

高速铁路全封闭声屏障基础及拱架施工误差限值研究

白 勇

(中铁十二局集团第一工程有限公司,陕西 西安 710038)

摘要:我国高速铁路的运营里程已超过 4 万 km,且越来越多的高铁线路在规划建设中会不可避免地穿过人群密集区。高速列车产生的噪声会对沿线居民产生较大干扰,传统的直立式声屏障的降噪效果已难以达到要求,安设全封闭声屏障作为一种更有效的降噪措施,近几年逐渐走进人们视野。然而该措施目前在高铁项目上应用较少,其整体工程的设计与施工仍存在较多问题。根据津兴铁路固永特大桥工程实例,通过数值模拟的方法,重点以全封闭声屏障的基础施工和拱架施工为研究对象,对基础和拱架这两个关键施工环节中的误差来源进行总结,对施工中的误差限值提出建议,相关研究可为后续高速铁路桥梁上全封闭声屏障的施工提供借鉴。

关键词:高速铁路;全封闭声屏障;钢结构;施工技术;误差分析

中图分类号: TU55+2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0287-05

0 引言

2018 年,我国第一条架设全封闭声屏障的高铁线路全线通车^[1],随后以高铁全封闭声屏障耦合系统为研究对象,学者们展开了大量关于其降噪性能^[2]、风动特性^[3]及车桥耦合特性^[4]等方面的讨论,并针对性地做了大量研究。在施工误差方面,金健等^[5]基于京雄高铁项目,对如何提高 U 形预埋螺栓的安装精度进行了研究,提出了一系列精度控制办法,然而在基础及拱架的施工误差控制方面,仍有待后续深入研究。

本文以津兴铁路为工程背景,通过对高铁桥梁上全封闭声屏障的关键施工工艺进行总结研究,分析了在基础及拱架施工过程中的误差源及控制措施,提出了基础及拱架施工误差的相关限值。

1 工程背景

1.1 工程概况

津兴铁路东起天津西站,西至北京大兴国际机场站,连接了天津市与北京大兴国际机场,铁路主要位于天津市及河北省廊坊市境内,全线长 100.6 km,设计运行速度为 250 km/h。津兴铁路固永特大桥(DK12+368.1—DK13+309.70)跨越廊坊市永清县城区,为满足降噪效果,在跨城线路上安装了全封闭

声屏障,安设声屏障线路全长达 941.7 m。

声屏障设计情况:主要由圆形钢结构拱架、金属吸声板、节点连接板、柱脚板、柱间支撑、顶部支撑和系杆等组成。钢拱架固定在桥梁翼缘板边的预埋螺栓上;吸声板通过拱架固定挡板和外侧翼缘板将其固定在 H 型槽内,形成全封闭声屏障。主体结构总高度为 9.23 m,标准钢拱架间距为 2 m,两侧柱脚中心间距为 11.381 m。钢拱架共有 491 根,断面设计示意图如图 1 所示。

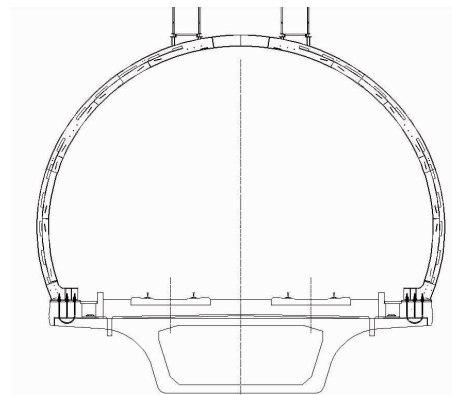


图 1 全封闭声屏障断面设计图

1.2 总体施工方案

津兴铁路全封闭声屏障的主体受力部分为钢结构,面积最大的部分为吸声板,钢结构和吸声板均采用预制加工与现场安设相结合的施工方法。在预制过程中,拱架采用目前较为成熟的反变形法,吸声板预制尺寸沿用直立式声屏障设计参数;在现场安设过程中,拱架在拼装完成后通过两点吊装到预定位置,吸

