

直立埋入式喷枪的传热模型及优化设计^①

包桂蓉

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要 介绍了艾萨/澳斯麦特熔炼中所使用的 Sirosmelt 直立埋入式喷枪的传热机理、传热模型及流动特性, 由此提出改进喷枪内部设计, 提高喷枪寿命的措施。

关键词: 直立埋入式喷枪; 传热; 流动特性; 喷枪设计

中图分类号: TF066. 1 文献标识码: A 文章编号: 1007- 855X(2002)01- 078- 05

0 引言

艾萨法熔炼中所用的 Sirosmelt 浸没式喷枪系统最早是 20 世纪 70 年代初由澳大利亚维多利亚东墨尔本的联邦科学工业研究组织(CSIRO)开发出来的, 现已成功应用于熔池熔炼工艺, 如矿渣处理、氧化熔炼和硫化熔炼等. 这种喷枪由两根同心装在一起的钢管组成, 工作时, 喷枪靠机械装置下降, 头部浸没于炉料中, 燃料(天然气或油)通过喷枪中心的管子向下供给熔炉, 并在浸没于熔池中的喷枪头部燃烧, 而空气或富氧空气则通过两根管子形成的环形通道输入, 将气体喷射与浸没燃烧结合起来. 在此过程中, 流过环形通道的气体使喷枪外壁保持较低温度, 并使靠近枪壁的液态熔渣冷却而凝结, 在喷枪外壁上形成一固态凝渣保护层. 该固态凝渣层可防止液态炉渣到达枪表面, 使喷枪免受熔池中高温液体的烧损和侵蚀.

鉴于直立埋入式喷枪的工作原理, 该喷枪系统必须满足两个重要条件才能正常运行. 一是必须使喷枪的外壁随时保持一固态凝渣层以免熔化; 二是喷枪壁必须足够冷却, 不出机械故障. 这两个条件是紧密相连的, 因为只有喷枪壁面保持低温才能使其外面形成固态凝渣层, 使喷枪延长寿命. 延长喷枪寿命的方法有改进喷枪材料、加水冷却、在反应空气加入水或煤粉及控制喷枪传热等, 而其中控制喷枪传热, 使喷枪壁传给反应空气的热量足够大, 使枪壁外侧形成一层稳定的固态凝渣层是最有效的措施. 本文就是通过研究喷枪内的传热及流动特性来探讨强化喷枪传热、提高喷枪寿命的方法.

1 喷枪结构

喷枪结构如图 1 所示. 喷枪由同心地套在一起的两根钢管组成. 燃料从内部管子通道输入熔池, 空气或富氧空气则从两根管子形成的环形通道流过. 在浸没熔池的喷枪头部的环形通道内还装有螺旋叶片旋流器, 其具体的结构尺寸如表 1 所示.

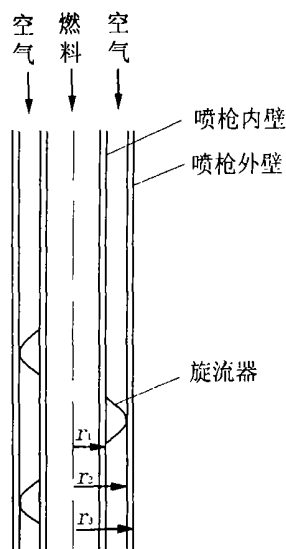


图 1 直立埋入式喷枪结构示意图

表 1 直立埋入式喷枪的结构尺寸

反应气体	内壁外径 r_1 / mm	外壁内径 r_2 / mm	外壁外径 r_3 / mm	枪长 L / mm	旋流器螺距 p / mm	旋流器长度 L_s / mm
空气	6.35	14.3	15.9	2 000	50	175
富氧空气	7.95	11.1	12.7	2 000	55	175

① 收稿日期: 2001- 04- 20;

第一作者简介: 包桂蓉, 女, 1969 年生, 讲师; 主要研究方向: 热能工程.

