

# 被动辐射制冷安全头盔的降温性能研究

丁晨星<sup>1</sup>, 朱龙潜<sup>2\*</sup>, 刘海康<sup>1</sup>, 潘巧<sup>1</sup>, 贺伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广东电网有限责任公司广州供电局输电管理二所, 广东 广州

<sup>2</sup>广州市香港科大霍英东研究院建筑物能源研究中心, 广东 广州

收稿日期: 2024年8月23日; 录用日期: 2024年10月22日; 发布日期: 2024年11月1日

## 摘要

随着全球气候变暖, 气温上升, 佩戴安全头盔的户外作业人员的热舒适度大幅下降, 还将伴随着中暑、脱水等健康问题。现有的安全头盔有加强自然对流、强制对流、加装制冷设备等三种途径实现降温, 然而会牺牲安全头盔的安全性能、增加头盔负重, 各有缺陷。文章提出一种涂敷了被动辐射制冷涂层的安全头盔, 可低成本地实现安全头盔的降温性能, 提高佩戴人员的热舒适度。经实验测试, 涂层附着能力强; 涂敷了被动辐射制冷涂层的安全头盔的安全性能未受到损伤, 符合相关安全标准; 在户外时, 涂敷了被动辐射制冷涂层的安全头盔比未处理的安全头盔外表面温度平均降低了10°C以上, 内部温度平均降低了3°C以上。被动辐射制冷涂层对安全头盔具有显著的降温效果。

## 关键词

安全头盔, 被动辐射制冷涂层, 附着性能, 安全性能, 降温性能

# Research on the Cooling Performance of Passive Radiation Cooling Safety Helmet

Chenxing Ding<sup>1</sup>, Longqian Zhu<sup>2\*</sup>, Haikang Liu<sup>1</sup>, Qiao Pan<sup>1</sup>, Wei He<sup>2</sup>

<sup>1</sup>No.2 Transmission Management Institute of Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co. Ltd., Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Building Energy Research Center, Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou Guangdong

Received: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2024; accepted: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Nov. 1<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

With global climate change and rising temperatures, the thermal comfort of outdoor workers

\*通讯作者。

文章引用: 丁晨星, 朱龙潜, 刘海康, 潘巧, 贺伟. 被动辐射制冷安全头盔的降温性能研究[J]. 材料科学, 2024, 14(11): 1529-1536. DOI: 10.12677/ms.2024.1411166

wearing safety helmets has significantly decreased, accompanied by health problems such as heat-stroke and dehydration. The existing safety helmets have three ways to achieve cooling: strengthening natural convection, forced convection, and installing refrigeration equipment. However, in this case, the safety performance of the helmet will be reduced, and the weight of the helmet will be increased. These three ways have their own shortcomings. This article proposes a safety helmet coated with passive radiation cooling coating, which can achieve the cooling performance of the safety helmet at a low cost and improve the thermal comfort of the wearer. Through experimental testing, the coating has strong adhesion ability. The safety performance of the helmet coated with passive radiation cooling coating has not been damaged and meets relevant safety standards. In outdoor testing, the safety helmets coated with passive radiation cooling have an average surface temperature reduction of more than 10°C and an average internal temperature reduction of more than 3°C compared to untreated safety helmets. Passive radiation cooling coating has a significant cooling effect on safety helmets.

## Keywords

Safety Helmet, Passive Radiative Cooling Coating, Adhesion Performance, Safety Performance, Cooling Performance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

安全头盔是一种重要的安全工器具，对于户外作业人员而言必不可少，可保护头部不受坠落物及其他因素引起的伤害，可有效防止或减少工伤事故的发生。在过去的几十年中，全球气候变暖及能源短缺的问题愈加严重。随着全球气候变暖，夏季的平均温度乃至全年的平均温度也有明显地上升[1]。更高的气温不单止会导致户外作业人员热舒适度大幅下降，还会有中暑、脱水等健康问题；对于电力相关行业的户外作业人员而言，更高的气温会导致更多汗液的排出，在特殊场景甚至会有安全隐患。人类头部的制冷效率比其他部位更高，降低头部温度，能有效提高人体的高温耐受性和热舒适度[2]。由此可见，一种具备降温能力的、可以改善佩戴人员热舒适度、适用于户外作业的安全头盔的研发迫在眉睫。

