

竖炉热交换

[苏] Б·И·基太也夫等著

中国工业出版社

76.181
538
C.2

竖炉热交换

[苏] Б·И·基太也夫 等著

姚正 宋晨光 等译

中国工业出版社



本书系根据苏联冶金出版社出版的“竖炉热交换”(Теплообмен в шахтных Печях)一书译出。

本书详细地介绍了竖炉中热交换的问题。书中列有关于煤气发生炉和高炉中料层高度的详细计算,以及高炉热交换的研究结果。

本书可供冶金、化工等专业的工程技术人员参考。本书由姚正、宋晨光等同志翻译,由徐业鹏同志作技术校对。

Б.И. Кляев, Ю.Г. Ярошенко, В.Д. Сучнов

ТЕПЛОБМЕН В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ

МЕТАЛЛУРГИЗДАТ

СВЕРДЛОВСК—1957

* * *

竖 炉 热 交 换

姚正、宋晨光等译

*

冶金工业部科学技术情报产品标准研究所书刊编辑室编辑

(北京灯市口71号)

中国工业出版社出版(北京东便门内大街10号)

(北京市书刊出版事业许可出字第110号)

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $9^{1/16}$ · 字数 228,000

1964年3月北京第一版·1964年3月北京第一次印刷

印数 0001—1,960 · 定价(科七) 1.50元

*

统一书号: 15165 2927(冶金-486)

作者的 話

近十年的实践完全证明了深入研究竖炉中热交换问题的实际意义。在这一期间进行了大量的实验室试验和工业性试验，其中绝大部分试验是在乌拉尔的基洛夫工学院进行的。试验由该院的“煤气炉热工”和“炼铁”教研室，同新塔吉尔、谢洛夫、庫施維等工厂及乌拉尔金属学院等合作进行的。试验还同时在馬格尼托哥尔斯克冶金联合企业、中央黑色冶金研究院（ЦНИИЧЕРМЕТ）及全苏冶金热工科学研究所（ВНИИМТ）中进行。

我们对块料层中热交换这一领域的知识的不足，是并非偶然的，正说明了这一现象特别复杂并且难以以数学方法运算加工。美国一著名研究人員付尔納斯曾认为：要認識块料层中的热交换机构是很困难的，而想用数学分析以解决问题的企图则是徒劳无益的。

近年来的研究和对实际解法的探索，使得目前有可能运用一些已得的数据来解决某些实际问题。例如，在1952年Г.П.伊万佐夫和Б.Я.留勃夫借助于运算学获得实际料块固定层透热的分析解法。最近，由于Г.П.伊万佐夫和Б.Я.留勃夫、Э.М.葛利特法尔勒及В.Н.季瑪菲也夫等工作，获得了在逆流中，即在绝大多数竖炉条件下关于烧透球形物体问题的准确解法。

早在1948年以前，Л.В.布德林发表了类似问题的近似解法。这一解法对工程师的計算是完全可以采用的，而且其准确度与按严格数学分析法計算的相差不多。

最近还初步研究了逆流中化学反应过程与热交换之间的关系。

所有这些情况都促使了作者把已有的材料作系统的整理，并写出关于竖炉的热工这本书来。

作者的主要意图是探討热工问题的解法，并使这一解法可能

用于工程計算上。为此，在本书第一章中叙述了料层空气动力学及在逆流条件下料块加热和固定料层的透热等問題。在本书第二、三章中提出了实验数据，并对逆流中化学反应过程的规律作了分析。在上述的基础上，本书最后顺序叙述了煤气发生炉及高炉的热工問題。在附录中还举出一些运用布德林辅助图表的解题实例，以具体说明計算的方法。

在收集实验和計算資料时得到新塔吉尔、謝洛夫等工厂工作人員，及該地科研机关許多工作人員的协助。作者特此向所有参与这一实验工作的同志：B.K. 格魯金諾夫讲师、B.Л. 拉扎廖夫工程师、K.Д. 康諾瓦洛夫工程师等，表示深深的謝意。

作者对技术科学副博士 B.H. 季瑪菲也夫审阅本书手稿时所提的意見和建議；对 Л.В. 布德林讲师所提的宝貴建議以及他为在传热系数不变的情况下計算球形体的加热和冷却，繪制了极为方便和准确的計算图表；对“煤气炉热工”教研室的全体成員的大力协助准备草稿；对在按 B.H. 季瑪菲也夫公式繪制計算图表时 A.B. 庫尔巴托夫工程师給予的答疑及帮助等，表示特別深刻的感激。

