

引用格式: 赵欣阳, 祝熠, 梅志远, 等. 不同筋材对复合材料加筋板水中透声性能影响试验研究 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(3): 197–204.
ZHAO X Y, ZHU Y, MEI Z Y, et al. Experimental study on effect of different reinforcements on sound transmission performance of composite stiffened plates in water[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(3): 197–204.

不同筋材对复合材料加筋板 水中透声性能影响试验研究



赵欣阳, 祝熠, 梅志远*, 付晓

海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033

摘要: [目的] 为探索使用复合材料筋材替代钢质桁架的可行性, 针对加筋板近场声散射特性, 提出复合材料筋材设计方案, 并开展相关试验研究。[方法] 首先, 基于水声材料测试标准建立加筋板透声性能试验方案; 然后, 通过消声水池自由场标定及扁钢与钢质桁架的透声性能对比, 验证试验环境与试验条件的可行性; 最后, 通过试验分析正入射与斜入射条件下加筋板的透声性能规律。[结果] 结果表明: 在正入射与斜入射条件下, 加筋板的透声性能规律基本相同, 其透声性能依次为裸板>钢质桁架>复合材料帽型加筋板; 复合材料筋材的透声性能受入射面横截面积的影响较大, 横截面积越小的加筋板其透声性能越优。[结论] 研究结合试验分析探索了未来研制高透声复合材料加筋板的方向, 即在保证弯曲刚度相等的前提下, 复合材料筋材应尽量采用镂空结构形式, 并尽可能降低其入射面横截面积; 另在设计筋材时应尽可能减少材料使用的种类, 以减少筋材中不同材料界面的数量。

关键词: 复合材料; 加筋板; 透声性能; 等弯曲刚度; 斜入射
中图分类号: U668.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02535

Experimental study on effect of different reinforcements on sound tranmission performance of composite stiffened plates in water

ZHAO Xinyang, ZHU Yi, MEI Zhiyuan*, FU Xiao

College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: [Objectives] In order to explore the feasibility of replacing steel trusses with composite reinforcements, this study proposes a composite reinforcement design for the near-field acoustic scattering characteristics of stiffened plates, and conducts the requisite experiments. [Methods] First, based on the hydroacoustic material testing standards, a test protocol for the sound transmission performance of stiffened plates is established; second, the feasibility of the test environment and conditions is verified through the free field calibration of an anechoic pool and comparisons between the sound transmission performance of flat steel and steel trusses; finally, the sound transmission performance law of stiffened plates under the conditions of positive and oblique incidence is analyzed through experiments. [Results] The results show that the sound transmission performance of stiffened plates under the conditions of positive and oblique incidence is basically the same, and in the order of bare plate > steel truss > composite stiffened plate. The sound transmission performance of composite stiffened plates is influenced by the cross-sectional area of the incident surface, and the smaller the cross-sectional area, the better the performance. [Conclusions] Combined with experimental analysis to explore the future development direction of high sound transmission composite stiffened plates and ensure equal bending stiffness, the design of composite reinforcements should try to use a hollow structural form and reduce the cross-sectional area of the incident surface as far as possible; in addition, the types of material used should be minimized so as to reduce the number of different material interfaces in reinforcements.

Key words: compound material; stiffened panels; sound transmission performance; equal bending stiffness; oblique incidence

收稿日期: 2021-09-18 修回日期: 2021-11-04 网络首发时间: 2023-04-06 16:44
作者简介: 赵欣阳, 男, 1998 年生, 硕士生。研究方向: 声散射与声目标强度。E-mail: xinyang_zhao0921@163.com
梅志远, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 舰船结构强度与振动。E-mail: Zhiyuan_mei@163.com

*通信作者: 梅志远

0 引 言

声呐导流罩作为舰艇的一个重要组成部分,主要由壳板和增强构件(肋板或者桁架)这 2 部分组成。作为一种封闭的结构,导流罩的内部声场和其结构形式与选材关系密切,不同材料、尺寸和结构的肋板(或桁架)对导流罩性能的影响很大;不同材料和不同厚度的壳板对导流罩性能的影响也不可忽视^[1]。

早期的导流罩由薄钢板与肋板组成,虽然能解决结构的刚度强度问题,但肋板的存在也带来了声散射,导致了发射声基阵的波束畸变以及接收基阵的精度下降^[2]。之后,随着桁架结构的诞生,替代了原有的肋板,其镂空型设计最大限度地减小了声波的散射。但是,钢质结构的声特性阻抗与海水相差较大,透声效果不佳,为提高壳板材料的透声性能,后又逐渐发展了玻璃钢、碳纤维等一系列透声性能更好、强度更高的纤维增强材料(FRP)^[3]。复合材料壳板与钢质桁架的结合虽然解决了透声性能与强度的问题,但难以避免随之而来的电化学腐蚀^[4]问题;同时,复合材料的优异性能以及近年来复合材料舵叶和稳定翼的发展^[5-6]也拓宽了船用结构材料的思路,因而应用复合材料筋材代钢质桁架的想法应运而生。

为了探索使用复合材料筋材替代钢质桁架的可行性,研制高透声复合材料加筋板,本文将从试验研究出发,基于等弯曲刚度这一条件设计 3 种形式共 5 类试验件,通过消声水池自由场试验,分析加筋板近场透声特性及其影响因素,为复合材料筋材设计提供指导。