现有的安全头盔主要有三种降温的方式。其一：增设透风窗口，加强自然对流；其二：在安全头盔上加装风扇等设备强制对流[3]；其三：采用半导体制冷等方式为头盔内部空间进行制冷[4]-[6]。以上三种手段，对热舒适有不同程度的改善，但各有缺点。王方等以自行车头盔为实验对象，验证了结构对安全性能的影响，改变结构会损伤安全性能[7]；韩成祥等及石林鑫等通过复合材料提高头盔的结构强度，但是可靠性并未得到有效的验证[8] [9]。崔晚晴等研发了一种半导体制冷的安全头盔，具有不俗的冷却效果，但是会增加头盔重量和头部的负重，降低舒适性，同时电源有热失控的风险，可靠性不高，有一定的安全隐患[10]。

综上所述，现有的安全头盔在提升热舒适上并没有一个合适的方案，需要一种既不会影响其安全性能，又不会影响其重量和成本，还能提高热舒适性的技术。被动辐射制冷技术是一种新兴的被动式制冷方式，以涂层的形式添加在安全头盔表面，通过光谱调控，在户外环境能将热量以中红外线的方式通过辐射到外太空，不需要耗电，无需额外的供能设备，重量极轻，同时也不会影响安全头盔本身的安全性能[11]。因此本项目提出的基于被动辐射制冷技术而研制的降温安全头盔，为提高安全头盔的热舒适度提

供一个新思路，有望达成以上的目标。

## 2. 实验详解

在本文中，搭建了金属底座的实验平台，为安全头盔各方面的测试提供稳定的测试环境，防止因放置不稳、测试过程中发生位移而产生的误差。实验内容包括涂层附着性能测试、安全头盔安全性能测试、安全头盔表面光学性能测试、安全头盔降温性能测试等。

### 2.1. 被动辐射制冷原理

被动辐射制冷技术是一种新兴的被动式制冷方式，以涂层的形式添加在物体表面，可以使物体表面反射绝大多数太阳光，同时能将热量以中红外线的方式通过辐射到外太空。制冷过程不需要耗能，是一种零碳排放的制冷方式。

### 2.2. 被动辐射制冷涂层的制备

被动辐射制冷安全头盔的制备步骤如下：

- (1) 配备硅烷偶联剂溶液；
- (2) 清理安全头盔表面油污和灰尘；
- (3) 使用砂纸对安全头盔表面进行打磨处理，并清理干净粉末；
- (4) 将硅烷偶联剂溶液喷涂在安全头盔表面，在室温下干燥 24 小时；
- (5) 将被动辐射制冷涂料底漆与去离子水以 10:1 的比例混合、搅拌均匀，均匀喷涂在安全头盔表面，在室温下干燥 5 小时；
- (6) 将被动辐射制冷涂料面漆与去离子水以 10:1 的比例混合、搅拌均匀，均匀喷涂在安全头盔表面，在室温下干燥 5 小时。

制备完成后，安全头盔如图 1 所示。



Figure 1. Safety helmet with passive radiative cooling coating

图 1. 具有被动辐射制冷涂层的安全头盔

### 2.3. 附着力测试

附着力测试及结果评价以国家标准 GB/T 9286-1998 的百格刀拉扯测试为标准，具体附着力测试标准如表 1 所示：

**Table 1.** Cross-cut tester standard**表 1.** 百格刀测试评价标准

| ISO 等级 | ASTM 等级 | 测试结果                            |
|--------|---------|---------------------------------|
| 0      | 5B      | 切口的边缘完全光滑，格子边缘没有任何剥落            |
| 1      | 4B      | 在切口相交处有小片剥落，剥落面积不超过 5%          |
| 2      | 3B      | 切口边缘和/或相交处有剥落，剥落面积大于 5%，小于 15%  |
| 3      | 2B      | 切口边缘或格子内有大片剥落，剥落面积大于 15%，小于 35% |
| 4      | 1B      | 格子内有大片剥落，剥落面积大于 35%，小于 65%      |
| 5      | 0B      | 剥落面积大于 65%                      |

百格刀拉扯测试步骤如下：

- (1) 将安全头盔放置于实验平台上，使用百格刀在安全头盔表面测试区域划出  $10 \times 10$  个  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的小网格。所有切口应穿透涂层；
- (2) 使用软毛刷沿网格图形每一条对角线轻扫 3 次，再向前、后各扫 3 次，除去切割脱落的涂层；
- (3) 使用胶带牢牢粘住小网格，并使用橡皮擦用力擦拭胶带；
- (4) 抓住胶带一端，以垂直方向迅速撕下胶带；
- (5) 重复步骤(3)以及(4)一次；
- (6) 观察测试区域的涂层脱落情况，对照标准进行评级，记录测试结果，结束测试。

