

单兵空调系统研究

张行周, 钟晓晖, 吴玉庭, 马重芳

(北京工业大学 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100022)

摘要: 在炎热环境中单兵空调系统可以对士兵的身体进行冷热调节, 制造一种微气候环境。通过试验研究的方法, 采用强化传热措施及轻质材料来减小微型制冷系统的质量及体积, 研制了一种微型蒸汽压缩制冷系统作为单兵空调的冷源, 微型制冷系统的制冷量为 300 W, 质量为 2.85 kg, 几何尺寸为 270 mm × 260 mm × 120 mm。此微型制冷系统提供的制冷量能够保证一个士兵在 40 环境温度下作战时感觉舒适, 不会产生热应激。所研制的微型制冷系统为我国士兵的个体热防护提供了一种轻便、易于携带的装备。

关键词: 热工学; 热防护; 单兵空调; 蒸汽压缩制冷; 旋转式压缩机

中图分类号: TB657; X986 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2007)06-0749-04

Study of Soldier's Air-conditioning Systems

ZHANG Xing-zhou, ZHONG Xiao-hui, WU Yu-ting, MA Chong-fang

(Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation Key Lab of Education Minister, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In a hot environment, the soldier's air-conditioning system can cool the body of soldier. The reduced size and weight of miniature vapor compression system were obtained by adopting enhanced heat transfer and low density material. A miniature vapor cycle refrigeration system as the cooling source of soldier's air-conditioning system was developed. The miniature vapor compression refrigeration system can provide 300 W cooling capacity, has dimensions of 270 mm × 260 mm × 120 mm, and weighs approximately 2.85 kg. This system can supply a comfortable micro-climate surrounding around the soldier in 40 hot environment to avoid heat stress. The system can provide a heat protection for soldier.

Key words: pyrology; thermal protection; soldier's air-conditioning; vapor cycle refrigeration; rotary compressor

0 引言

由于通信技术、计算机技术、全球定位技术和精确制导技术的迅猛发展, 未来战场作战模式将发生革命性变化。为适应这种变化, 各国都在争相开发单兵作战系统。各国开发的单兵系统主要包括 5 个子系统: 头盔、防护服、指挥控制、软件和武器^[1]。其中单兵空调系统是防护服子系统的一部分, 其主要功能是在高温湿热环境中吸收人体的热负荷, 维

持身体核心温度的恒定, 以提高作战人员在高热环境中的作战能力, 延长作战时间^[2-3]。

单兵空调系统可以使冷却液沿人体表面循环, 对士兵的身体进行冷热调节, 制造一种微气候环境, 使人如同置身于一个凉爽世界。单兵空调系统由液冷服和微型制冷系统组成。单兵空调系统采用局部性液冷服, 局部性液冷服主要包括液冷头盔、液冷背心等。液冷服内有细小管路, 当士兵穿着液冷服时, 由泵把冷却液打出, 通过管路流入液冷服, 冷却液降

低了士兵的身体温度后流至一个热交换器,热交换器与微型制冷系统相联,冷却液在此处被冷却后又进入循环,周而复始,循环制冷^[4]。目前各国正在研究的主动式微型制冷系统主要有蒸汽压缩制冷和吸收式制冷等。

1 热应激与工作负荷

为了避免过热,人体所产生的新陈代谢热传递给周围环境,当炎热环境阻止热量散发时,身体温度升高造成不舒适,如果身体温度过高就会产生更加严重的热应激。

身体依靠劳动强度的大小来消化食物,如果把身体看作机器,人体的效率很低,在完成少量有用功的同时产生了大量的热,肌肉活动越旺盛产生的热量越多,但是维持巅峰状态的时间很短。对于一个士兵而言,不同活动的产热量见表 1^[5]。

表 1 不同活动的产热量

Tab. 1 Metabolic heat output for various activities

活动类型	产热量/W	活动类型	产热量/W
站岗	137	挖散兵坑	475
擦枪	198	挖炮兵掩体	540

当输入身体的热量大于身体的散热量时,热积累达到某种程度后,热应激就会出现。由于对被迫存储热量的忍受能力有限,人必须休息以便于恢复体力。在炎热环境中工作时间较长时会造成皮肤发红,对工作疏忽,可能会产生中暑等症状。

