

高频感应耦合等离子体炬设计分析

中国科学院力学研究所 朱清文

【摘要】 近廿多年来对高频感应耦合等离子体炬进行了很多理论研究和实验,也发展了一些不同结构型式的等离子体炬。本文全面地分析等离子体炬设计及重要参数选择的依据和方法,特别对金属水冷等离子体炬进行了详细的分析和讨论。

关键词 高频 耦合 等离子枪

一、引言

由于高频(R.F.)等离子体技术在工业应用中的发展,对等离子体炬也就提出了更严格的要求,为此产生了不同结构型式的等离子体炬。但在实际中得到广泛应用的主要是气冷式和水冷式。一般气冷式多用于小功率和单纯对气体进行加热的场合;水冷式由于功率密度高,流量小,流速低,有利于颗粒气化和化学反应,适用于大功率和有特殊工艺过程要求的场合。常用的两种水冷型式,一为直接冷却石英管壁;一为间接式(金属水冷式),由多根金属管或中空异形金属块组成类似鸟笼,与石英管同心置于石英管内,水通过金属管或中空异形金属块阻止高温热流对石英管壁的热损坏。由于有金属置于高频电磁场,使高频线圈与等离子体的耦合变得复杂,同时增加了电磁感应损失。本文对金属水冷式进行了详细的分析和讨论,并给出了主要参数确定的依据和方法。

二、等离子体炬及其主要参数

等离子体炬如图1示,是由两个同心石英管和外面套一高频感应线圈组成。外管的作用是限制等离子体气流,内管同外管之间形成一个缝隙,作为高速旋转冷却气流的通道。其主要参数有等离子体放电功率 P_w ,工作频率 f ,中心进气流率 Q_c ,边气进气流率 Q_s ;其几何参数有外管半径 R_0 ,内管半径 R_1 ,长度 L_w ,感应圈匝数 N ,长度 L_c ,半径 R_c 及加料管半径 R_f 等。下面对上述参数的确定作一分析。

1. 等离子体功率 P_w 从高频感应加热理

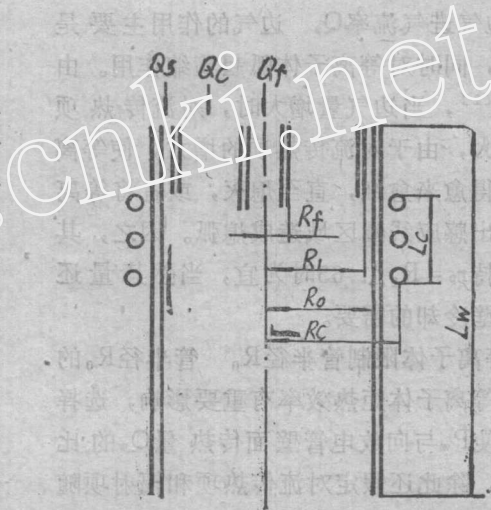


图1 等离子体炬简图

论得知,对等离子体的感应功率即放电功率,可用下式表示^[1]:

$$P_w = \mu \pi f H^2 L_c (\pi r_p^2) p \quad (1)$$

式中, r_p —等离子体放电半径, p — $2r_p/\delta$ 的函数, δ —趋肤深度, H —磁场强度。上式中除 r_p 外,其他参数都容易确定。确定 r_p 可用文献[2]中提出的方法。

2. 工作频率 f 从感应加热理论得知,当 $2r_p/\delta = 3.5$ 时,可获得最佳工作频率。 $p_w \propto f^{1.8}$,但当 $2r_p/\delta > 4.5$ 时,所得到的好处不多,据此给出最佳频率范围为:

$$0.76 \times 10^9 / 4\sigma r_p^2 < f_{opt} < 1.14 \times 10^9 / 4\sigma r_p^2 \quad (2)$$

式中, σ —等离子体电导率($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹。

3. 中心进气流率 Q_c 在工作高频圈中部断面上所产生的磁压差 P_m 可由下式确定:

$$P_m = (B^2 |_{r=r_p} - B^2 |_{r=r_0}) / 4\mu \quad (3)$$

式中, B —磁感应强度, μ —导磁系数。由于 P_m 可在等离子体炬轴心上产生一个轴心速度 $V_z = \sqrt{P_m 2g/\rho}$, 由此在等离子体放电区造成回流流动, 这是稳定放电所必需的。若中心进气流率大到足以消除回流, 则将破坏稳定放电, 在忽略由于弧的旋转对 V_z 的影响时, P_m 直接决定了中心进气流率, 这应该作为限制 Q_c 的一个准则。若 Q_c 太小, 将不能阻止由于 V_z 造成的等离子体烧顶现象。