## 2.4. 安全性能测试

安全性能测试包括抗冲击性能测试以及抗穿刺强度测试。其中抗冲击性能的测试及评价方案参考标准 ISO6272-1:2011，抗穿刺强度的测试及评价方案参考标准 GB/T 10004-2008。

抗冲击性能测试具体步骤如下：

- (1) 将安全头盔放置于实验平台上；
- (2) 选用 1000 g 的砝码，放置于安全头盔正上方 2 m 处。待砝码静止后释放，使其自由落体掉落与安全头盔碰撞；
- (3) 重复步骤(2)一次；
- (4) 记录测试结果，结束测试。

抗穿刺强度测试分别以 20 N、40 N、60 N、80 N、100 N、120 N 的力度进行多组测试，每组测试将测试区域向右移动 2 cm。具体步骤如下：

- (1) 将安全头盔放置于实验平台并固定；
- (2) 使用压力计尖锐头，以设定力度对安全头盔测试区域进行穿刺；
- (3) 将压力计后撤，离开安全头盔测试区域；
- (4) 重复步骤(2)及(3)；
- (5) 记录测试结果，结束测试。

## 2.5. 降温性能测试

因被动辐射制冷技术的制冷原理，降温性能测试地点需选在户外，并选择光照充足的日期进行测试，测试时间段从 9:00 直至 18:00。在本文中，使用了两项白色的带有被动辐射制冷涂层的安全头盔作为实验组，并以两项普通的白色安全头盔作为对照组进行实验验证。具体测试步骤如下：

- (1) 将实验组安全头盔及对照组安全头盔放置于户外实验平台，安全头盔之间相互间隔 0.5 m，防止

互相干扰；

- (2) 使用光照强度测量仪测量日照强度；
- (3) 使用红外探测仪测量安全头盔外表面温度；
- (4) 使用 K 型热电偶放置于安全头盔内部正中心测量内部空气温度；
- (5) 日照强度、安全头盔外表面温度、内部空气温度数据均每间隔 10 分钟记录一次；
- (6) 结束测试。

### 3. 实验结果及分析

#### 3.1. 附着力测试结果

百格刀拉扯测试结果如图 2 所示，划痕清晰，在测试过后，小网格内涂层完好地附着在安全头盔上，由此可见附着力测试评级达到 ASTM 5B 级。

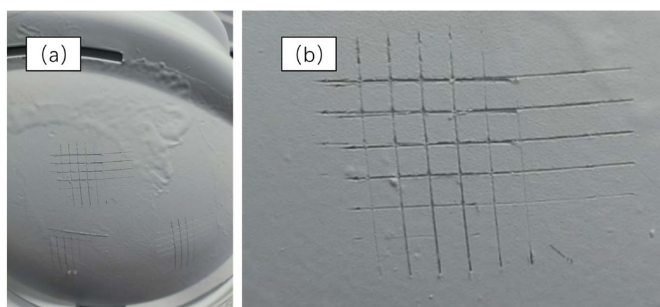


Figure 2. Result of the cross-cut tester  
图 2. 百格刀拉扯测试结果

#### 3.2. 安全性能测试结果

抗冲击性能测试结果如图 3 所示，表面涂层被碰撞后未见破损，但颜色呈现灰黑色；安全头盔本身无破损，无形变，具有良好的抗冲击性能，符合标准 ISO 6272-1:2011。

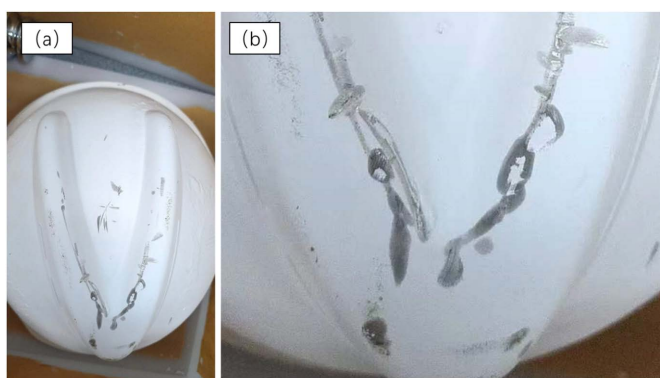


Figure 3. Result of the impact resistance test  
图 3. 抗冲击性能测试结果

抗穿刺强度测试结果如图 4 所示，当测试力度为 20 N 时，仅有涂层凹陷，安全头盔本身未见凹陷。随着力度逐渐增加，安全头盔开始有凹陷并凹陷程度逐步增大。当力度增大到 120 N 时，安全头盔未被刺穿，具有较好的抗穿刺性能，符合标准 GB/T 10004-2008。



