

巧克力用对流式冷却隧道的设计

李由生 韩杏珍 陈德本

(上海轻工业专科学校)

摘 要

本文主要论述对流冷却,隧道的结构和设计。巧克力沿隧道的长度方向在三个区域内冷却对流式冷却。隧道可完全保证巧克力涂衣有良好的质量。

主题词:巧克力制品;对流/冷却隧道;设计

概 述

对流式冷却隧道是一独立系统装置,它的结构设计能达到温和的冷却效果,特别对纯巧克力涂层产品更为适宜。该隧道设计长度和冷却部分,可分为四个区段:前段是风幕气流速冷区,过风幕后缓和冷却区,中间段是减速冷却区,过中间段又缓和冷却,最末段再经风幕气流速冷区。隧道内共分两层:上层和下层,而上层分前后段,各段端部形成风幕,减少与外界气流的热交换,致使内部造成负压区,形成循环式的气体流动,维持内腔一定的湿度和温度。

1 冷却隧道内腔发热量初算

冷却隧道内腔的发热量由如下几部分组成:围护结构的热传导;巧克力制品进入隧道内的发热量;传送带经外界环境温度吸热后进入内腔的散热;电动机置于隧道循环系统的散热量;外溢流量以及环境流体与内腔流体之间部分热交换。

为配备隧道所需冷却机组的制冷量,因而对各组成部分散热量的计算是至关重要的,也是在设计该设备时的主要技术指标之一。

1.1 电动设备的散热量

$$Q_1 = 860 n_1 n_2 n_3 (N/\eta)(1 - \eta)$$

N ——电动机的安装功率(kw)

n_1 ——安装系数

n_2 ——负荷系数

本文1987年10月15日收到。

n_3 ——蓄热系数

η ——电动机效率

1.2 巧克力涂层后发热量

$$Q_2 = (x c g \Delta t) / Z_t$$

x ——系数(取1)

c ——物料比热(kJ/g·K)

g ——物重(kg)

Z_t ——调节时间(min)

Δt ——温度调节幅度(K)

1.3 传送带发热量

表面辐射热为

$$Q_r = \varphi \cdot \sigma_0 A_0 (T_a^4 - T_B^4)$$

式中

φ ——加热表面的吸热系数(取1)

σ_0 ——斯忒藩—玻耳兹曼常数

A_0 ——散热面积(m²)

T_a 、 T_B ——加热表面和腔内空气的温度(K)

对流发热量为

$$Q_k = \bar{\alpha} A_0 (T_a - T_B)$$

式中

$\bar{\alpha}$ ——平均换热系数(kJ/m²·h·K)

1.4 围护罩壳冷损失计算

先按最小保温层厚度计算。为满足在室内相对湿度(日均)80%及环境温度30℃时的较佳围护罩壳厚度,不易泄漏或结露现象,则由下式得

$$Q_s = (NL/R) \Delta T$$

$$R = \sum \delta / \lambda + 1 / \alpha_{\text{og}}$$

$$\delta = (\lambda / \alpha_{\text{og}}) [(T_{\text{og}} - T_{\text{og}}) / (T_{\text{og}} - T_1) - 1]$$

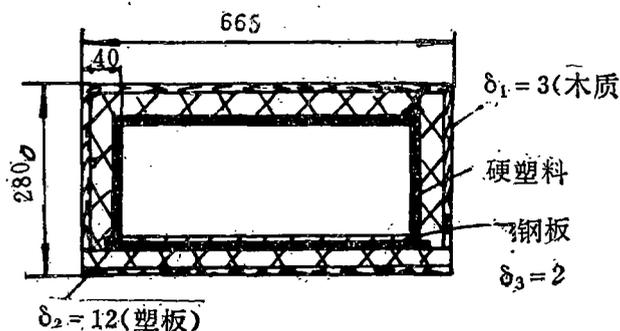


图1 围护罩壳截面

式中

- N ——围护罩壳截面平均周长(m)
- L ——隧道长度(m)
- R ——热阻($m^2 \cdot h \cdot K/kJ$)
- ΔT ——维护结构的内外温差(K)
- δ ——保温层厚度(mm)
- α_{og} ——保温层外表面换热系数($kJ/m^2 \cdot h \cdot K$)
- T_{og} ——保温层外的温度(K)
- T_{ng} ——内腔介质温度(K)
- λ ——导热系数($kJ/m \cdot h \cdot K$)
- T_L ——保温层外的空气露点温度(K)

