

电厂凝汽器节能罗茨液环真空泵组中管壳式换热器的选择

刘忠源 姜伟海

(江苏华电昆山热电有限公司 江苏苏州昆山市 215333)

摘要: 由于罗茨液环真空泵组在发电机组凝汽器维持真空的应用中相比于水环真空泵有不可比拟的能耗优势,因此得到广泛的应用。罗茨液环真空泵组内罗茨真空泵排气口换热器作用重大,但业内对于该类换热器如何科学选择,搜遍网络都没有找到一篇针对性的文章,业内一直遵循的经验公式。为追求严谨,此文章对发电机组配备的罗茨液环真空泵从热力学进行详述。

Abstract: Due to the unparalleled energy consumption advantage of Roots liquid ring vacuum pump set compared to water ring vacuum pump in maintaining vacuum in the condenser of power generation units, it has been widely used. The heat exchanger at the exhaust port of the Roots vacuum pump in the Roots liquid ring vacuum pump group plays a significant role, but the industry has not found a targeted article on how to scientifically select this type of heat exchanger through searching the internet. The industry has always followed an empirical formula. In pursuit of rigor, this article elaborates on the thermodynamics of the Roots liquid ring vacuum pump equipped with the generator set.

中国化石能源发电规模占据世界第一,化石能源发电包括天然气发电和煤发电。这两类发电流程大致相同,都是燃料燃烧产生热量来加热水变成水蒸气,进而推动汽轮机转动,带动发电机转动来发电。做完工的水蒸气在一个冷凝器内受冷收缩成液态水,重新进入锅炉,再形成蒸汽推动汽轮机,以此循环。在这个热力循环中,水蒸气在冷凝器内受冷收缩形成真空。据热力测算,真空度的优异直接影响机组能耗经济性。运行期间,选择一款性能优异的抽真空设备极其重要。

以往的冷凝器的抽真空设备考虑到机组启动时真空度差,大多配置的水环真空泵。但一旦机组稳定后,冷凝器真空较好,水环真空泵此时的效率低下,且易发生汽蚀。由于罗茨液环真空泵组在此真空段有着高效且极限真空高的优点,罗茨液环真空泵组目前被应用于冷凝器真空维持。作为真空维持泵型,同等抽速,罗茨液环真空泵组能够比水环真空泵节电 70%。

罗茨液环真空泵组机械部分主要由四部分组成:罗茨真空泵、罗茨真空泵排气管式换热器、水环真空泵、板式换热器。罗茨真空泵为气体增压器。它的作用是吸入气体,并在排气的那一瞬间对气体进行增压,让气体压力升高,体积变小,排给下一级的真空泵。因此下一级的真空泵所需的抽速可小于罗茨真空泵的抽速数倍,所以罗茨真空泵也被称为真空放大器。罗茨液环真空泵组中罗茨真空泵排出的气体被水环真空泵抽到继而排出大气。罗茨真空泵为两个 8 字型转子反向运转,不接触,但通过小的间隙来抽吸气体,所以罗茨真空泵较节能。水环真空泵是通过对水做功,通过叶轮将水形成等厚水环,等厚水环与偏心转子形成的空腔的大小变化,来抽气和排气,因此水环真空泵更耗能。水环真空泵的抽真空效率和水温关联紧密,水温高,水环真空泵易发生汽蚀,导致抽吸能力下降。

综上,要使得罗茨液环真空泵组高效及节能,是一个整体工作,配置中,我们尽可能的利用罗茨真空泵的增压作用,同时从改善水环真空泵的效率和性能着手,让罗茨真空泵增压后的气体顺利的通过水环真空泵排出大气。减少水环真空泵的工作量和提高水环真空泵的抽气效率并不是一个矛盾的话题,在罗茨液环真空泵组中可以通过罗茨真空泵排气口的管式换热器一并实现。

冷凝器真空维持应用中,罗茨真空泵抽吸的气体为水蒸气和不凝结气体。水蒸气和不凝结奇台经过罗茨真空泵增压后,压力变高,体积变小,温度变高。如果直接排至水环真空泵,高温气体会让水环真空泵的工作液温度变高,继而水环真空泵效率变低,继而整个真空泵组效率变低。

罗茨真空泵排气口配置一台管式换热器用来冷却罗茨真空泵的排气。冷却罗茨真空泵排气有两点好处:一、让进入到水环真空泵的气体温度变低,让水环真空泵变得高效;二、分担抽真空压力。由于压力升高,冷却后的水蒸气更容易凝结,继而让罗茨真空泵排气口的压力变低,这样罗茨真空泵进出口压差变小,罗茨真空泵负载变小,罗茨真空泵耗能变小。