**Figure 4.** Result of the puncture resistance test  
**图 4.** 抗穿刺强度测试结果

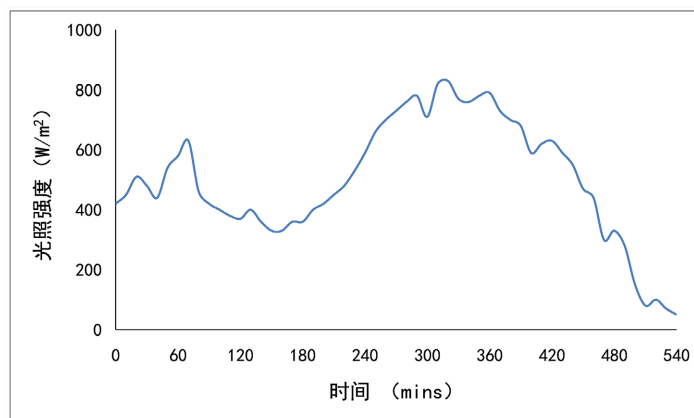
综合百格刀拉扯测试、抗冲击性能测试、抗穿刺性能测试结果可见，涂层附着能力强，头盔安全性能保持完好。具体测试结果如表 2 所示：

**Table 2.** Results of the adhesion performance and safety performance testing  
**表 2.** 附着性能及安全性能测试结果

| 测试      | 标准              | 结果 |
|---------|-----------------|----|
| 百格刀拉扯测试 | GB/T 9286-1998  | 5B |
| 抗冲击性能测试 | ISO 6272-1:2011 | 合格 |
| 抗穿刺性能测试 | GB/T 10004-2008 | 合格 |

### 3.3. 降温性能测试结果

测试时，光照强度曲线如图 5 所示。测试从 9:00 开始，直至 18:00 结束测试。10:30~13:00 之间有一段较长时间的阴天，因此光照强度略微下降。其余时间的光超强度则为正常波动。



**Figure 5.** Solar intensity  
**图 5.** 光照强度



安全头盔温度曲线如图 6 所示。安全头盔表面温度及内部温度曲线与光照强度呈正相关。具有被动辐射制冷涂层的安全头盔表面温度比未处理的安全头盔表面温度平均低 10℃左右,最高温差达到 15℃左右;平均内部温度降低 3℃左右,最高温差达到 5℃左右。