4. 边气进气流率 Q_c 。边气的作用主要是冷却管壁, 同时对等离子体弧起箍缩作用。由计算得知^[2], 当边气量增大时, 对流传热项也相应增大, 由于对流传热项的增大, 使等离子体弧变得愈来愈细, 直至熄灭。或者将等离子体团推出感应线圈区域造成熄弧。因之, 其送气量保持 $r_p = R_0/1.65$ 时为宜, 当然其量还要满足管壁冷却的需要。

5. 等离子体限制管半径 R_0 。管半径 R_0 的选择对于等离子体炬热效率有重要影响, 选择的原则应使 P_w 与向放电管壁面传热项 Q_w 的比值为最大, 除此还假定对流传热项和辐射项随 r_p 的变化。由式 (1) $P_w \propto r_p^2 P$ 。在最佳频率范围内, 如 (2) 式所示, p 函数基本不变, 可视为常数处理, 在这种情况下, $P_w \propto r_p^2 \propto 1/K^2$, 式中 $K = (R_0/r_p)$ 。壁面传热 $Q_w \propto 1/\ln K$ 。于是 $P_w/Q_w \propto (\ln K/K^2)$, 对其微分并等于零。

$$\frac{\partial}{\partial K} S = \frac{\partial}{\partial K} \left(\frac{P_w}{Q_w} \right) \propto \frac{\partial}{\partial K} (\ln K/K^2) = 0 \quad (4)$$

则可求得 $K = 1.65$ 。图 2 示出 K 和 S/S_{min} 的关系曲线。应当指出, 当 S/S_{min} 超过最佳频率时, 由于 p 函数迅速减小, 其值随 K 急剧变化。

6. 内管半径 R_i 。内管的作用主要是同外管之间形成一个高速旋转冷却外管内壁的气流通道。由于旋转气流在等离子体炬中速度衰减很快, 必须在通道出口造成足够大的速度。一般内管的下端同感应线圈的第一圈相齐。从实验和理论计算指出, 所形成的缝隙通道一般选为

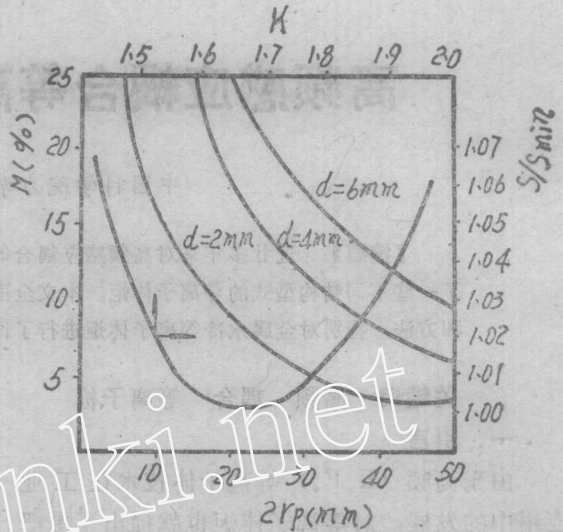


图 2 S/S_{min} 和 K 以及 M 和 $2r_p$ 参数间的关系曲线

2—6 mm 左右为宜, 这决定于冷却流量。

7. 放电管长度 L_w 。放电管除感应线圈段外, 为减少散热损失, 其他部分应尽量短。由于等离子体炬一般多与金属反应器相连接, 为避免对反应器造成磁耦合和放电, 从所对应的线圈下端算起, 放电管还需长出 80 mm 以上。

8. 感应线圈参数 匝数 N 由功率需要的安匝数确定, 长度 L 。由匝数 N 和匝与匝之间的间隙 (此间隙应保证匝间不发生放电) 所确定, 为避免磁场的二维效应, 应使 $L_c/(2R_c)$ 大于 1, R_c 的确定应使线圈的内壁与石英管间有 2—5 mm 的间隙。顺便指出, 安匝数也是进行等离子体炬与高频振荡器匹配调整的手段之一。

9. 加料管半径 R_f 。其作用是由载气通过加料管把粉料、气料或液料送入等离子体弧区, 为使加料能克服等离子体的回流送到弧区, 又不致破坏放电的稳定性, 一般说加料管半径选择的应尽量小。