1 试验研究

1.1 试验材料

从探索透声性能优异的加筋板这一目的出发,本试验采用透声性能较优的玻璃纤维和碳纤维这 2 种纤维增强材料以及透声型浮力材料分别作为复合材料壳板、加强筋蒙皮和加强筋芯材的制作材料,以 QC-350 树脂作为黏接剂,制备了复合材料帽型筋材,然后以 Q235 钢制备了均质材料筋材,具体的材料性能参数如表 1 所示。

1.2 试 件

1.2.1 平板尺寸设计

平板尺寸应能完全覆盖声信号辐射面以减少衍射。对于使用点声源的测量方法,根据 Bobber^[7]

表 1 材料性能参数
Table 1 Material performance parameters

材料名称	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
玻璃钢	19.43	1 840	0.140
T700/350	58.70	1 500	0.045
浮力芯材	1.10	700	0.400
QC-350树脂	3.30	1 100	0.390
Q235钢	210.00	7 850	0.300

在水下电声测量中的描述,为了减少板边缘衍射对测量的干扰,样品应制成矩形平板状,表面平整,厚度一致,且各边长应大于测试频率下水中波长的 2~5 倍。本文从试验环境、试验测试场地等方面考虑,最终确定试件的边长应不小于测试频率下水中声信号波长的 3 倍,测试频率范围为 5~10 kHz。

由波长、速度与频率的关系,可知本文试验所使用声信号的最大波长为 300 mm,由于在试件最大偏转角度为 25°的情况下试件边长在垂直于声信号入射方向的投影长度仍需满足 3 倍波长的关系,故经计算,可得边长最小值为 1 000 mm。经综合考虑,确定平板尺寸为 1 200 mm×1 100 mm,厚度为 6 mm(0.41 mm×15 mm,正交铺层),并于板中间布置一根长 1 200 mm 的加强筋。

1.2.2 筋材设计

本文试验目的是探讨加筋板筋材对透声性能的影响规律,所以对筋材设计的考虑尤为重要。从目前的研究来看,导流罩后的骨架形式与数量会影响声呐对声信号的接收,现有的导流罩多采用疏筋结构。另一方面,从结构力学的角度来看,在保证板架稳定性的条件下,利用筒形弯曲理论,采用周期性单向加筋应是减少筋材数量的有效途径。综合考虑这两方面的因素,本文在设计阶段决定采用单向添加单筋的加筋板作为研究对象。在弯曲刚度相等的前提下,本文设计了钢质桁架、扁钢、帽型筋共计 3 型筋材,然后分别将上述筋材与平板予以连接而组成加筋板,并进行测试。

本文利用付晓等^[8]关于板筋刚度匹配特性规律的分析,基于临界刚度设计了与玻璃钢平板弯曲刚度相匹配的钢质加强筋。图 1 所示为筋材宽度为 20 mm 时的板筋刚度比函数曲线。板筋刚度比 β 是关于 b 和 m 的二元函数,其中 b 为筋材宽度, m 为式(1)所示的无量纲量。

$$m = H/t \tag{1}$$

式中: H 为筋材高度; t 为板厚度。

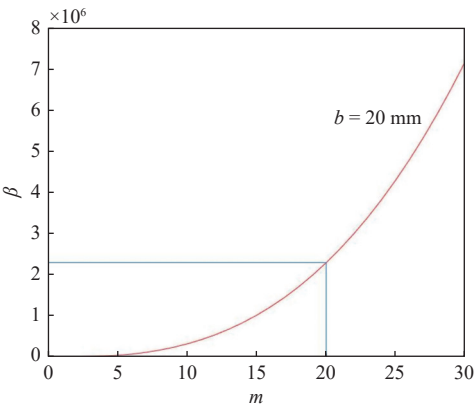


图1 板筋刚度比函数曲线

Fig. 1 Stiffness ratio function curve of plate reinforcement

由图可知, 曲线在 $m = 20$ 之后斜率大致稳定, 可以认为钢质筋材在 $m = 20$ 附近达到了临界刚度; 由式(1), 可以计算得到加强筋的高度约为 120 mm。

将扁钢的弯曲惯性与弯曲刚度作为筋材设计的输入量。利用 ABAQUS 有限元仿真软件, 基于钢质桁架的基本形式, 基于位移等效原理, 可得

到钢质桁架的设计方案如图 2(a) 所示。借助多岛遗传算法, 通过由 Isight 集成优化平台得出的优化结果, 同时结合工程实际, 可确定等弯曲刚度条件下的 3 种复合材料帽型筋材设计方案如图 2(b)~图 2(d) 所示(按照筋材的横截面积, 依次为标准型、高瘦型和矮胖型)。图 2 中数值的单位为 mm。