作者将极其欢迎讀者对本书提出批評性的意見。

序 言

豎炉理論是苏联科学工作者研究的理論問題之一。

豎炉——不仅对获得黑色和有色金属，而且对其他方面的生产过程，像焙烧石灰石、鎂砂、白云石等等，也是极为普遍使用的装置。很早以前，学者們就在豎炉理論的发展上作了很多工作。

1926年，列-沙捷林提出了豎炉理論的热力学原理。

B.E. 格魯姆-格尔热瑪依洛曾试图把自己的水力学理論运用到豎炉上来。

但是，只是在苏維埃时代，由于苏联科学院、其他科研机构及工业企业的广大人員都参与了这一工作，才对豎炉理論的发展作出了很大的貢獻。

但是目前仍然未能对豎炉理論提出綜合性的見解。这說明前一段时期我們只偏重了化学現象方面的研究。

有系統地研究热交换是从 M.A. 巴甫洛夫院士开始的。在研究高炉中热的传布及吸收問題时，巴甫洛夫确切地証明了單純由高炉热平衡推导出来的一些現象具有局限性。在同列傑布尔辯論这个問題时，M.A. 巴甫洛夫写道〔1，第542頁〕：“热平衡只是断定热量輸入或輸出的这一或那一因素及其單項的分配，它本身并不指出为达到热量的最好分配情况的过程”。

M.A. 巴甫洛夫接着指出，像水冷的必要性問題，完全不是由于热平衡的緣故而提出的。若按热平衡观点来看，水冷是与此相违反的。尽管这样，但是二十世紀前夕高炉上水冷的发展却是保証延长高炉寿命的决定性的一步。

根据热平衡观点来看，往高炉里加入热烧結矿，应该能节约焦炭。但是，正如 M.A. 巴甫洛夫正确指出的那样，实践否定了这种想法。

在观察了高炉采用通蒸汽加湿鼓风、使用焙烧过的石灰石及润湿过的炉料等等例子以后，M.A.巴甫洛夫指出以热力学的办法来处理这些问题存在着一定的局限性〔1〕。

И.А.索科洛夫教授认为，应该把高炉过程看作包含有各方面的内容，应对它进行各种方式的研究。大家知道，索科洛夫在深入研究高炉过程时除了从热力学方面，还从动力学方面进行研究，并在高炉工作者中首先提出研究铁矿石的还原性问题。

И.А.索科洛夫认为，研究高炉中的热交换之所以成为首要任务，是由于不清楚高炉中这一横断面或那一横断面的温度多高，不能预见它们中间的化学反应过程如何。

И.П.巴尔金院士、А.Н.保赫維斯涅夫教授及И.А.索科洛夫教授等人对高炉中热交换问题的重视，影响了大量的科研人员对高炉中的热交换过程进行研究。

在苏联，高炉过程理论日臻完善的工作是这样地引人入胜，参加的不仅是高炉工作者，还有许多相近专业的代表人物也都参与了这一工作。

高炉热交换研究工作的进展，有力地促进了炼铁技术的进一步提高。例如，用质量较差的非高炉燃料可在低炉身高炉中熔炼出生铁。

在煤气发生炉上研究热交换的结果，使气化方面取得了显著的实际效果。在褐煤气化时大量降低料层的高度，加倍提高了煤气发生炉的生产能力，并改善了煤气的组成。

但是，对于竖炉中许多反应过程仍未曾进行过研究。希望本书能有助于这一必需继续进行的研究工作。

目 录

作者的話

序 言

第一章 料层中的热交换	1
1. 对料层中气体动力学方面的几点意見	1
层内压头損失的計算例題	6
2. 逆流中导热性无穷大的料块的加热	8
3. 逆流中实际料块的加热 (近似解題法)	16
4. 水力积分器——加热过程的研究工具	22
求解模型的参数及其准数的例題	25
近似法的誤差值及其应用范围	30
5. 逆流中实际料块的加热 (准确解題法)	31
6. 順流中料块的加热	37
7. 固定料层中无限导热的料块的加热	44
8. 固定料层中实际料块的加热 (近似解題法)	49
9. 固定料层中实际料块的加热 (准确解題法)	51
10. 料层内热交换时发热量的計算	53
第二章 在实验室条件下确定块料层傳热系数的研究	56
1. 付尔納斯的研究	56
2. 桑德尔斯和福尔德的研究	67
3. O. A. 邱汉諾娃和 E. A. 沙帕金娜的研究	78
4. M. A. 沙坡瓦洛夫的研究	80
5. B. Ф. 邱汉諾夫等人的研究	80
6. P. C. 貝勒斯坦因、И. И. 帕列也夫和 И. М. 費多洛夫的研究	82
7. B. H. 季瑪菲也夫的研究	85
8. 关于实验工作的結論	88
按照加热固定料层内实际料块的新的解題法对付尔納	
斯的实验数据的修正	89
总結公式	93
第三章 化学过程在逆流中的发展	98

