陈卓娅. 智能消防机器人的设计和应用[J]. 数字技术与应用，2023，41(8)：170-172.
GAO Y Q, LIANG C S, CHEN Z Y. Design and application of intelligent fire fighting robot[J]. Digital Technology & Application, 2023, 41(8): 170-172.

[4] 周亦人，沈自才，齐振一，等. 中国航天科技发展对高性能材料的需求[J]. 材料工程，2021，49(11)：41-50.
ZHOU Y R, SHEN Z C, QI Z Y, et al. Demand for high performance materials in development of China's aerospace science and technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(11): 41-50.

[5] SU Y, FAN Y, MA Y, et al. Flame-retardant phase change material (PCM) for thermal protective application in firefighting protective clothing[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 185: 108075.

[6] 张路，袁芳，王文清，等. 面向一体化热防护的陶瓷基复合材料轻量化结构研究进展与挑战[J]. 材料工程，2022，50(10)：15-28.
ZHANG L, YUAN F, WANG W Q, et al. Progress and challenges in lightweight ceramic matrix composite structures towards integrated thermal protection structure[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(10): 15-28.

[7] 郭琳琳，苗成朋，张金君，等. 可重复使用刚性陶瓷隔热瓦辐射式热防护涂层研究进展[J]. 材料工程，2025，53(6)：105-116.
GUO L L, MIAO C P, ZHANG J J, et al. Research progress in reusable radiant thermal protection coatings on rigid ceramic insulation tiles[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(6): 105-116.

[8] FONSECA A, NEVES S F, CAMPOS J B L M. Thermal performance of a PCM firefighting suit considering transient periods of fire exposure, post-fire exposure and resting phases[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 115769.

[9] WANG T, WANG L. Effect of fabric properties and glove structure on thermal protective performance of fire gloves under flash fire exposure[J]. Textile Research Journal, 2023, 93(17/18): 4315-4328.

[10] GENG J, GUO S, GAO Z W, et al. Influence of radiation mode and intensity on the protective performance of firefighting boots[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 87: 105247.

[11] 石威. 各国消防机器人纵览[J]. 中国消防，2021(10)：73-75.
SHI W. Overview of fire fighting robots in various countries[J]. China Fire, 2021(10): 73-75.

[12] 陈庆暖. 消防灭火机器人及其应用[J]. 消防科学与技术，2018，37(5)：644-646.
CHEN Q N. Fire fighting robot and its application[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(5): 644-646.

[13] BOGUE R. The role of robots in firefighting[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2021, 48(2): 174-178.

[14] 尹海阳，龙小玉，肖飒，等. 消防灭火机器人的发展现状及展望综述[J]. 今日消防，2023，8(1)：16-18.
YIN H Y, LONG X Y, XIAO S, et al. A review of the development status and prospect of fire fighting robots[J]. Fire Protection Today, 2023, 8(1): 16-18.

[15] 黄小龙，郭一冉，高阳臻，等. 消防机器人研究进展与分析[J]. 消防科学与技术，2021，40(10)：1501-1504.
HUANG X L, GUO Y R, GAO Y Z, et al. Development and analysis of fire fighting robot[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(10): 1501-1504.

[16] 方江平. 消防灭火机器人研究进展[J]. 今日消防，2020，5(3)：19-22.
FANG J P. Research progress of fire fighting robot[J]. Fire Protection Today, 2020, 5(3): 19-22.

[17] 刘国熠. 消防避火服用柔性复合材料的热防护性能研究[D]. 天津：天津工业大学，2018.
LIU G Y. Research on thermal protective performance of flexible composite materials for firefighting proximity suits[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2018.

[18] 李贺. LED微阵列器件的热学性能分析及热沉结构设计[D]. 长

春：中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所)，2015.
LI H. Thermal analysis and heatsink structural design of LED microarray device[D]. Changchun：Changchun Institute of Optics，Fine Mechanics and Physics，Chinese Academy of Sciences，2015.

[19] 余飞. 正十二醇相变储热微/纳米胶囊的制备、表征及其应用研究[D]. 广州：华南理工大学，2009.
YU F. Preparation，characterization and application of phase change thermal storage mcirocapsules and nanocapsules containing N-dodecanol[D]. Guangzhou：South China University of Technology，2009.

[20] 赵荻，安宇龙，赵晓琴，等. 不同厚度8YSZ热障涂层的结构及性能表征[J]. 表面技术，2020，49(1)：276-284.
ZHAO D，AN Y L，ZHAO X Q，et al. Structure and properties of 8YSZ thermal barrier coatings with different thickness[J]. Surface Technology，2020，49(1)：276-284.

