

狭缝结构对船用排气引射装置气膜冷却性能影响的模拟研究

元晓川, 白中祥

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 船用燃气轮机的排气温度很高, 为了降低排气管道和排气烟羽的红外辐射, 在排气喷管上方安装排气引射装置, 利用引射原理卷吸环境中的冷空气, 降低排气温度, 同时在壁面上形成冷却气膜, 防止壁面温度升高。排气引射装置的扩压管为多级圆环结构组成, 文中利用数值计算的方法模拟了扩压管圆环间狭缝结构对壁面温度的影响, 得到了壁面上的温度分布, 确定了冷却气膜的长度, 为扩压管的设计提供了参考。

关键词: 排气; 引射; 扩压管; 冷却气膜

中图分类号: TK14; U661.71 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)04-0042-05

Numerical Analysis of Slots Structure for Film Cooling on Ejector Systems of Marine Exhaust Device

YUAN Xiao-chuan, BAI Zhong-xiang

(College of mechanical and power engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The exhaust temperature of marine gas turbine is very high. In order to reduce infrared radiation in exhaust pipe and exhaust plume, an ejector device is needed to be installed above the exhaust pipe. The temperature of exhaust gas is reduced by suction of cold air and a cooling gas film on pipe wall to prevent temperature rise. The diffuser pipe of the ejector device is composed of multilevel ring structure. Numerical simulation was applied to simulate the influence of multilevel ring structure on the temperature of pipe wall. The wall temperature distribution and length of cooling gas film was obtained. The purpose was to provide reference for design of diffuser pipe.

Key words: exhaust; ejector; diffuser pipe; cooling gas film

燃气轮机在现代舰船中得到了广泛应用。它能为舰船提供强大的动力, 但燃机的高温排气也成为红外导弹的追踪目标。为降低红外辐射, 提高舰船

的生命力, 现代舰船排气系统采用排气引射装置来抑制红外辐射, 其中应用最广的是由波瓣喷管和混合管组成的排气引射系统^[1-2]。

收稿日期: 2012-02-20

作者简介: 元晓川(1985—), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为船用排气引射系统的优化设计。

研究表明,300 ℃的金属壁面,其辐射能力为4 kW/m²,为相同温度下排出气体辐射能力的8.6倍^[3],所以降低排气管道的壁面温度在排气引射系统的设计中非常重要。目前排气引射系统中的扩压管为多级圆环结构,被引射流通过圆环之间的狭缝进入管道内部,同时在壁面上形成冷却气膜保护壁面,以达到降低红外辐射的目的。

目前国内针对排气引射系统的整体结构进行了较多的实验和数值研究^[4-8],但针对扩压管狭缝结构的研究较少,同时壁面上的冷却气膜也很难通过实验进行测量。文中针对不同的狭缝结构形式进行了数值模拟,分析了狭缝结构对壁面温度和气膜长度的影响,为扩压管的优化设计提供了一些参考。

1 排气引射原理

排气引射系统利用发动机的高温高速排气通过扩压环间的狭缝吸入周围低温流体,并与主流掺混,形成冷却气膜贴附在烟道壁面上,从而降低排气管壁及排气的温度,达到降低红外辐射的目的^[7]。如图1所示,高温高速气体从主喷管中喷出,在混合管内形成负压区,周围环境中的冷空气从引射口(狭缝)被卷吸到混合管中与高温气体进行混合。

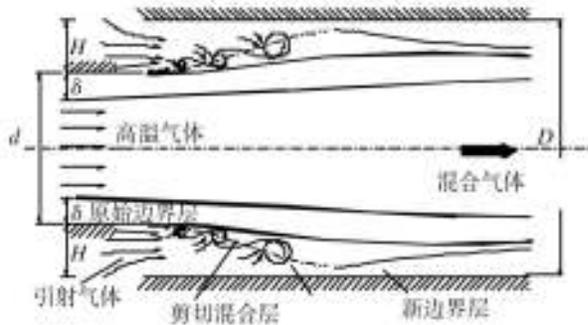


图1 引射原理示意

Fig. 1 Schematic of ejection flow

由于黏性作用,在高温气体与卷吸的冷流体之间形成类似后台阶分离流动的剪切混合层。一方面,混合层逐渐向管壁发展,另一方面,混合层携带着大量的冷流体逐渐向混合管中心区域发展。当达到一定的距离以后,剪切层发展到混合管的壁面附近,由于固体壁面的存在,剪切层重新发展成为新的边界层。在此过程中,混合管中心的流体与卷吸流