收稿日期: 2023-10-12

作者简介:白勇(1982—),男,学士,工程师,主要从事铁路工程施工与管理。

声板通过作业台车采用人工插入 H 型槽内的方法完成拼装。津兴铁路的全封闭声屏障施工流程如图 2 所示。

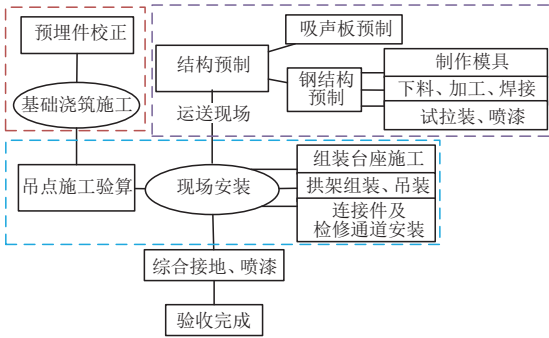
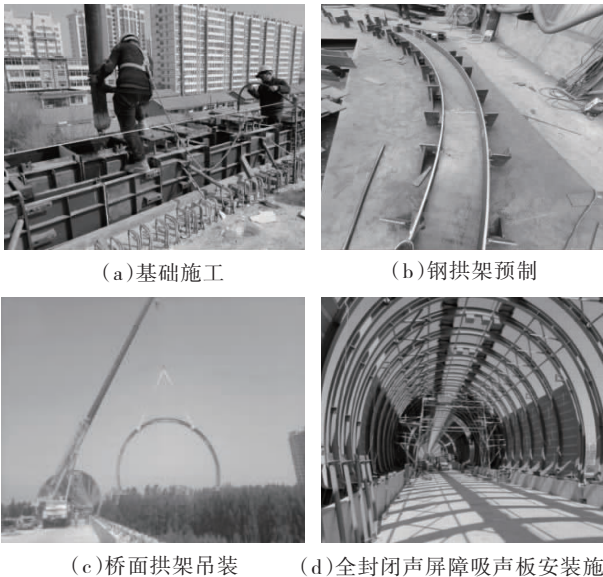


图 2 津兴铁路全封闭声屏障施工流程图

全封闭声屏障基础采用如图 3(a)所示的外挂钢模板现浇混凝土方法进行施工,由于制梁时声屏障基础的 U 型螺栓和钢板需进行预埋,所以在基础施工之前需首先进行预埋螺栓校正,其次进行模板的顺序安装,最后在混凝土浇筑养护完成后,拆除模板,完成施工。所有钢结构按照设计图纸在加工厂内进行预制,如图 3(b)所示。由于钢拱架尺寸较大,不便于整体运输,因此分三节段预制。三节段拱架运至现场后于组装台座上进行整体拼装焊接,通过运输车运送拱架到相应位置,后经吊车辅助钢拱架就位,通过千斤顶使拱架一侧柱脚钢板孔位对准预埋螺栓后下放,再用同样方法对位下放另一侧柱脚,如图 3(c)所示。全封闭声屏障单元板从每根钢拱架的底部、腰部和顶部三个活动挡板处进行插入安装。钢拱架整体高度为 9.23 m,在安装吸声板时须依靠作业台车进行,如图 3(d)所示。后续完成综合接地及补漆工作后,全封闭声屏障施工完成。



(a) 基础施工 (b) 钢拱架预制

(c) 桥面拱架吊装 (d) 全封闭声屏障吸声板安装施工

图 3 津兴铁路全封闭声屏障施工图

2 施工误差源分析

2.1 基础施工误差源分析

通过分析基础施工的工艺过程,发现在三个步骤中容易产生误差。

第一,模具定位误差。在模板施工中,模板内线严格按照模板定位线和基础定位时所弹墨线的尺寸进行控制,但在弹线时容易出现误差,在模板定位时完全零误差施工比较困难。

第二,基础定位误差。在进行基础施工之前需定位基础的中心,此中心不仅是对预埋螺栓的校正的依据,也是基础模板安放的标准点。中心定位时,在左右侧各自从基础中心拉一条工程线,通过在两条线间拉尺校正基础中心的横向间距。然而尺子精度、不规范测量以及拉线距离过长等因素都会导致基础中心的横向间距产生误差。

