

超音速冲压发动机试车台

无冷凝流动规范

刘克珩

摘 要

本规范系根据NACA, Lewis飞行实验室关于气流流经超音速喷管出现冷凝时的临界温度试验数据,结合Volmer关于冷凝波形成的核生成理论而建立的。适用范围从M数1.0到3.8。只要知道了气流的含湿量(绝对湿度)和气流静压,便可借助于静压与绝对湿度的关系曲线,查出露点。再根据露点与M数的关系曲线——无冷凝流动网图,可查出所试M数下出现冷凝的临界温度,从而,判断试验是否出现冷凝。

符 号 表

M	马赫数	下标	
P	压力, 公斤/厘米 ²	S _a	饱和蒸汽
G	重量, 克(或公斤)	N ₂	氮气
V	容积, 米 ³	O ₂	氧气
R	气体常数	CO ₂	二氧化碳气
T	温度, K(或℃)	H ₂ O	水蒸汽
σ	绝对湿度, 克水蒸汽/公斤干空气 或公斤水蒸汽/公斤干空气	com	混气
β	相对湿度	dr	干空气
k	绝热指数	o	滞止状态
J	冷凝核生成率	cr	临界状态
α	空气余气系数	T	总和
φ	效率	j	加热器
		rs	燃烧
		con	露点

一、前 言

不论风洞还是冲压发动机使用超声速喷管试验设备都应有适用于本设备的无冷凝流动规范。

关于超声速风洞, 为尽可能减少水汽冷凝产生不利于流动的影响, 对气源空气的含湿量(绝对湿度)作了严格要求。例如, 对中压(通常为25个大气压以下)气源, 规定空气的含湿量不大于0.2克水蒸汽/公斤干空气; 高压(通常高于120个大气压)气源, 规定空气的含湿量不大于0.06克水蒸汽/公斤干空气。

然而,对于超声速冲压发动机自由射流试验设备来说,为满足冲压发动机进气温度模拟,常采用直接加热器预热空气。因此,空气的含湿量将显著增加。如模拟M数1.8的飞行状态,把空气由初温270K加热到370K(静温为-48℃),空气的含湿量将从原来的0.06克水蒸汽/公斤干空气增加到大约3.2克水蒸汽/公斤干空气,增加了50余倍。众所周知,含湿量增加,露点升高,而一旦出现冷凝,会有较多的水汽液化,除伴随凝聚波形成外,释放出较多的潜热,使喷管流动发生明显变化。

通常,气体出现冷凝的必要条件是气体分压大于其饱和蒸汽压。对于湿空气,其主要成分为N₂、O₂、CO₂、Ar和H₂O,其饱和蒸汽压从大到小的排列顺序是P_{sa, N₂} > P_{sa, O₂} > P_{sa, CO₂} > P_{sa, H₂O},由此可知,随温度下降,空气中的水蒸汽首先出现冷凝。根据理论分析和实验证明,饱和蒸汽压是温度的单值指数函数。例如,对于冰:

$$P_{sa, ic} = 10^{-\frac{A}{T} + B} \quad (1)$$

式中的A和B均为常数。而空气中水蒸汽的分压P_{H₂O},则遵循绝热气体定律,是温度的幂函数:

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{O, H_2O}} = \frac{P_{com}}{P_{O, com}} = \left(\frac{T_{com}}{T_{O, com}} \right)^{k/(k-1)}$$

$$P_{H_2O} = P_{O, H_2O} \left(\frac{T_{com}}{T_{O, com}} \right)^{k/(k-1)} \quad (2)$$

所以,气流在超音速膨胀过程中,随M数增加,饱和蒸汽压要比水蒸汽分压下降得快,对于确定的温度来说,可能出现

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{sa, H_2O}} \geq 1.0 \quad (3)$$

水蒸汽形成饱和、过饱和以至于出现冷凝。一旦出现冷凝,便会导致总压下降,静压增加,M数减少,流动出现了不连续面,不可以再看作等熵流动了。

Oswatish 和 Volmer 曾提出关于冷凝核的生成理论——液滴形成的必要条件是水蒸汽分子凝结在核上,而冷凝核通常来源于空气中的吸水物质(杂质)或水分子集结成凝结胚。只要凝结胚表面蒸汽压低于周围水蒸汽分压,凝结胚就不断增长,达到平衡时,液滴半径可根据水蒸汽分压与饱和蒸汽压的关系确定。