体之间的混合进一步加强。最终,重新发展的边界层流动伴随着中心区域的流体以比较均匀的温度从混合管出口流出^[7]。

为了使排气管道完全处在冷却气膜的包裹之中,实际设计中采用了4~6级的多级结构^[9](如图2所示),一方面可以增加引射流量,另一方面可以多次利用被引射流产生冷却气膜包裹壁面。为了确定每一级狭缝产生的冷却气膜的长度,文中针对单级狭缝的引射流动展开。

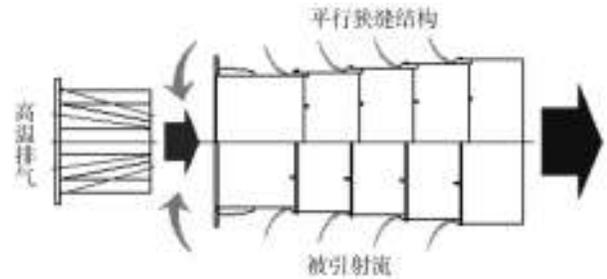


图2 排气引射系统示意

Fig. 2 Schematic of exhaust ejector systems

2 引射流动计算模型及边界条件

2.1 计算模型

文中着重关注下游壁面上的温度分布和引射流产生的气膜长度。考虑到引射狭缝相对于整个装置的面积非常小,在获得已有全尺寸模型计算结果的基础上,单独对狭缝处建立模型,细化网格,以得到更加精确的结果。计算模型如图3所示。



图3 计算模型及边界条件示意

Fig. 3 Schematic of simulation model and the definition of boundary conditions

图3中两级壁面均取2.5 mm厚的钢板。考虑到

模型的对称性,实际计算中对模型进行对称简化。周绍荣^[6]、马会明^[8]等人对热态条件下引射系统的性能进行了详细的实验研究和模拟计算。根据计算的结果可知,引射装置入口的平均温度为540~560 K,所以文中选取高温主流的入口温度为550 K,主流气体的物性参数取相应温度下的数值;周围环境中被引射流的温度设定为293 K。

文献[8]中对 $k-\varepsilon$ 、 $S-A$ 和 $k-\omega$ 湍流模型进行了比较。研究发现, $k-\omega$ 模型结果的偏差保持在4%以内; $S-A$ 模型的整体偏差约为15%; $k-\varepsilon$ 模型的偏差较大。这是因为 $k-\omega$ 模型采用大尺度的湍流频率 ω 方程,克服了 ε 方程的近壁缺陷,能更准确地模拟分离流动。因此,笔者采用 $k-\omega$ 湍流模型,非稳态计算过程中时间步长为 2×10^{-4} s,共计算3 s。计算中使用SIMPLEC算法,湍动能、湍流耗散项及动量方程均采用二阶迎风格式。

2.2 模型汇总

狭缝的结构差异主要体现在狭缝的高度(H)和狭缝的重叠长度(L)的变化上(如图4所示)。

图4中①处平板表示混合管的直管段,总长度保持不变,均为300 mm;②处平板表示扩压管段,总长度为600 mm + L ,随重叠长度的增减而变化。

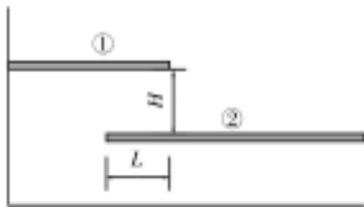


图4 狭缝结构示意图

Fig. 4 Schematic of slot structure

狭缝增高可以引射更多的冷空气,但压力损失也会增加,从而降低燃气轮机的功率。重叠长度减小也能增加引射流量,但过短的重叠长度将降低引射装置的结构强度,也不利于安装,同时可能导致主流的泄漏。