围护罩壳结构见图 1。

1.5 隧道外损冷量估计

由于罩壳密封性欠佳、风幕风速小于壳外气流流速以及环境气压极度变化等因素，使内腔冷量外损，因外损大小随不同因素变化有所不同，很难定量，只能凭借经验初步估计 419 ~ 1257 千焦/小时。

2 制冷压缩机选择

2.1 制冷工况的确定

确定制冷工况，主要是确定蒸发温度及冷凝温度。蒸发温度越高，冷凝温度越高，则制冷量越小。因此两者温度的高低直接影响隧道内腔温度的高低，同时也相应地降低或提高制冷量，即制冷量随它而波动。但隧道内的温度是由巧克力工艺要求恒定的，不能波动太大。在制冷量充裕情况下，则设定温度为 $10^{\circ} \sim 12^{\circ}C$ ，其他条件变化见图 2 所示。

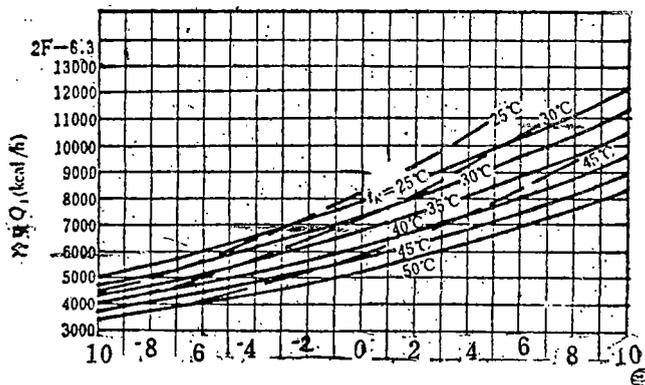


图 2 2F6.3 型压缩机供冷性能曲线(虚线为上冷试验曲线)

2.2 压缩机选择的依据

主要根据隧道系统内的总发热量，适当调整膨胀阀的开度来满足温度和冷量的要求。根据热量初估值约知所需冷量为 12570 千焦/小时左右，为考虑环境温度、湿度、风速、泄漏等因

素的变动以及为防止蒸发器表面结露(或结霜),务必提高离心风机的速度,达到冲霜和冷却的目的。除了具备上述条件,还应考虑一定的余量和稳定性,选取压缩机组时,应大于初算时的1.2倍制冷量,即使冷损大一些也不致于隧道温度提高,这样的选取可靠性比较大。本隧道选用了JZS—2F6.3压缩机组,其标准制冷量为16748K千焦/小时,同时配备ZF—24改型蒸发器,散热面积为10米²左右,迎风面积0.3米²,主要考虑:减少肋片间的积尘对传热效果的影响;增大肋片间距,减少冷媒在表冷器上结霜现象;增大风量和风速。

蒸发面积越大制冷量也大,但不能无限增大,它受压缩机制冷能力、工质、冷凝温度等限制。欲合理选取压缩机,做到既不浪费功率又满足制冷量,在蒸发温度-4℃,冷凝温度35℃工况条件下,制冷量可达21772K千焦/小时左右。

3 中间导风装置的回风口、进风口面积的确定

中间导风装置是冷却隧道的主要部件之一,它的作用主要是由冷冻机组经蒸发器后,由进风口提供冷媒,冷媒通过下管道送入两端风幕风罩,形成隔热的风幕布,使外部气流与内腔内气流不经热交换,而导风装置的另两口(回风口),不断地产生负压即所谓的吸气作用,将风幕两端的气流经上层整流罩后,返回到回风口,大量的气流由离心风机吸入,重新进入蒸发器,使吸入的气流温度大幅度下降,冷媒再次送入进风口,形成周而复始的循环系统。