三、金属水冷炬设计中的问题

由于金属圆筒对磁场的屏蔽, 这类等离子体炬必须用开缝金属筒或由沿石英放电管内壁圆周设置的多根, 并具有一定间隙的小直径金属或异形金属空心体组合而成。管中通水冷却,

防止高温气体热流对石英管壁的热损坏。对每根金属管或金属空心体来说，都处于高频磁场作用下，若其壁厚远大于金属趋肤深度时，在管子的空腔内实际上没有电磁场，是屏蔽的。为正确的选择这类炬的有关参数，必须研究磁感应的功率损失和耦合问题。

1. 感应功率 P'_w 空心圆柱体在交变磁场作用下所感应的实际功率仍可用(1)式表示，但需注意的是一者的 p 函数是不同的，在此处 p 是 d/δ 和 t/d 的函数(d —金属管内径， t —壁厚， δ —趋肤深度)。假定不锈钢金属管，其电阻率 $\rho = 100 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，相对导磁率 $\mu_r = 1$ ，取壁厚 $t = 0.5mm$ ，与磁场耦合长度 $L_m = 100mm$ ，频率 $f = 1MHz$ ，计算出的管径与感应功率的关系如图3示。若取等离子体炬直径为50mm，不同直径的金属管均按相同节圆排列，彼此间的间隙均取 $\frac{1}{2}d$ (从传热学计算和实验指出，这一间隙会有效地阻止高温热流对石英管壁的热损坏)，这样组成的等离子体炬，总的感应功率与金属管直径 d 的关系亦示于图3，从图中示出，选择金属管直径愈小愈好，但管径太小，易堵塞，水阻也大，从实际考虑选管外径为2—4mm为宜。金属管径大，除增加感应损失外，还降低工作线圈与等离子体之间的耦合效率，文献[3]指出，必须使 $r_p/R_0 > 0.44$ ，才可获得高的耦合效率。但最近Hull^[4]指出，与一般的电磁感应理论相反，在其采用的指状块中空冷却防护石英管壁系统中，并没有因为指状块的加厚而降低等离子体炬的电特性。作者认为对于这一问题还需要进一步的研究，因为指状金属块在高频磁场中的存在，使耦合变得复杂起来，同时由于冷却系统的改善，热辐射的减少，都可表现在等离子体炬的电特性上。

从公式(1)看出，减少感应功率应选低 μ 值和低 ρ 值的材料作冷却管，从 p 函数看，当 d/δ 充分大时，若 $t/d \uparrow$ ，则 $p \downarrow$ ，所以应选厚壁管。

2. 冷却管感应功率和等离子体放电功率之比 两者之比用 M 来表示。

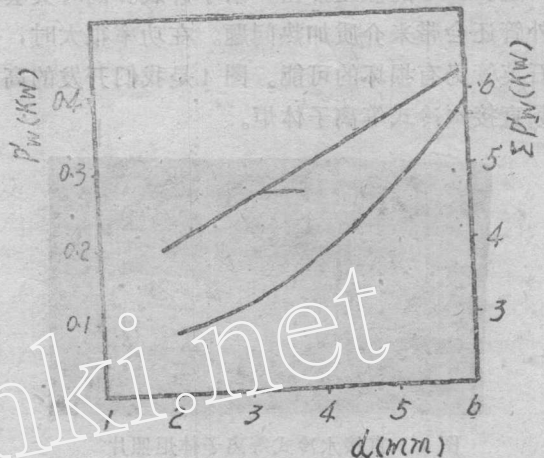


图3 P'_w 和 $\Sigma P'_w$ 和 d 的关系曲线

$$M = N \frac{\mu'}{\mu} (r/r_p)^2 p'/p \quad (5)$$

式中， N —冷却管根数， r —冷却管半径， μ' 、 p' 对应冷却管， μ 、 p 对应等离子体。 p' 的最大值小于0.5，当 $d/\delta > 20$ ， $p \sim 0.1$ ， p 的最大值小于0.4。对直径为 $\phi 50$ 的等离子体炬，在最佳运转状态，放电半径为 $50/1.65 = 30.3mm$ ，若选用 $d = 2mm$ 的冷却管，设 $\mu = \mu'$ ，则 $M = 5.66\%$ 。图2示出了 M 、 d 和 $2r_p$ 的关系曲线。

顺便指出， $N \propto R_0 \propto r_p$ ，所以 $M \propto 1/r_p$ 。 p'/p ，因之增加 r_p ，则 M 降低。若不保持 $R_0/r_p = 1.65$ ，增加 r_p ，虽然 M 值降低，但向管壁的热传输也增加。若使 R_0 随功率而增加，又保持最佳运转状态，则随功率增加而 M 值降低。