1.2.3 试验方法与条件

透射系数试验参照 GB/T 14369—2011《声学、水声材料样品插入损失、回声降低和吸声系数的测量方法》^[9] 进行。本试验要求满足自由场远场条件, 水听器应处于发射器的远场中, 以使水听器接收到的声波相当于平面波。

$$d > \frac{(a_1^2 + a_2^2)}{\lambda}; d > a_1, d > a_2 \tag{2}$$

式中: d 为发射器与水听器之间的距离; a_1, a_2 分别为发射器与水听器的最大几何尺寸; λ 为试验中声信号的最高频率对应的水中波长。

本试验通过记录声信号直达声压信号的电压

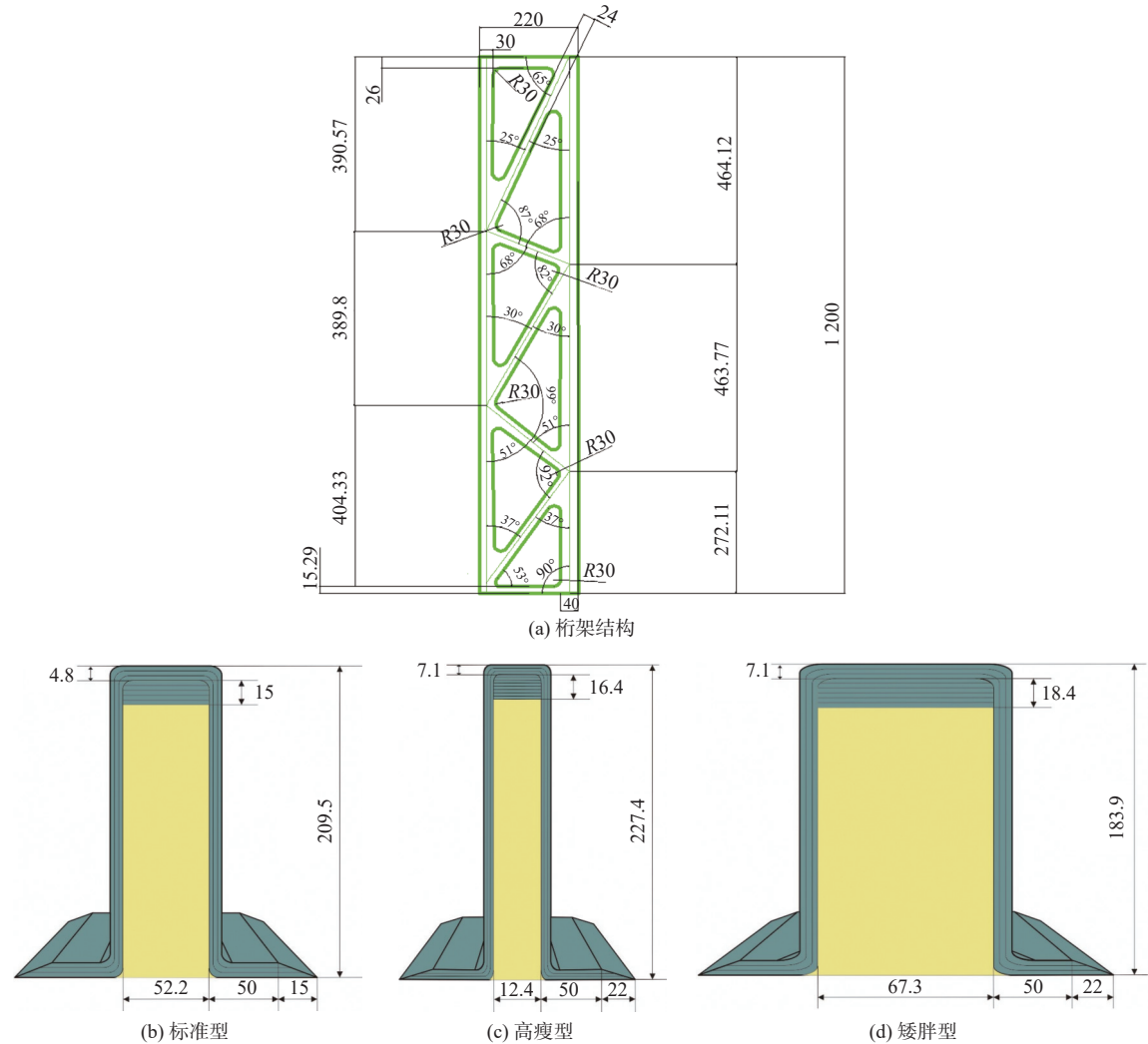


图2 加强筋结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of stiffener

值以及放入试件后透射声压信号的电压值,并以透射系数来评价加筋板透声性能的优劣,试验布置如图 3 所示。图中: p_i 为入射声压; p_d 为标准水听器测得的直达声压; p_t 为标准水听器测得的透射声压; d_1 为发射器与试件之间的距离; h 为试件所处水深。

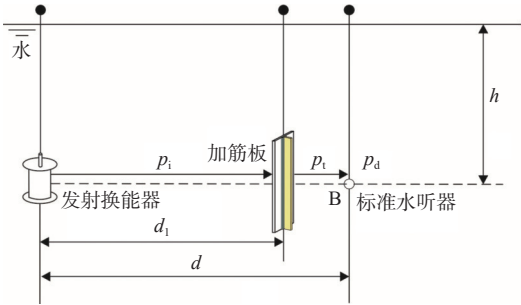


图 3 试验布置图
Fig. 3 Test layout diagram

透射系数 T 在 B 点进行测量:

$$T = \frac{p_t}{p_d}$$

(3)