本规范系根据NACA, Lewis飞行实验室在3.4×3.4英寸和4×10英寸两种超音速风洞在M数为1.45, 2.0, 2.01的实验观察结果并结合Volmer关于核生成理论建立的。规范以与风洞进口滞止压力无关的形式给出,理论上外推到M数3.8,以便用于具有超声速喷管的冲压发动机试车台上。

关于湿度几个术语

(1)绝对湿度(含湿量)

定义:单位立方米的水蒸汽含量(或称水蒸汽密度)

$$\sigma = G_{H_2O}/V \quad (4)$$

按照克劳修斯——克拉贝隆(Clausius-Clapeyron)方程

$$\sigma = \frac{G_{H_2O}}{V} = \frac{P_{H_2O}}{P_{dr}} \cdot \frac{R_{dr}}{R_{H_2O}} = 0.6223 \frac{P_{H_2O}}{P_{com} - P_{H_2O}} \quad (5)$$

(2) 相对湿度

定义：水蒸汽分压与饱和蒸汽压之比。

$$\beta = P_{H_2O} / P_{sa, H_2O} \quad (6)$$

饱和状态， $\beta = 1.0$ ，对应的温度称为露点。

(3) 绝对湿度与相对湿度的关系

$$\sigma = 0.6223 \frac{P_{H_2O}}{P_{com} - P_{H_2O}} = 0.6223 \frac{\beta P_{sa, H_2O}}{P_{com} - \beta P_{sa, H_2O}} \quad (7)$$

二、水蒸汽冷凝对气流参数的影响

表1列出超音速冲压发动机某自由射流试车台在进行发动机试验时，水蒸汽冷凝前后的喷管出口M数之变化情况。

表1 水蒸汽冷凝对射流喷管出口M数的影响

射流喷管膨胀比	无冷凝时M	冷凝时M冷	绝对湿度 σ	过冷度(℃)
2.211	1.79			
		1.734	3.90	42
2.283	1.830		9.30	
		1.776	3.80	42
		1.809	<0.06	42

由表1可见，对于采用碳氢燃料来直接预热发动机来流空气时，在预热温度较低的状态下，由于来流混气的绝对湿度相当高容易出现冷凝。一旦出现冷凝，对喷管出口M数就会产生较明显的影响。这种影响来自两个因素，一个是绝对湿度大，冷凝后释放出的潜热多，使M数下降；另一个是凝结激波的产生使M数下降。这两个因素的影响效果可从表1中看出在相同过冷度下，当绝对湿度为3.8~3.9克水蒸汽/公斤干空气时，冷凝使M数下降3.1~3.0%；绝对湿度小于0.06克水蒸汽/公斤干空气时，冷凝使M数下降1.1%。这个结果表明，对于超声速冲压发动机自由射流试车台来说，由于采用碳氢燃料直接预热发动机来流空气，混气的绝对湿度远大于超声速风洞中空气的绝对湿度，故冷凝对气流参数的影响程度差别也较明显。据此，当进行冲压发动机自由射流试验时，必须考虑到所模拟的温度下是否会出现冷凝，力求避免冷凝带来的不利影响。

三、建立规范的依据

根据NACA, Lewis飞行实验室在3.4×3.4英寸和4×10英寸两种超音速风洞试验确定的无冷凝流动的核生成率 $\ln J$ 的六次试验结果的平均值，选定 $\ln J = 4.1$ ($J = 60.34$) 作为无冷凝流动的核生成率极限。

由 $\ln J = 4.1$ 可以确定无冷凝流动的临界温度 t_{cr} 与蒸汽压比的关系(图1)。曲线右侧为冷凝区，左侧为无冷凝区。当 $M = \text{常数}$ 时，在状态A出现冷凝，通过对气流加热(保持绝对湿度不变)，可使状态自A向B移动，越过曲线后，冷凝自行消失。与曲线相交之点的状态，其温度就是无冷凝流动的临界温度，对应的横坐标便是相对湿度。

1. 无冷凝流动规范网图

网图表示成与风洞进口滞止压力无关的形式。纵坐标为露点、横坐标为M数, 根据给定的无冷凝流动的临界温度建立露点与M数的关系, 因为露点代表混气湿度。通过此网图可确定给定M数下, 流动不出现冷凝时所允许的最大湿度。该网图的建立步骤如下:

(1) 给定气流静温一无冷凝流动的临界温度 T_{cr}

(2) 由等熵流关系式

$$\frac{T_{cr}}{T_{0,com}} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{-1} = (1 + 0.2M^2)^{-1} \quad (8)$$

确定 $T_{0,com}$ 和M数的对应关系。

(3) 由 T_{cr} 从图1中查出 $\log \frac{P_{H_2O}}{P_{sa, H_2O}} = \log \beta$ 的值, 从而确定了相对湿度 β 。

(4) 根据Osborna—Meyers关系式确定 T_{cr} 时的饱和蒸汽压 P_{sa, H_2O} , 从而求得水蒸汽分压 $P_{H_2O} = \beta P_{sa, H_2O}$ 。

值得注意的是, 在确定饱和蒸汽压 P_{sa, H_2O} 时, 根据不同的临界温度 T_{cr} 的范围, 应分别选用下列关系式。

a、温度在 $0^\circ \sim 95^\circ \text{C}$ 范围内, 用纪利经验公式:

$$\log P_{sa, H_2O} = 0.0141966 - 3.142305 \left[\frac{10^3}{T_{cr}} - \frac{10^3}{373.16} \right] + 8.2 \log \left(\frac{373.16}{T_{cr}} \right) - 0.0024804(373.16 - T_{cr}) \quad (9)$$

b、温度在 $95^\circ \sim 374.15^\circ \text{C}$ 范围内, 用Osborne—Meyers提出的关系式:

$$\log P_{sa, H_2O} = A + \frac{B}{T_{cr}} + \frac{CX}{T_{cr}} (10^{DX^2} - 1) + E (10^{FY^{\frac{5}{4}}}) \quad (10)$$

式中: $A = +5.4408480$

$E = -0.0044$

$B = -2005.1$

$F = -0.0057148$

$C = +1.3869 \times 10^{-4}$

$X = T_{cr}^2 - 293700$

$D = +1.1965 \times 10^{-11}$

$Y = 374.15 - T_{cr}$

c、温度 $T_{cr} < 0^\circ \text{C}$ 时, 采用过冷水的饱和蒸汽压而不用冰的饱和蒸汽压。过冷水的饱和蒸汽压由下式确定:

i) 已知冰的饱和蒸汽压与温度的关系:

$$\log P_{sa, ic} = -\frac{2445.5646}{T_{cr}} + 8.2312 \log T_{cr} - 1677.006(10^{-5})T_{cr} + 120514(10^{-10})T_{cr}^2 - 6.757169 \quad (10)$$

$$P_{sa, ic} = 10^{-\frac{2681}{T_{cr}} + 10.469} \quad (11)$$

或

(10) 与 (11) 式的计算结果稍有不同, (10) 式更为准确。

ii) 过冷水与冰的饱和蒸汽压比与温度的关系为:

$$\log \frac{P_{sa, H_2O}}{P_{sa, ic}} = -\frac{1.1489 T_{cr}}{373.15 + T_{cr}} - 1.330(10^{-5} T_{cr}^2) + 9.084(10^{-8} T_{cr}^3), \quad (12)$$

故, 已知冰的饱和蒸汽压 $P_{sa, ic}$ 可算出过冷水的饱和蒸汽压 P_{sa, H_2O} 。在相同温度下,

$$P_{sa, H_2O} > P_{sa, i co}$$

(5) 引入下列关系式

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{O, H_2O}} = \frac{P_{com}}{P_{O, com}} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{-\frac{k}{k-1}} \quad (13)$$

即

$$P_{O, H_2O} = P_{H_2O} / \pi(\lambda) \text{ 或 } P_{H_2O} = P_{O, H_2O} \pi(\lambda)$$

(6) 确定对应于 P_{O, H_2O} 的露点 T_{cr} 作为纵坐标。

于是, 可建立起相对于风洞进口处 (或射流喷管出口处) 水蒸汽分压 (用露点表示), 进口温度和试验截面 M 数的无冷凝流动规范网图 (图 2)。

2. 辅助图线

为确定对应于某一 M 数下不发生冷凝的气流临界温度, 必须知道混气的露点, 而露点又取决于混气的绝对湿度和混气的压力 P_{com} 。因此, 需要通过一套辅助图线来确定混气的露点。