中间导风装置由进风口和回风口两部分组成,是在冷却隧道的中间位置。

3.1 进风口面积计算

进风口的流量和流速均由离心风机提供,产冷量由冷冻机组经蒸发装置后获得,假如风罩的压力损失不计,风机输出的流量,全部进入进风口,其面积的计算可由下式连续方程求得(可压缩流体):

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad \text{或} \quad q_v = 3600 V_1 A_1 = 3600 V_2 A_2 \quad (\text{当} \rho = \text{const时})$$

式中

q_v ——计算流量(m³/h)

V_1 、 V_2 ——风机出风口实测流速(m/s)

A ——进风口面积(m²)

ρ ——流体平均密度,随温度而变化(kg/m³)

根据计算结果,宽度为300毫米,高度为56毫米,但受结构上的限制,满高只能为55毫米,则 $A = 300 \times 55$ (毫米²),流速通过此面积时的出口速度应为 V_1' ,再经横截面 585×70 (毫米²)时的出口速度应为 V_2 。计算数值见汇总表2。

3.2 回风口面积计算

首先要确定回风口气流的流量和流速,才能计算出回风口的面积。由图5可知进风气流经进风口后,由管道输入两端“风幕风罩”形成风幕,再经隧道内腔(管道上部)折回到“中间导风装置”,由于上部两层结构上的限位,回风口处高度只能达到70毫米,其宽度需按回流流量(如不考虑压头损失)1700米³/时及流速计算得知。流速 V_5 与“中间导风装置”的结构形式有关。“中间导风装置”主要分三层(整流罩)、中间层(通道)、下层(管道),(如图3)。

3.2.1 进入通道速度 V_3 气流由通道进入“风幕风罩”后分二路回“中间导风装置”。一路

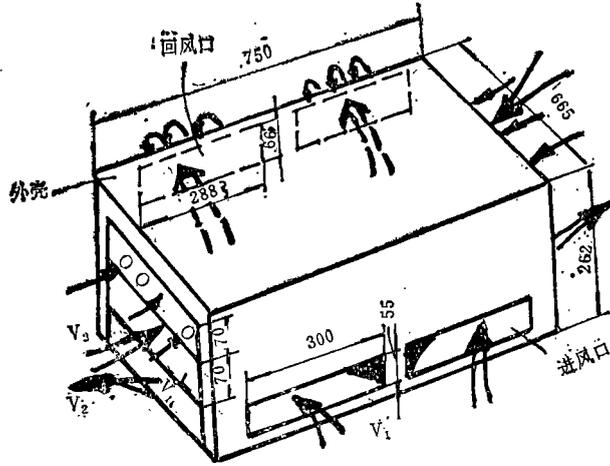


图3 中间导风装置

经风幕回“装置”下部速度为 V_3 ；另一路直接进入“装置”上部孔板送入整流罩，速度为 V_4 。 V_3 与 V_4 会成一股气流进入回风口，由于在孔板处流阻的影响，能量有所损失，但通过孔眼后却成均匀、稳定气流，这就是整流的作用。二部份的流速按连续性方程式求得。