1.3 试验准备工作

1.3.1 试件制备

玻璃钢平板采取手糊成型的方式,通过在板的中轴线附近对称加工 8 个直径为 10 mm 的穿孔来使平板与加强筋连接。钢质桁架通过对厚 25 mm、尺寸为 220 mm×1 200 mm 的 Q235 钢板进行激光切割来制备。扁钢通过切割厚度为 20 mm 的 Q235 钢板来制备。在两型钢质筋材侧面设置支架,通过点焊的方式将支架与筋材自身固定,以便于钢质筋材与玻璃钢平板通过螺栓连接。对于复合材料帽型筋材,3 种筋材的制备过程均为:首先,制作浮力材料以及面板预制体;然后,在表面铺设复合材料布;最后,以 QC-350 树脂作为黏接剂,通过真空成型制备,在筋材面板折边区域开通孔,以便于筋材与玻璃钢平板螺栓连接。试验所需试件如图 4 所示。

1.3.2 试验场地与试验器材

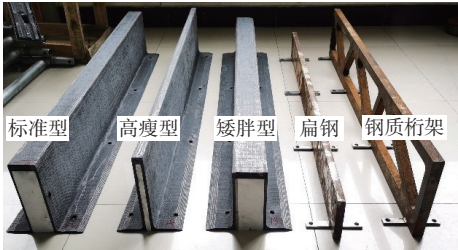
试验场地位于某大学的消声水池,水池长 10 m、宽 6 m、深 5 m,水池内壁及水面设置有消声尖劈模块,试验场地布置如图 5 所示。根据试验要求,为实现试验目的,设计了如图 6 所示的测试系统,该系统主要由信号发生器、功率放大器、数字示波器、发射换能器、标准水听器以及其他附属仪器组成。

1.3.3 消声水池自由场标定

在试验正式开始之前,为保证测试效果,需进行自由场标定,图 7 所示为自由场标定声场布置



(a) 玻璃钢平板



(b) 5 种加强筋

图 4 试验试件

Fig. 4 Test specimen

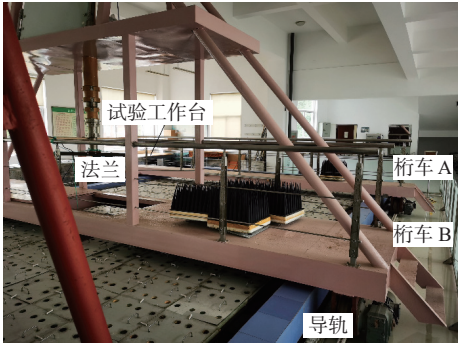


图 5 试验场地布置图

Fig. 5 Layout of test site

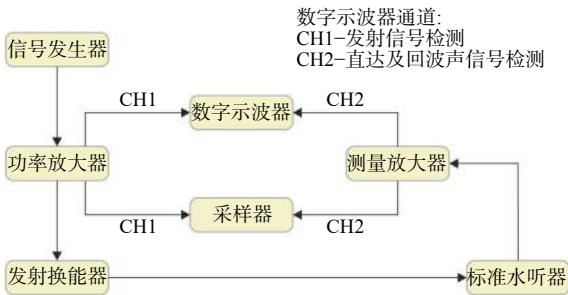


图 6 测试系统组成

Fig. 6 Block diagram of test system composition

图。图中数值的单位为 mm。
按照 GB/T 3223—1994《声学、水声换能器自由场校准方法》^[10] 开展自由场的标定工作。以发射换能器与水听器的连线作为 x 轴,以换能器为坐标原点,选取坐标为 3 885, 4 385, 4 885, 5 191, 5 275, 5 591 mm 的 6 个位置布置测点,测点深度

为 2 m, 测试各频率下水听器接收的电信号幅值 U_s (单位: mV), 用于反映各测点处的声压。测点处声压与测点距信号源的距离满足式(3)所示的关系:

$$\lg p_s + \lg d = \lg C = \text{const} \tag{4}$$

式中: p_s 为距离声源声中心 s 处的声压; C 为常数。

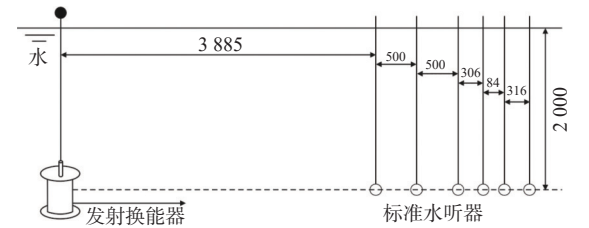


图 7 自由场标定声场布置图

Fig. 7 Layout of free field calibration sound field

以 $\lg p_s$ 为纵坐标, $\lg s$ (s 指距声源中心的距离) 为横坐标, 式(4)在直角坐标系中可以表示为一条直线。现在在各测点测试所得的直达声压值按照式(4)进行计算, 并将各测点数据予以拟合, 即可得到如图 8 所示的自由场标定结果。由图可知, 各频率下的测点均可以拟合为形如 $y = c_1x + c_2$ 的直线, 实际的测量点数据基本均匀分布于拟合直线两侧, 偏差值均在 ± 0.5 dB 以内, 且拟合直线斜率稳定。因此, 可以认为本试验消声水池符合自由场环境的设定。