由绝对湿度定义得:

$$\sigma = 0.6223 \frac{P_{H_2O}}{P_{com} - P_{H_2O}} = 0.6223 \frac{\beta P_{sa, H_2O}}{P_{com} - \beta P_{sa, H_2O}}$$

当相对湿度 $\beta = 1.0$ 时, 对应的混气温度即为露点。于是, 在刚达饱和状态时, 其绝对湿度表达式变为:

$$\sigma = 0.6223 \frac{P_{sa, H_2O}}{P_{com} - P_{sa, H_2O}} \quad (14)$$

$$\text{故 } P_{com} = P_{sa, H_2O} \left(1 + \frac{0.6223}{\sigma}\right) \quad (15)$$

因为饱和蒸汽压 P_{sa, H_2O} 是温度的单值指数函数, 所以, T 与 P_{sa, H_2O} 有一一对应关系。于是, 可建立起不同露点温度 T_{con} 下, 混气压力 P_{com} 与绝对湿度 σ 的关系曲线 (图 3)。

只要知道了混气压力 P_{com} 和混气的绝对湿度 σ , 就可查出露点。混气压力可通过喷管壁面静压孔测得。混气的绝对湿度最好用湿度计、微量水分分析仪或混气取样分析确定。

3. 可能存在的问题

本规范已在某自由射流试车台上获得初步验证。但是, 由于影响流动出现冷凝的因素颇多, 如混气中的杂质含量、混气压力、混气温度, 混气含湿量以及超声速喷管和试验段的型面等因素, 故采用 NACA, Lewis 飞行实验室在 3.4×3.4 英寸和 4×10 英寸两超声速风洞试验所得到的临界温度与蒸汽压比的关系作为本规范的依据参数, 其通用性可能受到限制。

四、使用举例

在没有条件用直接测量的方法获得混气含湿量的情况下, 可根据直接加热器的供油油气比 (或用空气余气系数)、化学反应的质量守恒方程, 来计算混气含湿量。图 4 和图 5 分别表示气体加热温差与加热器空气余气系数, 气体加热温度与混气绝对湿度的关系。

例 1, 混气初温 $T_{0, com} = 270K$, 气流不加温, $\Delta T = 0^\circ C$, 气源空气的绝对湿度 $\sigma = 6 \times 10^{-5}$ 公斤水蒸汽/公斤干空气, 试判断在 $M = 1.8$, $P_{com} = 1$ 公斤/厘米² 状态下, 流动是否出现冷凝?

(1) $M = 1.8$, $T_{o, com} = 270K$, $T_{com} = T_{o, com} \tau(\lambda) = 164K = -109^\circ C$ 。

(2) 由 $\sigma = 6 \times 10^{-5}$ 公斤水蒸汽/公斤干空气, $P_{com} = 1$ 公斤/厘米², 查图 3 得露点为 $-46^\circ C$ 。

(3) 由露点 $-46^\circ C$ 和 $M = 1.8$, 查图 2 得无冷凝流动临界温度为 $T_{cr} = -87.5^\circ C$

结论: 因混气静温 $T_{com} = -109^\circ C$, 低于临界温度 $T_{cr} = -87.5^\circ C$, 故流动会出现冷凝。

例 2, 混气初温 $T_{o, com} = 270K$, 用直接加热器加热温升 $\Delta T = 248^\circ C$, 气源空气的绝对湿度 $\sigma = 6 \times 10^{-5}$ 公斤水蒸汽/公斤干空气。试判断在 $M = 1.83$, $P_{com} = 1$ 公斤/厘米² 状态下, 流动是否出现冷凝?

