

“头盔热”的背后，是头盔“热”吗？(by 梦乙)

随着“一盔一带”安全守护行动的有序推进，警察叔叔们积极劝导、引领人们在骑行时佩戴头盔，市场上也迎来了一股“头盔热”。戴头盔可以大大减少交通事故的死亡风险，保护人们的生命，还能让你成为这条街（gai）上最靓的仔~



柯南和世良真纯的头盔 来源：名侦探柯南剧照

梦乙也为骑着小电驴上下班的母亲大人买了一顶粉嫩可爱，blingbling 的头盔，可是母亲大人在开开心心地戴了第一次之后，就提出了强烈抗议。

生命如此宝贵，道理人人都懂，可是，为什么大家都不那么愿意佩戴头盔呢？

对此，母亲大人表示戴头盔就像“享受”了一次烫发洗发头部桑拿三合一服务，体验极其酸爽，但是不具备美容功效！不愿意戴头盔的背后，究竟是对梦乙一片“孝心”的践踏(十┐皿┐)，还是亲情的淡薄？还是...果真另有其因，戴头盔又闷又热？

真相…永远只有一个！小伙伴们和梦乙一起来推理推理，首先了解一下人体散热的四种方式（四种？热传递不是只有三种吗？梦乙是不是热傻了？）。



真相只有一个 图片来源：名侦探柯南剧照

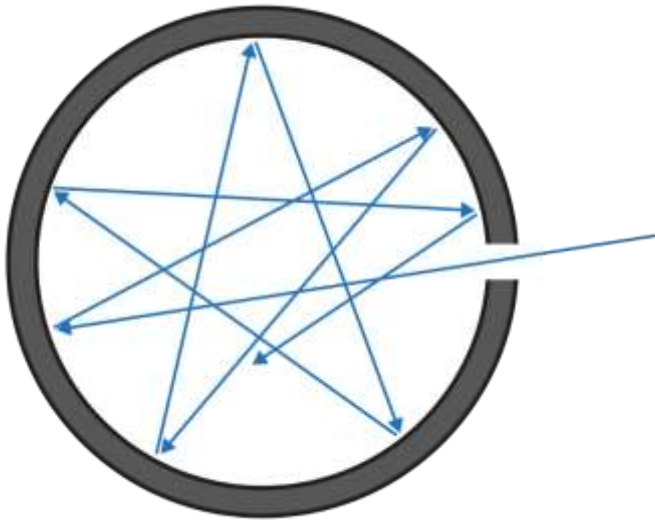
-----热辐射(thermal radiation)-----

自然界中的一切物体都在不停地以电磁波的形式向外辐射能量，由于热的原因而产生的电磁波辐射称为热辐射。黑体辐射的斯特藩-玻尔兹曼定律(Stefan-Boltzmann law)表明，一个黑

体表面单位面积在单位时间内辐射出的总能量与黑体本身的热力学温度的四次方成正比：¹

$$E = \sigma T^4$$

其中 σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数，约为 $5.639 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ， T 为黑体的热力学温度。黑体是一种理想化的辐射体，能够吸收外来的任意波长的辐射能量。可以通过构造一个带有小孔的空腔来模拟黑体，并认为外壳的透射系数为 0。外界辐射通过小孔射入空腔中，被壳体不断反射与吸收，每经过一次吸收，辐射的能量大大减小，如果小孔相对于空腔足够小，可以认为辐射最后不能射出空腔，全部被带有小孔的空腔吸收。



黑体的小孔腔模型 图片来源：https://en.wikipedia.org/wiki/Black_body

对于实际物体，辐射功率

$$P = A\sigma\epsilon T^4$$

其中 A 为物体表面积， ϵ 称为发射率，能够衡量物体表面以热辐射的形式释放能量相对强弱的能力。物体的发射率等于物体在一定温度下发射的能量与同一温度下黑体辐射的能量之比²。对于人体，人体皮肤的发射率非常接近 1.0，约为 0.98。