3.2.2 进入整流罩孔后速度 V_4 整流罩二侧各开 n 个圆孔，使气流经孔板整流减少旋涡，逐渐趋于平稳。

$$V_4 = q_v / (n \times A \times 3600)$$

式中

n ——孔数

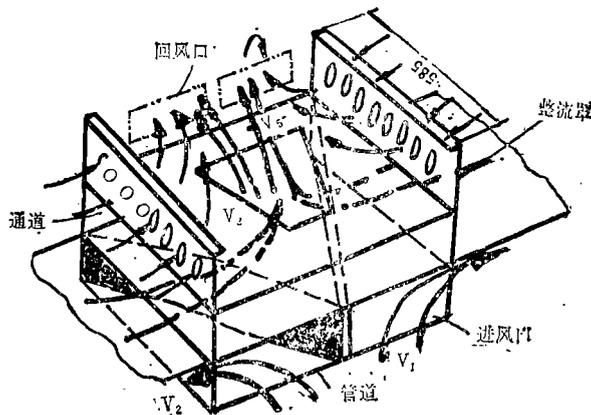


图4 中间导向装置内部结构图

3.2.3 进入梯形面积后之速度 V_5 进入梯形面积之速度，主要来自风幕两端上、下层的速度，因此其速度按下式计算，（通道下部输出速度）

$$V_5 = \frac{q_v}{[(a+b/2) \times h] \times 3600} \text{ (m/S)}$$

式中

a ——梯形的上底(m)

b ——梯形的下底(m)

h ——梯形的高度(m)

q_v ——流量, 为二面进入梯形面积时的二倍(m^3/h)

计算结果 V_4 大于 V_5 , 故粗略地按 V_4 速度计, 则可初步得高度 y 值。

$$y = 0.0805, \text{ 取 } 81\text{mm}$$

由于结构上的限制, 高度最大只能达到70mm, 故最后确定宽度如下:

$$W = 0.288\text{m}$$

按此宽度才能满足流量和流速之需要。

4 隧道风幕的形成及其风速计算

为保证冷却隧道内空气参数较严格地控制在一定范围内, 一般在与室内相连通的敞开口, 用空气幕的方法来保证罩内空气参数的稳定, 对内腔的循环系统其回风量应近似于送风量。根据实测, 为使室内气流不渗入罩内, 在敞开口(二处)处压出气流的平均速度应 >4 米/秒。

4.1 气流循环

空气幕的作用是根据射流原理, 从狭窄的风口喷射气流, 气流周围形成低压区, 由于近似封闭式内循环隧道, 部分气流因排风系统的吸引作用, 又送入送风系统, 再入进风口, 这样连续不断地循环下去, 见图5所示。

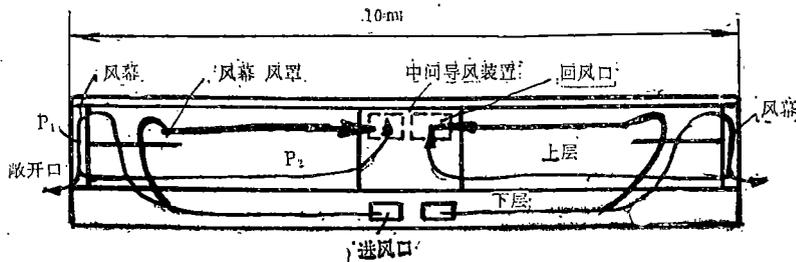


图5 冷却隧道风幕及其气流回路图

4.1.1 空气幕可按下列公式计算

$$W_x/W_0 = 0.492 / \sqrt{ax/b_0 + 0.41}$$

式中

W_x ——射流末端的空气平均速度, 可根据试验测得(m/S)

W_0 ——射流出口的平均速度(m/S)

a ——紊流系数 $a = 0.20$

x ——送风口至排风口的距离(m)

b_0 ——1/2送风口宽度(m)

4.1.2 实测风幕平均射流出口速度 按上述理论计算中, 未考虑沿程压头损失和局部压头损

失, 如果统筹考虑, 则实测值应小于理论值。由于冷却隧道拐弯部分多, 精确计算可按《Banc'el Berrnull》方程来求解, 但因流速的复杂情况对计算带来一定困难, 故只能用测试方法测出风幕射流口的平均速度(见表1)。从表中可见与上述风幕计算的平均速度基本相符, 但随着环境条件的变化, 实际数据会出现各异。