将文中的模型分成3组情况进行对比。

1) 对比狭缝的高度。狭缝高度用 H 表示,分别为7.5, 10, 12.5, 15 mm。

2) 对比重叠长度。重叠长度用 L 表示,分别为0, 10, 20, 30 mm。

3) 对比入口主流速度。主流入口速度用 v 表示,分别为10, 20, 25, 30, 35, 40 m/s。

3 计算结果分析

3.1 壁面温度的分布

3.1.1 狭缝高度对壁面温度的影响

当重叠长度均为20 mm,主流的入口速度均为30 m/s时,图5中 x 轴上坐标表示扩压管上的点的位置。考虑到主流和被引射流的掺混发生在狭缝台阶的后部区域,主流不至于影响到狭缝处的重叠部位,所以 x 轴上坐标从狭缝台阶处开始,即 $x=300$ mm处。 y 轴上坐标表示扩压管上相应点的温度,均取为下游壁面的内壁面温度。后文图6,图7中的坐标亦如上所述。

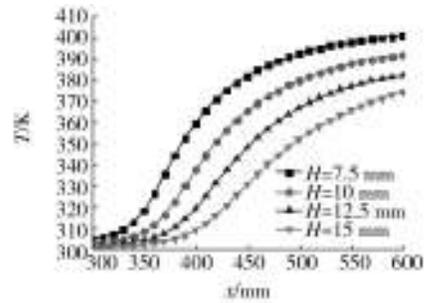


图5 不同狭缝高度时壁面温度曲线

Fig. 5 Wall temperature curves of different slot heights

从图5中可以看到,狭缝越高,壁面温度越低,并且4个模型中均存在壁面温度跃升的区域。在实际设计中扩压管的长度应尽量短于温度跃升的区域。

壁面温度较低的区域和冷却气膜的长度是相对应的,扩压管的长度应短于气膜的长度。

3.1.2 重叠长度对壁面温度的影响

从图6中可以看到,当狭缝高度均为10 mm、主流入口速度均为30 m/s时,重叠长度对壁面温度的影响较小, $L=10, 20, 30$ mm的3种模型中温度曲线几乎完全一致, $L=0$ mm时壁面温度只有略微降低。考虑到实际安装问题和防止主流从狭缝处泄漏, $L=0$ mm的模型仅作为对比,不推荐实际使用。

3.1.3 主流入口速度对壁面温度的影响

从图7中可以看到,当狭缝高度均为10 mm,重

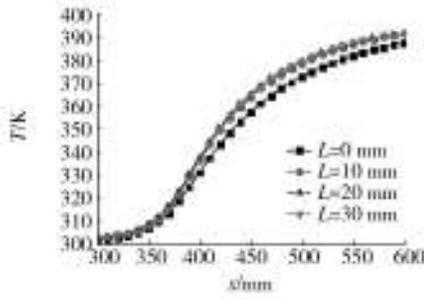


图6 不同重叠长度时壁面温度曲线

Fig. 6 Wall temperature curves of different overlap length

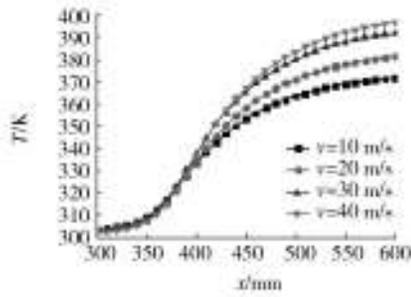


图7 不同主流速度时壁面温度曲线

Fig. 7 Wall temperature curves of different mainstream speed

叠长度均为 20 mm 时,在 300 ~ 400 mm 的区域,主流速度对壁面温度的影响不大,说明此区域处在冷却气膜的稳定包裹之中。在 $x > 400$ mm 的区域,主流速度越大壁面温度越高,这是由于剪切混合层发展到壁面后,冷却气膜破裂,新边界层形成,流速越大与壁面的对流换热越强造成的。