2 喷枪的传热机理及传热模型

直立埋入式喷枪的外部传热可分为三个区域(图 2):

(1) 辐射区. 在炉子的上部区域, 炉渣的喷溅量很少, 且该区域的喷枪外也没有覆层, 热量是以辐射的方式从炉子气体传向喷枪壁的.

(2) 定传热系数区. 在炉子的底部, 喷枪外壁完全被凝渣覆盖, 此处喷枪一会儿被液态炉渣冲刷, 一会儿又被炽热的燃烧气体包围, 热量是以多相对流和导热的联合方式进行传递的. 根据试验和计算结果, 这一区域的整体传热系数几乎为一定值, 故可将其视为定传热系数区.

(3) 复合交叉区. 这是辐射区和定传热系数区之间的区域. 在这一区域, 液态炉渣不断溅起, 并在气体中凝固, 不会粘结在枪壁上. 该区域炉渣飞溅的量远少于喷枪头部部分, 在热量传递中辐射和对流联合起作用.

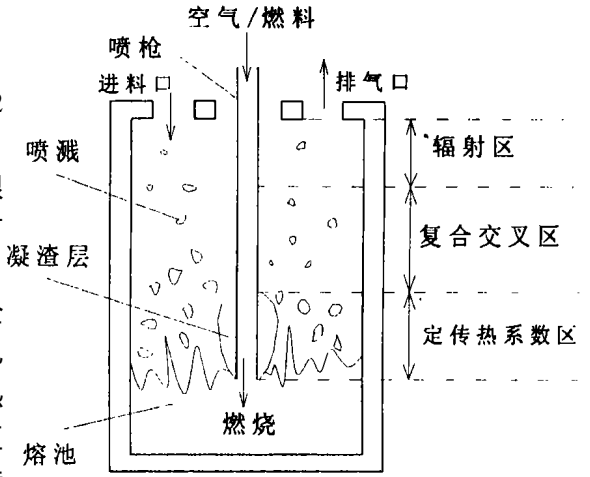


图 2 喷枪外部的传热区域分布图

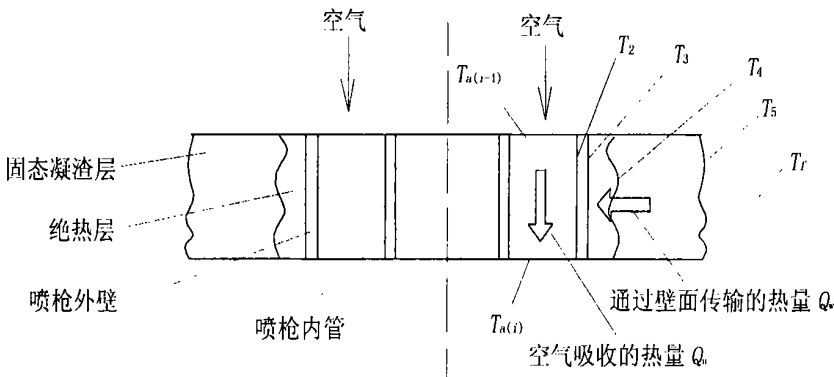


图 3 喷枪的温度及热流示意图

在喷枪内部, 环形通道内流过的空气所吸收的热量与从炉渣通过枪壁以及任何凝渣层或包复在枪壁外的隔热层传向冷却空气的热量相等. 对于一段长度为 dx 的喷枪截面(图 3), 通过该截面的空气吸收的热量 δQ_a 为

$$\delta Q_a = m c_p (T_{a(i)} - T_{a(i-1)})$$

式中: m 为空气流量, c_p 为空气比热, $T_{a(i-1)}$ 为空气进入该段的温度, $T_{a(i)}$ 为空气离开该段的温度. 而从枪壁传给冷却空气的热量 δQ_w 为

$$\delta Q_w = 2\pi r_2 h_2 (T_2 - T_b) dx$$

式中 h_2 为流动空气与外层枪壁内侧的对流传热系数, T_2 为外层枪壁内侧的壁温, r_2 为外层枪壁的内半径, T_b 为该段空气的平均温度(按体积计算). 对流传热系数 h_2 可用环形通道的空气轴流关联式计算, 如果环形通道中使用了旋流器, 还应考虑旋流引起的强化传热, 应用相应的关联式计算 h_2 .