为了避免热应激的出现,可以采取两种措施:一是减少输入身体的热量;二是增加身体的散热量。通用的解决办法是冷却周围的环境。然而,在某些情况下,控制周围环境的温度是不切实际的或者费用昂贵,这样就需要进行个人冷却。

根据 Natick 单兵中心研究结果:一个士兵的工作负荷一般在 100 ~ 500 W 之间,只要提供 300 W 冷量就可保证一个士兵在炎热的环境中身穿防护服作战时不会出现热应激。

2 国内外研究现状

美国的 Natick 单兵中心、Aspen 系统公司、Foster-Miller 公司和 PNNL 国家实验室等从 20 世纪 90 年代初期就开始从事这方面的研究工作,Natick 单兵中心、Aspen 系统公司、Foster-Miller 公司主要研制的是微型蒸汽压缩制冷系统,而 PNNL 国家实验室主要研制吸收式制冷系统,到目前为止,已经有多个

型号的微型制冷系统样机研制成功,而且 Foster-Miller 公司研制的微型蒸汽压缩制冷系统已经被美军在伊拉克战争中使用。目前,在我国还未见到有关这方面的报道。

1994 年 Natick 单兵中心开发了 IMCS 个体微气候制冷系统,IMCS 采用微型内燃机驱动蒸汽压缩制冷系统,制冷量为 300 W。微型内燃机采用 JP-8 液体燃料,携带 170 g JP-8 液体燃料可以使 IMCS 制冷系统连续运转 5 h。IMCS 系统质量为 7.71 kg,系统背包几何尺寸为 178 mm × 254 mm × 305 mm。

1996 年 Natick 单兵中心开发了 PVCS 便携式蒸汽压缩制冷系统,其包括制冷单元、电池模块、液冷服及联接管路。电池模块可以取下来充电。该系统采用 R-134a 作为制冷剂,其制冷量为 300 W。采用 4 节 24 V BA-5590 亚硫酸锂电池供电可以连续运转 4 h。制冷单元质量为 4.5 kg,几何尺寸为 257 mm × 168 mm × 159 mm;电池模块质量约 5 kg,几何尺寸为 260 mm × 175 mm × 159 mm;全身液冷服包括液冷背心、液冷裤和液冷帽,其质量为 2.72 kg。PVCS 系统已经被直升机驾驶人员使用。

1998 年 Natick 单兵中心开发了 ALMCS 高级轻型微气候制冷系统,特点是质量轻,便于携带。ALMCS 采用 R-134a 作为制冷剂,在 35 °C 的环境中制冷量为 230 W。采用 2 节 24 V BA-5590 亚硫酸锂电池供电,可连续使用 3 h。含有 2 节电池的 ALMCS 系统质量约 5 kg,几何尺寸为 165 mm × 105 mm × 413 mm。ALMCS 系统通过采用微型滚动活塞压缩机和新颖的背包设计在减轻质量和减小体积上取得了重大突破,已具备商业生产。

Aspen 系统公司成功研制了 3 种回转压缩机,制冷量从 120 W 到 400 W 不等。图 1 所示为安装有无刷电机的回转压缩机,此压缩机直径为 51 mm,长度为 76 mm,质量约 0.45 kg。Aspen 系统公司使用此种压缩机为美国陆军研制了紧凑式蒸汽压缩制冷系统,该系统在 35 °C 环境下的制冷量为 120 W,输入的电功率为 50 W,电源为 24 V 直流电,系统质



图 1 Aspen 的回转压缩机

Fig. 1 Rotary compressor developed by Aspen

量为 2.1 kg,几何尺寸为 185 mm × 190 mm × 84 mm.

Aspen 系统公司还研制了个人冷却系统 PCS (见图 2),它也是采用回转式压缩机,能够在 38 环境中提供 300 W 制冷量,压缩机直径为 51 mm,长度为 69 mm,质量为 0.59 kg,采用 R-134a 作为制冷剂。该系统采用 24 V 或 12 V 直流亚硫酸锂电池作为电源,电池质量为 1.36 kg,制冷单元质量为 2.72 kg,整个 PCS 系统质量为 4.08 kg,几何尺寸为 241 mm × 178 mm × 95 mm. 该系统连续运行时间为 3 h.

