

〔美〕 E·泰尔穆 著

受火加热炉 燃烧区过热点分析

COMBUSTION FOR
HOT FIRED
SPOT PROCESS
ANALYSIS HEATERS

963



轻工业出版社

TE963

5

3

受火加热炉燃烧 区过热点分析

[美] E. 泰尔穆

(Chevron 研究公司高级工程师)

陆庆邦 译

烃加工出版社

B

476755

内 容 提 要

受火加热炉是工业上常用的重要设备。如何确定加热炉管壁最高表皮温度是工程技术人员所面临的一大问题。本书通过大量的现场实测数据,对燃烧区过热点作了详尽的分析,并提出了一种直接估计燃烧区最高热强度大小和位置的方法。该方法考虑了火咀热负荷、火咀数目、燃烧区长度、燃料种类等众多因素,最后结果以无因次数群表示。采用该方法可校核新建加热炉的设计方案,也可对现有加热炉改变操作条件进行评价。计算方法简便,有实用价值。

本书读者对象为有关的工程技术人员、研究人员和大、中专师生。

Combustion Hot Spot Analysis for Fired Process Heaters

E. Talmor

Copyright ©1982 by Gulf Publishing Company

受火加热炉燃烧区过热点分析

[美] E. 泰尔穆

(Chevron研究公司高级工程师)

陆庆邦译

经加工出版社出版

北京昌平沙河建华印刷厂排版

北京怀柔平义分印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米32开本 5¹/₈印张 123千字 印1—1,880

1987年8月北京第1版 1987年9月北京第1次印刷

书号: 15391·73 定价: 1.25元

绪 言

受火加热炉管壁最高表皮温度是选择管材和确定管壁厚度时必须知道的。炉管内壁最高温度也是判断油料有无可能变质所必需的。在管内油料一侧没有污垢或结焦的情况下,炉管外壁和内壁温度则都是油料温度,内侧膜系数和外侧最高辐射热强度的函数。表皮温度也是炉管材料和厚度的函数。

在大多数受火加热炉工艺指标中,没有列出外侧最高辐射热强度,也没有给出一个测定的方法。通常设计炉子时,把用来确定炉管传热面积的平均辐射热强度乘以一个 ≤ 2 的因子把沿炉管周边热强度的不均匀分布考虑进去。然而炉内沿烧火途径热强度的分布却未被考虑到。

全尺寸加热炉中沿管长热强度分布的测定做得很少^[1],以前所做的测定也是在小型科研炉子中进行的^[2,3]。这种炉子中对流传热占的比重较大,这也反映在所得的数据中;然而在烃加工加热炉的辐射室内对流传热是不占重要地位的。在一个全尺寸炉膛中辐射热强度分布的测定表明,不均匀性因子(最高热强度和平均热强度之比)对烧气为2.5~2.6,对烧油为2.9~3.8,其中包含因炉管周边热强度分布不均匀所致的因子1.8。其它分布因子^[4]看来是因炉膛几何形状和所用燃料种类而变。显然,没有一个适用于所有情况的因子。

预测辐射热强度变化的各种方法,其使用范围和复杂程度有所不同^[5~10]。对于那些流体流动、组成、和热量释放

方式已知的情况(由实验所得或由类似体系先前经验所知),区域法对于非发光^[5, 6]和发光辐射是最精确的。然而由于需要已知条件和大量的计算,区域法在受火加热炉日常设计和标定中的应用看起来还不太现实。

为了简化区域法和减轻计算工作量, Lobo^[10]建议把炉子内传热区段按照一系列充分搅混的方箱来处理,即任一传热区段内平均辐射气体温度为离开该区段烟气的平衡温度,并且辐射热强度在一个区段内为常数,但随区段而变。火焰长度和发光性是必须加以考虑的, Lobo^[10]还建议炉子的第一个传热区段包含整个燃烧区,就是说,在同时产生热量和辐射传热的区域内,整个区段内热量释放均匀,辐射热强度为常数。这个假定与第一个传热区段内燃烧是局限在一个扩展的内核这个事实不符,因而无法预告观测发现的燃烧区过热点^[1]。然而, Lobo的简化对于燃烧区以外的区段还是有优点的。

