

В. Ф. 柯培托夫 著

炉内钢料加热

冶金工业出版社

爐 內 鋼 料 加 熱

В.Ф.柯培托夫 著

何 水 譯

冶金工業出版社

本書分析了火焰爐內的傳熱與鋼的快速加熱問題。
對於燃料的利用、燃料的節約、煤氣燃燒理論、燒嘴和
煤氣燃燒的調整、鋼加熱時的氧化與脫碳、不氧化加熱
的理論與實踐等也作了詳細的討論。

本書供冶金工廠與機械製造廠的技術人員使用。

В. Ф. Конытов
НАГРЕВ СТАЛИ В ПЕЧАХ
Металлургиздат(Москва-1955)
爐內鋼料加熱

何水 譯

· 編輯：陳略 設計：芝芳 趙苓 責任校對：楊維寧

1958年9月第一版 1958年9月北京第一次印刷5,000冊

850×1168·1/32·200,000字·印張 $8\frac{4}{32}$ ·定價1.40元

冶金工業出版社印刷廠印 新華書店發行 書號0838

冶金工業出版社出版(地址：北京市燈市口甲45號)

北京市書刊出版業營業許可証出字第093號

目 录

序言	4
一、爐內傳热和鋼的加热速度	6
1. 爐內热交换	7
2. 爐頂高度的影响	14
3. 火焰光亮和不光亮时的傳热	19
4. 鋼坯的加热同它在爐底上的位置的关系	24
5. 金屬加热与其表面状态的关系	26
6. 鋼氧化时的放热对加热速度的影响	24
7. 鋼在具有不同淬火冷却速度的浴爐內和在 一般爐內加热速度的比較	37
8. 鋼內的热应力	42
9. 鋼加热的計算	45
10. 鋼的加热時間	50
11. 火焰爐內鋼的快速加热	62
二、燃料及其在爐內的利用	79
12. 爐內燃料的利用	84
13. 爐內燃料的消耗	92
14. 煤气的燃燒	113
15. 煤气空气混合物的燃燒	122
16. 爐用煤气和重油的燃燒裝置	133
17. 爐內气氛的控制	148
三、爐內鋼的氧化和不氧化加热	158
18. 鋼的氧化	159
19. 火焰爐內鋼的脫碳	183
20. 鋼在馬弗爐和电爐內的不氧化加热	198
21. 制取保护气体和不氧化加热鋼料的理論与計算	210
22. 在保护气体中加热的若干实际数据	243
参考文献	257

序 言

火焰爐內加熱鋼料時發生着各種物理和化學過程，這些過程就是爐子向鋼料的傳熱和鋼料內部的導熱、爐內氣氛的形成及鋼料同周圍氣體間的化學反應。火焰爐內鋼料周圍所形成的氣氛，是加熱鋼料時所發生的燃料燃燒過程的產物，燃燒過程是化學動力學和氣體力學上的一種複雜過程。

由於鋼料加熱時所發生現象的多样性，本書研究的內容就需劃分為三個互相聯系的題目：1) 爐內傳熱和鋼料加熱速度；2) 燃料燃燒和爐內氣氛的形成；3) 加熱時，鋼料表面的氧化與脫碳以及不氧化加熱的實現。

鋼料在爐內加熱，速度越快越好，這是因為快速加熱可以提高爐子的生產率，因而就能減少爐子的數目或縮小爐子的尺寸，並節約維護費用。鋼料快速加熱時爐子生產率的提高，還可以降低每一加熱件的燃料消耗量和鋼料燒損率。

鋼料進行各種熱加工工序（軋制、鍛造、熱處理）時，它的質量同鋼的加熱情況關係很大。

從鋼錠到成品的加工過程中，要進行好幾次爐內加熱（在軋鋼加熱爐、鍛造加熱爐、熱處理爐內加熱）。爐子的供熱，需消耗許多高級工業燃料。例如，構造很好的軋鋼連續式加熱爐，加熱鋼料時的燃料消耗量為 400~600 仟卡/公斤，鍛造爐的燃料消耗量為 600~900 仟卡/公斤，熱處理爐根據熱處理種類的不同，燃料消耗量在 300 仟卡/公斤以上。

