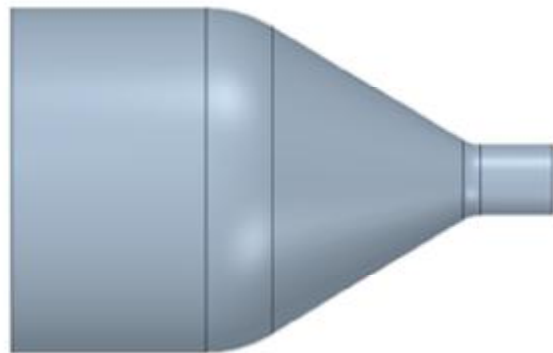
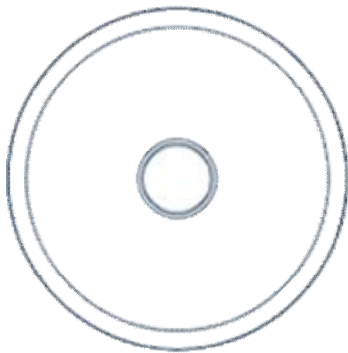

孟加拉国的“降温神器”引发的思考



目 录

1. 前言	1
2. 简化模型	2
3. 工程热力学分析	4
4. 流体力学分析	4
4.1 风压	4
4.2 连续性方程	5
4.3 理想气体状态方程	6
4.4 伯努利方程	6
5. 求解方程组	8
6. 后记	10

1. 前言

开始准备写本文时，夏至刚过，这几天北京天气晴朗，白天室外气温已经达到 37°C ，单位早已开启了空调，但难免需要外出，会感觉到太阳晒得特别热。北京的天气炎热相对于上海、南京和其它一些南方城市明显要爽得多，不是湿度大的那种桑拿式闷热，算得北京城的一大优势。

有位北航博士经常遇到我提及个人生活上和道听途说的热的困惑，这两天提到说印度有穷人捡饮料瓶插在墙上用作夏季室内降温，据说效果明显，降温幅度能达到 5°C ，似乎这个创意不错而且很实用。第一反应，这个原理类似于空调循环里面的节流阀环节，模糊的感觉是有道理的，而且没记错的话有利用网孔结构的节流降温效应实现阻燃防爆功能的。但说到通过增加这个创意设计，能对普通住房或工棚实现良好的降温，又感觉在可信度上打了疑问。

在网上搜了一下，原来在 2016 年就已经炒过这个创意新闻，而且当时是来自孟加拉国的记者采访，见图 1。国内外有一些山寨文章且大都给出了偏支持的意向，更有国内某报记者给出实测 20 分钟降温 5°C 的体验报道，见图 2。同时也难得见到有国内的环卫工人自制实测，很遗憾的发现温度计示值只降了 0.4°C ，且人体并没有明显感受。到底这款创意神器灵不灵，本文尝试进行理论上的分析与探讨。（刚找到的视频：<https://v.qq.com/x/page/n0600xxki5y.html>）



图 1 来自孟加拉国的“降温神器”新闻



图 2 来自国内某报对“降温神器”的报道

2. 简化模型

为了使分析对象尽可能典型，特地去永辉超市买了人生第一瓶大雪碧，这是超市里最大的瓶装款（2L），该尺寸看起来和网上的降温神器用的塑料瓶是差不多的，见图 3。

经用千分尺测量：瓶体平均直径约 $\Phi 105\text{mm}$ ，瓶口内径约 $\Phi 21.5\text{mm}$ 。对照实测的实物尺寸，绘制出图 4 所示的分析简图。我们的分析对象即从左侧大尺寸截面流入瓶体，并从右侧小尺寸截面流出瓶体部分的空气。即只需要对瓶体肩部（截面 I）和瓶口（截面 II）两处进行建模分析，截面 I 处的参数用下标 1 来表示，截面 II 处的参数用下标 2 来表示。



图3 大雪碧瓶（2L装）

本文的物理问题看似简单，仍需要做一些必要的简化、指定必要的初边界条件才能开展定解分析工作：不妨假定室外（即截面 I 处）的空气温度为 40°C ，忽略流动阻力能量损耗，及截面 I 到截面 II 范围内空气和瓶体及外界的换热；把室内的静止空气作为静压基准，定义为一个标准大气压： 101325Pa ，则该气压也即截面 II 处的静压值。