¹ 刘玉鑫.热学[M].北京大学出版社，2019

² 杨世铭，陶文铨.传热学[M].高等教育出版社，2006



人体辐射大部分以红外线的形式散发

来源: https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation

当热辐射的能量投射到物体表面时,和可见光一样,也会发生吸收、反射和穿透现象³。物体对不同波长辐射的吸收具有选择性,为了方便计算,往往认为物体对辐射的吸收与波长无关,并把这样的物体称为灰体。把人体模拟为灰体,人体对外界辐射的吸收功率为

$$P = A\sigma\epsilon T_0^4$$

其中 ϵ 为吸收率,为物体吸收的能量与相同温度下黑体吸收的能量的比值。

根据基尔霍夫热辐射定律 (Kirchhoff's law of thermal radiation), 物体的吸收率等于发射率。

那么人体的净辐射功率为辐射功率与吸收功率的差值为

$$P = A\sigma\epsilon(T^4 - T_0^4)$$

人体的核心温度约为 37°C, 体表温度约为 33°C, 标准男性和标准女性的体表面积分别约为 1.7 m²和 1.5 m², 人体站立姿态时有效辐射面积约为体表面积的 0.73 倍, 环境温度为 25°C 时, 标准男性和标准女性各自的净辐射散热功率约为 60 W 和 53 W⁴。

-----对流(thermal convection)-----

在温度差较小, 传热机制保持不变时, 可以使用牛顿冷却定律来描述对流散热:

$$P = hA(T - T_{env})$$

其中 P 为人体传热的功率, A 为人体表面积, T 为人体热力学温度, T_{env} 为环境热力学温度, h 为传热系数, 与流速有着密切的关系, 这里假定 h 与温度无关。

人体对流系数无风时约为 3.4 W/m²·K, 室温 25°C 时, 同上考虑到人体站立姿态的有效表面积, 得到标准男性和标准女性各自的对流散热功率约为 34 W 和 30 W。⁵

传说伊斯兰教的教主穆罕默德有一次指着远处的大山对周围的教徒说:“我只要念几句咒语, 这座山就会移到我来面前。”许久过后, 大山还是一动不动。为了缓解尴尬, 挽留自己的尊严, 穆罕默德就腾腾地跑到山跟前, 说出了那句名言:“山不来就我, 我便去就山。”这告诉我们, 如果风没有吹过来, 我们可以自己动起来, 增大对流系数。我们通过制造强制对流, 比

³ 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 高等教育出版社, 2006

⁴ 康建胜. 从能量角度粗谈人体的几个定量问题[J]. 生命的化学, 2013, 33(05): 588-595.

⁵ 同上

如吹电风扇，来增加相对风速，可以达到在炎炎夏日降温的作用。

-----热传导(heat conduction)-----

可以用傅里叶热传导定律(Fourier law of heat conduction)来模拟人体通过热传导散失的热量:

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\kappa \nabla T \Delta S$$

其中 κ 为热导率， ∇T 为温度梯度， ΔS 为物体的接触面积。

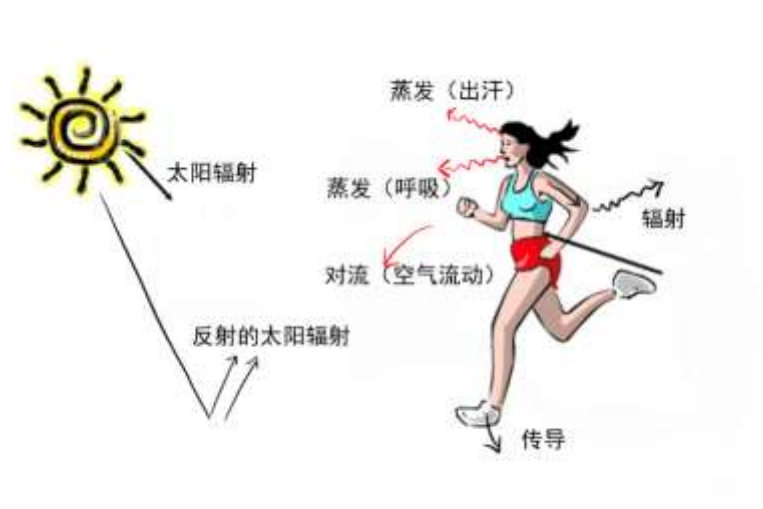
许多情况下，只考虑一个方向的热传递，于是有一维情况的傅里叶热传导定律

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\kappa \frac{dT}{dz} \Delta S$$