爐內加熱時，由於氧化要損耗大量的鋼。軋鋼與鍛造加熱爐內鋼的燒損率，占鋼料總重的 1~2%，這一般認為是正常的，而現時工廠所使用的許多爐子，燒損率還超過這一數值。由於鋼要通過好幾座爐子，進行若干次加熱，因此各熱加工車間的軋鋼、鍛造加熱爐和熱處理爐的鋼燒損率總計大約占全部產量的 5%。這種損耗數值並不小于使用成品時的腐蝕損耗。

在苏联鋼的生产达到现代高度水平和机械制造业有很大发展的情况下，鋼的加热費用（包括鋼产生氧化鉄皮的損失价值）总计起来是一个相当大的数字。因此研究和改进加热过程，不仅有科学上的意义，而且有很大的国民經济意义。

本書所研究的鋼料加热問題，主要是屬於机器 制造厂方面的。

本書不是教学入門書，因此不强求全面叙述所有涉及到的問題；書中对所研究的現象作了一般的評論。本書主要是取材于作者本人的一些研究材料。

一、爐內傳熱和鋼的加熱速度

1933年在莫斯科召開了優質鋼工作者代表大會。會上詳細討論了鋼的加熱問題，並特別推薦了鎳鉻不銹鋼坯（X18H9）每一公分厚度約透熱 40 分鐘的加熱速度標準〔1〕。而在現代的不銹鋼坯快速加熱爐內，加熱速度為每一公分厚度只需 1 分鐘，即加快了 40 倍。這樣的快速加熱除了能提高爐子生產率以外，還可能使鋼料在火焰爐內加熱時幾乎不生成氧化鐵皮。

這個例子說明了鋼加熱工藝方面的巨大進步和我們所研究的問題的重大實際意義。這些成就在很大程度上是由于在鋼加熱方面進行了許多研究工作而取得的，這些研究工作証明了舊時認為金屬必須緩慢加熱的假設無論在理論和實踐上都是沒有根據的。

我們應當指出許多研究家所完成的工作：首次在科學基礎上對鋼加熱進行實驗研究的 H.H. 多布羅賈托夫〔2〕和 H.A. 敏克維奇〔3〕；指出爐內加熱鋼料時輻射傳熱底巨大意義的 Б.Б. 斯塔爾克〔4〕；研究加熱件內不穩定熱流的 Г.П. 依凡佐夫〔5〕、Д.В. 布德林〔6〕和 И.П. 謝米金〔7〕；研究金屬內部熱應力計算的 H.Ю. 塔依茨〔8〕；研究巨型鋼錠鍛前加熱的 А.А. 斯克沃尔佐夫和 И.И. 日木羅夫〔9〕；研究鋼錠軋制前加熱的 И.М. 哈巴羅夫〔10〕；研究鋼坯和小型鋼錠加熱的 В.Н. 索科羅夫〔11〕、В.В. 克列克什〔12〕和 Е.А. 克勞斯金格〔13〕等等。

鋼料快速加熱的研究，被廣泛應用於工業上。許多工廠在修改鋼料加熱速度標準或提高爐子的供熱能力後，提高了爐子生產率並降低了鋼料燒損率和單位燃料消耗量。在鋼料快速加熱規範的推行方面，除爐子操作人員外，爐子設計人員也有很大的功績。

然而，加速和改善鋼料加熱的可能性並未完全得到利用。現時，隨著加熱設備的機械化和自動化、新型構造爐子的出現以及

我們燃料利用和金屬氧化方面知識的發展，加熱操作還是可以改善的。

1. 爐內熱交換

金屬加熱速度，決定於加熱爐的構造和供熱能力、爐子對鋼料的外部傳熱條件以及被熱鋼料的物理性質和鋼料內部的導熱條件。

加熱爐的燃料，系在爐膛內燃燒。噴咀或燒咀內噴出的空氣和燃料在燃燒時形成火焰，火焰的溫度隨長度和橫截面而不同。焰氣不能充滿整個爐膛，且因本身儲有一定的動能，便將爐膛內的燃燒生成物吸到自己的周圍。火焰的橫截面尺寸，隨着離燒咀的距離而增大，這是因為它吸附有氣體和燃料燃燒反應的結果。熱處理爐的燃料系在單獨的燃燒室內燃燒，這種燃燒室通常位於爐底的下方。熱處理爐爐膛內充滿着燃料結束燃燒後的反應產物。