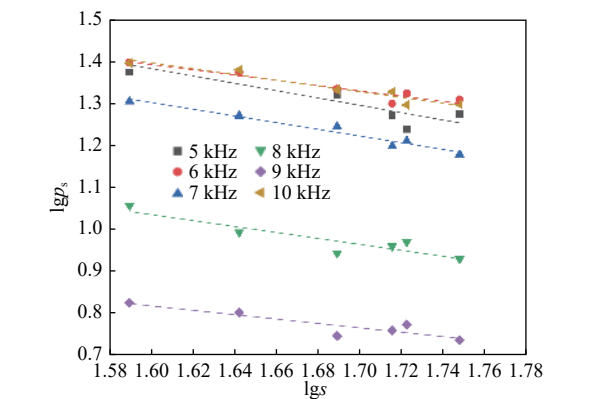


图 8 自由场标定结果

Fig. 8 Results of free field calibration

2 试验结果与分析

本文将试验所得各测点直达声压和透射声压分别取平均值, 然后根据式(3)进行计算, 得出玻璃钢平板及 5 型加筋板在正入射与斜入射 25° 这 2 个角度下不同频率的透射系数数值。为了验证本文所构建测试系统布置的合理性, 判断在此种布置下能否实现在时域上分离直达信号与反射信号, 对直达(无加筋板)与透射(有加筋板)信号进行了观察和分析。图 9 所示为在斜入射情况下,

频率为 5 kHz、测试距离为 706 mm 处的测量信号, 其中图 9(a)为直达信号, 图 9(b)为加入钢质桁架后测得的透射信号。从图中可以看出, 当接收信号稳定时, 可以明显分离出 6 个周期的直达与透射信号。

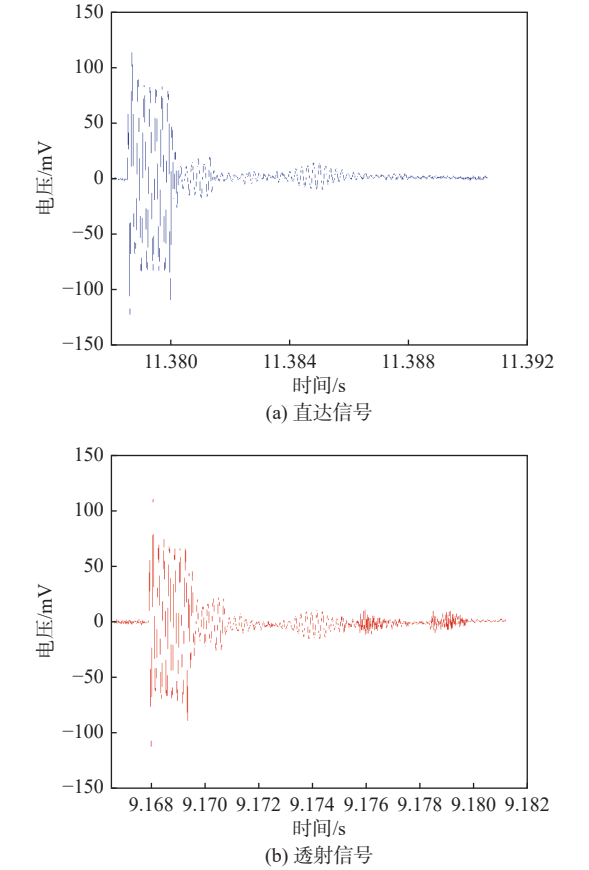


图 9 时域信号图

Fig. 9 Schematic diagram of time domain signal

2.1 正入射试验结果与分析

按照正入射条件下各试件的透射系数特征, 绘制距离试件入射面(加筋板外表面, 坐标为 $x = 4885$ mm) $D_1 = 306$ mm, $D_2 = 390$ mm, $D_3 = 706$ mm 时各频率下的透射系数特性曲线, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 在正入射条件下, 玻璃钢平板在加筋之后, 透射系数会有不同程度的降低。其中, 钢质桁架优于扁钢, 这是因为扁钢的存在带来的声散射导致了声场的畸变, 而拥有窗格的钢质桁架却减小了对声波的散射。然而, 复合材料帽型筋材加筋板的透声性能则呈现出不稳定的趋势, 透射系数会随频率的改变而产生较大波动, 且该型筋材加筋板的透射系数均基本小于钢质桁架, 仅部分频率能够达到接近于钢质桁架的水平。

图 11 所示为部分频率下各类试件的透射系数随测点距离变化的规律, 测点位置分别为: $D_1 = 306$ mm, $D_2 = 390$ mm, $D_3 = 706$ mm。从图中可以