由于空气是热的不良导体，因此几乎不会发生传导，一般情况下我们可以忽略人体的传导散热。

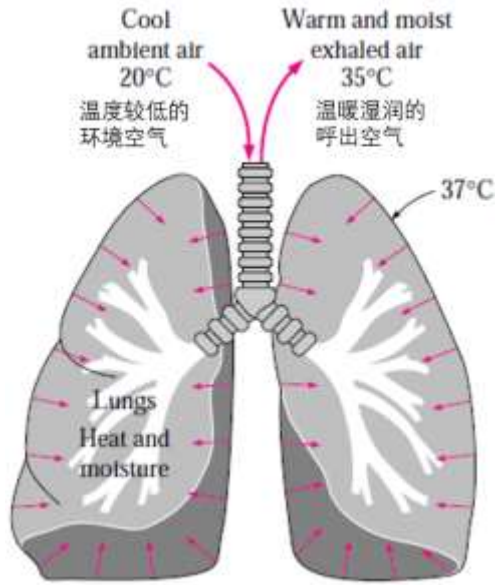
-----蒸发散热(evaporation)-----

除了对流、传导、辐射这三种热的传递方式以外，对于人体而言，蒸发散热也是一种重要的散热方式（敲黑板）。当人体剧烈运动或者环境的温度高于皮肤温度时，蒸发散热成为人体的主要的散热方式。



人体与外界热量传递 图片来源:梦乙自制

人体的蒸发散热分为两种形式：**不感蒸发和发汗**。不感蒸发是指体液中的水分直接透出皮肤和粘膜表面，在没有聚合成肉眼可见的汗液之前就已经蒸发掉的过程。

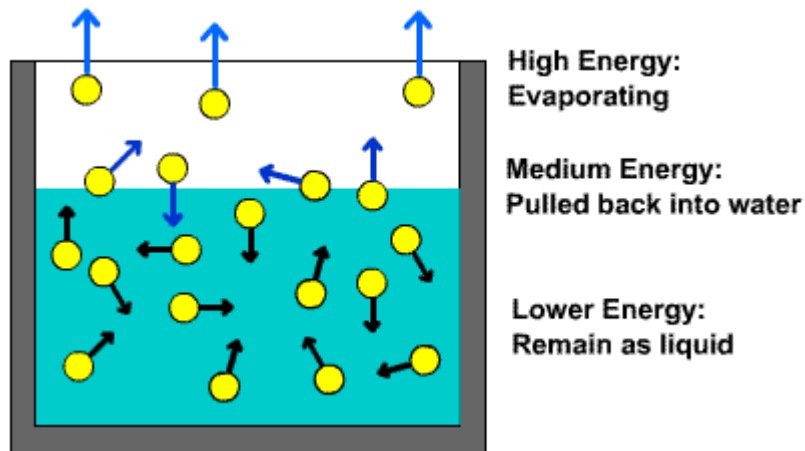


通过肺部的不感蒸发

图片来源: <https://engineer-educators.com/lessons/3-heat-transfer-from-the-human-body>

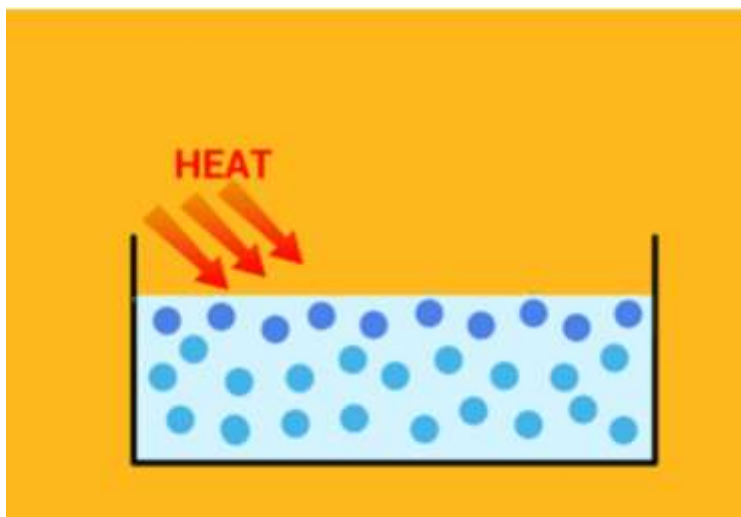
发汗即指水分聚合成了肉眼可见的汗滴。在汗液由液相蒸发为气相的过程中, 会吸收大量的热量, 称为液气相变的**潜热**。

从微观上看, 液体分子的热运动动能各有不同, 只有动能较大的分子能够克服其他粒子的吸引作用逸出液体, 在克服吸引力做功的过程中, 会消耗掉液体的一部分内能。



液体蒸发微观图

图片来源: <https://sites.google.com/site/svgphysics/topics-2013--2014/evaporation-and-boiling>