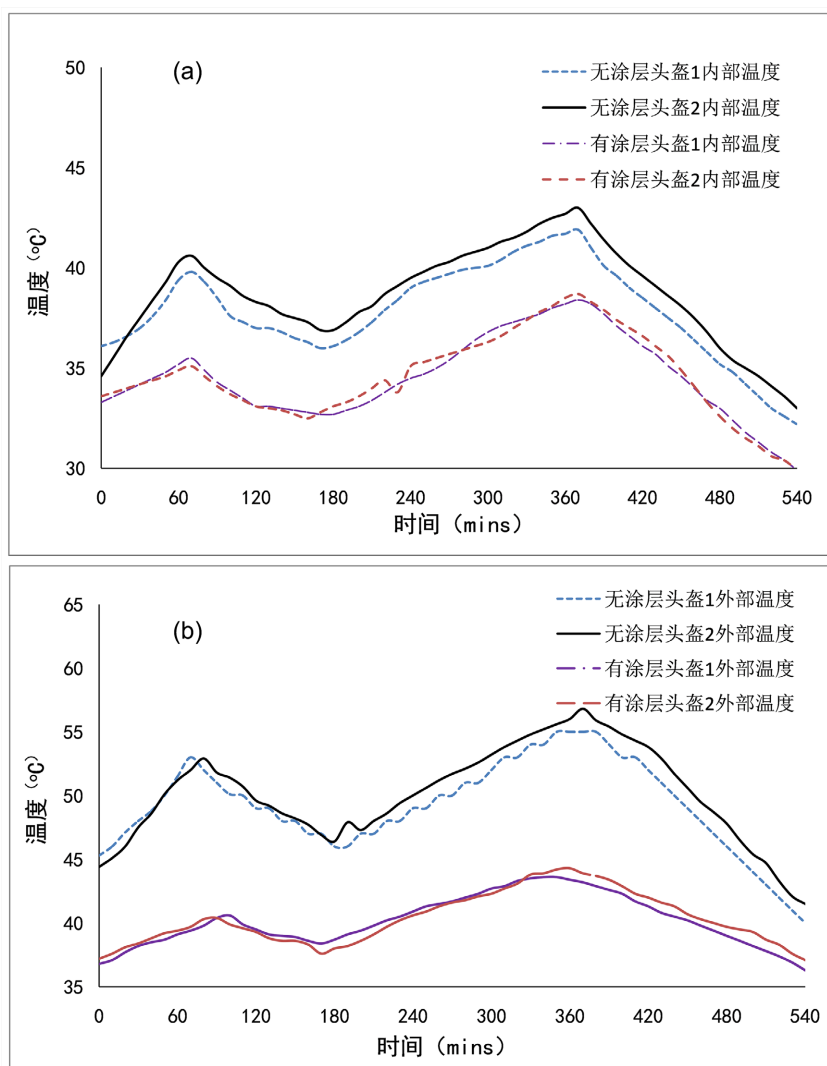


Figure 6. (a) inner temperature of safety helmets; (b) outer temperature of safety helmets  
图 6. (a) 安全头盔内部温度; (b) 安全头盔外部温度

#### 4. 结论

在本文中,设计及制备了 2 顶具有被动辐射制冷功能的安全头盔,在测试平台中,对涂敷了涂层的安全头盔进行了附着性能及安全性能测试,包括百格刀拉扯测试、抗冲击性能测试、抗穿刺性能测试。结果可见,涂层具有较强的附着能力,且并未对安全头盔原有的安全性能造成影响。

在本文中,在户外条件下对具有被动辐射制冷涂层的安全头盔的降温性能做了实验验证。以两项有被动辐射制冷涂层的安全头盔作为实验组,两项未处理的安全头盔作为对照组,在同样的光照强度下进行暴晒测试。结果显示,具有被动辐射制冷涂层的安全头盔表面温度比未处理的安全头盔表面温度平均低 10℃左右,最高温差达到 15℃左右;平均内部温度降低 3℃左右,最高温差达到 5℃左右。可见被动

辐射制冷涂层能有效地对安全头盔进行降温，有望解决市面上现有安全头盔的痛点，提高安全头盔的舒适性。

## 基金项目

广东电网有限责任公司广州供电局职工创新项目“一种被动辐射制冷安全头盔的研制”(030100KZ24030132)。

## 参考文献

- [1] Abu Hamdeh, N.H. and Al-Muhtaseb, M.A. (2010) Optimization of Solar Adsorption Refrigeration System Using Experimental and Statistical Techniques. *Energy Conversion and Management*, **51**, 1610-1615. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.048>
- [2] 刘长明, 房瑞华. 液冷头盔[J]. 中国劳动防护用品, 1999(6): 18-20.
- [3] 周小娜, 杨桥桥. 冬夏两用舒适型安全头盔的研制[J]. 农村电工, 2022, 30(2): 35-36.
- [4] 陈瑜, 曾赢, 罗志鹏. 新型加热及制冷除雾霾智能头盔[J]. 科技创新与应用, 2017, 7(36): 9-10.
- [5] 沈帅博, 伍世华, 李婷婷, 徐佳明, 张家炜, 林小闹. 带制冷与空气过滤功能的医用头盔设计研究[J]. 科技与创新, 2022(6): 101-103, 106.
- [6] 张亚君, 黄小华, 李金新, 余永纪. 分布式可控制医疗制冷头盔[J]. 杭州电子科技大学学报, 2011, 31(2): 17-20.
- [7] 王方, 胡盛辉, 胡林, 等. 典型公路自行车赛事故场景中头盔损伤防护性能研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(8): 256-270.
- [8] 韩成祥, 张向奎, 刘蕊, 胡平. 安全头盔热塑性“复材结构一体化”成形/型与结构优化[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2024, 1-17. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0238>, 2014-01-15.
- [9] 石林鑫, 王海军, 王洪磊. CFRP 基材矿用安全头盔轻量化设计与优化[J/OL]. 复合材料科学与工程, 2024, 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/10.1683.tu.20240627.1730.010>, 2024-07-01.
- [10] 崔晚晴. 一种新型半导体制冷帽设计[J]. 中国科技信息, 2018(16): 93-95, 97.
- [11] 李坤, 董罡, 周天祥, 施玮, 苏小丽, 曾涛, 罗婷, 唐奇, 陈云霞. 天空辐射制冷材料的研究进展及其在建筑制冷中的应用[J]. 陶瓷学报, 2024, 45(4): 631-642.