

高功率 CO₂ 激光器换热性能的研究

韩晏生 李晓元

(华中理工大学, 武汉, 430074)

摘要: 高功率 CO₂ 气体激光器的换热性能好是器件长期稳定运行的关键环节之一。本文以板翅式热交换器为例阐明了热交换器的计算和设计方法。

关键词: 热交换器 混合气体 传热系数

Studies on heat exchange of high power CO₂ laser

Han Yansheng, Li Xiaoyuan

(Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: The performance of heat exchange is an essential technology to assure the long time stable work of high power CO₂ lasers. In this paper, the calculation of heat exchange and the design of radiator are described in detail, which use the radiators made of elliptical tubes with fins as examples.

Key words: radiator gas mixture heat-transfer coefficient

高功率 CO₂ 气体激光器的换热性能好是器件长期稳定运行的关键环节之一, 热交换器是激光器的重要组成部分。高功率 CO₂ 激光器在工业使用中往往还附加一个水冷装置。

由(9)式可以得出, 当等效输入阻抗与高频发生器输出阻抗互为共轭值时, 有:

$$Z_{mL} = Z_g^* \quad (10)$$

或 $R_{mL} = R_g, \quad X_{mL} = -X_g$

这时高频发生器的输出功率为最大值:

$$P_{max} = |V_g|^2 / 8R_g \quad (11)$$

关于高频发生器与负载间的阻抗匹配的实验研究可参考文献[3]。

四、结 论

1. 介质电容器上的电场强度应接近于放电间隙的电场强度, 即 $E_e \approx E_0$ 。
2. 在采用低介电常数的介质时, 必须采用较高的电源频率, 反之亦然。
3. 为了提高传输效率, 必须采用阻抗匹配网络, 使等效输入阻抗与高频发生器的输出阻抗互为共轭。

参 考 文 献

- 1 丘军林. 中国激光, 1994; 21(5): 377-381
- 2 Schock W, Hall Th, Wildermuth E *et al.* SPIE GCI., 1988; 1031: 76-81
- 3 王贤俊, 陈 涛, 丘军林. 激光技术, 1993; 17(5): 276-281

气体温度对激光器输出功率有很大影响,在 CO₂ 气体激光器中,气体温度升高会导致输出功率下降。我们知道,CO₂ 激光器的量子效率为 41%,也就是说,将有近 60% 的能量最后变为气体的热能。而实际上,目前工业用 CO₂ 激光器其光电转换效率一般为 15~25%,即 75~85% 的能量变为气体的热能。除此之外,在高速流动气体中,还有循环泵所作的功也在气体中转化为热能。所以,在高功率气体激光器系统中都设计有性能良好的热交换器。

在以前的千瓦级 CO₂ 激光器系统中较多采用管板式的热交换器,其结构简单,易于生产。还有一种蜂窝形绕片式热交换器,可以提高气体与冷体的接触面积,较之管板式热交换器的传热性能更好一些。

目前,一种新型的板翅式热交换器在气体激光器中得到采用,其结构如附图。它与前两种热交换器的差别是:在冷流体中装有翅片,即可进行良好的二次传热。冷流体和热流体分层交错进行换热。它的单位体积的传热面积是管板式的 15~30 倍^[1]。其传热系数比管板式的热交换器高 5~10 倍,结构也十分紧凑。

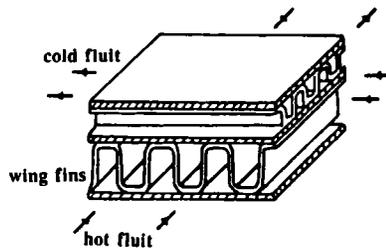


Fig. Schematic of heat exchanger with wing fins

我们对高功率 CO₂ 气体激光器进行了有关换热性能的研究,特别是在高速气流中对其有关参数进行了测试。研究表明,板翅式换热器性能良好。本文在实验的基础上进行了理论分析和实际计算,现在简要地描述如下。