从喷枪壁本身来说, 热量是以导热的方式传过各层的, 这些热量均可用导热方程表示. 通过外层枪壁的热流为:

$$\delta Q_l = 2\pi \frac{k_l (T_3 - T_2)}{\ln(r_3/r_2)} dx$$

若喷枪外有一绝热层, 则通过绝热层的热流为:

$$\delta Q_{ins} = 2\pi \frac{k_{ins} (T_4 - T_3)}{\ln(r_4/r_3)} dx$$

这时通过凝渣层的热流为:

$$\delta Q_s = 2\pi \frac{k_s(T_5 - T_4)}{\ln(r_5/r_4)} dx$$

若无绝热层, 则通过凝渣层的热流为:

$$\delta Q_s = 2\pi \frac{k_s(T_5 - T_3)}{\ln(r_5/r_3)} dx$$

上述各式中的 k_l, k_{ins}, k_s 分别为外层枪壁、绝热层和凝渣层的导热系数. 最后, 从炉料传给喷枪外壁的热流为:

$$\delta Q_f = 2\pi r_0 h_0 (T_f - T_0) dx$$

上式中的 r_0 和 T_0 根据不同的边界条件分别对应于 r_3, r_4 或 r_5 以及 T_3, T_4 和 T_5 . T_f 是熔池中炉料的温度, h_0 是炉料与喷枪外层间的传热系数, 其值随喷枪所处的不同区域而变化, 应根据该区域的特征分别进行计算.

根据能量平衡, 上述各式中传递的热量应相等, 即

$$\delta Q_a = \delta Q_w = \delta Q_l = \delta Q_{ins} = \delta Q_s = \delta Q_f$$

Solnordal 等人利用位于 CSIRO 矿山分部的中试厂进行了一系列试验. 实验时的熔池直径为 0.3 m, 高 2.0 m, 使用的喷枪是 CSIRO 标准喷枪, 且喷枪头部附近均有一旋流器, 喷枪具体尺寸见表 1. 图 4 是其中一个实验及其利用上述传热模型计算的结果, 其中的空气流量为 $159 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$. 从图中可以看出, 传热系数 h_0 在辐射区随炉温的升高而迅速上升, 相应喷枪壁温度也增加. 随着喷枪进入交叉区, 炉中的喷溅量增大使对喷枪的辐射减弱, 温度下降. 在距喷枪尾部约 0.9 m 处, 开始形成凝渣层, 温度产生突降. 然后喷枪温度又缓慢上升, 直到在旋流器入口处, 又发生另一温度突降. 最后在喷枪头部, 由于燃烧泡的辐射效应以及沿喷枪头部的轴向导热作用, 温度又迅速上升. 凝渣层的厚度先增加, 然后沿喷枪轻微变薄. 除了喷枪头部外, 凝渣层的厚度在其整个长度上基本是均匀的, 反映出凝渣层和炉料间传热系数的均匀性, 也证实该区域可视为定传热系数区.

Solnordal 等人的研究还发现^[1], 凝渣层的导热系数为 $0.5 \sim 1.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 炉料和枪壁间的传热系数为 $80 \sim 150 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. 这些值的大小均比其它文献中金属—炉渣系统的相应数值小很多. 产生差异

的原因是在 Siros melt 熔池中通有大量的气体, 会生成特别大的燃烧气体气泡, 这些气泡周期性地覆盖喷枪, 使传向喷枪的对流和导热热量减少, 导致整体传热系数减小. 另外粘附在枪壁上的凝渣层由于枪壁温度的变化 (由气体对喷枪的交替覆盖引起) 有可能使喷枪发生轻微缩胀, 在凝渣层和枪壁间形成一微小缝