简化辐射热强度分布计算的其它尝试^[11, 12]表明,火焰长度对于最高辐射热强度的大小和位置是有影响的,但是计算出来的位置总是在燃烧区的末端,而观测到的过热点却是在燃烧区中的其它位置。

实际上,只要有一种方法能预告燃烧区中最高辐射热强度的位置和大小就可以了,设计或标定加热炉时并不需要知道热强度变化的整个情况。有了这种方法,工程师在常规的热气体辐射计算之外,可以校核燃烧区过热点的大小和位置,以保证对燃烧区管材和壁厚的选择是正确的,表皮热电偶的位置也是合适的。

本书给出一种直接估计燃烧区最高热强度大小和位置的方法。该方法考虑到每个火咀的热负荷、火咀的数目、燃烧

区的长度（火焰长度）、火焰辐射率（燃料种类）、火咀和炉管的间距、火咀之间的距离和炉膛／火咀的结构。所得的结果以无因次数群表示，可用于烧油和烧气、单侧和双侧烧火炉管。列出本方法的结果，并由烃加工所用不同的加热炉工况数据加以说明。本方法已成功地用于校核新建加热炉的设计方案，对现有加热炉改变操作条件进行评价，并且对新建和现有加热炉安装燃烧区表皮热电偶位置提出建议。

本书中给出的燃烧区过热点分析认为，过热点主要和火咀与炉管的布置、每个火咀的热负荷、和／或燃料种类有关。其它因素所造成的过热点，譬如炉墙再辐射（角隅效应）、热气体对流和辐射相结合（冲击管效应）、和／或管内局部结垢等都不在本书分析范围之内。

本法不考虑火焰冲击炉管，即火焰和炉管的间距为零的情况，分析中先已知炉膛尺寸，然后计算燃烧区的长度。在燃烧区内假定火焰燃烧正常，位置稳定，就是说火咀至炉管的几何间距便决定了沿燃烧区火焰至炉管的间距。这种考虑方法是现实的，因为要是燃烧正常的火焰会使炉管产生燃烧区过热点的威胁，火焰漂移、跳动或冲击炉管也会对炉管造成过热威胁。火焰冲击炉管本身一般是不予分析的，因为它往往是一些无法预料事件的结果，譬如各个火咀头在底座内未能对齐，或者刮风日子里不平衡倒流对于火焰的影响。通常只是在火咀高热负荷长期运转时，这类火咀／炉膛的缺陷才变得明显。

本书示例中直接火焰辐射（本分析方法）所得的燃烧区最高热强度和表皮温度高于热气体辐射（常规计算）所得的最高热强度和表皮温度，就是说，来自火焰的直接辐射占主导地位。然而来自火焰的直接辐射不总是如此。例外的情况有

炉膛内火咀与炉管间距过大，火咀之间距离过大，燃料气中含氢过高（火焰辐射率过低），油料路程迂回以致出口管（油料温度最高）在燃烧区之外，或者以上情况的综合。遇到这些情况只好求诸热气体辐射的常规计算。这表明常规计算和燃烧区分析两者应该总是互相补充，才能确定炉管表皮温度和膜温度的最高值。

E. 泰尔穆

符 号 说 明

- A —— 离燃烧开始处距离为 ξ 的燃烧区截面积。
 A_0 —— 火咀底座流动截面积。
 A_L —— 分配给每个火咀的炉膛截面积。
 C/H —— 碳氢重量比。
 D_0 —— 炉管外径。
 D_i —— 炉管内径。
 $D_{i,1}$ —— 管内污垢内径。
 F —— 圆筒炉内火焰辐射阻挡因子, 式 (3-1)。
 f —— 烧气时的火焰辐射率 (图2-2), 或烧油火焰的局部辐射率。
 f_0 —— 烧油时火焰最高辐射率 (图2-2)。
 h —— 燃烧区最高热强度那一点上管内油料侧的膜系数。
 K —— 燃烧系数, 立方英尺/每小时百万英热单位, 式 (2-2) 和式 (2-3), 表2-1。
 k_w —— 管壁导热率。
 L —— 燃烧区长度, 式 (2-3)。
 L_0 —— 炉底烧火偏斜火焰冲击垂直辐射墙处离炉底的距离 (图4-16), $L_0 = (R' - R_0') / \tan \alpha$ 。
 LHV —— 式 (2-4) 中燃料气的低发热值, 英热单位/标准立方英尺。
 $MMBH$ —— 10^6 英热单位/小时。