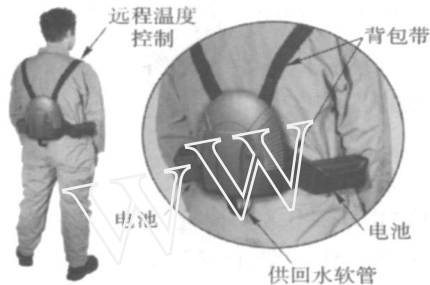


图 2 Aspen 的个人冷却系统

Fig. 2 Personal refrigeration system developed by Aspen

Foster-Miller 公司也为美国陆军研制了紧凑型蒸气压缩制冷系统,该系统在 35 环境下的制冷量为 115 W,其输入的电功率为 50 W,电源为 24 V 直流电,系统质量为 1.8 kg,系统体积为 2 788 cm³.

Foster-Miller 公司还研发了空中勇士微气候制冷机 MCU (见图 3),这套系统在美国军用直升机上进行了全面测试,并在伊拉克战争中使用。该系统在 52 的炎热环境中能提供 324 W 的制冷量。制冷机 MCU 依靠 28 V 直流电源运转,最大工作电流不超过 12 A. 该系统质量为 5.89 kg.

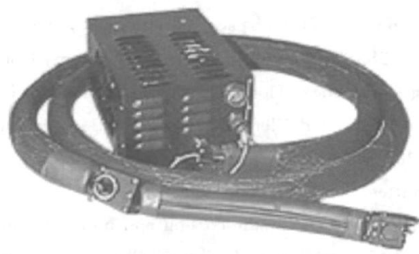


图 3 Foster-Miller 的空中勇士微气候制冷机

Fig. 3 Micro refrigeration unit developed by Foster-Miller

美国的 PNNL 国家实验室研发了一种 LiBr/H₂O 吸收式微型热泵,它主要由液体燃料燃烧产生的热能驱动,此外也需要少量的电能驱动液体泵和风扇,它能提供 350 W 的制冷量,可以连续运行 8 h,

其系统质量为 4.99 kg,几何尺寸为 280 mm × 250 mm × 250 mm.

3 微型制冷系统性能

微型制冷系统由旋转式压缩机、管带式冷凝器、套管式蒸发器及毛细管组成。冷凝器是采用铝材制造的,直流风扇对冷凝器进行风冷。套管式蒸发器是由紫铜制造的,它有两路通路:一路为制冷剂通路;另一路为冷水通路。液冷服内有细小管路,细管内水流为单向直通,水流从髋臀之间的总进水管流入,分流上行至背部,绕过肩向下,经胸腹部到达腰部,然后横行折向髋臀部汇入总出水管。液冷服总进、出水管分别与套管蒸发器冷水通路的出口和进口相联,冷水在液冷服和微型制冷系统之间循环流动。

经过近 5 年的研制,北京工业大学于 2005 年底研制出了第一代微型制冷系统——工大微冷-1 型 (见图 4)。研制的微型制冷系统采用旋转式压缩机,第一代微型制冷系统压缩机 (见图 5) 采用铸铁制造,质量为 700 g,而第二代压缩机采用铝合金制造,目前主要零部件已经加工完成,正在组装测试,铝合金材质的压缩机在质量上将更加轻巧。



图 4 北京工业大学研制的微型制冷系统

Fig. 4 Micro refrigeration system developed by Beijing University of Technology

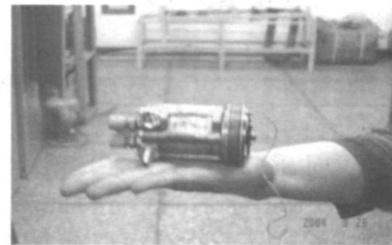


图 5 北京工业大学研制的旋转式压缩机

Fig. 5 Rotary compressor developed by Beijing University of Technology

工大微冷-1 型采用 12 V 高能锂离子聚合物电池作为动力源,水路循环是由微型电动水泵驱动。

微型制冷系统质量为 2.85 kg,几何尺寸为 270 mm × 260 mm × 120 mm.