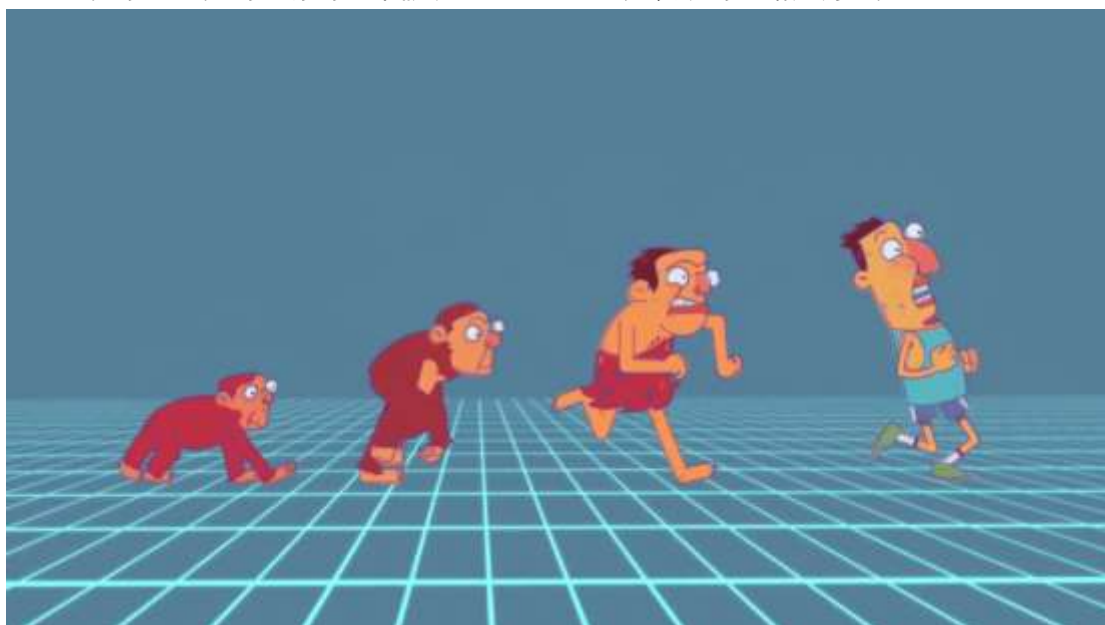
液体蒸发微观示例 (gif 1)

图片来源: <https://www.toppr.com/content/story/amp/evaporation-94909/>

当我们走出泳池的时候,微风拂过,加速了身体表面水分的蒸发,因此感到阵阵凉意。人们在中高强度的运动时,仅头部的蒸发散热量可达约 10.3-38W,随着运动强度的上升,头部的散热量会有所增加。与前面得到的辐射散热和对流散热功率相比,运动时头部在散热中起到了很重要的作用。

人可以通过**全身蒸发散热**。汗液中的水分含量高达 99%,在运动时,能够大量出汗,借助汗液的蒸发保持高效的散热。

体质人类学对人类的起源的一个假说与此相关:人类皮肤的裸露是为了更好地散热。

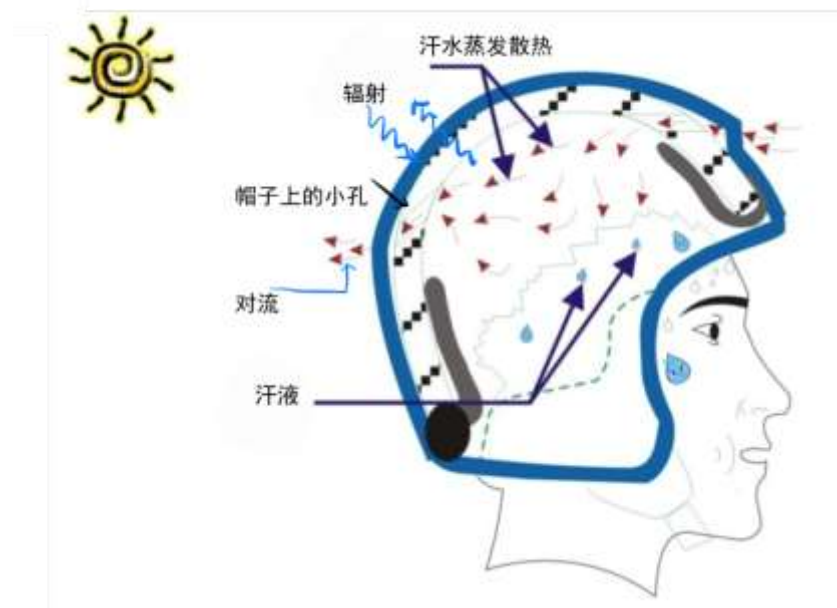


人类起源假说 (gif 2) 来源: ted-ed: Why do we sweat?