- MW_f ——燃料气的分子量,
- N ——圆筒炉中火咀数目。
- Q ——火咀在离燃烧开始距离为 ξ 处所释放的热量。
- Q_L ——火咀释放的热量 ($\xi=L$)。
- q ——根据外表面积的管壁局部热强度。
- R ——火咀中心和炉管表面之间最小间距。
- R' ——从炉底对着垂直辐射墙偏斜烧火情况下辐射墙至炉管表面之间的距离 (图4-16)。
- R_0' ——从炉底对着垂直辐射墙偏斜烧火情况下火咀中心和炉管表面之间的最小间距 (图4-16)。
- r_b ——圆筒炉内火咀中心圆半径。
- r_f ——炉管内侧污垢阻力。
- r_t ——炉管外半径 $= D_0/2$
- r_{tf} ——圆筒炉内炉管面内接圆的半径。
- S ——火咀均匀布置时火咀中心距离 (图3-2; 表3-1), 或火咀平面上某一火咀中心和炉管面某一点之间, 与 R 相垂直的距离 (图3-13、3-14、4-5、4-7、4-9和4-15)。
- S ——炉管中心间距。
- $t_{b,h}$ ——燃烧区最高热强度那一点上油料温度。
- $t_{w,t}$ ——燃烧区最高热强度那一点上炉管内壁温度, 亦即最高膜温度。
- $t_{w,o}$ ——燃烧区最高热强度那一点上炉管外壁或表皮温度。
- Δt_f ——燃烧区最高热强度那一点上膜温降, 式(2-8)。
- Δt_r ——燃烧区最高热强度那一点上污垢阻力 r_f 所造

成的温降，式(2-14)。

Δt ——燃烧区最高热强度那一点上管壁温降，式(2-7)。

$\tan^{-1}$ ——反正切，弧度。

V ——每个火咀燃烧区离燃烧开始距离为 ξ 处的体积。

V_r ——每个火咀燃烧区的体积($\xi=L$)。

x ——燃烧开始处和炉管面上可看到火焰所有单元的一点之间距离，图1-2。

x' ——燃烧开始处和炉管面上只可看到 o 和 x' 之间火焰单元的一点之间距离，图1-2。

x_m ——燃烧区最高热强度那一点离燃烧开始处的距离。

x_v ——火咀视野长度，图4-8，式(4-5)。

y ——式(2-16)和式(2-17)中油气混烧总共释放热量中烧油所占部分；或对着管排烧火时管排上一点和火焰轴线的法线距离，图4-1。

z ——炉管相对于火咀中心或一排火咀的高差，图3-4、4-5、4-7、4-9和4-15。

希腊字母

α ——偏斜烧火离垂直线角位移，式(4-16)。

α_t ——圆筒炉内相对于燃烧区最高热强度那一点的炉管角位置，图3-8至图3-10。

ξ ——燃烧区上离燃烧开始处的距离。

ξ_0 ——自 A_0 至由 A_0 和 A_L 所形成的圆锥或长方锥体顶点的距离， $\xi=L/(\sqrt{A_L/A_0}-1)$ 。

下标,

avg ——平均。

c ——属于油气混烧。

g ——属于烧气。

max ——最大。

o ——在式(2-16)和式(2-17)表示属于烧油。

x ——点 x 处。

$x=0$ ——在 $x=0$ 处,指火焰的基底,式(4-6)和式(4-7)。

y ——对着管排烧火时,在离火焰轴线距离为 y 处,

图4-1。

$y=0$ ——对着管排烧火时,在火焰轴线上,图4-1。

$1, 2, \dots, n$ ——相对于编号为 $1, 2, \dots, n$ 的火咀中心。

目 录

绪言

符号说明

第一章 理论分析..... (1)

烧油。烧气。

第二章 实用问题..... (13)