已知条件:(1)工作物质:CO₂, N₂, He 三种混合气体,总气压为 13332.2Pa, CO₂:N₂:He=1:7:20。

(2)热负荷:热负荷是指放电时激光器所产生的热量,以及循环泵做功所产生的热能总和。对于一台 2kW 的 CO₂ 激光器来说,其额定输出功率要以 2.5kW 来计算,电光转换效率应取其低值 15%,则输入功率为 $2.5 \div 15\% \approx 16.67(\text{kW})$;循环泵估计约 7.3kW 用于对气体做功,即共计有 24kW 的电功率在气体中转换为热能,由热功当量 $1\text{cal} = 4.18\text{W} \cdot \text{s}$ 可推出:

$$Q = 860P \quad (Q - \text{kcal/h}, P - \text{kW})$$

则热负荷: $Q = 860 \times 24 = 20640(\text{kcal/h})$ 。

(3)气流参数:测得气体在喉道的流速为 50m/s,喉道截面为 0.0446m²,则体积流量 $V = 8028\text{m}^3/\text{h}$ 。

(4)冷流体参数:用自来水或冷水机组提供的清洁水作为热交换器的冷流体,入口水温为 15℃,流量为 4t/h。

下面进行具体计算。

1. 混合气体的参数计算

(1)混合气体的密度:混合气体的密度与温度、气压和气压比有关。混合气体为热流体,在未工作的静压状态下,一般取高于室温 10~15℃ 来计算,即取 40℃ 为宜,在 $1.01 \times 10^5\text{Pa}$ 时,气体的比重 $r_{\text{CO}_2} = 1.738\text{g/L}$, $r_{\text{N}_2} = 1.1\text{g/L}$, $r_{\text{He}} = 0.15\text{g/L}$;在气压比为 CO₂:N₂:He=1:7:20 时,可求得: $r_{\text{混}} \approx 0.444\text{g/L}$ 。

前面已知条件给定混合气体的总气压为 13332.2Pa,计算可得混合气体的密度为:

$$r_{\text{混}} \approx 0.058\text{g/L}$$

(2)混合气体的定压比热:在 13332.2Pa 气压下可分别查得三种气体的定压比热为: $C_{p\text{CO}_2}$

$= 0.2046 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$; $C_{PN_2} = 0.2485 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$; $C_{PH_2} = 1.24 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$ 。按上述气压比可求得混合气体的定压比热为:

$$C_{P混} = 0.486 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$$

(3)混合气体的温升:混合气体经放电管和循环泵压缩后都会使气体升温,用公式:

$$\Delta t_{气} = \frac{Q}{r_{混} \cdot C_{P混} \cdot V \cdot F_{截}} \quad (1)$$

式中, V 为气体流速, $F_{截}$ 为喉道截面, $V \cdot F_{截}$ 为气体体积流量,可求得:

$$\Delta t_{气} = 91.2^\circ\text{C}$$

同样用上述公式可求得冷流体的温升:

$$\Delta t_{水} = 5.2^\circ\text{C} \quad (V_{水} = 4 \text{ t/h})$$

这就是说,当入口水温为 15°C 时,出口的水温为 20.2°C 。因此,气体流经热交换后的气温一般与出口水温相等,即 20°C 左右。那么气体经循环泵压缩后再经放电区升温,共计升温 91.2°C ,即气流流进热交换器入口的气温达 111°C 。

(4)混合气体的粘度:流体的粘性大小可用粘度来度量,同一流体的粘度随流体的温度和压力而变化。在低气压下的气体粘度可不考虑气体动力粘度变化,按《深冷手册》介绍的计算公式:

$$\mu_{混} = \sum y_i \cdot \sqrt{M_i \cdot T_{ci}} \cdot \mu_i \quad (2)$$

式中, y_i 为 i 组的体积分量; M_i 为 i 组的分子量; T_{ci} 为 i 组的临界温度($^\circ\text{K}$); μ_i 为 i 组的粘度。经查表,并代入公式,可求得:

$$r_{混} = 20.4 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s/m}^2$$

(5)混合气体的导热系数:根据《深冷手册》计算公式:

$$\lambda_{混} = a \sum y_i \cdot \lambda_i + (1 + a) \frac{1}{\sum \frac{y_i}{\lambda_i}} \quad (3)$$