管式换热器的选型直接影响罗茨液环真空泵组的整体性能。我们非常有必要写一篇文章对管式换热器如何选型进行详述。

管式换热器选型不应该一味放大换热面积,利用裕量来保证换热。更大的换热面积需要匹配更多的冷却水源,且换热面积越大,管式换热器造价高,占地面积大。选择一款合适的管式换热器,我们需要从管式换热器热负荷、冷却水用量、平均传热温差三个方面来确认管式换热器的基本参数。

管式换热器热负荷

管式换热器的热负荷就是至罗茨真空泵排气在经过管式换热器后,需要降到规定的温度。

在此过程中,不凝结气体降到规定温度,部分水蒸气会液化成凝结水,发生有相变化。

对于无相变换热过程,管式换热器的热负荷参照下面的公式:

$$Q_1 = m_1 c_{p1} \Delta t_1$$

Q_1 管式换热器热负荷, kJ/h;

m_1 罗茨真空泵排气的流量, kg/h;

c_{p1} 罗茨真空泵排气的热容, kJ/kg·°C;

Δt_1 罗茨真空泵排气的温度变化, °C

有相变化的纯饱和蒸汽冷凝过程,热负荷与冷凝蒸汽的汽化潜热公式如下:

$$Q_1 = w_1 R_i$$

W_1 水蒸气冷凝量, kg/h;

R_i 饱和蒸汽的汽化潜热, KJ/kg。

冷却水用量

罗茨真空泵排气所放出的热量等于管式换热器冷却水吸收的热量与热损失之和,实际设计中,热损失一般近似取罗茨真空泵所释放的热量 5%, 以下公式可计算冷却水用量:

$$M_3 = Q_1 / c_{p3} \Delta t_3$$

Q_1 罗茨真空泵排气所释放的热量, kJ/h;

c_{p3} 冷却水热容, KJ/kg·°C;

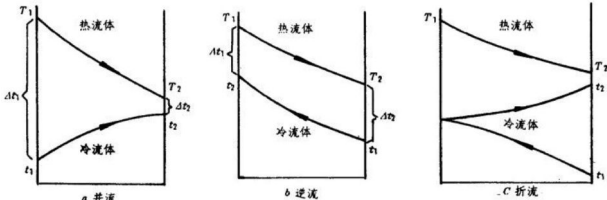
Δt_3 冷却水进出口温度变化, $^{\circ}\text{C}$;

M3 冷却水用量, kg/h 。

平均传热温差

管式换热器的平均传热温差是热交换的推动力。冷却水以及排气在管侧和壳侧的进出口温度, 以及冷却水在管侧流动方向以及排气在壳侧的流动方向都和平均传热温差息息相关。对于管式换热器, 常见有并流、逆流、折流三种类型。

顺流传热是指冷热流体在换热器内以相同的流向进行换热。在顺流传热中, 冷热流体温差随着流体流动逐渐减小, 因此换热效果也逐渐减弱。顺流传热的优点在于设备结构简单, 易于维护保养。顺流传热比较适合于温差较小或不需要大量热量传递的场景。逆流传热是指冷热流体在换热器内以相反的流向进行换热。在逆流传热中, 冷热流体的温差最大, 因此可以达到最大换热效果。同时, 逆流传热可以避免温度交叉点过低或过高导致的换热不充分的问题。逆流传热的主要优点在于能够提高换热器的传热效率, 适用于温差较大或需要大量热量传递的场景。



并流和逆流类型, 平均传热温差都可以用管式换热器两端流体温度的对数平均温差来表示, 公式如下:

$$\Delta t_m = \Delta t_1 - \Delta t_2 / (\ln \Delta t_1 / \Delta t_2)$$

Δt_m 逆流或并流的平均传热温差

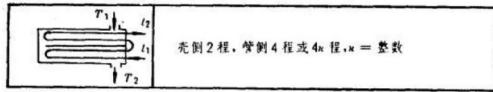
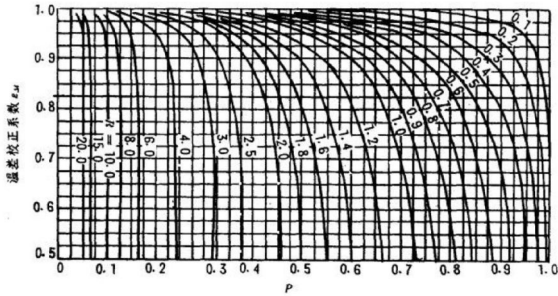
$\Delta t_1, \Delta t_2$ 可按图中所示计算。