燃烧区长度。火焰辐射率。表皮和膜温度。

油/气混烧。

第三章 常用加热炉..... (24)

单侧烧火炉管。双侧烧火炉管。

第四章 特殊加热炉..... (77)

对着管排烧火。管排下方从侧墙烧火。

从炉底对着垂直辐射墙偏斜烧火。

参考文献..... (174)

第一章 理论分析

加热炉中的燃烧区可以被看作为一系列周围有界的喷射火焰体系，火焰从火嘴底座喷出，并扩展到分配给它的炉膛截面积（图1-1）。每个喷射火焰体系有一个可见的内核，内核伸展到大约为燃烧区的全长 L 。除了漂移火焰的情况，可见内核轴线和炉管之间的最小距离在整个燃烧区内为常数，即等于相应火咀的中心线和该炉管面之间原先的间距 R 。在点 L 处，所有火咀的燃烧都趋于完全；全部烟气（新产生的加吸入的）占有管排所包围的整个横截面积。

考虑一单个燃烧区，从火咀底座面积 A_0 扩展到由管排所包围的分配给它的炉膛截面积 A_L （图1-2）。离火嘴底座距离为 ξ 处燃烧区的一个单元产生热量 dQ 。这个热量的一部分 f 将以火焰辐射方式散失，将此单元的中心看作辐射的点源。围绕这个点源的等热强度面为离源半径为 R_1 的球面。这样，沿燃烧区距离为 ξ 处的单元 $d\xi$ 对于炉管上能看到火焰的一点 α 处的热强度贡献为

$$dq_\alpha = \frac{f dQ}{4\pi R_1^2} = \frac{f dQ}{4\pi [R^2 + (\alpha - \xi)^2]} \quad (1-1)$$

