

森林消防头盔的人机工程学分析

杨洪泽 李滨 李博

(东北林业大学机电工程学院)

摘要:森林消防头盔的人机工程学设计与其安全性能紧密相关,为了提高森林消防头盔的安全性能,对国内应用广泛的3款消防头盔产品,从外形结构、材料、安全、舒适性等方面进行了性能评价。并根据消防员的使用情况进行数据分析,提出了使用悬挂系统、安装高度调节器、使用外设旋钮的可调式护目镜、分解使用头盔、护目镜、面罩等设计建议,为今后的森林消防头盔设计提供了技术支持。

关键词:森林消防头盔;人机工程学;安全性;舒适性

中图分类号: S776.29 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2011)01-0159-04

YANG Hong-ze; LI Bin; LI Bo. **Ergonomic analysis of forest fire helmet.** *Journal of Beijing Forestry University* (2011) 33(1) 159-162 [Ch, 12 ref.] College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, 150040, P. R. China

The ergonomic design of forest fire helmet is closely related to its safety performance. In order to improve the performance of forest fire helmet, three representative forest fire helmets are evaluated from the shape, material, safety, comfort and other aspects and analyzed according to the firemen's usage condition. Some suggestions for helmet design, such as using suspension system, installing height adjuster, using adjustable goggles with peripheral knobs and decomposition using helmets, goggles and masks, are proposed, which provide referential technical guidance for the design of forest fire helmets in the future.

Key words forest fire helmet; ergonomics; safety; comfort

森林火灾发生地一般山势险峻、地形复杂,消防车、消防飞机等往往不能靠近火灾现场进行直接扑救,经常要求消防员深入火源进行人工侦察和扑救,危险系数非常大^[1]。

森林消防头盔可以对消防员的头颅、脸部和颈部进行整体防护,是保护消防官兵安全的最重要的防护器具。但是在我国的林火扑救现场,许多消防人员并不愿意长时间使用消防头盔,因头盔的质量和设计问题而出现的消防员伤亡事故也时有发生^[2]。出现该现象的主要原因是森林消防头盔的防热性能差、头部受力不均匀、下颌带松动、稳定性差等。头盔的设计者和制造者并没有基于消防员的身体参数和使用习惯,对头盔各部分的结构和尺寸进行系统的分析和实验^[3]。

本文对国内普遍使用的、有代表性的3款消防头盔进行了人机工程学研究,分析评价了森林消防头盔的造型、结构、材料、安全性和舒适性,为森林消防头盔的设计和制造提供技术支持。

1 人机工程学分析

在森林消防头盔的设计中,必须考虑到消防员的人体形态特征、消防员在火场中的感知特性、反应特性和心理特征等,这些内容都属于人机工程学的研究范畴。人机工程学是研究人-机-环境三要素之间相互规律的一门学科,通过对这三要素的研究,以确保人-机-环境系统总体性能的最优化^[4]。森林消防头盔的设计应该基于人机工程学,设计者必须对消防员和森林火场有着深入的研究分析,才

收稿日期:2010-08-15

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL09BB53)。

第一作者:杨洪泽。主要研究方向:工业设计。电话:13946053619 Email: id-workshop@sohu.com 地址:150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路东北林业大学机电工程学院。

责任作者:李滨,博士,副教授。主要研究方向:机械电子工程。电话:13936225413 Email: 630104635@qq.com 地址:同上。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

能设计出令消防员在扑火工作中安全、舒适、并能提高扑火效率的头盔护具。

1.1 外形和结构分析

森林消防头盔一般由帽壳、帽箍、帽托、缓冲层、下颊带等部分组成。头盔还应配有面罩,并可按帽形选配披肩等。

对比国内外常见的消防头盔产品,头盔帽壳主要是在外形形式、材料和颜色等方面有所不同,基本上都可以满足阻燃、耐高温、抗冲击、防刺穿等性能的要求。

头盔帽壳外形形式分为无帽沿形式和有帽沿形式。无帽沿形式将头部全部包裹在头盔内部,有帽沿形式则只护住耳朵以上的部位。比较这两种盔型,无帽沿形式头盔具有重心稳定,头盔与头部结合紧密的特点,奔跑运动中不会产生晃动现象。但将头部全部包裹在头盔中,无疑增大了头盔的质量,不利于头部的散热,后颈部的防护范围缩小,而且若不佩戴内部通讯装置等附件,还会对消防员的通讯造成困难。有帽沿式消防头盔只要内部佩戴装置结构合理,悬挂空间大小适当,同样可以使得头盔整体重心稳定,佩戴适度。帽沿的存在可以起到引导水流方向的作用,适合佩戴空气呼吸器等装置。