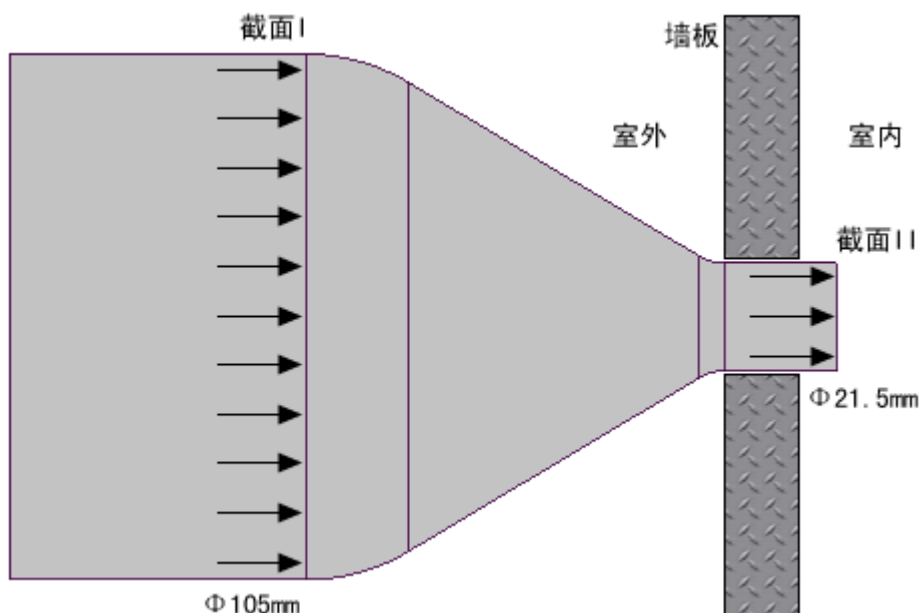


图4 分析简图

3. 工程热力学分析

这里引入一个物理名称“理想气体”，其包括 2 个假设：气体分子是弹性的且不占据空间体积的质点，气体分子之间无作用力。“理想气体”可以看成是实际气体在气压趋近于 0、密度无限小的极限状态，是工程上简化便于处理的方法。本文的常温常压下的空气（以及氮气、氧气、氢气）就可以近似作为理想气体考虑。

工程热力学里面还有一个名词“节流”符合本文讨论的现象：管道中的流体在流经孔板、阀门等组件时，受局部阻力导致流体压力降低的这种现象称为节流。本文中，气流经过瓶子的时间短，而且相关物质之间实际温差也不大，所以可以视气流与瓶体等外界物体不存在热交换，为一个绝热过程，即所谓的“绝热节流”。

对于管道内稳定的绝热流动，有如下的能量方程式：

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad (1)$$

现在我们就可以定性判断出瓶口处的气流温度是不是真的下降了：

首先根据工程经验（本质是质量守恒定律），瓶口处的流速将增加，导致式（1）右侧的动能项数值相对于左侧的动能项是增大了，能量守恒的结果必然是右侧的焓值项变小了。而对于理想气体，焓值和内能都只是以温度作为单值变量的状态量（ $h = u + \frac{p}{r} = u + RT$ ）。所以本节可以给出定性结果：瓶口的气温的确是下降了！

至于瓶口处的气温究竟下降了多少，本文接下来做定量分析。

4. 流体力学分析

4.1 风压

本文的瓶吹现象类似于建筑环境学上的建筑门窗的风压渗透作用，作为基本参数，尝试借助其工程估算方法先确定风压差。截面 I 到截面 II 之间的风压差计算公式如下：

$$\Delta P = C_f \times \frac{1}{2} \times r \times v_1^2 \quad (2)$$

式（2）中：

C_f 为风压差系数，考虑到流动阻力不是很大，这里取 0.7； r 为室外空气密

度，不妨从干空气的物性手册查询，得一个标准大气压（由于风压相对于 1atm 是个小量，空气密度变化很小，不影响这里对风压差的估算）和 40℃ 温度状态下空气密度值为 1.128kg/m³； v_1 为室外垂直于截面 I 的平均风速，本文分别取 1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s、5 m/s、6m/s，则计算得到的对应风压差见表 1。

表 1 截面 I 到截面 II 的风压差估算结果统计

序号	风速 (m/s)	风压差系数	空气密度 (kg/m ³)	风压差 (Pa)
1	1	0.7	1.128	0.3948
2	2	0.7	1.128	1.5792
3	3	0.7	1.128	3.5532
4	4	0.7	1.128	6.3168
5	5	0.7	1.128	9.87
6	6	0.7	1.128	14.2128