(1) $M = 1.83$, $T_{o, com} = 270K + 248K = 518K$ $T_{com} = T_{o, com} \tau(\lambda) = 310K = 37^\circ C$

(2) 由温升 $\Delta T = 248^\circ C$ 查图 4 得 $\alpha_j = 10.4$ ($\varphi_{rs} = 1.0$ 时), 查图 5 得 $\sigma_{com} = 8.3 \times 10^{-3}$ 公升水蒸汽/公斤干空气。

(3) 根据气流总绝对湿度

$$\sigma_T = \sigma + \sigma_{com} = 6 \times 10^{-5} + 8.3 \times 10^{-3} = 8.36 \times 10^{-3} \text{ 公斤水蒸汽/公斤干空气}$$

以及 $P_{com} = 1$ 公斤/厘米² 查图 3 得 $T_{con} = 11.5^\circ C$

(4) 由露点 $T_{con} = 11.5^\circ C$ 和 $M = 1.83$ 查图 2 得无冷凝流动临界温度 $T_{cr} = -37^\circ C$

结论: 因气流静温 $T_{com} = 37^\circ C$ 而临界温度 $T_{cr} = -37^\circ C$, 故不会出现冷凝。

参 考 文 献

- (1) Burgess Warren C. Jr. and Sashore Ferris L., Criteria for condensation-free flow in supersonic tunnels, NACA TN2518, 1951.
- (2) Reinhold N. Y., Properties of ordinary water-substance in all its phases; water-vapor, water and all the ices, 1940.
- (3) 乌卡洛维奇 M. N., 水和蒸汽的热力性质。