盔顶分为有加强筋和无加强筋两种。加强筋在增加头盔刚度、提高头盔防砸和抗冲击性能方面起到了重要的作用,且使外观看上去美观协调。但是加强筋增加了头盔的绝对高度,导致头盔重心偏高,影响了佩戴的稳定性^[5]。

头盔帽壳的材料要具备坚韧、耐冲击、阻燃、耐高温等性能。头盔帽壳的外形和尺寸必须和消防员的头型相符,应当参照 GB/T 2428—1998^[6]中成年男性标准头型尺寸的规定进行设计(表1),分大、小号。头盔的质量不能太大,GA44—2004^[7]要求头盔的质量(不包括面罩和披肩等附件)不应超过1 kg。一般来说,人的头部负重1.5 kg、1~2 h不会有何不适,但如果超过这个质量,就会产生头部不适、颈部疼痛、目眩等现象,从而降低消防员的扑火能力。因此,从人的头部所能承受的生理负荷来看,在达到一定防护等级的基础上,应当尽力减小头盔质量。

表2 帽壳用工程塑料材料综合性能对比表

Tab. 2 Performance comparison of plastics used in helmet shell

材料	拉伸强度/MPa	弯曲模量/MPa	抗冲击性能/(kJ·m ⁻²)	使用温度/°C	透光率/%	极限氧指数(阻燃性)/%
PEI	41	2 068	29~33	-160~180	50	47
PC	60~70	2 100~2 400	17~24	-100~120	90	36

选择帽圈帽箍材料要重点测试耐热性能。试

表1 成年男女头围尺寸分布表
Tab. 1 Distribution of head circumference for adult male and female mm

性别	均值	标准差	第5百分位数	第50百分位数	第95百分位数
男子	560	15	535	560	586
女子	545	16	519	546	572

帽箍接触头前额的部分要透气、吸汗,可以利用棘轮机构进行调节,也可以利用插槽装置调节。根据成年男女头围尺寸,小号调节范围为510~570 mm,大号调节范围为560~640 mm,以适用于不同头围消防员灵活调节的需要。帽托和缓冲层应具有头盔重心调节系统,以利于头盔重心的调节,不容易移位,增强佩戴的稳定性。头盔内部加设高温隔热层,可以增加头盔对热和冲击的防护,使消防员的佩戴更为舒适和安全。下颊带应能灵活方便地调节长短,宽度应大于15 mm,调节范围为350~500 mm,插扣的设计要保证佩戴头盔牢靠舒适,解脱方便。

头盔面罩应采用无色或浅色透明的、具有一定强度和刚性的耐热材料,无色透明面罩和浅色透明面罩的透光率分别应不小于85%和43%。无论是外翻式面罩还是内嵌式面罩,都要让消防员在扑火过程中易于上下调节。

1.2 材料分析

现阶段国内广泛使用的消防头盔多采用工程塑料注塑制成。由于头盔的各零部件承载的功能不同,所以头盔的外壳、面罩、帽圈、帽箍等零部件选用的塑料种类各不相同。要经过理论分析、材料测试、样品试验等多个步骤,再确定各个零部件的材料。

公安部上海消防研究所马皎皎研究员设计的新型消防头盔(下文简称新型消防头盔)的帽壳材料选为聚醚酰亚胺(PEI)材料。PEI材料具有冲击强度高、热变形温度高、极限氧指数高、发烟量很低、绝缘电阻较高、介质损耗因数较低、化学稳定性好等诸多优点。使用PEI材料注塑的帽壳表面光滑、冲击韧性好,耐高温性能也可以达到设计要求。在我国应用最为广泛的84-1型消防头盔的帽壳材料为聚碳酸酯(PC)。二者相比,PEI材料的耐热性、阻燃性和抗冲击强度均较高(表2)。

验证明,84-1型消防头盔选用的聚乙烯材料制成的

帽圈在 260 °C 高温中加热 5 min 就会融化变形。而新型消防头盔采用增韧尼龙材料代替聚乙烯,不仅可以满足耐高温性能的要求,而且具有较好的柔韧性,易于加工。