显然，风压差比一个标准大气压约小了 4 个量级。此时得到表 2 所示的截面 II 处的空气静压值。

表 2 截面 I 和截面 II 空气静压值统计

序号	风速 (m/s)	截面 I 处静压 (Pa)	截面 II 处静压 (Pa)
1	1	101325.3948	101325
2	2	101326.5792	101325
3	3	101328.5532	101325
4	4	101331.3168	101325
5	5	101334.87	101325
6	6	101339.2128	101325

4.2 连续性方程

空气从截面 I 流到截面 II，由流体力学的连续性方程（即质量守恒方程）得：

$$r_1 \times (v_1 \times A_1) = r_2 \times (v_2 \times A_2)$$

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{v_2 \times A_2}{v_1 \times A_1}$$

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{A_2}{A_1} \times \frac{v_2}{v_1}$$

整理得：

$$\frac{r_1}{r_2} = \left(\frac{0.0215}{0.105} \right)^2 \times \frac{v_2}{v_1} \quad (3)$$

注意，虽然在工程流体问题中，通常对于流速小于 10 倍音速的情况将空气视为不可压缩流体处理，但这里为了较为准确获取空气本身较小的温度变化情况，仍希望捕捉较为真实的密度变化。

4.3 理想气体状态方程

对截面 I 和截面 II 两处的空气，应用理想气体定律 $p = r \times R \times T$ ，得：

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{r_1 \times T_1}{r_2 \times T_2}$$

将式 (3) 带入，得：

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{0.0215}{0.105} \right)^2 \times \frac{v_2}{v_1} \times \frac{T_1}{T_2}$$

整理得：

$$T_2 = \left(\frac{0.0215}{0.105} \right)^2 \times \left(\frac{p_2}{p_1} \times \frac{T_1}{v_1} \right) \times v_2 \quad (4)$$

在式 (4) 中， T_1 已知，且对于指定的风速 v_1 ， p_1 、 p_2 也已知，故式 (4) 中实际上只有 T_2 和 v_2 两个未知数，则至少还需要有一个方程才可求解。

4.4 伯努利方程

对于任意流体，有如下的通用能量方程：

$$\frac{p_1}{r_1 \times g} + a_1 \times \frac{v_1^2}{2 \times g} + z_1 + I_1 + h_M + Q_H = \frac{p_2}{r_2 \times g} + a_2 \times \frac{v_2^2}{2 \times g} + z_2 + I_2 \quad (5)$$

式 (5) 中, I_1 、 h_M 、 Q_H 三项分别代表其它形式流体能量 (比如压缩势能、粘性耗散等) 转换为内热量、外部机械 (如泵或风机等) 做功、从外界吸收的热量。如果消去这三项。此外, α_1 为动能修正系数, 是对平均速度的修正, 其精确值较难获取, 对于湍流接近 1, 通常取为 1, 对于层流该值可能更大, 但此时动能项数值又很小, 如果取 1。则式 (5) 即可简化为著名的伯努利方程:

$$\frac{p_1}{r_1 \times g} + \frac{v_1^2}{2 \times g} + z_1 = \frac{p_2}{r_2 \times g} + \frac{v_2^2}{2 \times g} + z_2$$

不过对于本文问题不采用伯努利方程: 考虑保留上述简化中的 I_1 项, 同时考虑到为水平流动, 忽略重力势能项, 于是将式 (5) 简化为:

$$\frac{p_1}{r_1 \times g} + I_1 + \frac{v_1^2}{2 \times g} = \frac{p_2}{r_2 \times g} + I_1 + \frac{v_2^2}{2 \times g} \quad (6)$$

对于气体, 常使用焓来表示单位质量气体具有的状态能量 (注意区别: i 表示单位质量的内能, I 表示单位重量的内能):

$$h = i + \frac{p}{r} = I \times g + \frac{p}{r} \quad (7)$$

用式 (7) 整理式 (6) 得:

$$h_1 - h_2 = \frac{1}{2} \times (v_2^2 - v_1^2) \quad (8)$$

我们知道, 对于常用的实际气体及完全气体, 焓的变化与温度变化有如下关系式:

$$h_1 - h_2 = c_p \times (T_1 - T_2) \quad (9)$$

由式 (8) 和式 (9) 可得:

$$c_p \times (T_1 - T_2) = \frac{1}{2} \times (v_2^2 - v_1^2) \quad (10)$$

在式 (10) 中, 查空气热物性表可知空气的 c_p 变化很小 (300K 时为 1007J/(kg.K), 350K 时为 1009J/(kg.K)), 由于入口空气温度为 40°C (即 313.15K), 因此不妨取为 1007.5J/(kg.K)。同时 T_1 、 v_1 为已知参数, 只有 T_2 和 v_2 两个未知量, 因此正好可与式 (4) 联立方程组实现求解。