表1 风幕射流出口的速度测试数据

次数	内腔湿度 (%)	内腔温度 (K)	风幕温度 (K)	风幕风速 (m/S)	流量 (m ³ /h)
1	64	283	280	7.0	296
2				6.5	275
3				6.5	275
4				7.0	296

测试条件: 1. 环境温度16℃ 2. 环境湿度73%

4.2 隧道内腔负压的形成

内腔气流流动所经过的路程, 见图5所示。由进风口送入经回路后返回回风口, 在几乎密闭的内腔中, 完成内部连续循环。因考虑到气流的可压缩性, 应用修正后的欧拉公式, 在低马赫数时, 与速度变化相比, 密度的变化是很小的, 以致在计算流场时可以忽略。这类变化可模拟变截面流管中定常, 绝热流动状态, 即可认为 $\rho = \text{const}$, 故 $M = 0$, 于是得到面积—速度关系

$$du/u = -dA/A / (1 - M^2)$$

式中

M ——马赫数

A ——截面积(m²)

u ——气流速度(m/S)

可见, 在一定温度下, 压力与容积成反比关系。

由于气流经下通道到两端形成两处风幕, 而风幕气流少部有外溢, 也就是说在模拟密封容器中流量有损失, 内腔分子的分压力则减小, 故上层扩大了容积造成低压(负压), 这对内腔循环降低湿度有很大的优越性, 但因围护装置不全为封闭外壳, 界面之间会产生微量的热交换, 所以内腔压力不可能降得很低。

5 进风管道与回风通道之含湿量变化的考察

两道之间含湿量变化, 直接和环境条件发生关系, 其主要环境条件是温度、焓、相对湿度, 压力等物理参数, 可以利用*i-d*湿空气焓湿图来确定设备的露点温度, 此温度也表明了空气经过表面冷却后, 所得到的接近饱和状态的空气温度。

从图5中可见上层与下层之间用钢板隔开, 在钢板表面(底部)再涂层隔热材料, 增加热阻, 使热量损耗减少。然而, 隔热层厚度不能太厚, 否则沿程阻力损失过大, 因此既要满足

结构上的要求,又要减少沿程阻力。如果热阻太小,在钢板表面上含湿量大增,造成板面露水,侵蚀钢板和湿润传送带,会增加内腔湿度,但由于内腔气流的内循环,故内腔湿度的增加受到一定的限制。一般相对湿度大的空气含湿量也高,随着隧道的连续工作以及与外界基本隔绝,内腔相对湿度会逐步地降低,继而在钢板的表面附着的水汽逐渐减少,具体的量值见*i-d*湿空气焓湿图。

应当指出,相对湿度是含湿量的工况条件,但环境温度、压力以及巧克力的焓也同样是不可忽略的工况因素,在考察含湿量变化的同时,必须综合研究。相对湿度以70%以下为宜才有利于巧克力表层的凝结。

6 传送带变速范围及其速度确定的原则

各种类型巧克力的芯体被制作之后,紧接其后的是涂层成型、冷却的过程,冷却隧道就是与涂层机匹配的一种巧克力凝固定型设备,故它的传动部分所传送的速度必须与涂层机速度相协调。同时,还要考虑到巧克力工艺需要的冷却时间。

6.1 传送带的速度确定原则

6.1.1 巧克力工艺要求 巧克力从液态变为固态是通过降低物料温度而实现的,降低温度的目的在于移去物料所包含的显热与潜热,故不宜采取低温速冷的方式,过低温度使物料迅速固化不能及时移去物料内部的潜热,即使凝固了也是不稳定的,因为内部热量的重新平衡将损坏固体的质构特性,同时也无助于脂肪晶格的规律排列。

本机主要与涂层相配置,将涂层后的制品进行及时冷却,移去芯体和涂层的热量,对不同巧克力采用不同冷却速度,隧道内气流的冷却温度一定要控制在7~12℃、风速不超过7米/秒,在隧道内停留时间约为15~20分钟,巧克力涂层凝结过程的相对湿度应保持在60%~70%范围内,这样才能保证巧克力制品的质量。