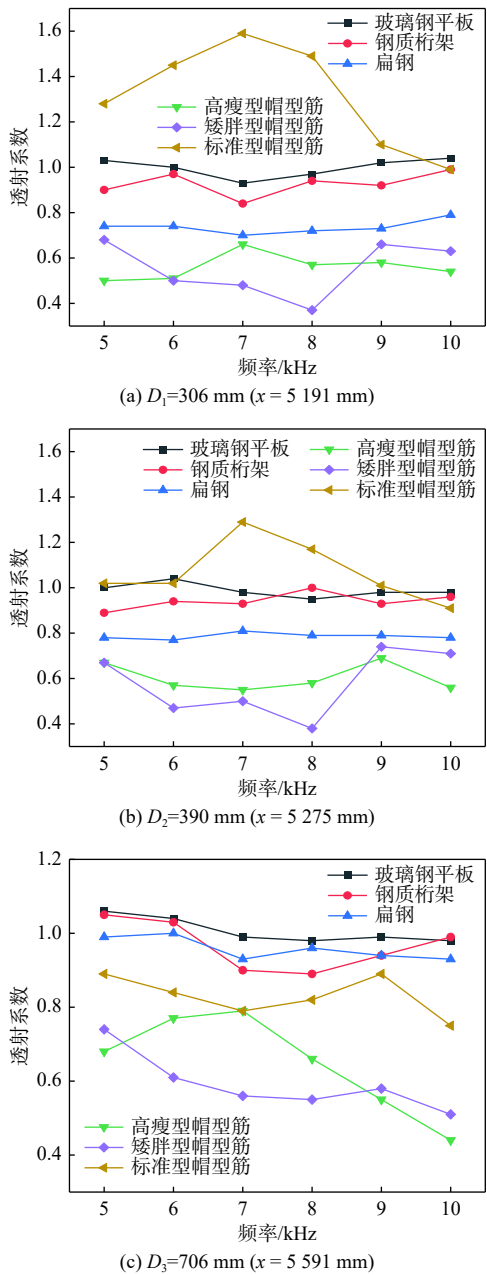


图 10 试件透射系数随频率的变化 (正入射)

Fig. 10 Variation of transmission coefficient with frequency (positive incidence)

看出,钢质桁架加筋板的稳定性最好,其透射系数在同一频率下基本不会随距离的变化而变化,但复合材料筋材加筋板却表现不佳,其中标准型帽型筋加筋板的透声性能最不稳定。虽然此型加筋板在不同频率与不同距离下的透射系数大部分大于1,但这是因为水听器所测得的透射声压很可能是由于此型加筋板筋材衍射与加筋板透射共同叠加所导致,这样形成的不稳定声场有悖于导流罩的设计,会使导流罩后的声呐基阵获取不到有效的声学信息。其他两型复合材料筋材加筋板的稳定程度虽次于钢质桁架,但其透射系数随距离变化的上下波动幅度均在0.2以内。综合考虑透射系数大小和透射系数随频率与距离的变化趋

势,发现在正入射条件下,3型复合材料帽型筋加筋板中高瘦型帽型筋加筋板表现最优。

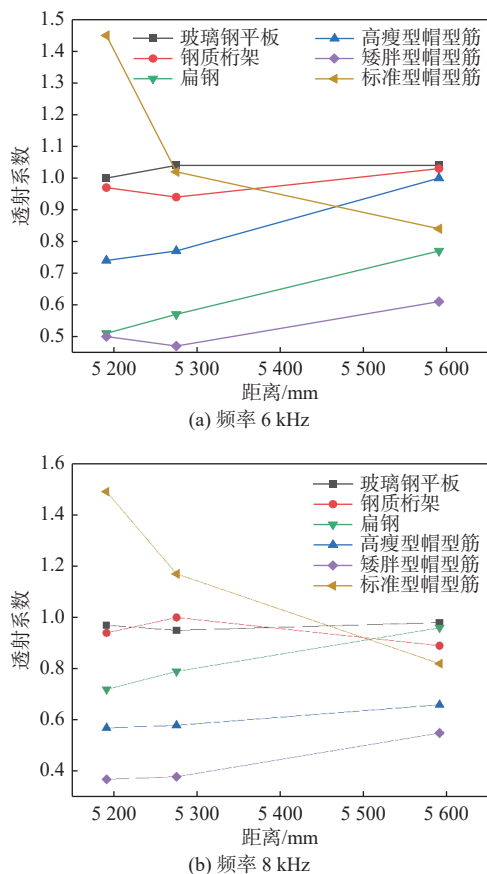


图 11 试件透射系数随距离的变化 (正入射)

Fig. 11 Variation of transmission coefficient with distance (positive incidence)

综上所述,在正入射条件下,等弯曲刚度的钢质桁架的透声性能要优于复合材料筋材加筋板,而复合材料筋材加筋板中以高瘦型帽型筋表现最优,这说明在正入射条件下,入射面横截面积小的复合材料帽型筋材其透声性能较优。对于将碳纤维材料作为蒙皮,将透声型浮力材料作为芯材的复合材料帽型加强筋而言,虽然这2种材料在声管试验中均有较优的透声性能,但是由于在这2种材料的过渡区域界面可能存在反射和折射现象,声场可能不规律,因而会导致试件的性能与材料声管试验性能存在较大差异。

2.2 斜入射试验结果与分析

按照斜入射(25°)条件下各试件的透射系数,绘制各频率下的透射系数曲线,如图12所示。

由图12可知,在斜入射条件下,复合材料平板在加筋之后,透射系数仍会有一定程度的降低,降低幅度一般大于正入射条件下。此时,钢质桁架的透射系数与扁钢的差别不明显,整体来看,扁钢的透射系数要略优于钢质桁架,但综合