折流情况, 平均传热温差可按逆流情况计算, 然后加以校正,

$$\Delta t_m = \epsilon_{\Delta t} \Delta t_{m\text{逆}}$$

Δt_m 折流情况下的平均传热温差

$\epsilon_{\Delta t}$ 温差校正系数



一般情况下, 罗茨真空泵排气口的管侧为 4 层, $\epsilon_{\Delta t}$ 的值不得低于 0.8。

确认了上面三个条件, 我们就可以估算管式换热器的传热面积。罗茨液环真空泵组中管式管式换热器的传热系数 K 值大致范围为 $1745\text{--}3489\text{w/m}^2\cdot\text{K}$, 通常我们设定 $K=3400\text{w/m}^2\cdot\text{K}$ 。利用传热速率公式, 计算所需换热面积:

$$A = Q_i / K \Delta t_m$$

A 换热面积, m^2 ;

K 传热系数, 此处 $K=3400\text{w/m}^2\cdot\text{K}$;

Δt_m 平均换热温差, $^{\circ}\text{C}$;

Q_i 管式换热器热负荷, kW

确定好换热面积, 实际换热面积, 我们常取计算值的 1.2 倍。

目前电厂罗茨液环真空泵组的罗茨真空泵大多为 $2250\text{m}^3/\text{h}$ 。凝汽器真空为 10Kpa (abs), 经过罗茨真空泵增压后, 管式换热器压力为 17Kpa (abs)。罗茨真空泵排气温度最高为 50°C , 电厂冷却水温度平均为 30°C , 需要降低到 31°C 。冷却水流量为 $0.6\text{m}^3/\text{s}$ 。

我们假设经过管式换热器的皆为饱和水蒸气, 30%有相变化, 70%无相变化。

按照真空严密性 $200\text{Pa}/\text{min}$ 来计算, 每小时通过管式换热器气体质量流量为: $55\text{kg}/\text{h}$

分别按照无相变化和有相变化来计算管式换热器热负荷。

$$\text{无相变化部分: } Q_i = m_1 c_{p1} \Delta t_1 = 55 * 0.7 \text{kg/h} * 2598 \text{ kJ / kg }^{\circ}\text{C} * 19^{\circ}\text{C} = 1900437 \text{kJ/h}$$

$$\text{有相变化部分: } Q_i = w_1 r_1 = 55 * 0.3 \text{kg/h} * 2372.3 \text{ kJ/kg} = 39142 \text{kJ/h}$$

$$\text{总的热负荷为: } Q_i = 1900437 \text{kJ/h} + 110311 \text{kJ/h} = 2010748 \text{kJ/h}$$

平均换热温差:

$$\Delta t_m = \Delta t_1 - \Delta t_2 / (\ln \Delta t_1 / \Delta t_2) = 14 / 2.7 = 5.19$$

$$\Delta t_m = \Delta t_1 - \Delta t_2 / (\ln \Delta t_1 / \Delta t_2) = 14 / 2.7 = 5.19$$

估算换热面积:

$$A = Q_i / K \Delta t_m = 2010748 / (3400 * 5.19) = 114 \text{m}^2$$

结论:

综上所述, 罗茨液环真空泵组中罗茨真空泵排气口管式换热器换热面积最大仅需配备 114m^2 , 过大或过小都是不合理的选择。

引用:

[1]郑美玲. 换热网络及壳管式换热器的热力过程优化[D]. 上海交通大学, 2011.

[2]韩春福. 热管换热器离散型计算方法研究[C]//1999.DOI: 10.7666/d.Y315614.

[3]张丽娜, 杨春信. 板翅式换热器分布参数模型及其性能研究[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会. [2023-10-06]. DOI: ConferenceArticle/5aa1874cc095d722208ff3b9.

[4]张周卫, 薛佳幸, 汪雅红, 等. LNG 系列缠绕管式换热器的研究与开发[J]. 石油机械, 2015. DOI: CNKI: SUN:SYJI.0. 2015-04-027.

[5]岳向吉, 巴德纯, 刘坤, 等. 干式罗茨真空泵吸气级内流动的瞬态模拟[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(9):6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7126.2012.09.18.

[6]戴映红. 气冷式罗茨真空泵的转子型线设计及流场分析[D]. 浙江工业大学, 2010. DOI: 10.7666/d.y1776263.

作者简介: 刘忠源 (1971-) 男, 江苏常州人, 工程师, 研究方向: 发电厂运行。

作者简介: 姜伟海 (1992-) , 江苏苏州人, 工程师, 研究方向: 发电厂运行。