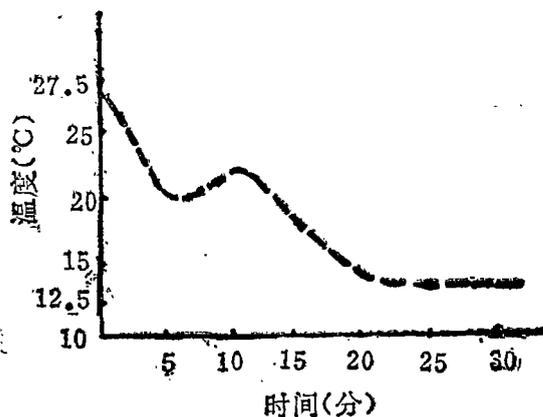


图6 巧克力凝固温度与时间的关系

涂层后制品的冷却凝结条件即冷却的温度与速度,冷却速度过快或过慢容易使制品表面发生花白现象,涂层质构变粗,失去光泽。冷却速度与温度应按图6分三段冷却为宜,同时使巧克力制品的晶格趋于稳定。

6.1.2 传送带的速度要求 当巧克力被凝固时，脂肪因重新结晶而形成有规律的晶格，各种分散相也被固定在脂肪的晶格之间。因此，为了获得较为稳定的巧克力制品，除了三段冷却外，还考虑到时间的长短，也就是说，短暂的速冷、缓慢的较长冷却，需要一定的时间保证，故在设备设计时，一方面要与涂层机速度相匹配，另一方面要根据物料涂层厚薄，随时调整变速器的变速范围。

6.2 传送带速度及功率的确定

根据上述原则，确定主滚筒的速度范围为 0.0198~0.0792米/秒，相应转速为 $n_1=1.68\sim 6.72$ (转/分)(忽略滑差率)。此转速直接由蜗轮蜗杆传递，见图7。

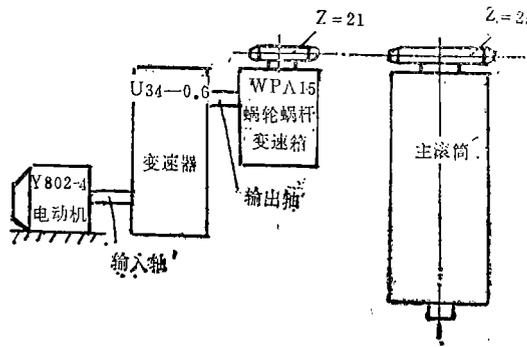


图7 传动系统

6.2.1 包角空载时功率

主滚筒总轴功率

$$P_1 = F_{e0} \cdot V / 102$$

$$F_{e0} = 2F_0 (1 - 1/e^{\alpha}) / (1 + 1/e^{\alpha}) \text{ (圆周力)}$$

式中

f ——摩擦系数

α ——包角

6.2.2 输送水平负载功率 (见图8)。

$$P_2 = F_1 \cdot V / 102$$

$$F_1 = fN_1$$

式中

F_1 ——摩擦力(kg)

N_1 ——所受长度上负载正压力

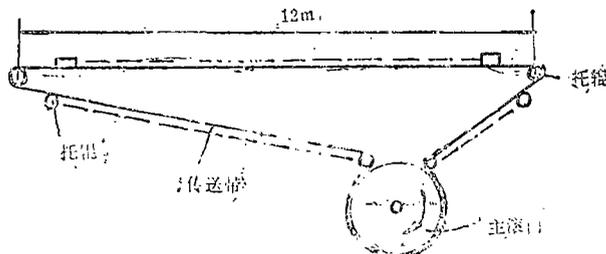


图8 传送带运行图

6.2.3 左端圆轴摩擦功率 按最有效圆周力计算。计算方法见6.2.1, 求 P_3 。

6.2.4 下托辊功率 P_4

$$W = (q_0 + q'')L_h \cdot \omega'' \quad (\text{阻力}) \text{带下垂时。}$$

式中

q_0 ——输送带每米重量(kg/m)

q'' ——每米长度上的下托辊拖动部分的重量(kg/m)