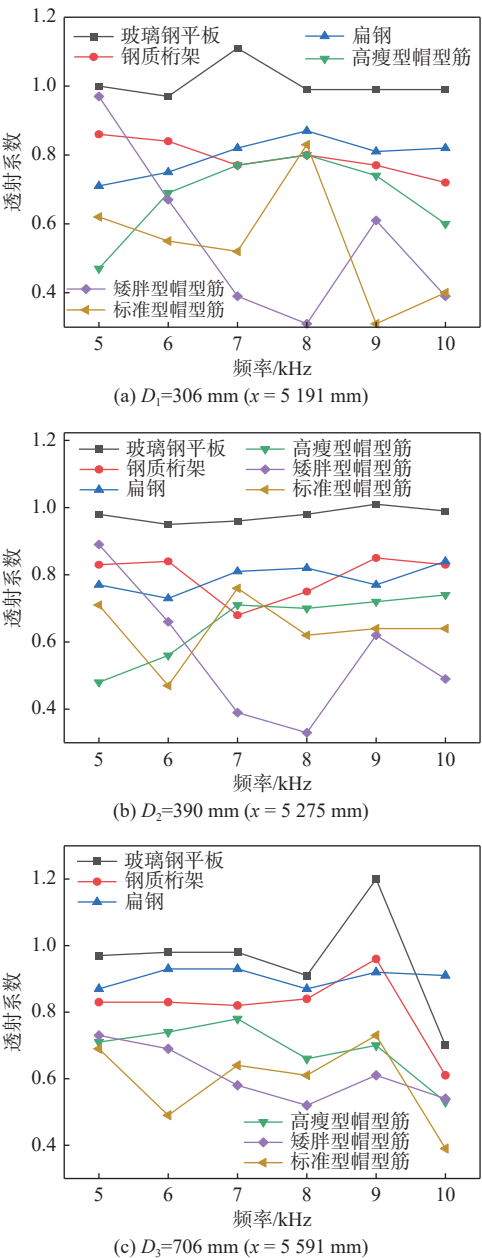


图 12 试件透射系数随频率变化情况 (斜入射)
Fig. 12 Variation of transmission coefficient with frequency (oblique incidence)

考虑正入射条件下的情况,发现钢质桁架的透射系数还是要优于扁钢的。一方面,这符合导流罩的发展历程,即采用钢质桁架替代了肋板;另一方面,也从侧面验证了试验设施与试验条件的可信度。在斜入射条件下,各类筋材的透射系数均存在波动,但加强筋为钢质桁架的加筋板的透射系数仍然较为稳定。然而,复合材料帽型筋材的透射系数随着频率的改变产生了较大波动,其中高瘦型复合材料筋材相较于其他2类复合材料筋材波动较小且整体的透射系数接近于钢质桁架,这说明在斜入射条件下,入射面横截面积小的复合材料帽型筋材其透声性能较优。

图 13 所得结论与图 11 基本一致。在斜入射

条件下,钢质桁架的透射系数随距离的变化有一定的波动但仍较为稳定;复合材料筋材中高瘦型帽型筋的表现最好,其透射系数最大,透射系数随距离变化的幅度最小。

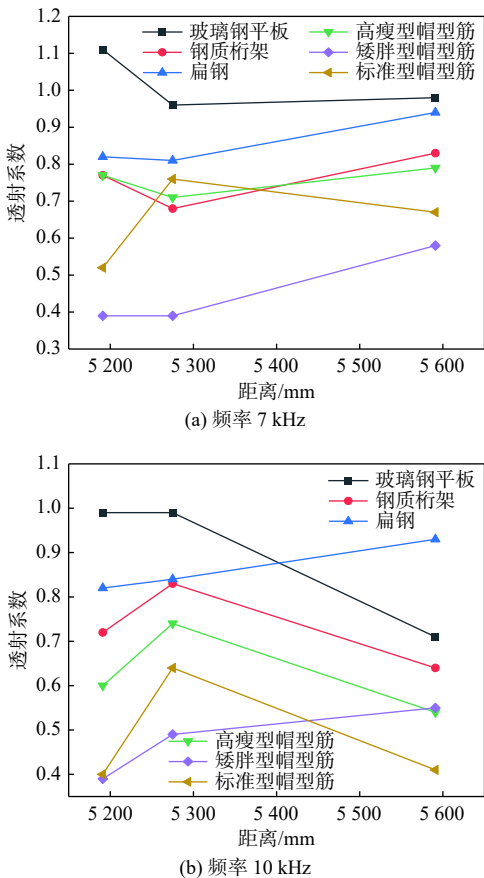


图 13 试件透射系数随距离的变化 (斜入射)
Fig. 13 Variation of transmission coefficient with distance (oblique incidence)

综合考虑透射系数大小和透射系数随频率与距离的变化趋势,发现各类筋材加筋板的透声性能顺序为:钢质桁架>复合材料帽型筋,复合材料帽型筋材的透声性能存在较大波动,其中高瘦型帽型筋表现较优且在7~10 kHz时与钢质桁架较为接近,说明具有较小横截面积的复合材料帽型筋材其透声性能较优。