[21] 王潇，孙强，张国伟，等. 消防机器人热防护材料隔热性能数值模拟[J]. 安全与环境学报，2023，23(4)：1062-1066.
WANG X，SUN Q，ZHANG G W，et al. Numerical simulation of the heat- insulation performance of thermal protection material for firefighting robot[J]. Journal of Safety and Environment，2023，23(4)：1062-1066.

[22] 张辉，程广伟，张永博，等. 消防机器人热防护隔热材料选择与结构优化[J]. 消防科学与技术，2024，43(4)：528-534.
ZHANG H，CHENG G W，ZHANG Y B，et al. Selection and structural optimization of thermal insulation materials for firefighting robots[J]. Fire Science and Technology，2024，43(4)：528-534.

[23] 刘佳琪，王超会，林蔚，等. *M*CrAlY金属黏结层高温失效行为研究进展[J]. 材料工程，2024，52(3)：22-32.
LIU J Q，WANG C H，LIN W，et al. Research progress in high-temperature failure behavior of *M*CrAlY metal bond-coat[J]. Journal of Materials Engineering，2024，52(3)：22-32.

[24] 罗宇晴，李子楠，朱石刚，等. LaZrCeO热障涂层EB-PVD制备及失效机理[J]. 材料工程，2024，52(12)：53-60.
LUO Y Q，LI Z N，ZHU S G，et al. Preparation and failure mechanism of LaZrCeO thermal barrier coating by EB-PVD[J]. Journal of Materials Engineering，2024，52(12)：53-60.

[25] 范佳宾，王全胜，宁先进，等. 高温、高温度梯度条件下多元稀土掺杂氧化锆热障涂层的失效过程与机理[J]. 中国表面工程，2025，38(2)：293-301.
FAN J B，WANG Q S，NING X J，et al. Failure process and mechanism of multi-rare earth oxide Co-doped ZrO_2 thermal barrier coatings under high temperature and high temperature gradient[J]. China Surface Engineering，2025，38(2)：293-301.

[26] SEVINCHAN E，DINCER I，LANG H. Investigation of heat transfer performance of various insulating materials for robots[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2019，131：907-919.

[27] 常建，杨磊，张桂硕，等. 一种机器人用的抗高温材料：CN118063190A[P]. 2024-05-24.
CHANG J，YANG L，ZHANG G S，et al. A high-temperature-resistant material for robots：CN118063190A[P]. 2024-05-24.

[28] MIDHUN V C，SURESH S，KRISHNAN A S R，et al. Effect of vacuum insulation panel integration in phase change material-based passive thermal management system for electronics package exposed to hot air environment[J]. Journal of Energy Storage，2022，53：105180.

[29] 韩延龙. 基于相变材料的核救灾机器人电子器件热防护研究[D]. 上海：华东理工大学，2016.
HAN Y L. Phase change material based thermal management for electronic devices on nuclear rescue robot[D]. Shanghai：East China University of Science and Technology，2016.

[30] 王潇，李永强，刘天奇，等. 应用于火灾救援机器人的相变胶囊多层堆积热防护数值研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版)，2024，20(1)：82-88.
WANG X，LI Y Q，LIU T Q，et al. Numerical studyon thermal protectionof phase change capsule multi-layer stackingfor fire rescue robot[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science)，2024，20(1)：82-88.

[31] LI F，HUANG Y，SUN J，et al. A high-temperature resistant robot for fixed-point firefighting[C]//YANG H，LIU H，ZOU J，et al. Intelligent Robotics and Applications. Singapore：Springer，2023：527-536.

[32] WANG X，ZHAO W，POLLARD J，et al. Experimental study on the thermal protection enhancement of novel phase change material integrated structural firefighting gloves under high-heat exposures[J]. Case Studies in Thermal Engineering，2024，56：104286.

[33] WANG Y，MA Y，CHEN R，et al. Thermal protective performance of firefighting protective clothing incorporated with phase change material in fire environments[J]. Fire and Materials，2021，45(2)：250-260.

[34] 唐飞，李明旭，徐延泷，等. 一种热防护结构：CN208896137U[P].2019-05-24.
TANG F，LI M X，XU Y L，et al.A thermal protection structure：NC208896137U[P].2019-05-24.

[35] STEFAN A，GRIGORE L S，MOLDER C，et al. Research on heat transfer through a double-walled heat shield of a firefighting robot[J]. Machines，2022，10(10)：942.