像狗狗、猎豹等动物,皮肤上的大多数汗腺的分泌物以蛋白质和脂肪为主,水分含量很少,降温效果很差。在他们的鼻头和四个爪子的肉垫上也分泌有汗腺,这些汗腺分泌物中的水分含量较高,但是汗腺数量太少。因此,在炎热的夏天,狗狗只能通过舌头分泌唾液,借助唾液的蒸发散热来代替汗液散热。猎豹是陆地上跑得最快的动物,但是最多只能跑 3 分钟,一

个重要的原因是猎豹无法很好地散热, 长时间跑步会使猎豹体温骤升, 损伤大脑等重要器官。人类由于拥有良好的散热能力, 虽然跑得不是很快, 但却是跑步时间最长的动物之一。说不定, 在远古, 我们的祖先专门在炎炎夏日, 追逐大型食草动物, 等它们热得不行了, 追上它们, 把它们扛回家去, 饱食一顿。

-----当我们戴头盔时, 究竟发生了什么? -----



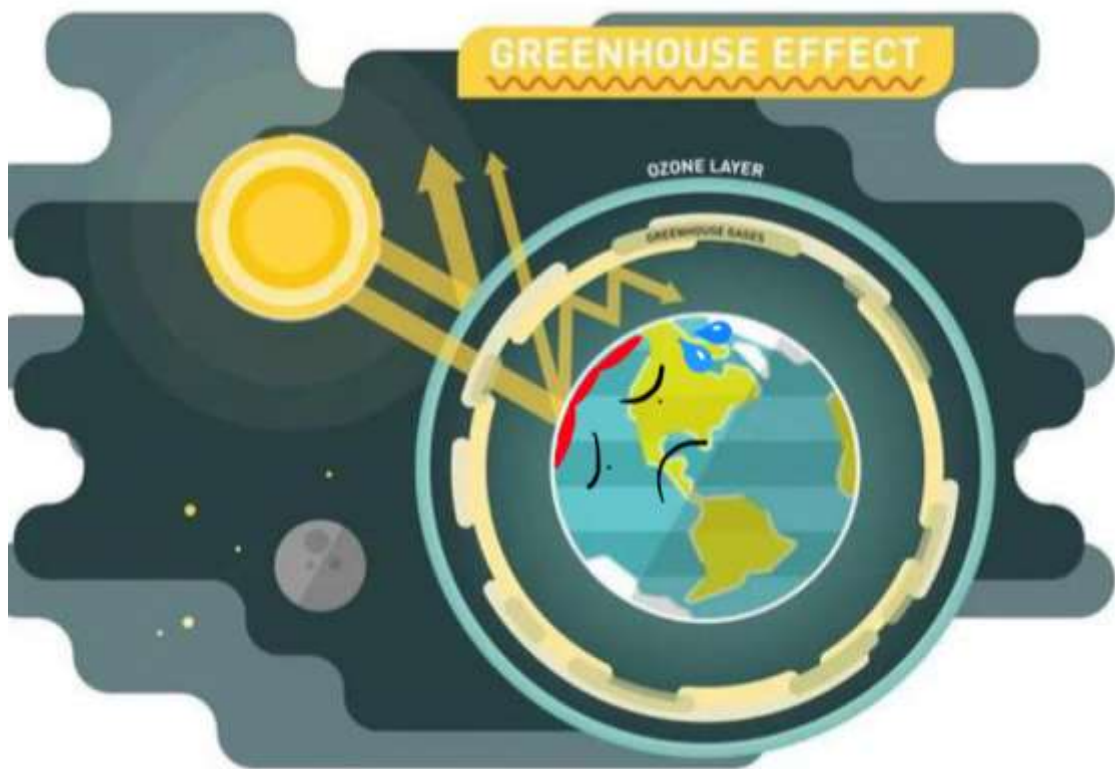
戴上头盔时的热传递 图片来源: 梦乙自制

对于没有开口或通风不良的头盔, 可以把头盔外壳与头皮之间的空间模拟为一个封闭腔。头盔的舒适内衬、缓冲层看作封闭腔中的一个物体, 之后我们来分析这个封闭腔。



戴着头盔的头部示意图 图片来源：梦乙自制

人戴着头盔时的热传递，和地球的温室效应过程类似。我们想象温室气体给地球戴上了一顶巨无霸头盔（好可怜的地球 sir 呀），把地球以及大气层看作一个整体来分析。



温室气体给地球带上了一个巨大的头盔 图片来源：梦乙自制

头盔的缓冲材料大多是由发泡聚苯乙烯（EPS）制作，具有极为优越的绝热性能。头盔外壳大多由 ABS 或者 PC 制作，也具有较为良好的绝热性质。因此，我们认为模拟的封闭腔不通过头盔与外界进行热传导。同样地，对于戴着头盔的地球 sir 来说，由于热传导需要介质，当我们把地球与大气层看做一个整体时，戴着头盔的地球无法与真空通过热传导进行热量交换。