5. 求解方程组

根据上文分析，得到如下的方程组，可以进行求解：

$$\left\{ \begin{array}{l} T_2 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \times \left(\frac{p_2}{p_1} \times \frac{T_1}{v_1}\right) \times v_2 \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_p \times (T_1 - T_2) = \frac{1}{2} \times (v_2^2 - v_1^2) \end{array} \right. \quad (12)$$

将式 (11) 带入式 (12) 得：

$$c_p \times \left(T_1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \times \left(\frac{p_2}{p_1} \times \frac{T_1}{v_1}\right) \times v_2\right) = \frac{1}{2} \times (v_2^2 - v_1^2)$$

已知参数带入后，得到：

$$1007.5 \times \left(313.15 - \left(\frac{0.0215}{0.105}\right)^2 \times \left(\frac{101325}{p_1} \times \frac{313.15}{v_1}\right) \times v_2\right) = \frac{1}{2} \times (v_2^2 - v_1^2) \quad (13)$$

将上文表 2 的 v_1 和 p_1 对应带入式 (11)，即可求出对应的 v_2 ，将求出的 v_2 带回式 (11) 就可以求出 T_2 。如果还想知道出口空气密度，只需要使用理想气体状态方程式即可求出。计算结果见表 3、图 5 和图 6。对于不同的进口风速，出口风速近似于直线关系，而出口气温随着风速的增加下降斜率也越大，出口空气密度的上升斜率则增加。根据本文的计算，如果需要出口气温下降 5℃，则进口风速应不小于 4.26 m/s，即达到 15.336km/h 的风速（相当于在无风的天气骑普通电动自行车的相对风速）。

表 3 计算结果统计

序号	截面 I 进口风速 (m/s)	截面 II 出口风速 (m/s)	截面 II 出口气温 (°C)	截面 II 出口空气密度 (kg/m ³)
1	1	23.83	39.73	1.128
2	2	47.53	38.87	1.131
3	3	70.98	37.48	1.137
4	4	94.07	35.61	1.143
5	5	116.70	33.26	1.152
6	6	138.76	30.45	1.163