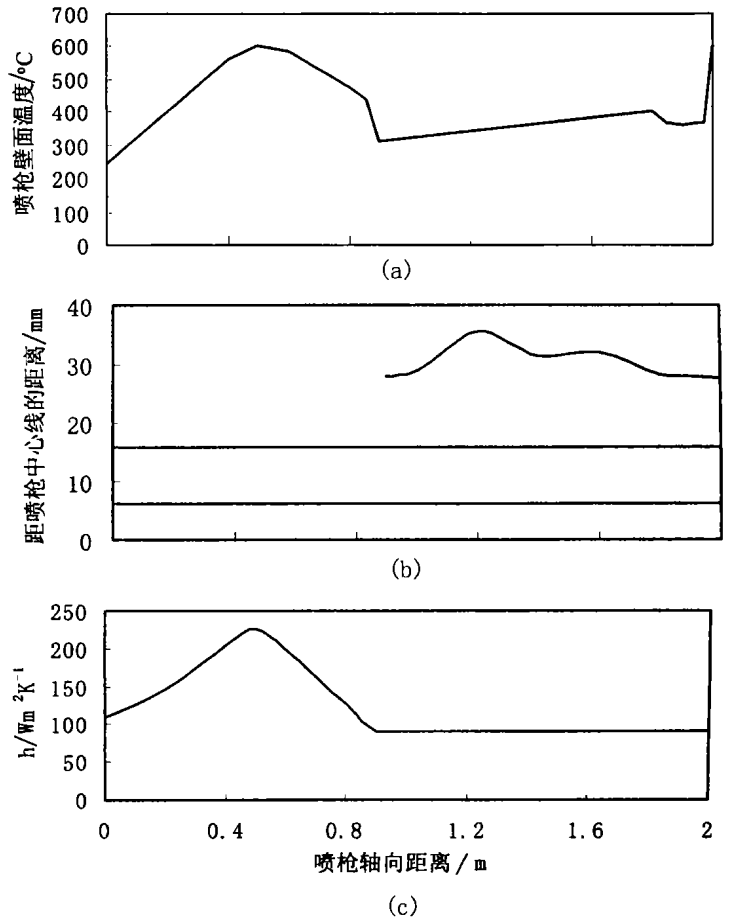


图 4 (a) 喷枪外壁温度随喷枪长度的变化
(b) 凝渣层厚度随喷枪长度的变化
(c) 喷枪外表面传热系数随喷枪长度的变化

隙, 导致两者之间的接触热阻增加, 使凝渣层的导热系数有所下降。

另需指出的是, 凝渣层的导热系数随其成分而变化, 也就是说与具体过程有关。在工业规模的生产中, 由于有更多的气体通过熔炼炉, 故实际过程中的传热系数将会因为气体屏蔽作用的加强而比 $80 \sim 150 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 要低。

3 具旋流器喷枪中的传热及流动特性

直立埋入式喷枪要安全长期运行的关键是使枪壁传给空气的热量足够高以使枪壁外形成一稳定固态凝渣层, 起到保护喷枪的目的。前已叙及, 延长喷枪寿命最适宜的方向是改善喷枪内部结构, 而最有效的方法就是在其环形空气通道中放置螺旋叶片旋流器, 强化空气扰动, 提高对流换热系数, 达到增强换热量、降低喷枪壁温的目的。理论和实验证实, 在流体中引入旋流能显著强化传热, 其机理为:

1) 在相同的流量下, 因为旋流流体流过的距离比轴流流体要长, 故传热表面(外环壁)附近的局部流体速度增加, 对流传热系数也相应增加。据研究, 这种传热表面附近流体速度提高引起的强化传热量在旋流所产生的整个强化传热量中所占的比例为 $60\% \sim 100\%$ 。