四、等离子体炬结构的考虑

对等离子体炬结构的基本要求是：1) 可靠的工作；2) 对等离子体气流干扰小；3) 易于反应物质喷入弧区；4) 易于同反应器连接；5) 使等离子体参数均匀；6) 几何参数正确。在气冷式等离子体炬中，几乎无例外的是用同心石英管组成，为了增加防护效果，有的还采用多层同心石英管，这种等离子体炬，只要能有效地防止热损坏，是易于满足上述要求的，在直冷式等离子体炬中，也有同样的情况，并能满足特殊工艺过程的要求，缺点是，

在起弧和灭弧过程中,石英管内外壁突然承受高达1000℃的温差冲击,易于碎裂。同时夹套外管还会带来介质加热问题。在功率很大时,石英管仍有损坏的可能。图4是我们开发的高频直接水冷式等离子体炬。

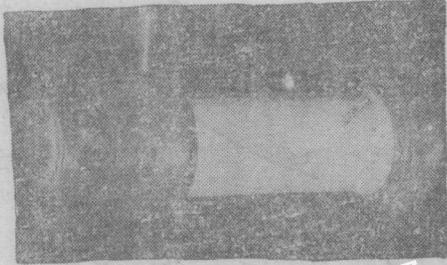


图4 直接水冷式等离子体炬照片

金属水冷式等离子体炬能可靠地对石英管进行热防护,几乎具有无限的使用寿命。若采用异形中空金属块,还可有效地防止热辐射(强热辐射使感应线圈附近大气离化,引起线圈匝间放电)。还可工作于极低的气体流量下和非常高的等离子体温度,能满足特殊工艺过程的要求。若采用同心双层套管,可同时完成进水与回水,这可克服单管冷却式在等离子体炬中一半的金属管处于进水状态,而另一半则处于回水状态所造成的温度不均匀问题。这种结构还有对等离子体气流扰动小,易于同反应器连接等优点,但这种等离子体炬的缺点是增加了感

应损失,应用于腐蚀性气体有限制。图5是我们开发的同心双层套管式金属水冷等离子体炬。

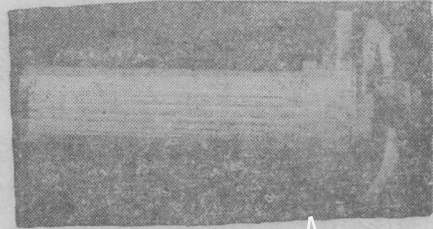


图5 金属水冷式等离子体炬照片

五、结论

通过对高频感应耦合等离子体炬设计、主要参数选择原则和方法,以及对其结构的分析和讨论,可作为等离子体炬的工程设计和参数调整的科学依据和基础。

阎家坪工程师在我们发展等离子体炬工作中作了很多工作,特此致谢。

参考文献

- 1 J. Davies and P. Simpson, Induction Heating Handbook, Mcgraw-hill book Co, 1979, UK, Limited
- 2 朱清文. 力学进展. 1981, 11(4)
- 3 M. L. Thorpe, NASA, CR-1143, 1968
- 4 D. E. Hull, United states patent, 1984, 4. 431. 901

DL4310—6 A型30t铸铁立式有心保温炉

西安电炉研究所和第一汽车厂铸造分厂合作研制的DL4310—6 A型30t铸铁立式有心保温炉于88年4月1日在长春由陕西省机械厅主持通过鉴定。该炉是目前国内自己设计和制造的容量最大的一台立式铸铁有心保温炉,采用可拆式感应体,茶壶式进出铁水口,结构先进合理。一汽铸造厂自87年8月投产以来已连续运行了7个多月,情况良好,实测数据表明主要技术参数和性能达到设计要求,保温功率和过热电耗接近当代国外先进水平。一汽铸造厂采用冲天炉——有心保温炉双联作业后,铸件强度提高了3公斤/厘米²,废品降低率70%,经济效益显著。与会代表对此型保温炉给予极高

评价,认为炉子的主要技术性能居国内领先地位,是铸铁熔炼生产的理想保温设备,它的研制成功,填补了国内空白,并一致希望研制单位尽快定好产品的系列化,以适应不同规模铸造厂的需要。

炉子的主要技术参数如下:

总容量	45t
有效容量	30t
感应器额定功率	700kW
感应器额定电压	740V
过热能力	15t×100℃/h
保温功率	210~230kW
电耗	50kWh/t×100℃

摘自“电炉快报”第23期