

# 增压锅炉大容量蒸汽机械雾化喷油器的设计及试验研究

张海龙<sup>1</sup>, 吴国松<sup>1</sup>, 李国镔<sup>2</sup>, 王 僊<sup>1</sup>

(1. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 黑龙江 哈尔滨 150078;

2. 海军驻七〇三研究所军事代表室 黑龙江 哈尔滨 150078)

**摘要:** 对某船用增压锅炉大容量蒸汽机械雾化喷油器的设计进行了详细的探讨, 采用几种流量系数修正算法对喷油器进行了验证性计算, 并将结果与其流量特性试验研究结果进行对比分析, 结果表明: 应用流量系数  $\mu_{kj} = 0.405A_k^{-0.75}$  修正方法, 计算结果与试验标定结果最大误差为 1.8%, 该修正方法可以应用于船用蒸汽机械雾化喷油器的设计计算。

**关键词:** 增压锅炉; 喷油器; 修正计算; 流量特性

中图分类号: TK223.23

文献标识码: A

## 引言

船用蒸汽锅炉有体积紧凑、启动快、机动性好的特点, 其炉膛容积热强度很高, 高热强度炉膛一般布置少量的单个大容量的喷油器, 要求其必须具有火焰尺寸小、充满度高、燃烧充分的特点。蒸汽机械雾化喷油器以其流量调节比大、雾化蒸汽耗量少、雾化效果好等特点而被国外广泛应用于船用增压锅炉。

目前喷油器设计存在的主要问题是设计出力与实际出力相差较大, 结构设计不够合理。喷油器流量和雾化角的计算基本方法有最大流量理论法和动量方程法。最大流量理论法是通过假设使喷口流量系数最大时, 喷嘴仍能稳定工作来计算流量系数。动量方程法是通过建立喷口处燃油流动的动量方程推导出的流量系数法。然而, 不论用哪一种计算方法, 均与实际情况有一定误差, 设计时必须进行修正。目前采用的修正分为纯经验法和半经验法两类, 但是每一种修正方法只能适用于一定的条件范围。因此, 符合实际的喷油器设计计算方法尚需在实践中进一步探索。

本研究采用不同经验修正算法, 对某船用增压锅炉蒸汽机械雾化喷油器进行设计计算, 并进行了大量的流量特性试验研究, 在此基础上, 给出一种新

的经验修正算法, 并同试验结果进行了比较验证。

## 1 喷油器的结构特点和设计依据

蒸汽机械雾化喷油器主要由多孔分油板和雾化片构成, 燃油从一个内腔经多孔分油板进入雾化片的燃油切线槽, 继而从喷口旋流喷出。雾化蒸汽从另一个内腔进入雾化片的蒸汽切线槽, 从雾化片与蒸汽挡板之间的环状间隙喷出。经过压力旋流雾化和蒸汽辅助雾化共同作用的燃油和雾化蒸汽混合后从喷口同轴喷出形成雾化锥。该型喷油器结构如图 1 所示。设计条件为: 燃油粘度  $0.182 \text{ cm}^2/\text{S}$ ; 燃油容重  $860 \text{ kg}/\text{m}^3$ ; 进油压力  $1.8 \text{ MPa}$ ; 额定出力  $1500 \text{ kg}/\text{h}$ ; 雾化角  $53^\circ - 65^\circ$ 。

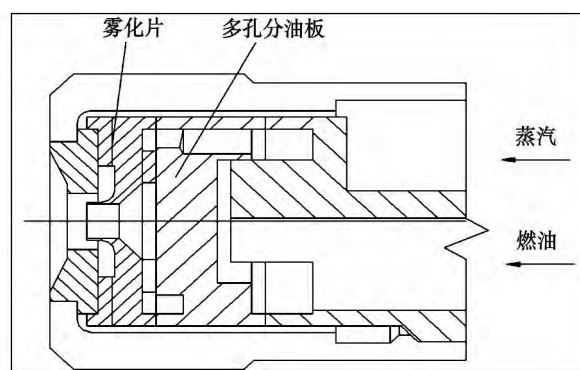


图 1 喷油器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the oil sprayer

## 2 结构设计及参数选择

### 2.1 喷口直径 $d_e$

根据最大流量理论:

收稿日期: 2013-04-25; 修订日期: 2013-11-07

作者简介: 张海龙(1981-), 男, 黑龙江佳木斯人, 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 高级工程师。

$$G = 0.36\mu\pi r_c^2 \sqrt{2gP_0\gamma} \quad (1)$$

式中:  $G$ —喷嘴喷油量  $\text{kg/h}$ ;  $\mu$ —喷嘴流量系数;  $r_c$ —喷嘴口径  $\text{mm}$ ;  $P_0$ —进油压力  $\text{kg/cm}^2$ ;  $\gamma$ —燃油重度  $\text{kg/m}^3$ 。

雾化喷嘴的流量系数取决于结构特性系数  $A$ :

$$A = \pi R r_c / \sum f \quad (2)$$

式中:  $R$ —旋转半径  $\text{mm}$ ;  $\sum f$ —切向槽总面积,  $(\text{mm})^2$ ,  $\sum f = nbh$ ;  $b$ —切向槽宽度  $\text{mm}$ ;  $h$ —切向槽深度  $\text{mm}$ ;  $n$ —切向槽数。

如果其它尺寸不变,只增大  $r_c$ ,喷嘴的结构特性系数  $A$  增加,雾化角要加大。 $A$  增加,表示旋转强烈,这一因素可使雾化质量改善;但是, $r_c$  增加后喷嘴出口处油膜变厚,雾化质量变差。设计时通常根据雾化角经验公式或流量经验公式推算出  $A$  和  $\mu$ ,然后按流量公式计算出喷嘴口径,该型雾化片喷嘴口径  $d_c = 5.6 \text{ mm}$ 。

### 2.2 切向槽数 $n$

切向槽数  $n$  推荐取 3-6,切向槽数增加有利于雾化矩流量密度沿圆周分布均匀,获得较好的雾化质量,但加工复杂。大容量雾化片的切向槽数以 6 个为宜。

### 2.3 切向槽宽度 $b$ 和深度 $h$

在喷嘴口径不变的条件下,由式(2)知,喷嘴结构特性系数  $A$  主要由旋流半径  $R$  及切向槽总面积  $\sum f$  决定,切向槽面积的变化应与旋流室和喷嘴口径的变化相适应,力求得到最佳的  $A$  值。根据经验,切向槽总面积  $\sum f \approx (1.1 - 1.2)$  倍喷嘴口径面积时较佳。该型雾化片切向槽深度  $h$  取  $1.8 \text{ mm}$ ,切向槽宽度  $b$  取  $2.8 \text{ mm}$ 。

### 2.4 旋流半径 $R$

其它尺寸不变,增大旋流半径  $R$ , $A$  增加,雾化角增大,由于旋转加强,使中心气体旋涡的半径加大,因此流量系数  $\mu$  减小,喷油量减小。旋流半径选择依据经验,通常  $R = (1.5 - 6) r_c$ ,最佳的范围为  $R = (2 - 3.5) r_c$ ,且必须保证  $R \geq r_c + b/2$ ,该型雾化片旋流半径  $R$  取  $4.6 \text{ mm}$ 。则旋流室直径  $D = 2R + b = 12 \text{ mm}$ 。

喷油器雾化片主要结构尺寸如表 1 所示。雾化片结构如图 2 所示。

表 1 雾化片主要结构尺寸

Tab.1 Main structure and dimensions of the atomizer plate

喷嘴口径 /mm	切向槽数 /个	切向槽宽 /mm	切向槽深 /mm	旋流半径 /mm
5.6	6	2.8	1.8	12

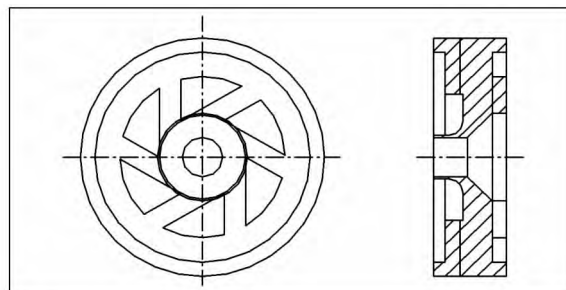


图 2 雾化片结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the structure of the atomizer plate