1.	扩散阻力或煤气外部供给阻力	98
2.	关于高炉内的气相成份	101
3.	在逆流条件下还原过程的特点	107
4.	沿高炉高度二氧化碳的富集过程	112
第四章	煤气发生炉的热工	114
1.	关于煤气发生炉的空载高度	114
2.	泥煤煤气发生炉	117
3.	燃料层高度与泥煤的湿度、块料的尺寸以及煤气发生炉 生产率的关系	118
第五章	高炉热工	127
1.	高炉热交换观点的发展	127
	A. C. 沙尔基先茨的研究	128
	M. A. 巴甫洛夫院士的研究	130
	Г. 里-沙捷林和 E. H. 基普希良的研究	132
	A. H. 保赫維斯涅夫和 M. A. 沙坡瓦洛夫的研究	133
	Б. И. 基太也夫的研究	135
	泰勒的研究	141
	結論	143
2.	高炉内热交换的研究	144
	高炉操作	144
	研究方法和结果	149
	高炉热交换的全图	154
	上部热交换区的工作	163
	空载段	165
	编制区域热平衡的简化方法	167
	炉腹和炉缸区域热交换的特点	168
	下部热交换区个别部分的热交换过程	172
	高炉富氧鼓风时的热交换	173
3.	加热鼓风对节省焦炭的效果	176
4.	石灰石沿高炉高度的分解过程	179
5.	关于高炉合适高度的讨论	181
6.	铁水和炉渣温度	185

第六章 計算举例及参考資料	188
附录 I、計算逆流中热交換的公式和表	193
附录 II、計算逆流中热交換的輔助图表	226
附录 III、在傳热系數不变的条件下，計算球形物料加热 或冷却的公式和图表	238
附录 IV、計算固定料层中热交換的表和公式	245
附录 V、在固定温度的介质中計算球体加热或冷却的 图表	252
参考文献	258
使用的符号	262
补充材料：高炉热交換理論的現狀 (B.И.基太也夫等在 1962年卢森堡国际炼铁會議上的报告)	265

第一章 料层中的热交换

1. 对料层中气体动力学方面的几点意见

由不同形状的填料堆成的料层具有的显著特点，是在被气流强烈冲刷的料块之间形成凸凹不平，具有各种奇特外形的沟槽。

图 1 是将焦炭料堆灌上石蜡后的纵剖面照片。

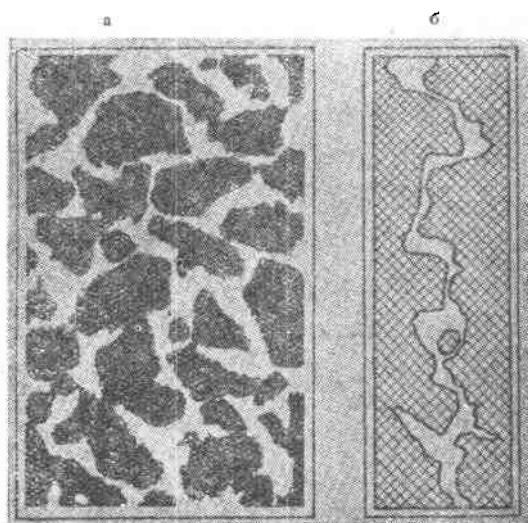


图 1 灌上石蜡的焦炭料层纵剖面照片
a—料层剖面图；b—料层里一条沟槽的轮廓图

沟槽的基本特征是轮流交替扩展和急剧收缩。

由于这些沟槽的高低不平，就很难计算出块料料层的雷诺准数及求出沟槽的直径。这样就很难用通常在管道中的气体动力学求得的准数来判断料层中的气体动力学。因此，我们将保持用以米表示的平均料块的直径，及在已知温度和压力下竖炉自由断面上的气体速度的最简单方法，来计算雷诺准数。