1.3 安全性分析

森林燃烧产生的火焰、火星和热辐射能直接烧伤人体,尤其是头部、颈部受到的危害最大;大量的烟尘阻碍了人的视野,同时刺激眼睛和呼吸道,使人们迷失方向甚至窒息;烧断的枝丫、倒木和滚石也会对人的头部造成直接伤害。头部是人体最重要的部位,也是最脆弱、最容易受到伤害的部位,为

了达到最佳防护等级,头盔在进行设计制造时一定要经过多重试验。国家标准要求:冲击吸收性能试验中,头模所受的冲击值应 $\leq 4\ 900\ \text{N}$;耐穿刺性能中,钢锥与头模不产生电接触;耐燃烧性能中,续燃时间不超过 5 s;侧向刚性试验中,帽壳最大变形不超过 40 mm,残余变形不超过 15 mm。阻燃性能试验中,披肩织物氧指数应 $\geq 30\%$;面罩性能试验中采用 340 分光光度计测量,可见光透过率 $\geq 90\%$ 。表 3 为 3 款消防头盔产品的性能参数,可见 3 种消防头盔均能较好地满足 GA44—2004^[7],其中新型消防头盔在冲击吸收性能和耐燃烧性能方面表现最佳。

表 3 84-1 消防头盔、HLK-1 消防头盔、新型消防头盔的性能对比
Tab. 3 Performance comparison of 84-1, HLK-1 and new-style fire helmets

名称	冲击吸收性能	耐穿透性能	耐燃烧性能	电绝缘性能	侧向刚性	总质量/kg
84-1 消防头盔	5 kg 钢锤自 1 m 高度自由下落冲击头模,头模所受冲击力的最大值不超过 3 433 N	3 kg 钢锥自 1 m 高度自由下落冲击头模,钢锥不与头模建立电接触	800 °C 火焰燃烧盔体 10 s 移开火焰,盔体 2.8 s 内自熄	交流电 2 200 V,耐压 180 s,帽壳泄漏电流不超过 3 mA	帽壳侧向加压 430 N,帽壳最大变形不超过 40 mm,卸载后变形不超过 12 mm	0.95
HLK-1 消防头盔	5 kg 钢锤自 1 m 高度自由下落冲击头模,头模所受冲击力的最大值不超过 3 670 N	3 kg 钢锥自 1 m 高度自由下落冲击头模,钢锥不与头模建立电接触	800 °C 火焰燃烧盔体 10 s 移开火焰,盔体 2.9 s 内自熄	交流电 2 200 V,耐压 180 s,帽壳泄漏电流不超过 3 mA	帽壳侧向加压 430 N,帽壳最大变形不超过 40 mm,卸载后变形不超过 15 mm	0.6
新型消防头盔	5 kg 钢锤自 1 m 高度自由下落冲击头模,头模所受冲击力的最大值不超过 3 780 N	3 kg 钢锥自 1 m 高度自由下落冲击头模,钢锥不与头模建立电接触	(10 ± 1) kW/m ² 辐射屏辐照 60 s 后,火焰灼烧 15 s,火源离开帽壳后,帽壳火焰在 5 s 内自熄,没有火焰烧透到帽壳内部的明显迹象	交流电 2 200 V,耐压 60 s,帽壳泄漏电流不超过 3 mA	帽壳侧向加压 430 N,帽壳最大变形不超过 40 mm,卸载后变形不超过 15 mm	0.99

注:样本量 $n=5$;相对标准偏差为 4.55%。

1.4 舒适性分析

除了强调头盔在身体方面的保护外,还要进一步考虑舒适性问题。舒适性是指头盔佩戴对消防员引起不适、疲劳及对工效的影响程度。

头盔的舒适性与很多因素有关:1) 头盔质量越大,舒适性越差,而质量的主要部分是盔壳,改进盔壳的材料、结构和工艺可减轻质量,提高舒适性。在盔重一定的情况下,对头顶压力分布越均匀,舒适性越好。所以悬挂件于头顶接触部分的面积、部位、平展贴合程度等都应该根据使用人群的平均参数进行设计。2) 头盔的重心位置是一个很重要的参数,从生物力学角度看头部与颈肌之间形成力平衡体系,人头位于颈肌背侧肌群力作用点和寰枕关节支点之间。戴盔后,相应肌肉作用力加大,假若盔重心偏离头部重心,则改变了肌肉作用力的分布,从而增大肌肉疲劳甚至造成伤害,舒适性降低。一般认为,如果盔重心不能与头重心重合则稍偏低、偏后为好。这样可使头盔的稳定性增强,从而舒适性提高。因此,调整头盔质量分布使其重心位