## 3 设计计算

喷油器的设计计算主要是喷油量的计算及雾化角的计算。设计过程中,理论计算与实际情况有一定误差,这是因为实际燃油是粘性液体。实际蒸汽机械雾化喷油器的结构和型式很多,蒸汽介入对流量的影响尚需进一步研究,因而需通过大量试验研究对理论计算进行修正。根据最大流量理论法,为了计算喷油量,需要知道流量系数  $\mu$ ,根据理论分析可得,流量系数决定于喷嘴的结构尺寸,即喷嘴的结构特性系数  $A$ ,而雾化角也决定于结构特性系数  $A$ 。目前,广泛使用的经验系数法和经验公式法主要是对结构特性系数  $A$  及流量系数  $\mu$  进行修正。

针对本型雾化片结构尺寸,依据以下修正算法进行验证计算进行比较分析。

### 3.1 纯经验法

根据西安热工研究所总结大量试验得出的纯经验修正方法<sup>[3]</sup>:

流量修正系数

$$\mu_{sj} = 0.88\mu$$

式中:  $\mu_{sj}$ 、 $\mu$ —分别表示实际流量系数和理论流量系数;

对本例进行修正:  $A = \pi R r_c / \sum f = 1.338$ ;  $\mu$

$= f(A)$  ,查表  $\mu = 0.385$  ;  $\mu_{sj} = 0.88 \times 0.385 = 0.339$  ;  $G = 0.36\pi\mu_{sj}r_c^2 \sqrt{2gP_0\gamma} = 1\ 655\ \text{kg/h}$  .

### 3.2 格列计算法

格列在最大流量理论的基础上 ,考虑摩擦和压力损失 ,并在实验的基础上 ,提出了当量有效几何特性  $A_k$  的概念 ,并应用经验公式  $\mu_k = 0.451A_k^{-0.69}$  (当  $A_k = 0.37 - 4.65$  时) 进行修正计算 ,利用格列计算法对本计算有  $A_k = 1.4$  ;  $\mu_k = 0.451A_k^{-0.69} = 0.358$  ;  $G = 0.36\pi\mu_{sj}r_c^2 \sqrt{2gP_0\gamma} = 1\ 749\ \text{kg/h}$  .

### 3.3 实验流量系数修正法

以最大流量理论为基础 ,用实验流量系数  $\mu_{sy}$  对最大流量理论的流量系数进行修正 ,亦即用实验流量系数综合考虑各种因素引起的计算误差。当喷嘴设计出力  $\geq 300\ \text{kg/h}$  ,喷嘴几何特性系数  $A = 0.5 - 3.0$  时 ,流量系数修正公式  $\mu_{sy} = \mu - 0.125 + A/30$  .对本例进行修正计算得出  $A = 1.338$  ;  $\mu = 0.385$  ;  $\mu_{sy} = 0.305$  ;  $G = 0.36\pi\mu_{sy}r_c^2 \sqrt{2gP_0\gamma} = 1489\ \text{kg/h}$  .

### 3.4 经验公式法

针对该种结构型式雾化片 ,中船重工第 703 研究所做了大量试验 ,总结出流量系数修正经验公式:

$$\mu_{kj} = 0.405A_k^{-0.75}$$

式中:  $\mu_{kj}$  —修正流量系数;  $A_k$  —当量有效几何特性系数。

据此计算得:  $A_k = 1.4$  ;  $\mu_{kj} = 0.405A_k^{-0.75} = 0.315$  ;  $G = 0.36\pi\mu_{kj}r_c^2 \sqrt{2gP_0\gamma} = 1539\ \text{kg/h}$  .

## 4 试验及分析

针对该蒸汽机械雾化喷油器 ,在常压下 ,采用多组结构参数 ,进行喷油试验研究。采用的雾化片结构尺寸如表 2 所示。

表 2 雾化片主要结构尺寸

Tab. 2 Main structure and dimensions of the atomizer plate

雾化片 编号	喷口直径 /mm	切向槽数 /个	切向槽宽 /mm	切向槽深 /mm	旋流半径 /mm
1	5.6	6	2.8	1.8	12
2	5.6	6	2.8	2.0	12
3	5.6	6	3.0	2.0	12
4	5.6	6	3.0	1.9	12
5	5.6	6	3.0	1.8	12