ω'' ——平行托辊阻力系数

L_h ——输送机水平投影长度(m)

主滚筒轴总功率 $P = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) / \eta_1$, (kw)

式中

η ——传动效率

6.3 蜗轮蜗杆变速范围及其功率确定

根据结构分析和功率的约计, 我们选取了系列变速装置, 见图7所示。

轴功率 $p' = p / \eta$ (kw)

6.4 无级变速器变速范围及计算功率的确定

无级变速器变速范围是根据传送带的线速度范围而确定的, 其计算功率是由各轴功率和消耗功率之总和。

$$\text{轴功率 } p'' = p' / 0.75$$

$$\text{配用电机功率} > 0.32(\text{kw})$$

由此选择U34—0.6型变速器。

考虑到动力负载因素, 其轴功率应如下计算:

$$p''' = p'' \times K \quad (\text{kw})$$

式中

K ——安全系数

安全系数的选取, 主要考虑附加阻力、润滑条件、摩擦状况、张力大小、传送带位置、负载启动时产生加速度所消耗的附加功率等素因。本设计选取安全系数为2。

结 语

本机主要是围绕空气对流循环、冷却为宗旨的结构设计和配备制冷系统, 并配有三段冷气区域, 能较好地满足巧克力制品冷凝工艺要求, 经实际应用效果良好;

本冷却隧道的气流流程, 由于沿程和局部压头损失, 所测得的流量、速度和压力与理论计算有些差异;

欲使隧道内腔保持在8~12℃范围内, 务必随环境条件变化, 随时调整温控器;

制冷系统所提供的冷量, 主要根据隧道全程冷耗, 但与实际冷耗有些差别, 尚需修正。

表2 各种计算汇总

参 数	数 值	参 数	数 值
Q_1	460 kJ/h	P_2	9.7×10^{-4} kw
Q_2	2018 kJ/h	F_{cc}'	20.9 kg
$Q_3 = Q_k + Q_s$	7344 kJ/h	P_3	0.0163 kw
Q_4	1599 kJ/h	W	1.29 kg
Q_5	1269 kJ/h	P_4	1×10^{-5} kw
R_1	0.231 m ² hK/kJ	P	0.19 kw
R_2	0.296 m ² hK/kJ	P''	0.32 kw
N_1	1.84 m	$P'' = P'' \times K$	0.64 kw
N_2	1.88 m	P_1	0.24 kw
V_1'	14.3 m/s		
V_2	5.9 m/s		
V_3	3.13 m/s		
V_4	11.74 m/s		
V_5	3.09 m/s		
单面回风口面积	288 × 70 mm ²		
单面进风口面积	300 × 55 mm ²		
W_0	7 m/s		
n_1	1.68~6.72 r/min		
F_{cc}	195.7 kg		
P_1	0.152 kw		
F_1	1.25 kg		

参 考 文 献

- [1] 第四机械工业部, 第十设计研究院. 空气调节设计手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983
- [2] 李诗久. 工程流体力学. 北京: 机械工业出版社, 1980
- [3] 时爱民, 章光华译. 气体动力学基础. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 梁庚煌. 运输机械手册. 北京: 化学工业出版社, 1983
- [5] 濮良贵. 机械零件. 北京: 人民教育出版社, 1982
- [6] Robertc. Tuvirnall, Fundamentals of Machine Component Design 1983
- [7] 苏庆瑞等. 制冷与空调. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1983

The Analysis of the Structure of “All Air Convection Cooling Tunnel” and the Approach to its Design

Abstract

This article is mainly concerned with the structure and design of All Air Convection Cooling Tunnel. Along the direction of the length, cooling takes place in three zones; All Air Convection Cooling Tunnel is the guarantee of constantly good coating quality.

Subjectwords: Convection/cooling tunnel; Chocolate product; design