要得到点 α 处的总热强度，必须将燃烧区所有单元的贡献加起来；即将式（1-1）的右侧对 ξ 积分。

为进行积分，必须将产生的热量和火焰辐射率表示为 ξ 的函数。写成

$$dQ = (dQ/dV)dV = (dQ/dV)A d\xi \quad (1-2)$$

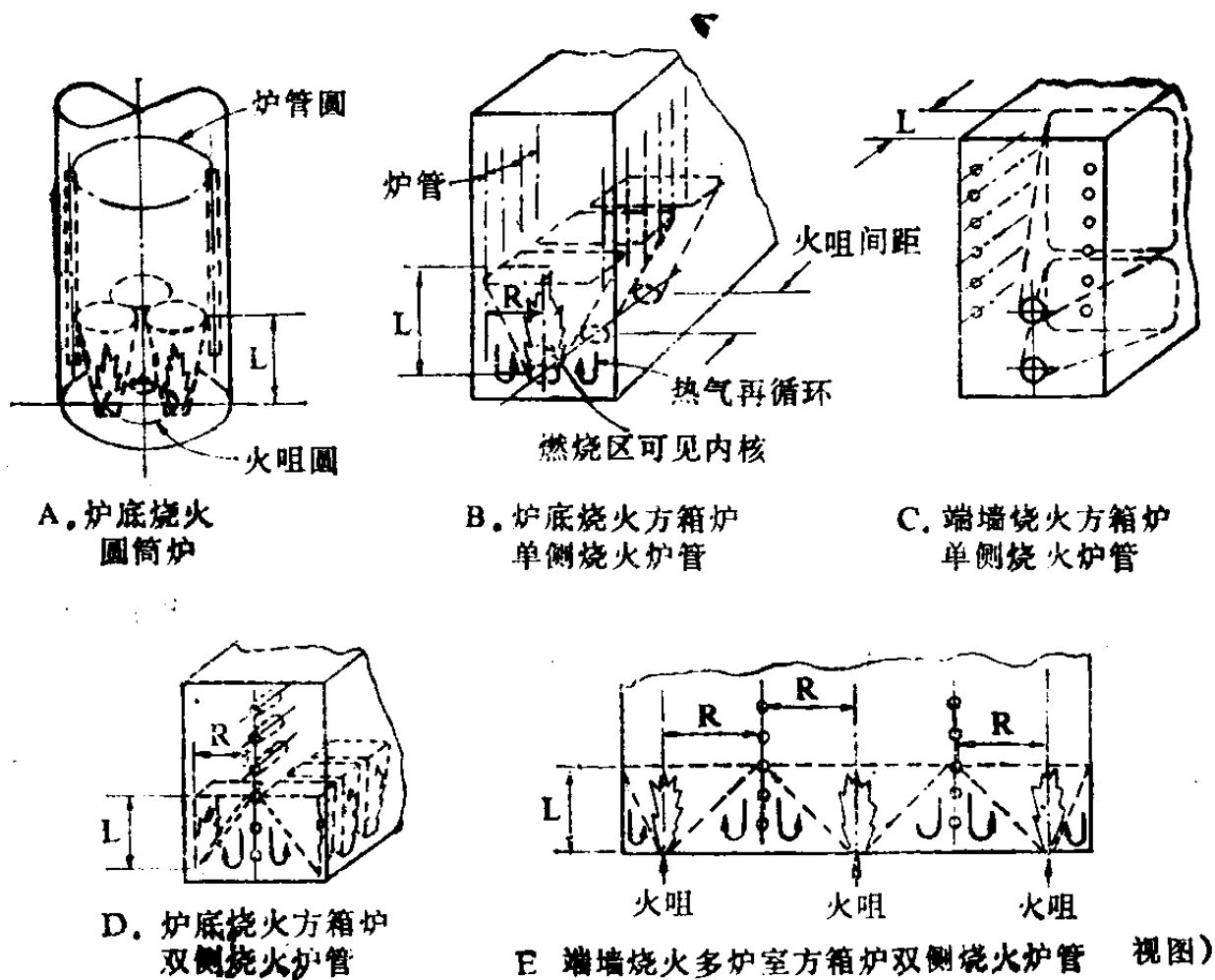


图 1-1 炼油厂加热炉燃烧区

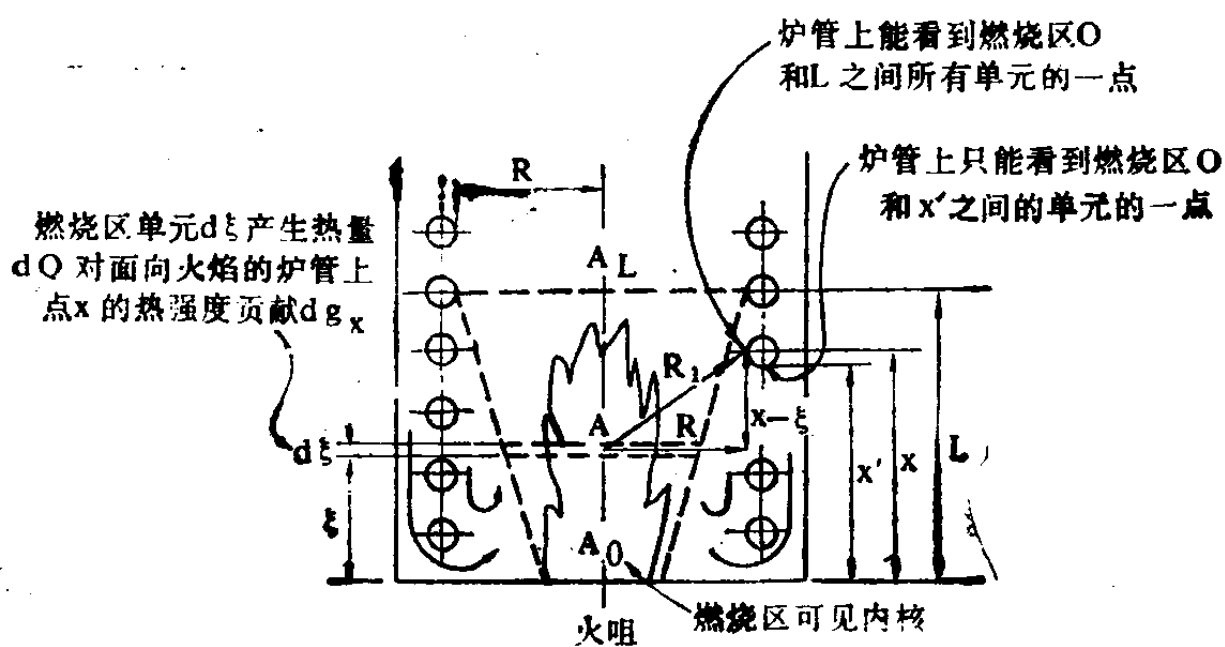


图 1-2 同时产生热量和进行辐射

规定出单位体积释放热量 dQ/dV 如何随距离 ξ 而变, 假设燃烧区为某种形状, 即可定出 A 作为 ξ 的函数; 产生热量的变化情况随易可以确定。

一、烧气

从简化假设出发 (如单位体积释放热量为常数, 燃烧区形状为圆锥或长方锥), 可得

$$\frac{dQ}{dV} = \text{Const.} = \frac{Q_L}{V_L} \quad (1-3)$$

式中: Q_L ——释放的全部热量;
 V_L ——燃烧区体积。

还有

$$\frac{A}{A_L} = \left[\frac{\xi + \xi_0}{L + \xi_0} \right]^2 \quad (1-4)$$

式中: ξ_0 ——自 A_0 至由 A_0 和 A_L 形成的圆锥或长方锥体顶点的距离,

$$\xi = L / (\sqrt{A_L/A_0} - 1)。$$

因而

$$dQ = \frac{Q_L}{V_L} A_L \left[\frac{\xi + \xi_0}{L + \xi_0} \right]^2 d\xi \quad (1-5)$$

将式(1-5)代入式(1-1)

$$dq_x = \frac{f Q_L A_L (\xi + \xi_0)^2 d\xi}{4\pi V_L (L + \xi_0)^2 [R^2 + (x - \xi)^2]} \quad (1-6)$$

再假设整个燃烧区内辐射率为常数, 对于烧气这是可以成立的^[13, 14]。将式(1-6)在($\xi = 0, q_x = 0$)和($\xi = L, q_x = q_x$)之间积分得

$$\left(\frac{4\pi R^2 q_x}{3f Q_L} \right) \frac{1 + \frac{A_L}{A_0} + \sqrt{\frac{A_L}{A_0}}}{\left(\sqrt{\frac{A_L}{A_0}} - 1 \right)^2} = \frac{1}{(L/R)^2}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\frac{x}{L} + \frac{\xi_0}{L}}{(L/R)^2} \ln \frac{1 + \left(\frac{L}{R}\right)^2 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2}{1 + \left(\frac{L}{R}\right)^2 \left(\frac{x}{L}\right)^2} \\