3.2 冷却气膜长度的比较

从图 1 中可以看到剪切混合层发展到壁面时会形成一个较大的分离再附漩涡。把温度场云图和流线图叠加可以看到,冷却气膜终止于分离再附漩涡的前缘位置,如图 8 所示。通过对此漩涡位置的分析,可以确定冷却气膜的长度。各个模型均取分离再附漩涡稳定存在的时刻,如图 9 所示。

3.2.1 不同狭缝高度下气膜长度的比较

当重叠长度均为 20 mm、主流速度均为 30 m/s 时,上述 4 种模型对应的流线图如图 10 所示。

通过对漩涡前缘位置的分析可以确定冷却气膜的长度(L_0),并且把冷却气膜的长度和狭缝的高度相比,求得一个无量纲比值 L_0/H ,分析不同结构下气膜长度的变化规律。

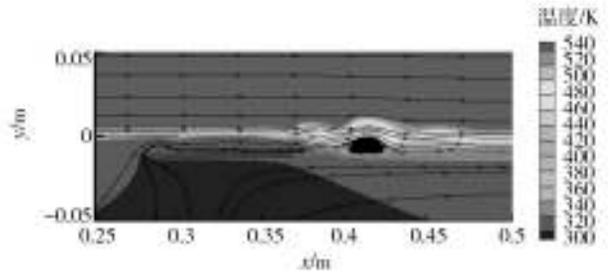


图8 温度云图和流线图

Fig. 8 Contour of the temperature and streamlines

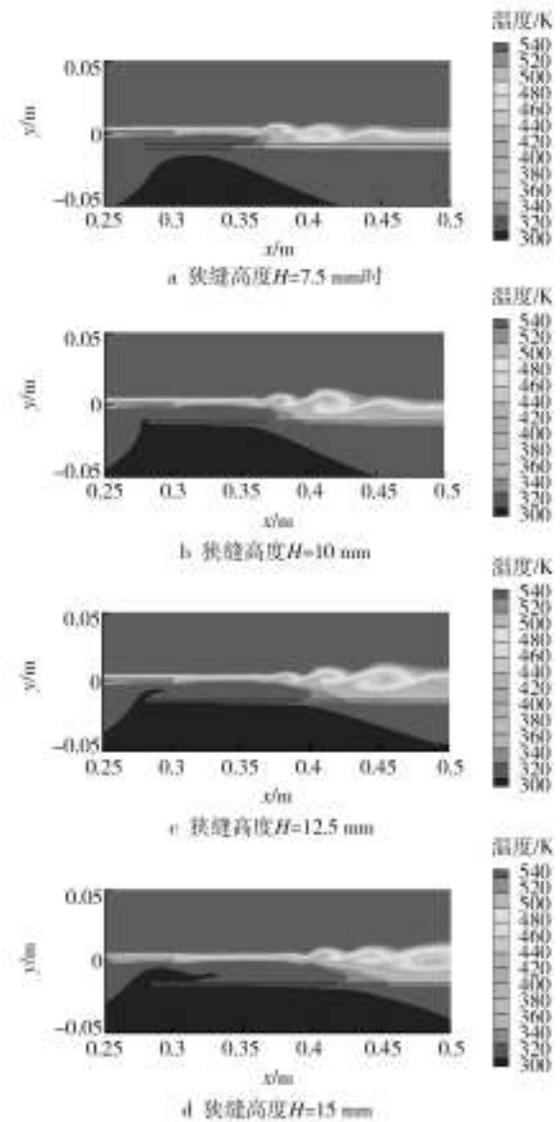


图9 4种模型的温度云图

Fig. 9 Contour of temperature in four models

从表 1 中可以看出,气冷却膜的长度约为狭缝高度的 10.2 ~ 11.3 倍。实际设计中各级扩压管的长

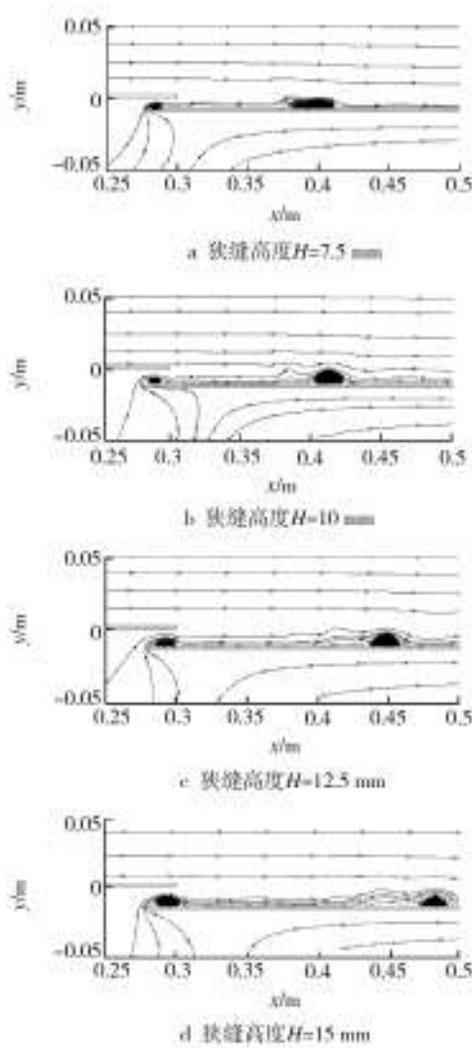


图10 4种模型的流线图

Fig. 10 Streamlines in four models

度应尽量小于这个范围,以避免高温主流灼烧到壁面,从而导致温度跃升。

表1 不同狭缝高度下的冷却气膜长度

Table 1 The length of cooling gas film in different slot height

狭缝高度 H/mm	7.5	10	12.5	15
漩涡前缘位置/mm	377	402	436	469
气膜长度 L_0/mm	77	102	136	169
L_0/H	10.2	10.2	10.9	11.3

3.2.2 不同重叠长度下冷却气膜长度的比较

利用上述方法对不同重叠长度和不同主流速度下的模型进行比较,结果见表2和表3。条件:狭缝高度均为10 mm,主流速度均为30 m/s。