在工業爐內，爐氣向被熱物体和爐壁的傳熱，是以對流和輻射的方式進行的。在高溫的情況下，大部分熱量以輻射方式傳給鋼料，而在低溫（例如，溫度低於 700° ）的情況下，熱量主要以對流方式來傳播。氣體流速越大，一定表面上的對流傳熱速度就越大。向鋼料傳熱的，除爐氣外還有通常受熱不均勻的爐壁和爐頂。而周期操作的室式爐（例如加熱巨型鋼錠用的），它的溫度還隨時間而變化着，因此，爐內的傳熱條件是非常複雜的。可是在對流傳熱的研究方面雖然已加強，但是我們在輻射傳熱，特別是光亮火焰輻射傳熱方面的知識還是很有局限的。

我們來簡要的研究一下加熱爐的熱交換條件。

兩個物体間的熱交換。在爐內進行着爐壁同被熱鋼料間的熱交換。熱輻射同光輻射的區別，是波長長些，但它也是以光速來傳播的。

按斯蒂芬—波爾茨曼定律，黑體的總輻射能與其絕對溫度 T 的四次方成正比：

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ 仟卡/公尺}^2 \cdot \text{时}。 \quad (1)$$

黑体的辐射系数为:

$$c_0 = 4.96 \text{ 仟卡/公尺}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{度}^4。$$

大多数固体可以看作是灰体。设灰体每种波长的辐射能同黑体的辐射能间保持一定的比值。严格说来, 这只是近似的。例如, 耐火粘土磚在光谱的短波区域就比长波的红外线区域辐射得多些。虽然在大多数情况下, 对一般辐射现象有着足够的知识, 但在炉内高温的情况下, 辐射光谱还研究得很少。

对于灰体也可采用斯蒂芬—波尔茨曼定律, 此时方程式中黑体辐射系数 c_0 要改为灰体辐射系数 c 。

根据克希荷夫定律, 每一物体在一定的温度下, 其辐射能等于吸收能。

物体在一定温度下的辐射能 E 对于黑体辐射能 E_0 的比值, 称为该物体的黑度:

$$\epsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0}。 \quad (2)$$

物体的黑度恒小于 1, 它是无名数。磚砌体和金属的辐射光谱是连续的; 它们都是灰体。磚砌体的黑度通常介于 0.7~0.9 之间, 而有氧化铁皮的钢的黑度介于 0.8~0.9 之间。

两物体进行热交换时, 不仅高温 (T_1) 物体向低温物体辐射, 低温 (T_2) 物体也向高温物体辐射。斯蒂芬—波尔茨曼方程式此时具有如下的形式:

$$Q_{1,2} = \epsilon_{1,2} \cdot c_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ 仟卡/时}, \quad (3)$$

当一物体处于另一物体之内和封闭系统传热 (炉内加热钢料就是这种情况) 时, 黑度的形式应为:

$$\epsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}, \quad (4)$$

此时，兩物体表面积的比 $\frac{F_1}{F_2} \leq 1$ 。

如果將輻射傳热方程式改成帶傳热系数的方程形式，如

$$Q_{1,2} = \alpha F_1 (T_1 - T_2) = \epsilon_{1,2} c_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

則应指出，这一傳热系数与下列值成正比：

$$\frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{T_1 - T_2} \quad (6)$$

同时随着絕對溫度 T_1 的升高而迅速增大。

气体輻射 爐內除固体表面（爐壁和爐料）外，燃燒生成物中所含的三原子气体（二氧化碳和水蒸汽）也輻射热量，若爐气中含有碳氢化合物时，則它也能进行輻射。双原子气体不能輻射热量。