试验研究了没有雾化空气和雾化空气压力 0.25 MPa 两种工况下几种结构尺寸雾化片喷油流量。试验工况及测试结果如表 3 所示。喷油压力为喷油器入口前压力。

表 3 喷油流量试验结果

Tab. 3 Oil spraying flow rate test results

雾化片 编号	燃油压力 /kg · cm <sup>-2</sup>	无雾化汽时喷油 流量/kg · h <sup>-1</sup>	有雾化汽时喷油 流量/kg · h <sup>-1</sup>
1	18.0	1559	1544
2	18.0	1685	1673
3	18.0	1769	1752
4	18.0	1704	1695
5	18.0	1647	1632

图 3 为切向槽  $b \times h = 1.8\ \text{mm} \times 2.8\ \text{mm}$  的雾化片的流量曲线 ,表 4 为几种修正算法与无雾化汽时流量试验值对比分析。

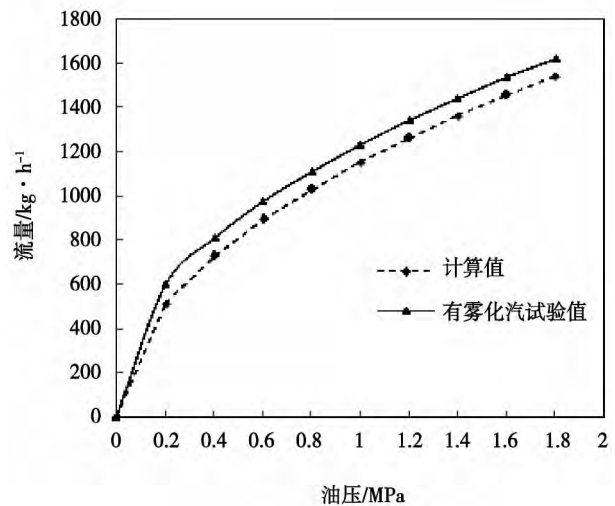


图 3 雾化片流量曲线

Fig. 3 Flow rate curves of the atomizer plate

由图 3 可知 ,雾化片流量试验值低于计算值 ,与理论分析相符。由表 4 可知 ,修正方法 1 ,方法 2 计算所得的喷油器流量结果与试验值误差相对较大 ,而方法 3、方法 4 的计算结果与试验值误差均在 5% 以内 ,计算精度可以满足工程使用需要。

## 5 结 论

(1) 应用流量系数  $\mu_{kj} = 0.405A_k^{-0.75}$  经验公式

修正方法 ,计算结果与冷态试验台上的试验标定结果最大误差为 1.8% ,结果表明该修正方法适用于

蒸汽机械雾化喷油器的流量计算 ,可以应用于船用蒸汽机械雾化喷油器的设计计算。

表 4 几种修正算法与无雾化汽时流量试验值对比分析

Tab.4 Contrast and analysis of several correction calculation methods and the test values of the flow rate when no steam is provided for atomization

雾化片 编号	燃油压力 /kg · cm <sup>-2</sup>	计算流量/kg · h <sup>-1</sup>				与试验值的差别/%			
		方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
1	18.0	1655	1749	1489	1539	6.2	12.2	4.5	1.3
2	18.0	1804	1876	1631	1661	7.1	11.3	3.2	1.4
3	18.0	1933	1964	1767	1744	9.3	11.0	0.1	1.4
4	18.0	1847	1900	1679	1681	8.4	11.5	1.5	1.3
5	18.0	1761	1832	1596	1617	6.9	11.2	3.1	1.8

(2) 由喷油流量试验结果表明 ,喷口直径 5.6 mm ,切向槽  $b \times h = 18 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$  的雾化片满足本例中的设计要求 ,可以应用于某船用增压锅炉中。

(3) 研究结果还表明在相同的喷油压力下 ,有雾化空气时 ,喷油器流量比没有雾化空气时小。分析认为 ,雾化气作用主要是增强喷油器的雾化效果 ,喷油器工作时 ,雾化气占据了一部分流通面积 ,导致燃油实际流通面积减小 ,从而使喷油量有所降低。

参考文献:

[1] 王建志. 增压锅炉蒸汽机械雾化喷油器流量特性研究[J]. 电站系统工程 2006 22(5):23-25.

WANG Jian-zhi. Study of the flow characteristics of the steam and mechanically atomized oil sprayer of a supercharged boiler [J]. Power Plant System Engineering . 2006: Vol. 22 No. 5 23 -25.