式中, a 在 110°C 时为 0.35 , λ_i 查表代入公式计算得:

$$\lambda_{混} = 0.0734 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

(6)混合气体的质量流量:

$$G_{混} = r_{混} \cdot V = 465.6 \text{ kg/h}$$

2. 传热计算:

传热计算公式为

$$Q = k \int_a^F \Delta t \cdot dF = k \cdot \Delta t \cdot F \quad (4)$$

式中, k 为总传热系数; Δt 为对数温差; F 为有效传热面积。

(1)总传热系数 $k_{混}$ 和 $k_{水}$ 分别用下式计算:

$$\frac{1}{k_{混}} = \frac{1}{h_{混} \cdot \eta_{混}} + \frac{1}{h_{水} \cdot \eta_{水} \cdot \frac{A_{水}}{A_{混}}} \quad (5)$$

$$\frac{1}{k_{水}} = \frac{1}{h_{水} \cdot \eta_{水}} + \frac{1}{h_{混} \cdot \eta_{混} \cdot \frac{A_{混}}{A_{水}}} \quad (6)$$

式中, h 为给热系数; η 为翅片效率; A 为传热面积。给热系数也是一个很复杂的计算, 它与放热因子, 体积流量和定压比热成正比, 与其普兰特准数 $Pr^{2/3}$ 成反比。计算得:

$$h_{\text{混}} = 75.1 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

$$h_{\text{水}} = 10226 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

翅片效率 η 按下公式计算:

$$\eta = 1 - \frac{A_2}{A_1}(1 - \eta_f) \quad (7)$$

式中, A_1 为总传热面积, 这是给定的。在本试验中热交换器传热面积为 $A_{1\text{混}} = 46.6 \text{ m}^2$; $A_{1\text{水}} = 9.9 \text{ m}^2$ 。 A_2 为二次传热面积。计算得:

$$\eta_{\text{混}} = 0.914 \quad \eta_{\text{水}} = 0.828$$

代入总传热系数公式可求得:

$$k_{\text{混}} = 66.4 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

$$k_{\text{水}} = 276.4 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

(2) Δt 对数温差的计算: 该热交换器为横流式, 即错流流动式, 用如下公式计算:

$$\Delta t = \epsilon_{\Delta t} \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (8)$$

式中, Δt 为较大温差端温差: $\Delta t_1 = t_{\text{混}} - t_{\text{水}} = 101.2 \text{ °C}$; Δt_2 为较小温差端温差: $\Delta t_2 = t_{\text{混}} - t_{\text{水}} = 4.8 \text{ °C}$; $\epsilon_{\Delta t}$ 为错流式修正系数: $\epsilon_{\Delta t} = 0.85$ 。

计算得: $\Delta t = 26.9 \text{ °C}$ 。

有了以上数据, 即可代入传热方程式中计算可得:

$$\text{气流热载体侧面: } Q_{\text{混}} = 83235 \text{ kcal/h}$$

$$\text{水流冷载体侧面: } Q_{\text{水}} = 96657 \text{ kcal/h}$$

这个计算结果比激光器额定功率为 2.5kW 输入时的热负荷 20640kcal/h 大 4 倍多。由于在实际应用中, 气流的不均匀性, 气体导流不合理, 热交换器的有效使用面积将受到影响。另外, 在水侧面上往往免不了结垢层的产生, 这都会影响传热效果。因此, 一般计算和设计时应给 1.5~2.5 的安全系数。

利用该热交换器还进行了更高功率的激光输出的试验, 其最高输出功率为 3.7kW, 在短时间内完全能承担激光器的全部换热。试验结果表明该热交换器有良好的换热性能。

这种板翅式热交换器也有其不足之处, 一是风阻较之管板式大。经气压流阻测试对于同一级别激光器, 如 2kW CO₂ 激光器, 管板式热交换器的压降为 133Pa, 而板翅式为 260Pa。第二是水的通道小, 二次冷却片的间距仅 4mm, 若有脏物流进翅片, 有可能堵塞通道^[2]。因此, 要在水侧进口附加过滤器。

参 考 文 献

- 1 杭州制氧机研究所编译. 深冷简报, 1970;(2):41~49
- 2 王 淞译. 深冷简报, 1972;(3):99~117