在人体头盔的封闭腔中，仅在腔内存在局部的小对流，腔内的空气与外界缺乏有效的对流。对于头部，由不带头盔兜风时的放飞自我变为效果上的无风，减少了对流散热。对于地球来说，在全球区域内，存在着非常复杂的大气环流，整体来看，只是地球头盔中的局部对流。地球 sir 也无法通过对流散热与外界进行热量交换，其实温室效应很重要的一个原因是密闭的环境与外界缺乏对流。

对于热辐射，情况略微有些不同。来自太阳的热辐射被人体头盔外壳吸收，头盔外壳是暴露在外界环境中的，可以通过对流、传导等方式散热。由于头盔制作材料良好的绝热性能，我们近似认为头盔外壳不会向封闭腔内部传递热量。将头盔对辐射的透射系数近似为 0，头盔的缓冲层、舒适衬垫还相当于在头皮与外壳之间插入了两层隔热板，减少了封闭腔向外界的辐射散热。可以认为头皮发射到头盔的热辐射全部被吸收或反射回封闭腔中，太阳辐射也不会穿透头盔外壳进入封闭腔。但是，封闭腔内部的头皮却在不断发射着热辐射。头皮发射的热辐射被头盔的舒适衬里或缓冲层吸收与反射，反射的热辐射再次被吸收与反射。每经过一次反射与吸收，热辐射的能量大大减小，最终可以看作头皮发射的热辐射全部被封闭腔吸收了。对比前面提到的黑体的小孔隙模型，我们构造出的封闭腔也可以看作一个理想的黑体，只不过辐射不是来自外部，而是来自封闭腔的一个表面---头皮。

对于戴着头盔的地球而言，大气层构成的头盔透射系数很大。分子结构对称的双原子分子，

如空气，实际上并无发射和吸收辐射的能力，可以认为是热辐射的透明体。如二氧化碳，水蒸气等三原子气体，却具有相当大的辐射与吸收本领⁶。这些气体对于太阳辐射几乎的几乎是透明的，却强烈地吸收来自地球表面的辐射，地球表面也就无法很好地通过辐射散热。通常我们提到温室气体，往往想到二氧化碳。如果说，水蒸气也在温室效应中发挥了很重要的作用，是不是很不可思议？其实，水蒸气的温室效应可比二氧化碳强多了，还能使二氧化碳的温室效应加倍。之所以谈论温室效应的时候很少谈论水蒸气，是因为人类活动对大气中水蒸气含量的影响微乎其微，大气中的水也很容易达到一个动态平衡，水蒸气含量的变化，与人类活动没有多大的关系。

对于小小头盔中的封闭腔来说，水蒸气的影响可就巨大了。人们在较为炎热的天气里骑车，或进行剧烈运动时，头皮会大量分泌汗液。由于缺乏有效的空气对流，封闭腔内的空气无法得到有效的更新。随着汗液的蒸发，空气中的水蒸气分压不断增大。人体的热辐射大多以红外线的形式发射，水蒸气也很有选择性地，对红外线波长范围内的辐射具有良好的吸收性。水蒸气含量的增加，还会增强对来自头皮的热辐射的吸收，增强头部的“温室效应”。另一方面，汗液的蒸发速率越来越慢，无法通过相变带走足够的热量。尤其在极为炎热的天气里，环境温度高于皮肤温度时，人体实际上会通过对流、传导、辐射获得热量。这时候，蒸发散热成为人体唯一的散热方式。如果头部蒸发散热受到阻碍，会让人感觉又闷又热，大有酷暑蒸桑拿的体验感。