我們认为，被采用的 $Re_{кры}$ 值是按最客观的数值計算的。

在著名的尼古拉茲—ЦАГИ (中央流体力学研究所) 曲綫图上 (图 2) [2]，把与实际情况相适合的料层阻力的对应数据作了很好的比較。

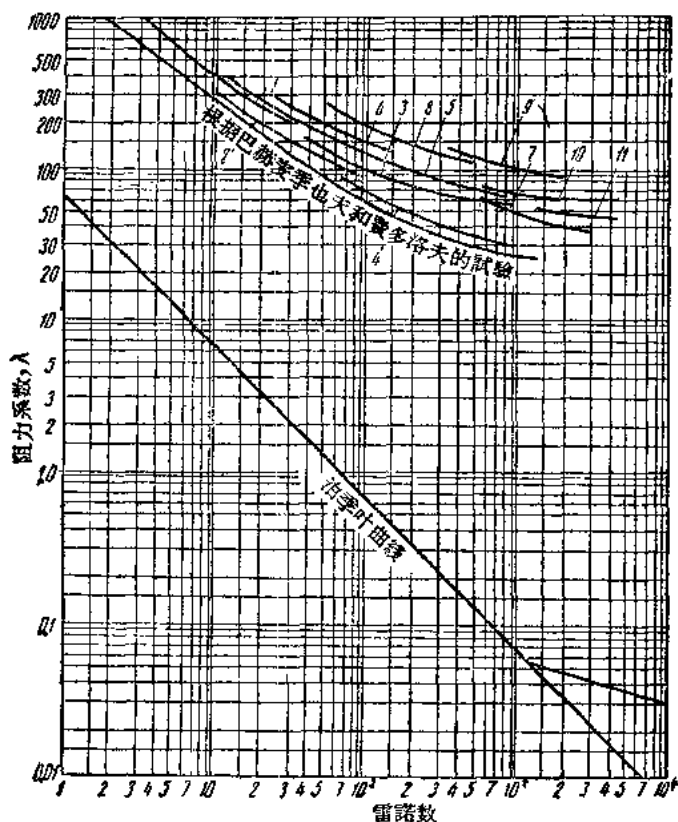


图 2 具有料层試驗結果的尼古拉茲—ЦАГИ曲綫图

1—无烟煤 $d_{cp}=1.5$ 毫米；2—无烟煤 $d_{cp}=2.5$ 毫米；3—无烟煤 $d_{cp}=10$ 毫米；4—頁岩 $d_{cp}=9.5$ 毫米；5—鉄矿石；6—肥煤 $d_{cp}=15$ 毫米；7—由迴轉窑中得出的燒結矿；8—車里亞賓斯克煤；9—石灰质的鱗状褐鉄矿；10—由帶式燒結机上生产的燒結矿；11—焦炭

这些曲綫在图上所处的位置，远远高于为我們所熟悉的对管

內气体运动的研究所得出的那些数据和曲綫。

應該了解到料层过程的規律性不与泊季叶曲綫重合，而是如图 2 所示向右偏了一些，这是由于人为的計算雷諾准数的緣故。

研究这张插图上的实验数据，可得出料块层的气体动力学的一系列特点。

1. 因为料层內有很多形成涡流的因素，致使在很小的雷諾数时就产生从层流向涡流区的过渡。当 $Re_{kvc} = 100$ 时，可見到明显的涡流区。当雷諾准数再继续增大时，曲綫很快进入自模区。在料层里不存在着通常我們在很粗糙的管道里所觉察到的，随着雷諾数 Re 的增大而增加 λ 的这段过渡区 [3]。

2. 由于存在突然收縮的沟縫，在料层內可見到很大的局部气体速度。因而在料层內阻力的绝对值是很大的，其摩擦阻力系数成百倍地超过在很粗糙的管道內相对应的数值。

3. 在料层內的涡流和自模区里，涡流特性显得特别强烈，以致造成相对來說較早地进入自模区。在这一区里，摩擦阻力系数为常数，压头損失服从平方規律，而气体速度在很大的程度上影响传热系数。