表2 不同重叠长度下冷却气膜长度的比较

Table 2 The length of cooling gas film in different overlap length

重叠长度 H/mm	0	10	20	30
漩涡前缘位置/mm	402	401	402	403
气膜长度 L_0/mm	102	101	102	103
L_0/H	10.2	10.1	10.2	10.3

表3 不同主流速度下冷却气膜长度的比较

Table 3 The length of cooling gas film in different mainstream speed

主流速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10	20	25
漩涡前缘位置/mm	375	391	392
气膜长度 L_0/mm	75	91	92
L_0/H	7.5	9.1	9.2
主流速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	30	35	40
漩涡前缘位置/mm	402	401	401
气膜长度 L_0	102	101	101
L_0/H	10.2	10.1	10.1

从表2可以看出,重叠长度对冷却气膜长度的影响很小,从便于安装和防止主流在不稳定工况下泄漏的角度来衡量,建议重叠长度取为20~30 mm。

从表3可以看出,狭缝高度和重叠长度相同,主流速度小于30 m/s时,冷却气膜长度随主流速度的增加逐渐延长;主流速度为30~40 m/s时,冷却气膜长度几乎不变,主流速度对冷却气膜的影响减弱。舰船在正常的巡航工况下排气主流的速度为30~40 m/s,根据表3中的结果建议把各级扩压管的长度设计为狭缝高度的10倍左右。

4 结论

1) 壁面温度主要受狭缝高度和主流速度的影响,重叠长度对壁面温度的影响很小。

2) 狭缝高度和重叠长度相同,主流速度不同时,300 mm< x <400 mm的范围内,壁面温度差距很小; x >400 mm后,壁面温度开始跃升,主流速度越大,壁面温度越高。

3) 冷却气膜长度主要受狭缝高度和主流速度的影响。主流速度为30 m/s,不同狭缝高度时,冷却

(下转第78页)