2) 旋流使流体紊流度提高, 进而使通过流体的紊流传热量增加。在轴流中, 轴向的紊流波动直接由流体运动产生, 而径向和切向两个方向上的波动则由轴向的动量传递产生。但是在旋流中, 将直接生成三个方向的速度分量。通过直接产生径向和切向速度分量, 旋流中的紊流动能会整体提高, 紊流传热量也就随着紊流动能的提高而增加。

3) 流体的旋转在旋流中建立了一离心力场, 当热流是由外传向管内时, 该离心力场有利于对流传热。离壁面稍远的流体质点, 因受较大的离心力将向壁面方向移动。故在靠近壁面的流体中, 离心力的作用将使流体湍流混合加强, 减少壁面附近的层流底层的热阻, 同时离心力的存在加强分子的扩散作用, 使内壁处的较冷空气替代外壁处的较热空气, 有利于强化管内换热。同时在流体加热的情况下, 离心力的存在加强了分子的扩散作用, 使内壁处的较冷空气替代外壁处的较热空气, 亦强化了传热^[2]。

据 Solnordal 和 Gray^[1]的研究, 在喷枪的环形通道内使用螺距等于 0.9 和 1.2 倍外环直径的螺旋叶片旋流器后, 其传热系数可比轴流式的提高 2.35 倍。

引入旋流器后, 虽然喷枪内的传热系数有所提高, 但相应的压力损失也增加很多, 如使用上述旋流器后, 其压力损失是光环形通道的 9 倍。故需要对喷枪的环形通道插入旋流器后的流体流动性能有一定了解。流体流过一给定旋流器的性能可分为三个区域:

(1) 入口区域(流动发展区): 当喷枪环形通道中的轴对称流体遇到一螺旋插入物时, 就会在螺旋叶片的始端发生流体分离, 同时开始产生旋转速度分量。这些都将产生额外的流动损失, 称其为入口压力损失。

(2) 充分发展流动区: 在该区域各流通截面上的速度分布曲线形状保持不变。充分发展流动的压力损失包括动量压力损失和摩擦压力损失。由于旋流器的引入使摩擦表面积增大, 其摩擦压力损失比光管的大。

(3) 旋流衰减区: 这是流体离开旋流器后, 旋转流动逐渐衰减直到切向速度分量为零的区域, 这一区域的轴向长度称为旋流衰减长度。旋流衰减长度在雷诺数一定时随旋流数的增加而增加, 在旋流数一定时随雷诺数的减小而缩短。

4 Sirosmelt 喷枪的内部设计

Sirosmelt 喷枪的内部设计需要进行综合考虑, 虽然通过在流体中引入旋流使传向管道中流体的热量大大增加, 但是这种提高传热率的代价就是系统的压力损失也相应增大。据 Errington 等人报道, 澳大利亚昆士兰艾萨矿山的工业型熔炼炉中, 应用的就是 Sirosmelt 喷枪技术, 其所需的空气压力为 250 kPa(表压), 对应的费用占整个设备运行费用的相当大部分^[1]。因此喷枪的设计既要能保证足够的强化传热以使枪壁外形成一固态凝渣层, 又要充分降低喷枪内的压力损失以减少运行费用。从设计的角度看, 应该使单位泵功下的传热量最大同时又要保证实际的传热量足以冷却喷枪。这可以通过提高传热系数、降低压力损

失来提高系统单位泵功下的传热量. 就应用旋流器的喷枪而言, 可通过以下措施来改善喷枪的传热—压降性能.

4.1 应用旋流衰减区域

实验表明, 喷枪中具有衰减旋流时的平均传热系数随衰减长度的增加减少缓慢. 如经过一个相当于 40 水力直径的衰减距离后, 用螺旋叶片旋流器后的传热量仍是相同雷诺数下轴流的两倍. 但螺旋叶片旋流器由于润湿表面积的增加使表面摩擦比环形管提高了 27%. 故此可利用旋流衰减区仍具有较大传热系数的性能, 应用一系列间隔排列的短旋流器来取代连续的长旋流器, 减少由于表面积增大引起的压力损失, 就可增加单位泵功下的传热量.