气体的輻射有一定的选择光譜，即是說，它的輻射局限于一定的光譜範圍內。

当热綫通过爐气層时，其一部份輻射能被爐气吸收；同时在溫度为一定的情形下，爐气中含二氧化碳和水蒸汽的濃度越大和氣層越厚，則輻射能的吸收量越大。

若热綫以最初强度 $I_{\text{на в}}$ 通經吸热的气体介質，則在通过 S 長的路程后，射綫强度便減低了，並將等于

$$I = I_{\text{на в}} e^{-kps}, \quad (7)$$

式中 k ——射綫減弱系数；

p ——气体混合物中吸热气体的分压力。

吸热量决定于热綫所經路程上吸热气体的分子数，即决定于 $p \cdot s$ 的乘积。

若已知气体射綫減弱的系数和光譜上吸收帶的寬度，則利用黑体的光譜能量分布法則（普蘭克定律），可以計算气層的黑度。

現时用試驗方法研究了三原子气体的吸收能力。由于气体在一定溫度下吸收和放射的热能是相等的，故一般爐子和傳热方面的手册和主要指南 [14, 15] 均刊載有二氧化碳和水蒸汽輻射能

力对于气層厚度与气体濃度兩者乘积和溫度的关系图表。

由表 1 和表 2 可看出，爐内气層的黑度随三原子气体分压力与气層厚度的乘积及气体溫度而变化，此黑度随爐子尺寸的縮小而減小。

表 1

二氧化碳气層的黑度， $\epsilon_r(\text{CO}_2)$ ，%

$p \cdot s$ 绝对大气压 公尺	在下列溫度 (°C) 下						
	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
0.004	3.42	3.09	2.68	2.24	1.82	1.45	1.15
0.01	5.25	4.82	4.26	3.63	3.01	2.45	1.97
0.02	6.89	6.38	5.72	4.96	4.18	3.45	2.81
0.04	8.73	8.17	7.42	6.53	5.58	4.67	3.85
0.1	11.6	10.9	10.1	9.01	7.85	6.69	5.61
0.2	14.1	13.4	12.5	11.3	9.93	8.57	7.26
0.4	17.0	16.3	15.2	13.9	12.4	10.9	9.27

表 2

水蒸汽層的黑度， $\epsilon_r(\text{H}_2\text{O})$ ，%

$p \cdot s$ 绝对大气压 公尺	在下列溫度 (°C) 下						
	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
0.004	1.05	0.84	0.67	0.55	0.45	0.38	0.32
0.01	2.49	2.00	1.62	1.34	1.11	0.94	0.80
0.02	4.61	3.75	3.07	2.55	2.14	1.82	1.56
0.04	8.13	6.70	5.55	4.67	3.96	3.39	2.93
0.1	15.7	13.3	11.3	9.62	8.29	7.21	6.32
0.2	24.4	21.0	18.2	15.8	13.9	12.3	10.9
0.4	36.2	32.1	28.6	25.6	23.0	20.8	18.9

气層厚度增大时， CO_2 的輻射增加得較小；溫度升高时，它的輻射数值倒增大得多些。 H_2O 的輻射則表现为相反的现象，它的輻射却是随着气層厚度的增大而迅速增加。

含碳化合物和氢較多的燃料，其燃燒生成物含 H_2O 很多，含 CO_2 很少，而含氢很少的燃料，如無煙煤或高爐煤气，其燃燒生成物含 H_2O 很少；这样，它們輻射傳热也相应地不同了。

为了说明这些情况，援引了高爐煤气和焦爐煤气燃燒生成物在不同的气層厚度和溫度情况下的輻射数据（表 3）。

表 3

高爐煤气和焦爐煤气燃燒生成物中 CO_2 和 H_2O 輻射的比較

溫 度 °C	气層厚度 公尺	何種煤气的燃燒生成物	輻射，仟卡/公尺 ² ·时		
			CO_2	H_2O	共 計
900	0.05	高爐煤气.....	4600	280	4840
900	0.05	焦爐煤气.....	2550	1900	4360
900	0.5	高爐煤气.....	10300	2800	12600
900	0.5	焦爐煤气.....	7200	12700	19100
1400	0.05	高爐煤气.....	12400	770	13050
1400	0.05	焦爐煤气.....	6600	5000	11400
1400	0.5	高爐煤气.....	31500	7400	37200
1400	0.5	焦爐煤气.....	20400	37000	54500

