

一种用于冷却100W Nd:YAG激光器的热交换器

顾彦华

(西南技术物理所)

摘要: 本文介绍一种用于冷却100W Nd:YAG激光器的热交换器。文中就该热交换器设计的热力计算、机械结构及其实验、应用等情况进行了论述。

The heat-exchanger used in cooling 100 W Nd:YAG laser

Gu Yanhua

(Southwest Institute of Technical Physics)

Abstract: The heat-exchanger used in cooling 100 W Nd:YAG laser is introduced. In this paper the thermodynamical computation, mechanical structure, experiment and application on the heat-exchanger are described.

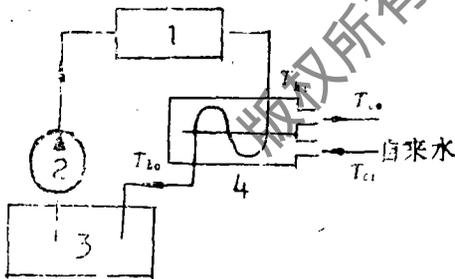


图 1

1—激光器 2—水泵 3—处理水
水箱 4—热交换器

一、前 言

用双水冷却系统取代通常直接用自来水冷却Nd:YAG激光器的方式,可使流经激光器件的冷却水保持一定的水质和洁净度,对延长激光器件的使用寿命和保证激光功率输出的稳定都是十分有益的。双水冷却系统由两个水系统组成,系统简图如图1。第一水系统是一个封闭的循环冷却系统。冷却水由泵从水箱中抽出,流经激光器、热交换器内管,返回水箱。第二水系统,直接将自来水通入热交换器壳内放掉,用来冷却第一水系统。

显然,设计一个在一定工作环境下使用的热交换器,是双水冷却系统设计的关键。下面就介绍一种用于冷却100W Nd:YAG激光器水系统的热交换器,分别就该热交换器设计的

热力计算、机械结构及实验、应用等情况进行介绍。

二、热力计算

热力计算是设计换热器的第一步。它的目的是，根据所需要传递的热量、传递介质在一定温度下的物性，以及激光器件正常工作要求的冷、热流进出口温度，来计算所需要的换热面积，为结构设计提供依据。

热力计算所依据的基本方程式^[1]为：

$$\text{传热方程式 } Q = k \cdot F \cdot \Delta T_m$$

$$\text{热平衡方程式 } Q = M_h \cdot c_{ph}(T_{hi} - T_{ho}) = M_c \cdot c_{pc}(T_{co} - T_{ci})$$

式中， Q 为传热量（单位W）； k 为传热系数（单位W/cm²·K）； F 为换热面积（单位m²）； M_h 、 M_c 分别为热、冷流体的质流速（单位kg/s）； c_{ph} 、 c_{pc} 分别为热、冷流体的定压质量比热（单位J/(kg·K)）； T_{hi} 、 T_{ho} 分别为热流体进、出口温度（单位K）； T_{ci} 、 T_{co} 分别为冷流体进、出口温度（单位K）； ΔT_m 为平均温压（单位K）。

热力计算的关键是确定平均温压 ΔT_m 和传热系数 k 。这里采用对数平均温压法进行计算。由于对流换热除了受导热规律控制外，还要受流动规律的支配，影响的因素很多。为了便于计算，做如下假定：

- (1) 传热系数和流体的物性为恒定；
- (2) 热及流动均为稳定；
- (3) 不考虑热损失。

1. 设计限定工作条件

设计限定工作条件，应以能保证器件稳定工作为前提。

(1) 确定所需传递的热量 Q

此值可由实验测定，也可根据泵浦灯消耗功率推算。这里测定 $Q = 8373.6\text{J/s}$ 。

(2) 选用流量为27L/min的水泵

$$\text{则 } M_h = \frac{27}{60} = 0.45\text{kg/s}$$

(3) 自来水压力选用1.5kg/cm²，流量为40L/min

$$\text{则 } M_c = \frac{40}{60} = 0.67\text{kg/s}$$

(4) 计算冷流进出口温差，选定 T_{co} 、 T_{ci} 值

$$Q = M_c \cdot c_p(T_{co} - T_{ci})$$

$$T_{co} - T_{ci} = \frac{Q}{M_c \cdot c_p} = \frac{8373.6}{0.67 \times 4186.8} = 3\text{K}$$