第一代微型制冷系统在工作环境温度 40℃,制冷剂 R22 充注量 100 g,转速 1 950 r/min,输入电功率 190 W,水流量 38 kg/h 的工况下进行了性能测试,冷水进出口温度随时间的变化如图 6 所示,制冷量随时间的变化如图 7 所示,微型制冷系统的能效比 EER 随时间的变化如图 8 所示。

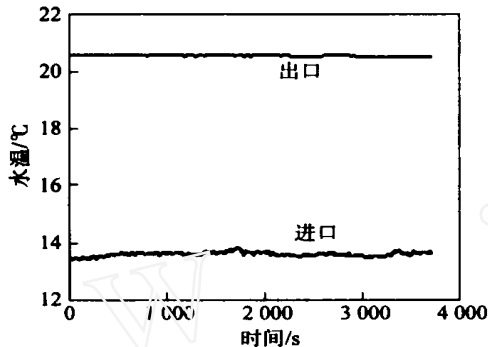


图 6 冷水进出口温度随时间的变化

Fig. 6 Variation of inlet/outlet cooling water temperature with time

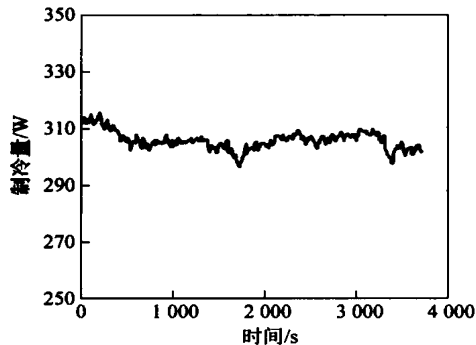


图 7 制冷量随时间的变化

Fig. 7 Change of refrigerating capacity with time

从图 7 中可以看出,微型制冷系统能够提供 300 W 以上的制冷量,可以满足单兵空调去除身体产生 300 W 热负荷的要求,能够保证一个士兵在 40℃ 环境温度下作战时感觉舒适,不会产生热应激。从图 8 中可以看出,微型制冷系统的能效比在 1.6 ~ 1.7 之间,有些偏低,需要进一步改善微型制冷系统

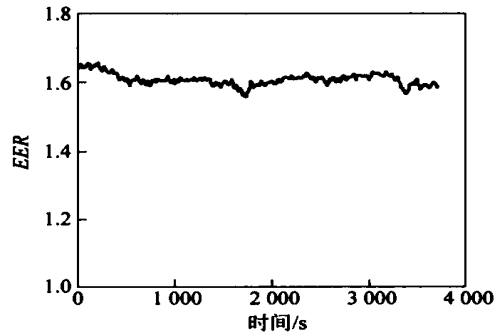


图 8 EER 随时间的变化

Fig. 8 Variation of EER with time

的效能,这样可以在同等电池容量的情况下延长微型制冷系统的工作时间。

4 结论

在炎热环境中作战时,士兵使用单兵空调冷却身体既可以提高作战效能又可以减少身体出现热应激的可能。工大微冷型蒸汽压缩制冷系统作为单兵空调的冷源,此系统能够提供 300 W 的制冷量,质量为 2.85 kg,几何尺寸为 270 mm × 260 mm × 120 mm。北京工业大学研制的微型制冷系统为我国士兵的个体热防护提供了一种轻便、易于携带的装备。

参考文献 (References)

- [1] Hewish Mark, Pengelley Rupert. Future soldier systems [J]. Janes International Defense Review, 1998, (31): 54 - 60.
- [2] Ken Beiko. Evaluation of personal cooling systems explosive ordnance disposal suits, TM-03-93 [R]. Canada: Canadian Police Research Center, 1993.
- [3] Kevin Drost M, Michele Friedrich. Miniature heat pump for portable and distributed space conditioning applications [C]. PNNL-SA-28888. The 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Honolulu, Hawaii, US: PNNL, 1997.
- [4] PC Schutte, C der Clerk, Matesa J. Body-cooling systems, SIM020702 [R]. South Africa: Safety in Mines Research Advisory Committee, 2002.
- [5] Roger Masadi. Microclimate cooling and power requirement [R]. US: US Army Soldier & Biological Chemical Command Natick Soldier Center, 2000.