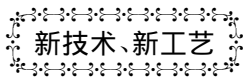
[2] 李来春. 大容量蒸汽机械雾化喷油器控制系统设计研究[J]. 热能动力工程 2001 ,17(4):387-389.

LI Lai-chun. Study of the design of a system controlling a large capacity steam and mechanically atomized oil sprayer [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power ,2001 ,17(4):387-389.

[3] 赵钦新 惠世恩. 燃油燃气锅炉[M]. 西安: 西安交通大学出版社 2000.

ZHAO Qin-xin ,HUI Shi-en. Oil and gas-fired boilers [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press 2000.

( 陈 滨 编辑)



### 简单循环装置的技术规范

据《Gas Turbine World》2013 年 1-2 月刊报道 ,在使用天然气、船用设备分馏油燃料时 ,用于电力、机械驱动和船舶推进燃气轮机的工业额定值取决于在 ISO 条件下的总输出功率。

下面列出了一些重要的换算关系:

效率

$$\frac{3413}{\text{Btu/kWh}} = \frac{2545}{\text{Btu/hp-h}} = \frac{0.138}{16/\text{hp-h}} \quad \frac{860}{\text{kcal/kW}} = \frac{641}{\text{kcal/hp-h}} = \frac{0.063}{\text{kg/hp-h}}$$

当量能量

$$1 \text{ kWh} = 859.9 \text{ kcal} = 3413 \text{ Btu} \quad 1 \text{ hp-h} = 0.746 \text{ kWh} = 2545 \text{ Btu}$$

换算系数

kW 到 hp            1.341 × kW = 马力

hp 到 kW            0.746 × hp = 千瓦

Btu 到 kJ            1.055 × Btu = 千焦

kJ 到 Btu            0.948 × kJ = 英制热量单位

( 吉桂明 摘译)

**ticles in a Parallel Dual-speed Dual Fluidized Bed** [刊, 汉] SHUANG Wei, LU Xiao-feng, HE Hong-hao, WANG Quan-hai ( Education Ministry Key Laboratory on Low Grade Energy Utilization Technologies and Systems, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(2). - 165 - 170

The authors put forward a parallel dual-speed dual fluidized bed technology and conducted an experimental study of the exchange characteristics of coarse and fine particles. The research results show that different operating and structural parameters can always bring about an influence on the exchange of particles in a definite direction but the extent of such an influence varies in various particle diameters. The air speed remarkably influences the exchange of particles in a diameter below 0.6 mm, maximally attaining 100% (total exchange). The difference of the partition wall height and the coarse bed height exists an optimum value and makes the exchange effectiveness of particles in a definite direction be optimum. When the fine bed height increases to a certain value, there will emerge a “reverse flow” phenomenon of the fine particles. Under various operating conditions, the average diameter of particles in the fine bed is only 0.55 mm maximally. **Key words:** circulation fluidized bed, parallel, dual speed, dual bed, particle exchange

**增压锅炉大容量蒸汽机械雾化喷油器的设计及试验研究 = Design and Experimental Study of a Large-capacity Steam-mechanically-atomized Oil Sprayer in a Supercharged Boiler** [刊, 汉] ZHANG Hai-long, WU Guo-song, WANG Xuan (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078), LI Guo-bin (Naval Representative Office Resident in Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(2). - 171 - 174

A detailed investigation was made of the design of a large-capacity steam-mechanically-atomized oil sprayer in a marine supercharged boiler and a verification calculation was conducted of the oil sprayer by using several flow rate coefficient correction calculation methods. On this basis, the calculation results were analyzed and compared with the test results of the flow rate characteristics. It has been found that by using the flow rate coefficient  $\mu_{kj} = 0.405A_k^{-0.75}$  empirical formulae as the correction calculation method, the calculation results have a maximal error of 1.8% as compared with the test calibration results. The correction calculation method can be used in design and calculation of marine steam-mechanically-atomized oil sprayers. **Key words:** supercharged boiler, oil sprayer, correction calculation, flow rate characteristics

**基于燃料特性实时修正的煤气锅炉热效率在线监测方法 = Method for On-line Monitoring the Thermal Efficiency of a Coal-gas-fired Boiler Real-time Corrected Based on the Fuel Characteristics** [刊, 汉] YE Ya-lan