& + \frac{\left(\frac{L}{R}\right)^2 \left(\frac{x}{L} + \frac{\xi_0}{L}\right)^2 - 1}{(L/R)^3} \left[\tan^{-1} \left(\frac{L}{R}\right) \left(1 - \frac{x}{L}\right) \right. \\
& \left. + \tan^{-1} \left(\frac{L}{R}\right) \left(\frac{x}{L}\right) \right] \quad (1-7)
\end{aligned}$$

式中: $(\xi_0/L) = 1/(\sqrt{A_L/A_0} - 1)$

式(1-7)表示一个无因次热强度数 $(4\pi R^2 q_w / 3 f Q_L)$ 和炉膛火咀面积比 (A_L/A_0) , 长度间距比 (L/R) 以及一个代表沿燃烧区距离的无因次数 (x/L) 之间的关系。 A_L/A_0 和 L/R 一定时, 热强度数在某个 x/L 值处达到最大。为要直接解出这个位置, 将 $(4\pi R^2 q_w / 3 f Q_L)$ 对 (x/L) 取导数并令其等于零, 得出

$$\begin{aligned}
& \ln \frac{1 + \left(\frac{L}{R}\right)^2 \left(1 - \frac{x_m}{L}\right)^2}{1 + \left(\frac{L}{R}\right)^2 \left(\frac{x_m}{L}\right)^2} + 2 \left(\frac{L}{R}\right) \left(\frac{x_m}{L} + \frac{\xi_0}{L}\right) \\
& \left[\tan^{-1} \left(\frac{L}{R}\right) \left(1 - \frac{x_m}{L}\right) + \tan^{-1} \left(\frac{L}{R}\right) \left(\frac{x_m}{L}\right) \right] \\
& = \left[\frac{L/R}{\sqrt{A_L/A_0} - 1} \right]^2 \left[\frac{A_L/A_0}{1 + \left(\frac{L}{R}\right)^2 \left(1 - \frac{x_m}{L}\right)^2} \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{R}\right)^2 \left(\frac{x_m}{L}\right)^2} \right] \quad (1-8)
\end{aligned}$$