[36] ALHAZA T，ALSADOON A，ALHUSINAN Z，et al. New concept for indoor fire fighting robot[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences，2015，195：2343-2352.

[37] SUCUOGLU H，BOGREKCI I，DEMIRCIOGLU P，et al. Thermal and structural analyses of firefighting robot[C]//World Electro Mobility (WELMO) Conference. Ankara：IEEE Turkey Section，2017.

[38] 常建，杨斌，张桂硕，等. 一种抗高温机器人隔热方法：CN117429100A[P]. 2024-01-23.
CHANG J，YANG B，ZHANG G S，et al. A high-temperature-resistant insulation method for robots：CN117429100A[P]. 2024-01-23.

[39] FUJITA J，TAMURA Y，AMANO H，et al. Novel exterior cover design for radiant heat resistance of firefighting robots in large-scale petrochemical complex fires[J]. ROBOMECH Journal，2022，9(1)：13.

[40] 周操，刘斌，郭宝林，等．一种用于消防机器人的热防护板：CN202421273364.2[P]. 2025-03-18.
ZHOU C，LIU B，GUO B L，et al. A thermal protection panel for firefighting robots：CN202421273364.2[P]. 2025-03-18.

[41] 王哲夫．火灾救援机器人电子器件热防护技术研究[D]. 厦门：厦门理工学院，2021.
WANG Z F. Research on thermal protection technology for electronic devices of fire rescue robot[D]. Xiamen：Xiamen University of Technology，2021.

[42] 唐飞，张逍，罗刚，等．一种传感器热防护装置、方法及消防机器人：CN202011151854.1[P]. 2020-11-24.
TANG F，ZHANG X，LUO G，et al. A sensor thermal protection device，method and firefighting robot：CN202011151854.1[P]. 2020-11-24.

[43] 唐飞，段玮倩，王昊森，等．一种耐高温天线结构：CN110459863A[P]. 2019-11-15.
TANG F，DUAN W Q，WANG H S，et al. A high-temperature-resistant antenna structure：CN110459863A[P]. 2019-11-15.

[44] 唐飞，徐延泷，李明旭，等．一种耐高温照明系统及采用该系统的消防机器人：CN202010311060.0[P]. 2020-06-23.
TANG F，XU Y L，LI M X，et al. A high-temperature-resistant lighting system and firefighting robot adopting the system：CN202010311060.0[P]. 2020-06-23.

[45] 唐飞，彭焱，张逍，等．一种耐高温监测系统：CN109167906A[P]. 2019-01-08.
TANG F，PENG Y，ZHANG X，et al. A high-temperature-resistant monitoring system：CN109167906A[P]. 2019-01-08.

[46] 孙柯．核救灾机器人电子器件热防护系统研究[D]. 上海：华东理工大学，2017.
SUN K. Research on thermal protection system of electronic device for nuclear disaster relief robot[D]. Shanghai：East China University of Science and Technology，2017.

[47] 陈海．一种耐高温设备用可升降全景环视系统及热防护结构：CN20221593916U[P].2024-08-23.
CHEN H. A liftable panoramic vision system and thermal protection structure for high-temperature resistant equipment：CN20221593916U[P].2024-08-23.

[48] 陈海．一种耐高温消防机器人用相机热防护装置：CN117872665A[P]. 2024-04-12.
CHEN H. A camera thermal protection device for high-temperature-resistant firefighting robots：CN117872665A[P]. 2024-04-12.

[49] 聂华成．基于温控双稳态狭缝流动的热开关传热性能与调控机理研究[D]. 济南：齐鲁工业大学，2023.
NIE H C. Heat transfer performance and tunable mechanism of thermal switch based on temperature-driven bistable slit flow[D]. Jinan：Qilu University of Technology，2023.

[50] HU P，WANG J. Smart passive thermal switches[J]. Device，2023，1(3)：100095.

基金项目：国家重点研发计划(2023YFC3011001)
收稿日期：2025-06-06；**录用日期**：2025-08-26

通讯作者：祝薇(1987—)，女，副研究员，博士，长期从事功能薄膜与器件、热管理材料与技术等相关研究工作，联系地址：北京市昌平区沙河高教园北京航空航天大学沙河校区材料科学与工程学院(102206)，E-mail：zhu_wei@buaa.edu.cn；邓元(1972—)，男，教授，博士，长期从事新型热能调控材料与技术、新型温度传感技术等相关研究工作，联系地址：北京市昌平区沙河高教园北京航空航天大学沙河校区(102206)，E-mail：dengyuan@buaa.edu.cn

(本文责编：齐书涵)