置合理是很重要的。3) 从运动的角度分析舒适性。消防员完成扑火动作时,头部做包含直线运动和角运动的复合运动。如果头盔在头上晃动很厉害,即运动跟随稳定性不好,则会影响舒适性。如果运动停止后而盔不能复位,产生残余位移,需要手动复位,则舒适性也不好。影响运动跟随稳定性的重要环节是悬挂件的结构特性,特别是刚度和阻尼、系固力等力学参数。这需要设计测试方法,定量描述晃动情况,改进悬挂特性^[5]。

森林消防头盔的舒适性关乎着森林消防员的安全和森林财产的保护,只有进行科学的舒适性设计,才能最大限度地提高功效,提高扑火作业的效率,降低佩戴疲劳以及其他不良反应。

2 人机工程学设计原则

森林消防头盔在使用过程中常出现一下问题:1) 头盔重心高,前倾,稳定性差,头盔的形状与人头尺寸不能很好地吻合,出现过松或过紧情况;2) 面罩内狭小,不仅防热性差,而且易下滑;3) 下颏带

设置不贴面,跑动时晃动大,与空气呼吸器和通讯设备的协调使用等问题^[8]。

根据分析和使用中发现的问题,从人机工程学的角度对头盔提出改进措施和意见:1)根据使用人群的平均头型参数合理设计头盔悬挂件与头顶接触部分的面积、部位、平展贴合程度,提高头盔形状与人头部形状尺寸的吻合度。2)采用悬挂系统代替柔性内衬与系带,悬挂系统既解决了减震、缓冲等问题,同时也确定了较理想的中心位置,使得佩戴舒适、方便可靠。3)安装高度调节器,提供多种不同戴帽高度的调节。帽箍及后托的内侧可设衬垫,衬垫材料选用耐高温的锦丝搭扣带或是采用酚醛泡沫,外层包裹具有吸汗透气性能的羊皮,使消防员触感柔软舒适,提高佩带的舒适度。帽箍可利用棘轮机构进行调节,棘轮装置可设置成不同的尺寸,供消防队员灵活更换。4)头盔内部可设有防冲击的透明护目镜,增强防热辐射性能,在盔体外侧可设有旋钮以便调节护目镜高低位置。护目镜和面罩应可方便拆卸,在不必要时,可减轻头盔的质量,增加舒适度;紧急情况时,也可同时使用,增强保护能力。5)盔体上需要设立通讯设施、头灯和呼吸装置接口,采取即插即用的方式,方便消防员视情况采取防护措施。

3 结 论

本文基于人机工程学的理论,针对国内现广泛使用的几款森林消防头盔做了调研和评测,分别从外形、结构、材料、安全、舒适等几方面给出了评测

意见,并提出了使用悬挂系统、安装高度调节器、使用外旋钮的可调式护目镜、分解使用头盔、护目镜、面罩等设计意见,为今后的森林消防头盔设计提供了技术支持。

参 考 文 献

- [1] 李博,王述洋,杨洪泽.现代森林消防头盔的发展趋势和设计方向[J].林业劳动安全,2008(2):14-16.
- [2] 张奕.浅谈消防员在灭火救援中伤亡的原因及预防措施[C].2004年湖北省消防学术论文竞赛论文集.武汉:湖北省消防协会,2004:276-281.
- [3] 马皎皎.新型消防头盔的研制[D].上海:上海交通大学,2007:6-39.
- [4] 丁玉兰.人机工程学[M].北京:北京理工大学出版社,1991.
- [5] 陈学龙,赵陕冬.警用头盔的人机工程学分析[J].中国个体防护装备,2008(6):29-32.
- [6] 国家标准化管理委员会.GB/T2428—1998 成年人头面部尺寸[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [7] 中华人民共和国公安部.GA44—2004 消防头盔[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [8] 李文彬,何伟敏,安静贤,等.油锯人机界面的优化研究[J].北京林业大学学报,2000,22(5):58-64.
- [9] 胡志东.森林防火[M].北京:中国林业出版社,2003:10-17.
- [10] 王春平,屈惠明,陈钱.新型红外成像技术[M].北京:中国兵器科学研究院,2007.
- [11] 马皎皎,孙康,胡传平,等.基于啄木鸟头部特点的消防头盔抗冲击防护技术研究[J].消防科学与技术,2007(1):69-71.
- [12] 苏马德普提·陈格勒,苏珊娜·罗杰斯.柯达实用工效学设计[M].杨磊,译.北京:化学工业出版社,2007.

(责任编辑 李文军)