A_L/A_0 和 L/R 一定时, 式(1-8)可以用来计算燃烧区

最高热强度处 x_m/L 的位置，然后用式 (1-7) 来计算最大热强度值 $(4\pi R^2 q_{max}/3fQ_L)$ 。在 A_L/A_0 和 L/R 的一定范围内进行计算的结果绘于图1-3，其中 $(4\pi R^2 q_{max}/3fQ_L)$ 和 (x_m/L) 以 A_L/A_0 为参数对 L/R 标绘。

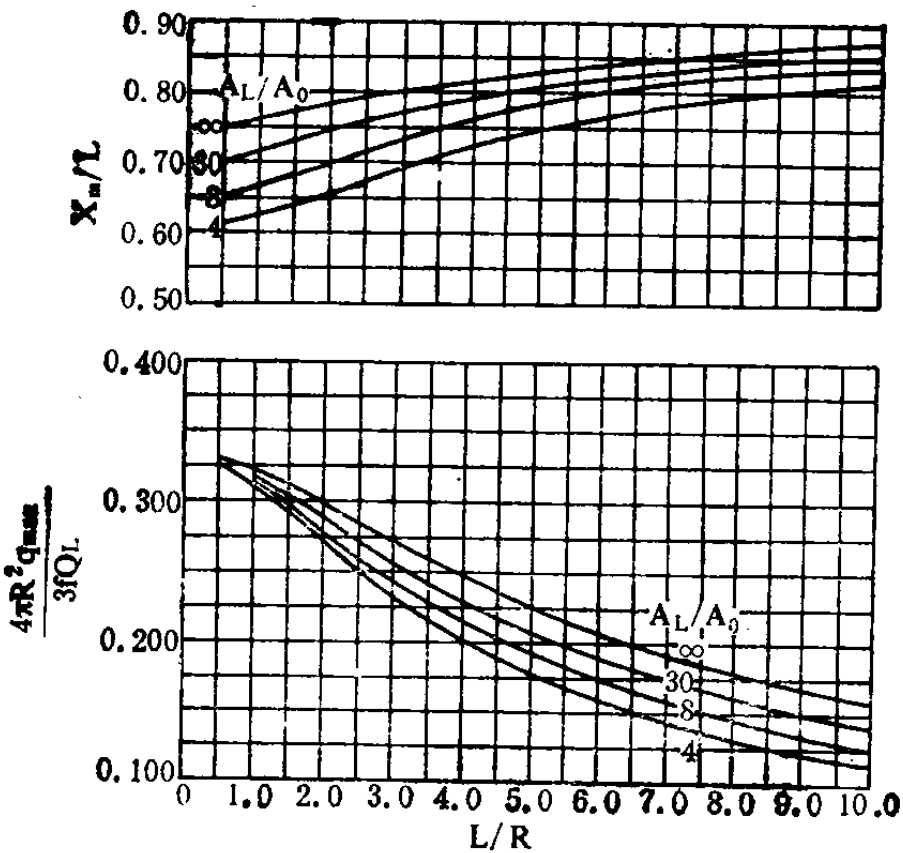


图 1-3 对管排一侧烧气时燃烧区最大热强度数及其位置

在 L/R 比值较小 (< 2)，即短火焰和/或火咀炉管之间大间距时，热强度数趋近于0.33，并不受 L/R 和 A_L/A_0 变化的影响。当 L/R 增大， L/R 和 A_L/A_0 对最大热强度数的影响则变得更加显著，相应的 x_m/L 值在0.61和0.87之间。至少有一家火咀制造厂家通常使用一条老的简易规则，即过热点一般在火焰长度的2/3处， $x_m/L=0.67$ 。

图1-3所给出的结果是针对炉管上能看到一单个燃烧区