若气体混合物內含有两种能吸热的气体，則混合气的吸热量較該两种气体单独吸热量的总和要小一点。

表 3 中 CO_2 和 H_2O 的混合气的总輻射要略小于該两种气体单独輻射量的和，这是由于它們相互吸热的結果，然而热輻射的減少不大。

表 1 和表 2 的气層厚度是指半球体底面中点的輻射射程。对于它种形狀的物体，則应采取該种物体所相当的半球体的輻射。有效气層厚度按类似水力直徑的方法計算。为了計算气層厚度，可利用下述公式：

$$s_{\text{eff}} = 0.9 \frac{4V}{F}, \quad (8)$$

式中 V ——自由容积；

F ——包围气体的固体表面积。

当气体同爐壁进行热交换时，气体輻射的热量不是全部被爐壁所吸收，有一部份热量被反射出来。这种現象在爐壁向气体輻射时也同樣發生，而且气体对热的輻射和吸收是選擇性的，而爐壁則具有連續的輻射光譜。由于一部份热綫被反射，总的輻射是

增大了。若厚度为 s 的气層向黑度为 ϵ_c 的爐壁輻射，則气体的輻射同爐壁吸收热量和反射热量之間的比如下式：

$$\epsilon_r : \epsilon_r \cdot \epsilon_c : \epsilon_r (1 - \epsilon_c) \quad (9)$$

在計算中可以假設，由于爐壁反射热量，气体輻射所增加的数值，等于一种附加气層的輻射，此附加气層的厚度按下述方程来确定：

$$s' = \frac{\epsilon_r (1 - \epsilon_c)}{\epsilon_r} \cdot s = (1 - \epsilon_c) s \quad (10)$$

这一方程只考虑了射綫的第一次反射，即对傳热影响最大的一次反射。

Г.Л. 波略克为了計算气体在 T_r 溫度下輻射傳給完全包围气体的溫度为 T_c 的爐壁的热量，求得了下述考虑到热綫多次反射的公式 [15]：

$$q = \frac{c_0}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1}{\epsilon_{r,c}}} \left[\frac{\epsilon_r}{\epsilon_{r,c}} \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \text{ 仟卡/公尺}^2 \cdot \text{时} \quad (11)$$

式中 ϵ_r ——气体在气体本身溫度下的黑度；

$\epsilon_{r,c}$ ——气体在周圍爐壁溫度下的黑度。

爐壁同鋼料的热交换 火焰爐爐壁和鋼料之間隔有非透热性的气体。爐壁向鋼料，或鋼料向爐壁輻射热量中的一部份，被爐气所吸收。在此情形下，就产生了复杂的法則，这种法則的研究在文献中有各种各样的 [15, 16, 17, 18]。

加热爐內火焰不光亮时，由于气層黑度很小，气体直接輻射給鋼料的热量較爐壁輻射的少些。气体輻射的热量先是大部被爐壁所吸收（因爐壁的表面积大于爐料），然后由爐壁輻射給鋼料。

在相同的溫度下，即令是無限厚的气層，它的輻射也要小于高黑度壁面的輻射，这是因为气体輻射光譜是不連續的緣故。

爐壁的連續輻射光譜有助于增加爐壁向爐料的傳热，因为爐壁輻射出的一部份热波不被燃料燃燒生成物所含三原子气体所吸收。

二次輻射表面（爐壁、陶制嵌入物）在增加輻射方面的作用，隨着火焰亮度的升高而減小。若為不透熱的光亮火焰，爐壁便不向鋼料輻射熱量。

有一部份熱量是以對流方式傳給鋼料的。對流傳熱在火焰向鋼料傳熱中所占的比重，隨着火焰溫度的升高而降低，例如在鍛造爐內，即令火焰是不光亮的，氣體借對流作用傳給鋼料的熱量也要比輻射傳給的熱量小若干倍。若流速很大或在狹小通道里傳熱，例如快速加熱爐內的傳熱時，則高溫下向鋼料的對流傳熱也具有很大的意義。然而，在普通的爐子內，也應盡量使爐氣很好地圍繞鋼料流動。當爐氣不能很好地圍繞鋼料流動時，氣層中便可能形成很大的溫度梯度。在此情形下，罩在鋼料表面上的是溫度較低的气層，這一气層將吸收向鋼料輻射的熱量的一部份，使加熱條件變壞。