现在我们发现，戴着头盔的头部，就像一个小小的温室，且雨水（汗水）充沛，温暖湿润，气候适宜，非常适合在头上养些花花草草了~



西域刀羊头上一枝独秀的花、慢羊羊村长头上的充满智慧的小草
图片来源：喜羊羊与灰太狼剧照

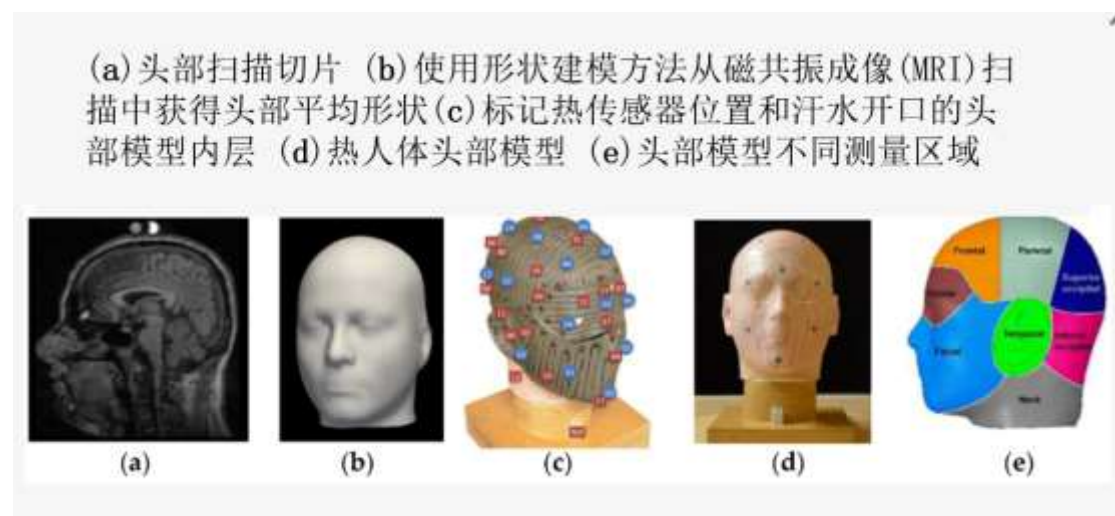
⁶杨世铭，陶文铨.传热学[M].高等教育出版社，2006



汗液难以蒸发 (gif 3)

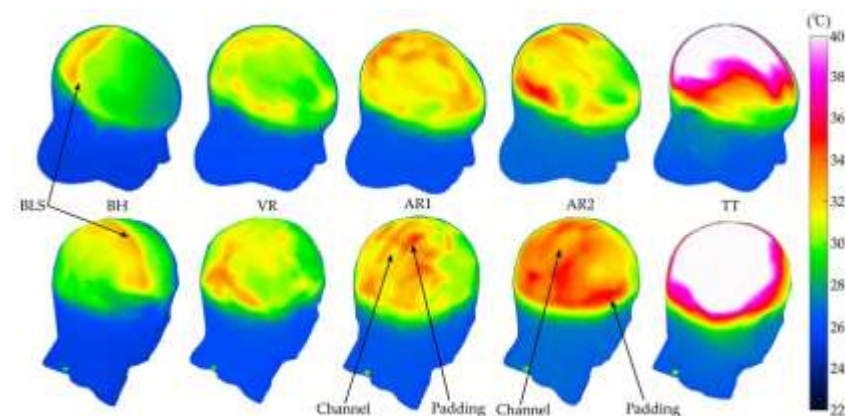
图片来源: <https://cdn.dribbble.com/users/742615/screenshots/3293621/dropfen.gif>

一些研究使用出汗的头部模型, 对戴头盔与不带头盔的头部模型进行了温度测量。



图片来源: 文献 10

在环境温度保持在 $20.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 头部皮肤温度保持在 $30.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 时, 对于不戴头盔的头部模型, 蒸发热传递占头部总热损失的 51%–53% 左右, 可见蒸发散热对于头部散热的重要性。



一项实验中五组头部模型的温度(BH 为不戴头盔的模型, 其余四组为佩戴不同头盔的模型)

图片来源: 文献 7

那么, 如果在头盔顶部加几个通风口是不是就不会那么热呢?