4.2 采用变螺距的旋流器

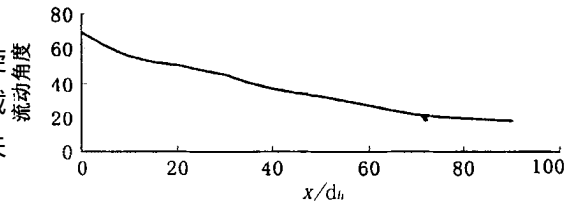
研究发现, 螺距减少会同时使沿旋流器的传热和压力损失均增大. 但使用变螺距的旋流器会使这种情况得到改善. 变螺距旋流器入口端的螺距大, 流体进入旋流器不会拐一个急弯, 入口压力损失就会减少. 接着螺距逐渐变小, 使流体出口处的旋转逐渐变强, 强化传热量增大^[4].

若将短旋流器和变螺距旋流器结合起来效果将更好. 应用时一个值得注意的问题是每个旋流器入口端的初始螺距应与该位置处的流体整体流动方向一致, 以便能最大程度地减少旋流器的入口损失. 因此, 第一个旋流器的初始螺距应为无限大, 因为流体是轴向进入的, 然后螺距逐渐减少将旋转逐步传给流体. 下游各旋流器的初始螺距应根据其所处位置处的流体总的流动方向来决定, 而流体流动方向是由旋流器的衰减特性决定的. Solnordal 和 Gray^[1]对工业型螺旋叶片旋流器的衰减特性进行了研究, 图(5)是他们研究的流体流动角与流体距旋流器出口距离间的关系. 按此关系就可确定各旋流器的初始螺距, 减少入口损失. 由于旋流衰减率对 Re 数的变化很敏感, 故图(5)中的数据仅适用于 Re 数为 80 000~ 400 000 的范围.

4.3 使用变径间距的旋流器

另一个可以减少入口压力损失的方法是改变螺旋叶片的半径. 传统旋流器的螺旋叶片横跨整个环形截面, 若使叶片从外壁开始逐渐向内壁趋近, 则入口损失会进一步减少.

如果综合应用上面的各项措施, 则不但会使喷枪壁传向空气的热量足以冷却枪壁, 形成一固态凝渣层, 而且还可以大大降低旋流器固有的高压损失, 使其单位



x—旋流发生器下游的距离 d_h—水力直径
图 5 流体流动角与流体距旋流器出口距离间的关系

泵功下的传热量接近甚至超过相同 Re 数下轴流系统的值, 从而节约使用 Siros melt 喷枪技术的运行费用.

参考文献:

[1] C. B. Solnordal, F. R. A. Jorgensen, and R. N. Taylor, Modeling the Heat Flow to an Operating Siros melt Lance[J]. Metall. Trans. B, 1998, 29B: 485~ 492.

[2] 高小涛. 管内复合强化传热技术及机理分析[J]. 热能动力工程, 1998, 13(6): 418~ 420.

[3] C. B. Solnordal and N. B. Gray, Heat- Transfer and Pressure- Drop Considerations in the Design of Siros melt Lances[J]. Metall. Trans. B, 1996, 27B: 221~ 230.

[4] N. Dave and N. B. Gray, Fluid Flow through Lances with Constant and Variable Pitch Swirled Inserts[J]. Metall. Trans. B, 1991, 22B: 13~ 20.

Heat Flow Model and Optimum Design for Upright Submerged Lance

BAO Gui- rong

(Faculty of Electric power Engineering, Kunming Science and Technology University, Kunming 650093, China)

Abstract The heat flow mechanism, heat flow model and fluid flow characteristic of a Siros melt Submerged lance used in Aisa/ Ausmelt melt are presented in this paper. Recommendations are made for improving the internal design of the lance to make it working for a longer time and to decrease the operational cost.

Key words: upright submerged lance; heat flow; fluid flow characteristic; lance design