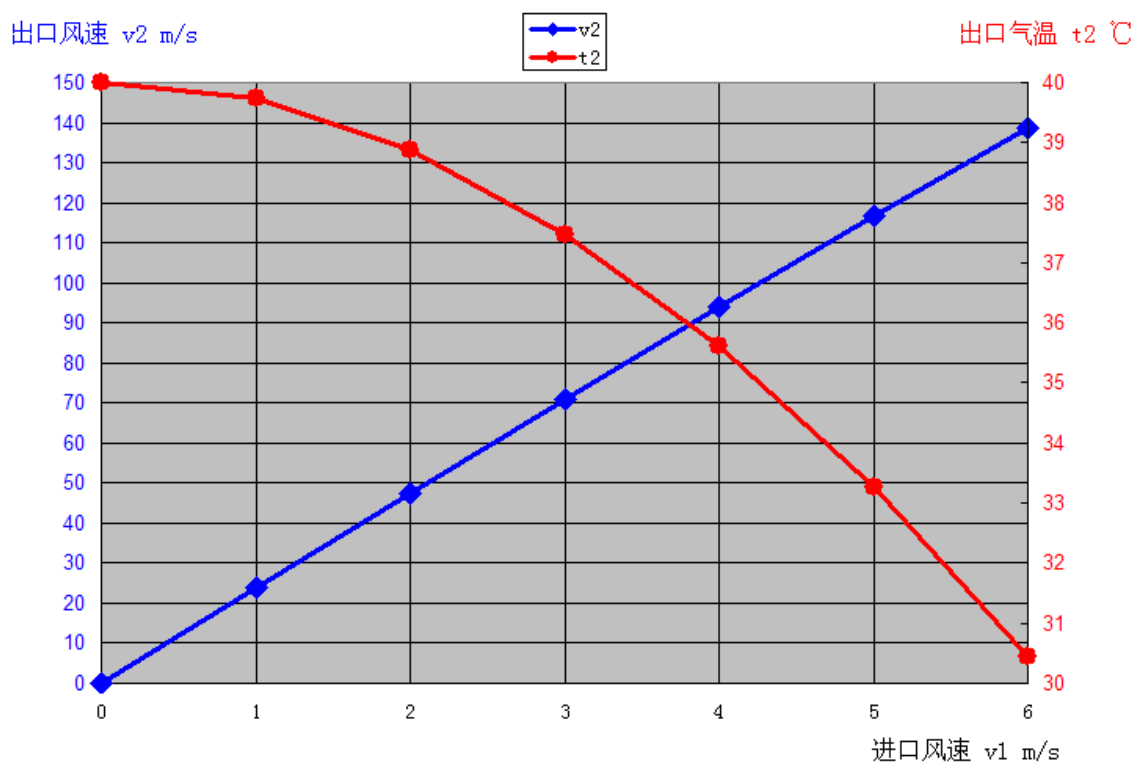


图 5 不同进口风速下的出口风速和出口气温曲线

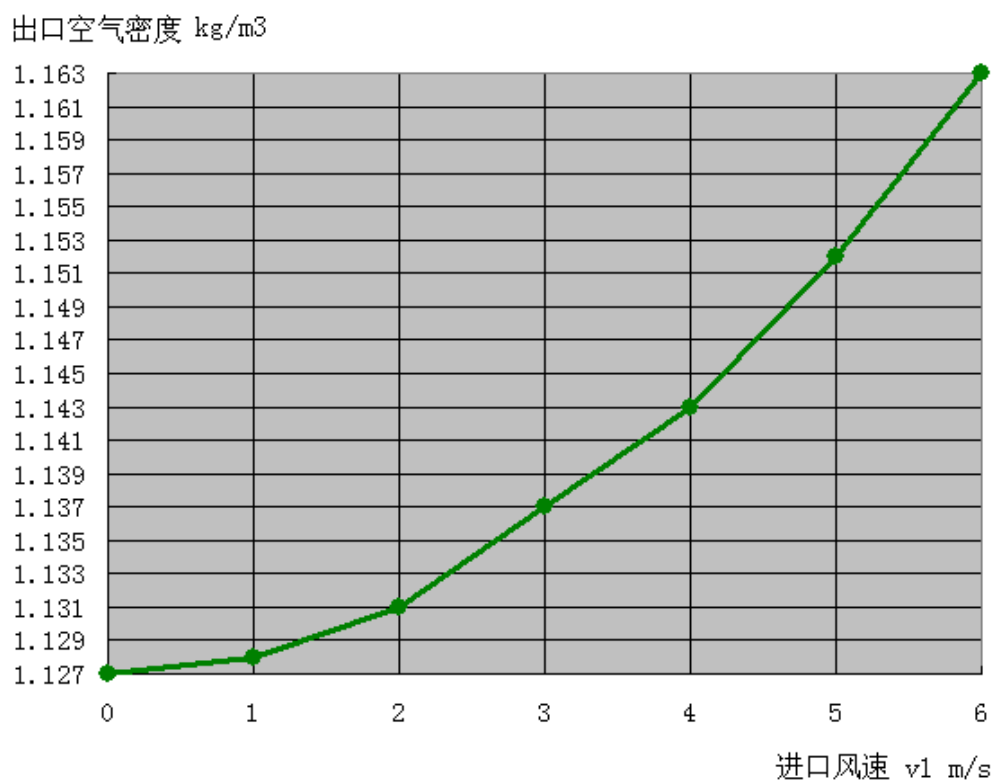


图 6 不同进口风速下的出口空气密度曲线

6. 后记

通过本文的分析，可以看出这个小小的“降温神器”牵涉到比较复杂的热物理问题，为了写这篇文章又重新翻了翻一些书本，前后耽搁了不少时间，不过也得到了收获。“降温神器”或许适合于有较持续稳定的、足够强度的风力且房屋围护结构的保温效果较差（无法使室内温度比室外温度明显低一些）的情况。如果你住在拥挤的城市建筑群，且你的建筑周边几乎无法获得流动的下降气流，该“降温神器”显然是没有作用的，辛勤的城市环卫工人的实测结果也证明了这一点。我们更多的做法是：在中午室外空气热过室内墙壁的那段时间，把门窗关上，并拉上向阳面的窗帘，打开空调或风扇。

当然我也不建议对风扇采用图 7 的形式，虽然本文的分析表明高压侧的空气被节流后会被一定幅度的降温，但从系统角度来看，风扇的吹风效率会显著下降，大量的风力受到流阻作用从周边反射走了，相信该网友并不会真的感到更加清凉，且风扇出口气压上升将影响到风扇耗费更多的电能，这些电能将转化成房间内的热量，得不偿失。



图 7 某网友自制的夏日“清凉神器”

总之，各种道听途说的“神器”或许是真的，在一定条件下从科学理论上判断其是可信的，但很可能在定量上并不适合于你的实际需要，在网上存在着大量的各类炒作题目、所谓的测试往往存在系统的科学性缺陷，盲目跟从可能带来糟糕的结果。