附图

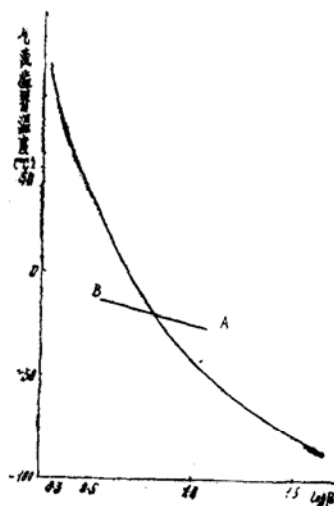


图 1 相对湿度对数, $\log \frac{P_{H_2O}}{P_{sat.H_2O}} = \log \beta$

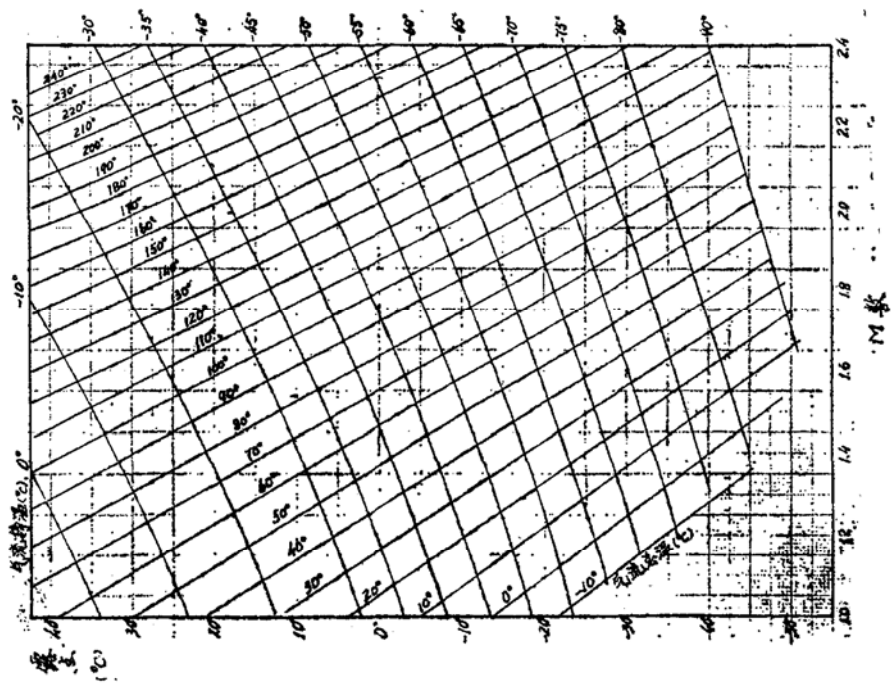


图 2 无凝流动规范图

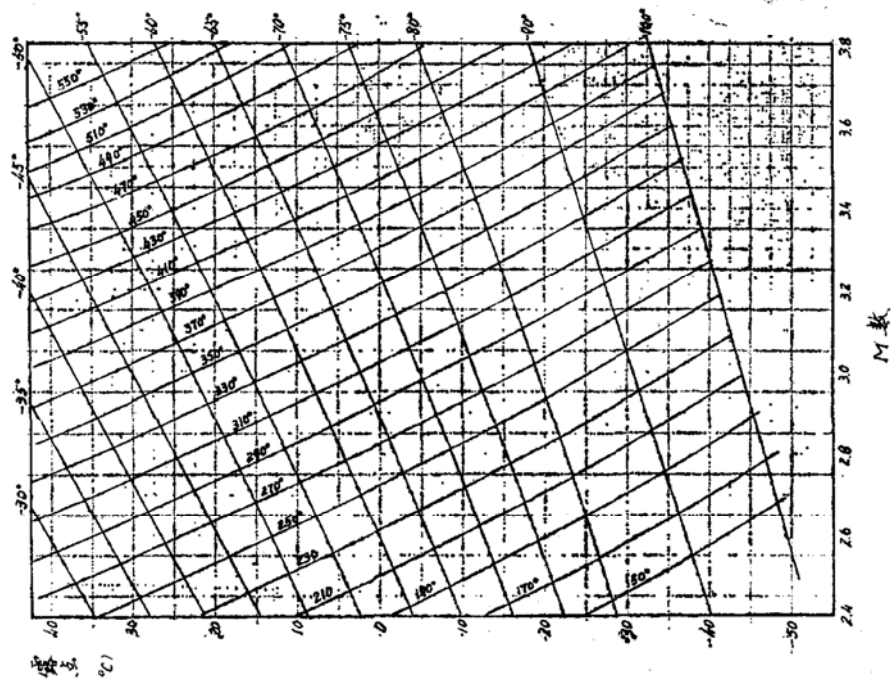


图 2 续

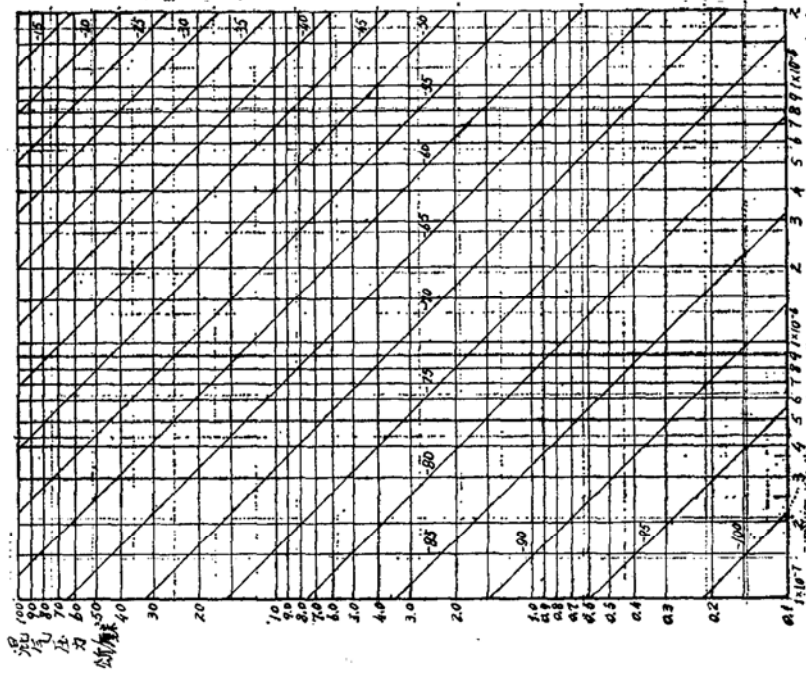


图 3 绝对湿度, σ 千克水汽/千克干空气