由於爐壁表面積很大，它由對流作用受到了大量的熱，因此，即令是在高溫加熱爐內，將對流傳熱完全忽略不計也是不應該的。

火焰中能輻射熱的，有水蒸汽、二氧化碳、炭黑和灰粒。

在發生化學反應的時刻，放出一種所謂的反應輻射能（Хемиллюминесценция）。這種輻射的特征是波長很短，多半短于光譜中可見部份的波長，它在輻射熱的數量上不遵循普朗克定律，它可能大于黑體光譜的相應部份，這一點大致示于圖1。由於反應輻射能的波長很短，結果含二氧化碳和水蒸汽的爐氣對它來說便是非透熱性的。當火焰同鋼料直接接觸時，由於反應輻射熱的關係，火焰向鋼料的傳熱便有一些增加。

當爐氣（燃料完全燃燒生成物）的成份和爐膛溫度為已知時，不光亮火焰的傳熱在某些情形下是可能計算的。

對於往鋼料傳熱的情況，有一些簡化計算的方法和公式〔19, 20〕，這些方法和公式都是基于這樣的前提：火焰充滿整個爐膛，或者，火焰充滿橫截面與爐膛相似的較爐膛為小的容積。

計算是由这样的前提出發的：爐壁和爐頂溫度相等且各处溫度

度均匀，火焰具有均匀的溫度和一定的透熱度。

在光亮火焰（它决定着多数加熱爐的操作）的情况下，傳热过程就比爐內充滿燃料完全燃燒生成物的傳热过程更为复杂，这是因为它牽涉到燃燒反应上。

爐子設計人員到現在为止还没有充分的根据來計算光亮火焰的輻射傳热。

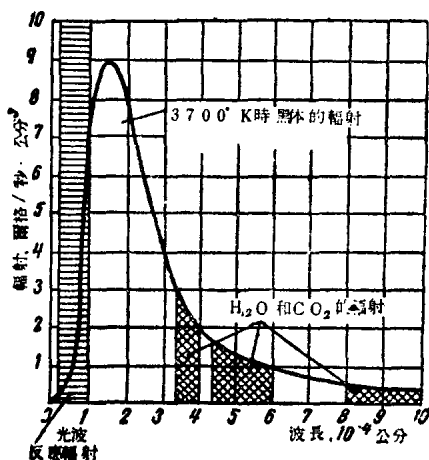


图 1 輻射光譜

在金屬加熱爐的实际設計工作中，爐膛內傳热計算的应用是有限的，这是由于計算中采用了大量的假設条件。

不得不承認，在現代傳热理論的狀況下，对于火焰爐內这样复杂条件下的傳热，还不能进行精确的計算。

在确定爐子的尺寸时，根据經驗或計算数据來計算金屬加熱時間。然后，根据指定的爐子生产率，並在考虑鋼料尺寸和它在爐底上的布置等条件的情况下，計算爐底尺寸，而爐膛高度則按下述实际数据來确定。

2. 爐頂高度的影响

气体輻射的数据是用来計算爐內的輻射傳热，此时与实际相差很远地假設整个爐膛各处气体具有平均的不变溫度，然后确定火焰層的輻射系数，並計算輻射給指定溫度的一定加熱表面的热量。計算的結果，常常导出这样的結論：在光亮火焰的情况下（特别是当气層高度不大时），即当火焰不含炭黑粒子时，傳热