3 结论

本文开展了加筋板透声性能试验研究,建立了复合材料加筋板透射系数试验研究方法。通过测量玻璃钢平板以及5种类型加筋板在正入射与斜入射条件下的透射系数,探讨了加筋板筋材形式、筋材材料类型、入射角度等条件对结构透声性能的影响。一方面,通过消声水池自由场标定确定了试验消声水池符合自由场的设定;另一方面,通过钢质桁架与扁钢的对比,验证了试验方案的可行性以及试验条件的可信度。由试验数据

可知,在正入射与斜入射条件下,加筋板的透声性能规律基本相同,透声性能依次为裸板>钢质桁架>复合材料筋材加筋板。试验显示复合材料筋材的透声性能表现不佳,其中高瘦型帽型筋在3型帽型筋中表现最好,在正入射与斜入射条件下其透射系数大小及透射系数随频率与距离的变化趋势均为最优,同时在斜入射条件下,在7~10 kHz 时与钢质桁架较为接近。标准型帽型筋的透射系数随频率与距离的变化较大,而矮胖型帽型筋的透射系数过小,均不符合声呐导流罩的研制需求。虽然高瘦型帽型筋材在多数工况下的表现相比其他2型筋材较优,但是与钢质桁架相比仍然存在差距。经综合分析,发现加筋板的透声性能主要存在以下规律:

1) 平板在加筋后其透声性能有一定程度的下降,且在斜入射条件下加筋板的透声性能相比正入射条件略差。

2) 在斜入射条件下,复合材料筋材由于存在由不同材料组成的界面,筋材的散射场较为复杂,导致在斜入射条件下复合材料筋材加筋板的透声性能要劣于钢质桁架。

3) 在弯曲刚度相等的前提下,复合材料筋材应尽量采用镂空的结构形式,并尽可能降低其横截面积;此外,在设计筋材时应尽可能减少材料使用的种类,以减少筋材中不同材料界面的数量。

上述规律能够为复合材料加筋板透声性能设计提供参考,在后续工作中,将设计镂空形式的复合材料筋材,探讨该型加筋板的透声性能规律,完成复合材料加筋板筋材透声性能设计,同时,充分发挥复合材料加筋板结构质轻、工艺性好、可设计性强等显著优势。

参考文献:

- [1] 张洋波. 声呐导流罩内声场特性研究[J]. *声学技术*, 2014, 33(5): 422–426.
ZHANG Y B. Research on inner sound field characteristics of sonar dome[J]. *Technical Acoustics*, 2014, 33(5): 422–426 (in Chinese).
- [2] 费国强, 沈文苗. 国外大舰导流罩概述[J]. *声学 & 电子工程*, 2012(2): 1–5.
FEI G Q, SHEN W M. Overview of foreign large ship deflector[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2012(2): 1–5 (in Chinese).
- [3] 黄春龙, 杨秋龙, 杨坤德. 水声透声材料的研究现状[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(11): 1231–1235.
- HUANG C L, YANG Q L, YANG K D. Research progress in underwater acoustically transparent materials[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2020, 40(11): 1231–1235 (in Chinese).
- [4] 张凯, 范敬辉, 马艳, 等. 碳纤维复合材料与金属的电偶腐蚀及防护[J]. *电工材料*, 2008(3): 20–23.
ZHANG K, FAN J H, MA Y, et al. Galvanic corrosion and protection between carbon fibre composite materials and metal[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2008(3): 20–23 (in Chinese).
- [5] 梅志远, 翟玉文, 周晓松. 一种潜艇高刚度特性复合材料稳定翼结构: 中国, CN201418001405.8[P]. 2017-05-31.
MEI Z Y, ZHAI Y W, ZHOU X S. A composite material stabilized wing structure with high rigidity for submarine: CN, CN201418001405.8[P]. 2017-05-31 (in Chinese).
- [6] 梅志远, 李华东, 刘令, 等. 一种高刚度轻质实芯复合材料舵叶: 中国, CN201610018207.0[P]. 2019-12-27.
MEI Z Y, LI H D, LIU L, et al. Solid composite rudder blade high in rigidity and low in weight: CN, CN201610018207.0[P]. 2019-12-27 (in Chinese).
- [7] BOBBER R J. Underwater electroacoustic measurements[M]. Florida, USA: Naval Research Laboratory, 1971: 27–31.
- [8] 付晓, 梅志远, 陈国涛, 等. 基于临界刚度的复合材料筋材多变量优化设计方法[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(8): 2616–2624.
FU X, MEI Z Y, CHEN G T, et al. Multivariable optimization design method of composite stiffener based on critical stiffness[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(8): 2616–2624 (in Chinese).
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 声学、水声材料样品插入损失、回声降低和吸声系数的测量方法: GB/T 14369—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Acoustics-measurement methods of insertion loss, echo reduction and sound absorption coefficient for underwater acoustical material samples: GB/T 14369 —2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012 (in Chinese).
- [10] 国家技术监督局. 声学 水声换能器自由场校准方法: GB/T 3223—1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
State Bureau of Technical Supervision. Acoustics-free-field calibration method of underwater sound transducers: GB/T 3223 —1994[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994 (in Chinese).