面的性能要求,经过多次试验,确定固化剂 HDT-90 与丙烯酸树脂的羟基值与异氰酸酯之比为(1.05 ~ 1.15):1 较好。

5 结论

1) 要获得适应海洋环境的防腐底漆树脂体系,必须采用适当环氧值的环氧树脂,用适量的氯醚树脂改性,而且固化剂和防腐颜料的选择对漆膜的机械性能、物理化学性能和综合耐腐蚀性能有重要影响。同时,氧化锌能提高氯醚树脂在高温下的稳定性,而且具有化学防腐颜料的功能。

2) 选择甲基丙烯酸甲酯、甲基丙烯酸羟丁酯、丙烯酸异辛酯、丙烯酸己内酯,先采用同步滴法聚合出高、低两种不同 t_g 的树脂,再按比例混合,可制备出综合性能好的耐候性面漆成膜树脂体系;用牌号为 HDT-90 的脂肪族异氰酸酯作为面漆的固化剂,干燥速度快,可获得硬度、耐水性、耐腐蚀性等性能优异的漆膜。

参考文献:

- [1] 吴石. 地面装备用防腐涂层体系现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2008, 37(4): 67—68.
- [2] 吕国斌, 杨建军. 氯醚防腐涂料的研制及其性能[J]. 材料保护, 2011, 44(7): 14—17.
- [3] 蒋娟, 成海玲. 氯醚树脂在涂料中的应用[J]. 上海涂料, 2010, 48(8): 53—55.
- [4] 王兴智, 张小琴. 改性氯醚防腐涂料的研究[J]. 现代涂料与涂装, 2009, 12(10): 4—6.
- [5] 徐春容. 改性氯醚树脂涂料的研制[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(8): 36—40.
- [6] 韩文礼, 徐忠苹. 紫外线对有机涂层的破坏机理及应对措施[J]. 石油工程建设, 2007(4): 18—20.
- [7] 李红良, 刘谦. 海洋防腐涂料的研究进展[J]. 宁波化工, 2011(2): 27—30.
- [8] 魏文政, 周光华, 张德琪. 氟树脂改性丙烯酸聚氨酯耐海水高耐候面漆研究[J]. 表面技术, 2003, 32(5): 32—33.
- [9] 王鼎. 丙烯酸长效防腐涂料的研制[J]. 安徽化工, 2000(2): 22—23.
- [10] 孙秀萍, 乔支新. 水性环氧-丙烯酸酯防腐涂料系统的制备与研究[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(7): 7—9.

(上接第 46 页)

气膜长度约为狭缝高度的 10.2 ~ 11.3 倍, 与 300 ~ 400 mm 壁面温度较低的区域相对应。

4) 狭缝高度和重叠长度一定, 主流速度低于 30 m/s 时, 冷却气膜长度随主流速度的增加逐渐延长; 主流速度为 30 ~ 40 m/s 时, 冷却气膜长度几乎不变, 不再受主流速度的影响。

参考文献:

- [1] WAITZ I A, QiU Y J, MANNING T A, et al. Enhanced Mixing with Streamwise Vorticity[J]. Prog Aerospace Sci, 1997, 33: 323—351.
- [2] 张靖周, 李立国, 高潮, 等. 波瓣喷管红外抑制系统的实验研究[J]. 航空动力学报, 1997, 12(2): 212—214.

- [3] 林文光. 舰用燃气轮机排气红外抑制方案探讨[J]. 船舶工程, 1993(3): 51—55.
- [4] 王晓岛. 引射器/扩压器型红外抑制装置三维湍流场及热辐射场数值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1991.
- [5] 杜朝辉, 钟芳源. 船用燃气轮机排气红外抑制装置的流动分析[J]. 船舶工程, 1995(6): 25—28.
- [6] 周绍荣, 杜朝辉, 陈汉平. 舰船排气系统红外抑制装置的湍流场及温度场分析[J]. 红外与毫米波学报, 2000(2): 134—138.
- [7] 柯峰. 开口后台阶引射及窄宽度二维台阶绕流的湍流非定常特性实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [8] 马会民, 陈汉平, 苏明, 等. 三维引射流动数值模拟及紊流模型选择[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 326—330.