根据工作条件要求，自来水进口温度最高不能超过30℃。所以选取 $T_{ci} = 30\text{℃}$ 。

即 $T_{c,i} = 30\text{ }^{\circ}\text{C} = 303\text{K}$

$T_{c,o} = 30 + 3 = 33\text{ }^{\circ}\text{C} = 306\text{K}$

(5) 计算热流进出口温差, 选定 $T_{h,o}$ 、 $T_{h,i}$ 值

$$T_{h,i} - T_{h,o} = \frac{8373.6}{0.45 \times 4186.8} = 4.4\text{K}$$

为保证器件工作稳定, 从器件流出的冷却水温应控制在 $40 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 所以选取 $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

即 $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C} = 313\text{K}$

$T_{h,o} = 40 - 4.4 = 35.6\text{ }^{\circ}\text{C} = 308.6\text{K}$

2. 求平均温压 ΔT_m

平均温压和冷、热流体相对流向及换热面的组合方式有关。所以首先设计换热器的流动方式(图2), 安排冷流体在壳内侧流动两个行程, 热流体在管内经多次交叉后流回水箱。由热平衡方程式推得(推导从略):

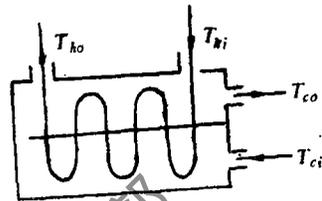


图2

$$\begin{aligned} \Delta T_m &= \frac{\sqrt{(T_{h,i} - T_{h,o})^2 + (T_{c,o} - T_{c,i})^2}}{\ln \frac{T_{h,i} + T_{h,o} - T_{c,i} - T_{c,o} + \sqrt{(T_{h,i} - T_{c,o})^2 + (T_{c,o} - T_{c,i})^2}}{T_{h,i} + T_{h,o} - T_{c,i} - T_{c,o} - \sqrt{(T_{h,i} - T_{c,o})^2 + (T_{c,o} - T_{c,i})^2}}} \\ &= \frac{\sqrt{4.4^2 + 3^2}}{\ln \frac{40 + 35.6 - 30 - 33 + \sqrt{4.4^2 + 3^2}}{40 + 35.6 - 30 - 33 - \sqrt{4.4^2 + 3^2}}} = 5.9\text{K} \end{aligned}$$

3. 求传热系数 k

传热系数 k 不仅取决于流体的流动规律和流动的沿程阻力, 而且和流体的物性有关, 其表达式为:

$$k = s_i \cdot \rho \cdot c_p \cdot v$$

式中, s_i 为斯登准则值, 此值与流体的流动状态(雷诺数 Re)、普朗特准则数 Pr 和沿程阻力系数 f_l 有关; ρ 为流体的密度(单位 kg/m^3); c_p 为流体的定压质量比热($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$); v 为流体的流速(m/s)。

计算以平均温度 $(313 + 308.6)/2 = 310.8\text{K}$ 为定性温度, 由物性表查得 310.8K 时水的有关物性为:

$c_p = 4178.4\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

$\nu = 0.658 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ (运动粘度);

$\lambda = 0.628\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (导热系数); $\rho = 995\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

换热器内管选用内径 $\phi = 12\text{mm}$ 的铜管, 热流在管内的流速为:

$$v = \frac{M_h}{\pi R^2} = \frac{450}{\pi \times 0.6^2 \times 100} = 3.98 \text{ m/s}$$

雷诺数 R_e 为

$$R_e = \frac{D \cdot v}{\nu} = \frac{0.012 \times 3.98}{0.658 \times 10^{-6}} = 7.26 \times 10^4$$

雷诺数 $R_e > 10^4$ ，表明管内流动状态为紊流。假定使用的铜管为光管，由管内流动沿程阻力系数 f_f 与 R_e 值关系的曲线图上查得流体沿程阻力系数 $f_f = 0.0048$ 。[2]

普朗特准则数 P_r 为

$$P_r = \frac{v}{\alpha} = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} = \frac{0.658 \times 10^{-6} \times 995 \times 4178.4}{0.628} = 4.35$$