是随着气層厚度的增大而增强。

最近，在文献中有这样一种說法，这就是用增大气流厚度，即增大爐頂高度的方式来增强燃料燃燒生成物輻射傳热的說法。

利用三原子气体輻射表来計算爐子內向鋼料的傳热，只有在已投入生产的爐子上已确定爐內的溫度場或者允許有上述的許多簡化的情况下才可能进行。

在設計爐子以及在操作爐子的时候，通常發生另一个問題：應該選擇怎樣的爐膛尺寸，以求得爐气在該容積內流动时其所含热量能最大限度地用来加热金屬？或者，怎样改善傳热情况，以降低一定生产率的爐內燃料消耗量？也可能發生这样一个問題：如果說，当吸热的金屬表面积为一定时輻射傳热同爐膛的横截面关系不大，那末，可否降低爐頂以縮小爐子尺寸和減少爐子修建費？

为了驗證气流水力直徑对輻射傳热的影響，制造了兩根試驗用的水冷鉄管——圓形管和矩形管(图2)[21]。

管長相同，都等于1500公厘；每管的內表面积为1.2公尺²。矩形管的

横截面积和水力直徑为圓形管的 $\frac{1}{2}$ 。管內燃燒同样数量的城市煤气同空气的混合物，煤气和空气的消耗量用流量孔板来測定，管內的加热依次地进行，因此，煤气和空气消耗量的測量是用一个流量孔板来进行。煤气空气混合气体量測定的精确度为5%。煤气燃燒时所用的空气过剩系数接近于1。

气体傳給管壁的热根据水帶走的热量来确定。燃燒煤气空气混合物的量是这样来选定：使加热水所用的热量变动在25000到60000千卡/时的範圍內。在最大热負荷时，圓形管內假定的气体流速約为0.5公尺/秒，矩形管內的流速則大一倍，即为1公尺/秒。

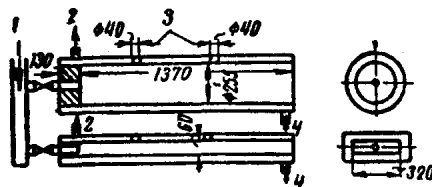


图2 研究傳热用的裝置；煤气在管內燃燒
1—煤气空气混合物；2—水的出口；3—热电偶孔；
4—水的入口

管子末端的溫度按热电偶的讀数为 960° 。管子末端 气体的 实际溫度不低于 1000° ，也就是說，管內燃燒生成物的溫度是十分高的，而气体流速也大約相当于爐內的气体流速。

結果查明：在精確度所允許的範圍內和試驗进行的条件下，輻射傳熱速度同火焰流的水力直徑無關（表 4），这一点在管子热負荷小和热負荷大的試驗中均得到証明。

表 4

管內的傳熱

	試 驗				
	1	2	3	4	5
圓形管內的傳熱，百萬元/時	63.0	60.9	26.1	24.5	24.3
矩形管內的傳熱，百萬元/時	66.0	60.9	27.9	25.9	26.1

。煤气空气混合物除在管內燃燒外，还在單独的燃燒室內进行了燃燒（图 3）；得出的試驗結果大致是相同的。

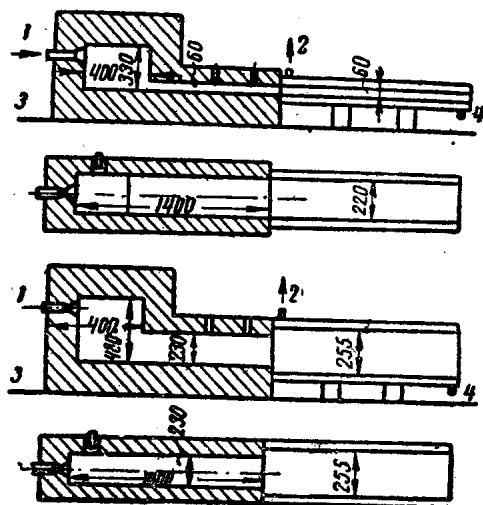


图 3 煤气燃燒室和矩形管圓形管裝置

1—煤气空气混合物；2—水的出口；3—地平面；4—水的入口

随着气体流速的增大，对流傳熱也增强。矩形管內对流傳熱