雷諾准数的幂数极接近于 1。这不应引起任何誤解，因为最近在管道內作涡流程度很高的热交换試驗研究中显示出了同样的情况。

应明确这一点，即图 2 显示出的普遍規律，只是近似地反映出工业炉里的料层气体动力学。在炉料中有碎粒及悬殊的块度范围，甚至出現液相，这些使問題更为复杂。本书后面叙述的是只对具有上述特性的所謂致密料层而言。

加大鼓风的速度，减小料块粒度会使致密料层的稳定性遭到破坏，而过渡到悬浮状态——沸騰料层。当继续加大鼓风速度或减小料块粒度时，則部分或全层进入蒸发状态。

显然，沸騰和悬浮的料层实际上是有利于細小炉料的一种状态。

沸騰层的气化已被工业生产所掌握。而沸騰层的許多其他过

程則尚在研究中。

順便談一談破壞致密料層穩定性和致密料層逐漸過渡向沸騰狀態的條件。

根據 C.M. 卡剛^[2] (及 H.M. 費多洛夫^[4]) 的數據, 這些條件是以下述的方法決定的。

料層表面的料塊是處於垂直向上的氣體流股的作用之下的。在脫離的瞬間, 料塊在 dt 時間內位移了 dh 。這時上升力距所需的力為重力和慣性力之和。

$$Q = G + m \frac{d^2h}{dt^2} \quad (1)$$

式中 G —— 料塊重量;

m —— 料塊質量。

另一方面, 與氣體介質的速度壓頭及底面積成正比的浮力可用公式表示為

$$Q = C_x \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot S \quad (2)$$

式中 C_x —— 按圖 3 求出的正面阻力的無量綱係數;

ρ —— 氣體密度, 公斤·秒²/米⁴;

v —— 相對料塊的氣體流股運動速度, 米/秒;

S —— 料塊的最大截面積 (與氣體流股相垂直的料塊最大截面), 米²。

若將任意形狀的料塊當作相等料塊質量的直徑 d 的球一樣, 則上升力距中料塊所具有的加速度可從微分方程得出

$$\frac{d^2h}{dt^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{C_x}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{r_g}{r_m} - g \left(1 - \frac{r_g}{r_m} \right) \quad (3)$$

式中 r_g 及 r_m —— 分別為氣體及料塊的比重。

轉化方程式 (3), 導入相似準數

$$\frac{d^2h}{dt^2} = \frac{3}{4} g \left(1 - \frac{r_g}{r_m} \right) \left(\frac{C_x}{d \cdot g} \cdot \frac{r_g \cdot v^2}{r_m - r_g} - \frac{4}{3} \right) \quad (4)$$

很易令人確信式 (4) 第二個括弧內的第一項是無量綱數,

按相似理論可將它作為準數提出

$$C_{r,r} \cdot \frac{v^3}{d \cdot g} \cdot \frac{r_c}{r_d - r_r} = Y \quad (5)$$