在一项研究中，分别对戴有前后开口、侧面开口、不开口的全盔和不戴头盔的出汗头部模型进行了测量。结果显示在风速为 3m/s 的条件下，四组头部模型单位时间的散热量分别为 364、331、401、576w/m²。结果也表明戴头盔能够减少头部的散热，使得头部的散热量约减少了 $\frac{1}{3}$ ，对于戴有头盔的模型，前后开口、左右开口能够增加一些散热，但是作用效果不是很显著。

对于全盔，即使增加开孔，也只会少量增加开孔，不会像自行车头盔一样，拥有大量的开孔。二者设计不同，与骑摩托车与自行车时骑行速度，公路条件，运动强度的差异有关。全盔上设计更为合理的开孔，能够帮助增加骑行过程中头部的散热。



摩托车全盔

自行车头盔

图片来源：<http://www.suomy.com/it/collezioni/racing-collezione/sr-sport/scheda-srsport.html>、<https://cn.hibike.com/met-crossover-p12fbae53718181de2213464ffe02f27e>
至此，戴头盔会使人感到闷热遭到实锤，梦乙妈表示大有冤情。

----- 漫漫头盔路 -----

尽管头部的面积相对较小，但头部是最容易受到热刺激的区域之一，也是实现热舒适的最重要的身体部位之一。戴头盔导致的头部散热的减少、汗液的积累给人一种潮湿的感觉，会导致不适。一项对来自 24 个不同国家和地区的人的调研中，有七分之三的人由于感到闷热而不戴头盔。

另一方面，研究表明，在炎热的环境中，头盔确实会影响局部皮肤温度和出汗率，但不会影响更一般的生理参数，如核心体温、心率，与中暑也没有直接的关系。

生命诚可贵，梦乙还要唠叨几句，为了安全，各位骑行的小伙伴要记得佩戴合适的头盔，成为这条街（gai）上最靓的仔。



头盔的分类 图片来源：梦乙自制

梦乙给母亲大人买的是保护效果最好，但也最闷的全盔（向梦乙妈求饶~）。其实照母亲大人骑小电驴的速度（龟速…）来看，完全没有必要买全盔，半盔即可满足基本的安全保障。看来是梦乙买头盔时考虑不周，我准备重新整装再次出发，为母亲大人买一个透气性好一点的头盔（保护效果会因此略有下降），比如(粉嫩可爱的)半盔，重新踏上劝说老母亲戴头盔的艰辛之路…

参考文献：

- [1]刘玉鑫.热学[M].北京大学出版社，2019
- [2]杨世铭，陶文铨.传热学[M].高等教育出版社，2006
- [3] Jablonski NG (2010) The Naked Truth Recent findings lay bare the origins of human hairlessness-and hint that naked skin was a key factor in the emergence of other human traits. *Scientific American* 302: 42–49.
- [4]Cornelis P. Bogerd,Jean-Marie Aerts,Simon Annaheim,Peter Bröde,Guido de Bruyne,Andreas D. Flouris,Kalev Kuklane,Tiago Sotto Mayor,René M. Rossi. A review on ergonomics of headgear: Thermal effects[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*,2015,45.
- [5] Kanesalingam Sinnappoo, Rajkishore Nayak, Lachlan Thompson, Rajiv Padhye. (2020) Application of sustainable phase change materials in motorcycle helmet for heat-stress reduction. *Journal of the Textile Institute* 0:0, pages 1-9.
- [6] Gisolfi CV, Rohlf DP, Navarude SN, Hayes CL, Sayeed SA. Effects of Wearing a Helmet on Thermal Balance While Cycling in the Heat. *Phys Sportsmed*. 1988;16(1):139-146. doi:10.1080/00913847.1988.11709412
- [7] Fitzgerald, S.; Atkins, H.; Leknys, R.; Kelso, R. A Thermal Test System for Helmet Cooling Studies. *Proceedings* **2018**, *2*, 272.
- [8]Satoru Ueno,Shin-ichi Sawada. Effects of ventilation openings in industrial safety helmets on evaporative heat dissipation[J]. *Japan Society for Occupational Health*,2019,61(2).
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation
- [10] Catherine O'Brien,Bruce S. Cadarette. Quantification of head sweating during rest and exercise in the heat[J]. *Springer-Verlag*,2013,113(3).

- [11] Science - Applied Sciences; Researchers from University of Antwerp Describe Findings in Applied Sciences (Thermal-Performance Evaluation of Bicycle Helmets for Convective and Evaporative Heat Loss at Low and Moderate Cycling Speeds)[J]. Science Letter,2019.
- [12] 康建胜.从能量角度粗谈人体的几个定量问题[J].生命的化学,2013,33(05):588-595.
- [13] Saud Ghani,Esmail Mohame Ali Ahmed ElBialy,Foteini Bakochristou,Seifelislam Mahmoud Ahmad Gamaledin,Mohammed Mohammed Rashwan. The effect of forced convection and PCM on helmets' thermal performance in hot and arid environments[J]. Elsevier Ltd,2017,111.