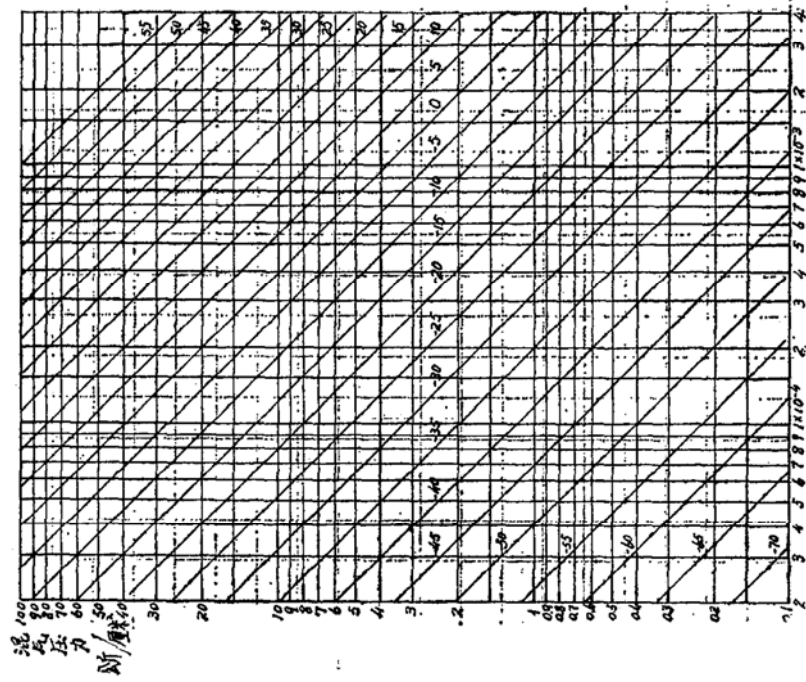


图 3 续 (a)

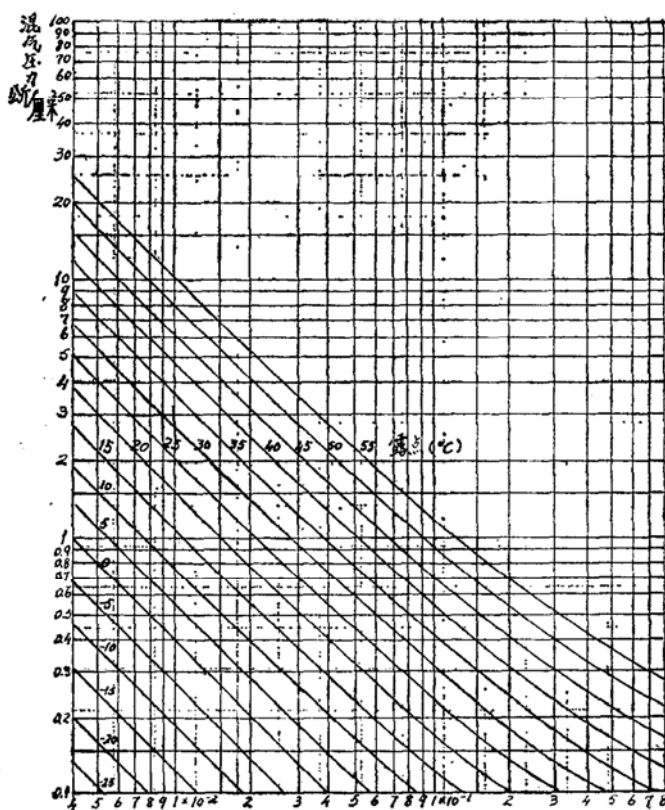


图3 续(b)

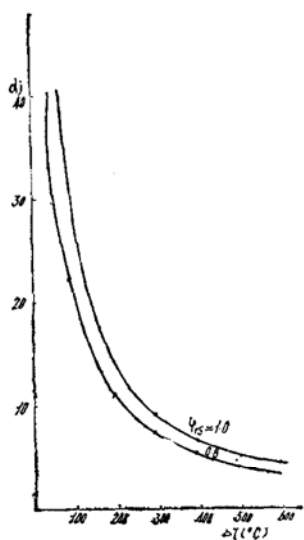


图4 温升与加热器余气系数的关系
(空气初温 $T_0 = 270^\circ\text{K}$)

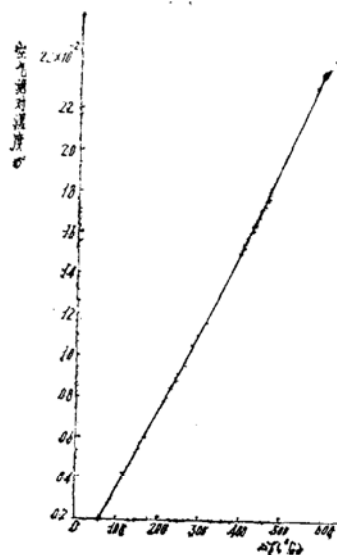


图5 空气绝对湿度与加热温差的关系 (空气
初始绝对湿度计为0, 初温为 270°K)