式中， α 为导热系数。

斯登准则值 s_t 用热量传递与动量传递的冯卡门类比律表达式求，

$$\begin{aligned} s_t &= \frac{f_f/8}{1 + 5\sqrt{f_f/8} \left\{ (P_r - 1) + \ln \left[1 + \frac{1}{6} (5P_r - 5) \right] \right\}} \\ &= \frac{0.0048/8}{1 + 5\sqrt{0.0048/8} \left\{ (4.35 - 1) + \ln \left[1 + \frac{1}{6} (5 \times 4.35 - 5) \right] \right\}} \\ &= 2.19 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

传热系数

$$k = s_t \cdot \rho \cdot c_p \cdot v = 2.19 \times 10^{-4} \times 995 \times 4178.4 \times 3.98 = 3622.27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

4. 计算需要的换热面积

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta T_m$$

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta T_m} = \frac{8373.6}{3622.27 \times 5.9} = 0.392 \text{ m}^2$$

三、结构设计

求出换热面积，就可以进行结构设计。由于热力计算是在忽略一些影响因素的前提下进行的，所以进行结构设计时，要适当考虑采用安全系数。该热交换器设计为间壁式，方形壳体内存铜管。其结构如图3。

四、实验、应用情况分析

按设计要求的条件，将该热交换器接入双水冷却系统。使用该水系统冷却处于100W工作

状态的Nd:YAG激光器, 连续工作30min, 水箱内温度变化情况如图4。

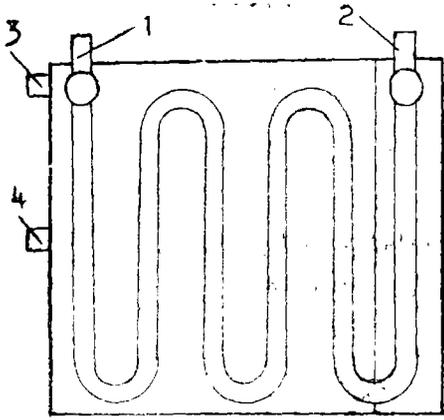


图 3

1, 2—分别为热流进出口
3, 4—分别为冷流进出口

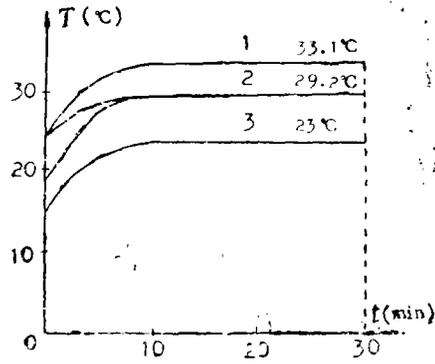


图 4

1— $T_{ci}=21.5^{\circ}\text{C}$ $T_{co}=24.5^{\circ}\text{C}$
2— $T_{ci}=16^{\circ}\text{C}$ $T_{co}=19^{\circ}\text{C}$
3— $T_{ci}=11^{\circ}\text{C}$ $T_{co}=14^{\circ}\text{C}$

图中可以看出, 系统进入热平衡状态的时间约为8~10min, 热流出口温度 (即平衡时水箱内水的温度) 与水箱内水的初始温度关系不大, 其值随第二水系统的进水温度 (即自来水温度) 变化而变化。当第二水系统的进水温度升高时, 其值也随着升高, 而且二者升高的幅度大体相当。因此, 要保证器件能稳定工作, 需对第二水系统的进水温度进行必要的限制, 以不超过24°C为宜。

经多次实验, 第二水系统的进出口温差均为3°C ($T_{co} - T_{ci} = 3$), 与设计值相符。经装机运行, 器件工作正常, 说明此热交换器设计是成功的。

另外, 从设计和实验中可以看出, 内管流体的流速对传热系数影响很大, 因此, 在可能的条件下, 适当选用较大流量的水泵, 可以提高换热效果, 减小所需的换热面积。

参 考 文 献

[1], [2] 《工程对流换热》, 机械工业出版社, 北京, 1982年。

收稿日期: 1989年1月31日。

· 简 讯 ·

分析络合物的PC光谱测量仪

洛斯·阿拉莫斯国家实验室改进了一种离子阱质谱分析仪, 用来探测比现在用于医学和实验室分析的类似测试仪器探测的复杂4倍的分子。该仪器中尺寸为原来一半的新式电极装置, 可以捕获存在于生物、矿物燃料和化学合成污染物中的大分子。预计它的价格为已在市场销售的体积较大的光谱仪的四分之一。

译自 L.& O., 1988, Dec., P.12.

张贤义 译 刘建卿 校