分析方程式 (4) 可得出這樣的結論，即在由料層表面脫離的臨界時刻球狀料塊的準數值為

$$Y_{kp} = \frac{4}{3}$$

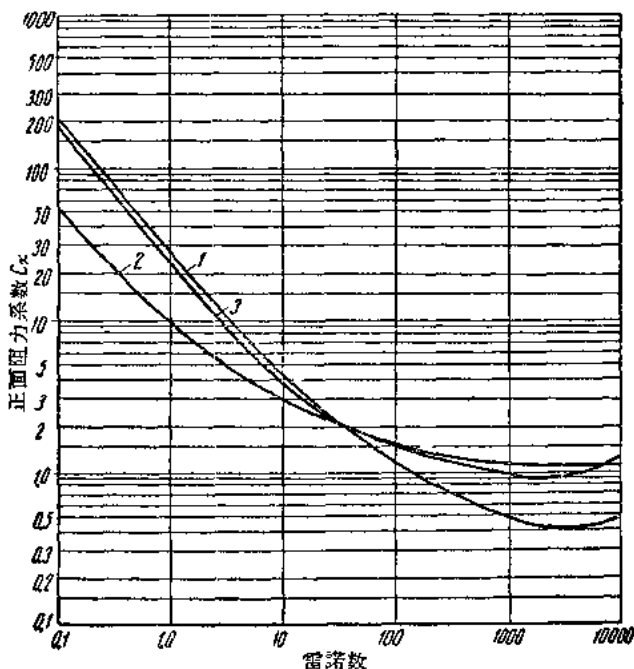


图 3 不同形状料块的正面阻力系数与雷诺数的关系
(根据盖钦根格斯基的实验数据): 1. 球; 2. 圆柱体;
3. 圆片

对散状料块的一連串試驗数据加工的结果，得出

$$Y_{kp} = 0.042$$

阻力系数是像对球状体一样取自盖钦根格斯基的曲线，而速度则由鼓风消耗量求出。

这样既反映了料层的特性，也迴避了料块的球状外形问题。經驗得出的吹起准数 Y 大約只為球状料块的三十分之一。

解方程式 (5) 可得相对速度

$$v_{\text{KP}} = \sqrt{\frac{Yd}{C_r} \cdot g \left(\frac{r_m}{r_r} - 1 \right)} \quad (6)$$

再将 Y 的数值代入上式，最后得

$$v_{\text{KP}} = \sqrt{0.042 \cdot \frac{d}{C_r} \cdot g \left(\frac{r_m}{r_r} - 1 \right)} \text{ 米/秒} \quad (7)$$

假如取微分方程式 (3) 的条件，則未知数 C_r 可如 Re 准数的函数一样从图表上求得 (图 3)。借助于式 (7) 求得的速度应相对于料层的有效截面。除此以外，在計算时料块的直径应取所采用料块的最小者。

层内压头損失的計算例題

求在 1 米厚的鎂砂焙烧炉中的压头損失，若废气經竖炉自由截面料层的速度在溫度 0°C 时， $w_0 = 0.3$ 米/秒；气体平均溫度 800°C ；气体比重 $\gamma_0 = 1.32$ 公斤/标米³；料块的平均直径 $d_{\text{CP}} = 50$ 毫米。

按公式

$$h_{\text{DOI}} = \lambda \frac{H}{d} \cdot \frac{w_0^2}{2g} \cdot \gamma_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right)$$

进行計算， λ ——阻力系数，可按图 2 求得。

求准数 Re_{KVC} ：

$$Re_{\text{KVC}} = \frac{w_t d_{\text{CP}}}{\nu_t}$$

废气的动力粘度值 (当溫度 800°C 时) 可按图表 (图 4 中曲线 4) 求得

$$\nu_t = 128.5 \cdot 10^{-6} \text{ 米}^2/\text{秒}$$

当溫度为 800°C 时的气体速度

$$w_t = w_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right) = 0.3 \left(1 + \frac{800}{273} \right) = 1.18 \text{ 米/秒}$$

$$d_{op} = 0.05 \text{ 米}$$

$$Re_{kvc} = \frac{1.18 \cdot 0.05}{128.5 \cdot 10^{-6}} = 460$$

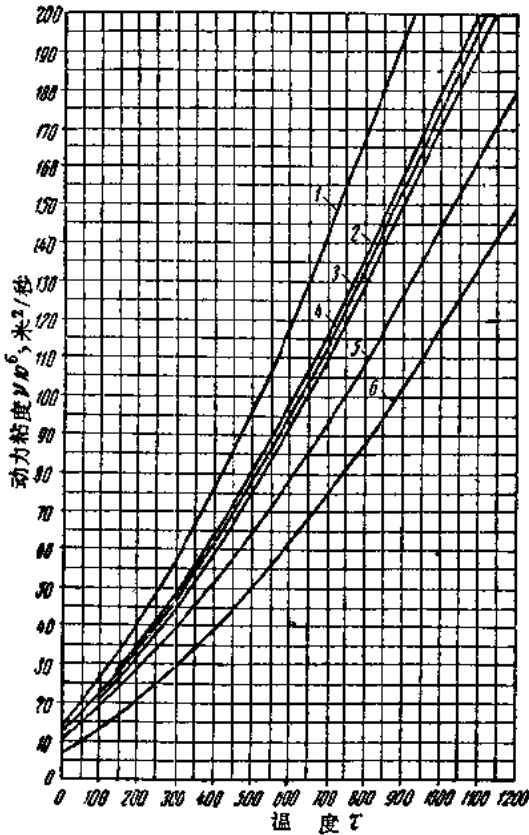


图 4 气体动力粘度随温度的变化

- 1—甲烷；2—一氧化碳；3—空气；4—燃烧生成物；5—焦炉煤气；
6—二氧化碳气体

利用图 2 按 Re_{kvc} 值求得矿石块的 $\lambda = 70$ 。将所得的数值代入计算式中，得