第三,基础定位的累积误差。对基础以横向左右 2 个为一组同时调节,先校正每组横桥向间距再调整顺桥向距离,顺桥向基础中心由跨中位置向梁端调整,但如果每组基础在纵向调节时都产生较小误差,会累积误差进而对两端的基础误差产生较大影响。

2.2 钢拱架施工误差源分析

钢拱架在预制过程中的误差主要来自于焊接变形阶段。全封闭声屏障钢拱架在预制过程中的焊接工作量大,翼板及腹板在受热后极易产生变形,且圆弧拱架无法使用常规的矫正机器进行矫正。在实际施工过程中多采用刚性固定法、塑性反变形法及弹性反变形法等方法以控制焊接变形。本项目为控制主钢架在焊接过程中产生的变形、保证焊接结束后的钢架成型和尺寸合格,在预制过程中采用塑性反变形法与弹性反变形法相结合的工艺。目前学者们研究出的 H 型钢焊接前的反变形参考数值可参考周振雷^[6]与茅云生等^[7]的研究。

3 基础施工误差限值分析

基础施工完成后,对部分基础的施工精度进行复测,结果显示基础中心的纵桥向和横桥向施工误差均在 10 mm 左右,横向误差最大为 12 mm,纵向误差最大为 20 mm。因限位板可竖向调节,基础竖向施工误差较小,可以忽略。对基础横桥向的误差限值从两方面进行讨论。一方面为基础施工产生横向误差导致的基础预埋螺栓与拱脚预留孔错位,其中预埋螺栓的直径为 30 mm 且螺栓孔位的直径为 38.5 mm,

所以在其他部分全部准确的情况下,单侧基础横向误差限值为 8.5 mm,即当基础中心的横向偏移超过 8.5 mm 时,会影响拱架施工;另一方面为基础施工产生横向误差导致拱架变形继而影响吸声板施工。为讨论基础横向误差限值,首先应进行吸声板的安装容许误差分析。如图 4 所示,立柱与金属吸声板之间用三元乙丙橡胶管状胶条弹性密封,起到减震保护的作用,其性能满足《声屏障用橡胶件》(GB/T 30649—2014)^[8] 中的要求。腹板两侧挡板的截面尺寸在一般位置与梁端不同,图 4 括号内的值为梁端挡板尺寸。通过式(1)计算得其容许误差为 13 mm,即当插槽的位置偏移 13 mm 时,会影响单元板施工。此外,要从该容许误差推导出基础误差限值,还需考虑拱架刚度的影响。

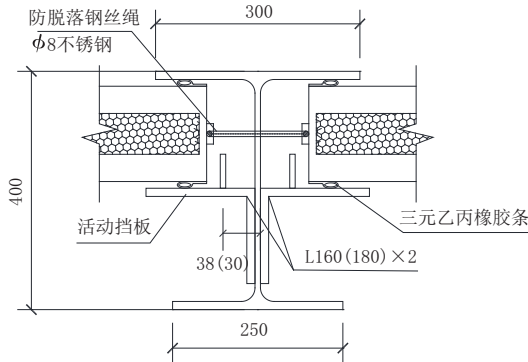


图 4 拱架与单元板局部构造(单位:mm)

$$\Delta = t_1 - t_2 - \beta t_3 \tag{1}$$

式中: Δ 为容许误差, mm; t_1 、 t_2 、 t_3 与分别为放置吸声板的槽内宽度、吸声板厚度与胶条整体壁厚,分别取值为 157 mm、140 与 5 mm; β 为胶条压缩率,《声屏障用橡胶件》(GB/T 30649—2014) 中规定吸声板用胶条恒定压缩永久变形应为(室温 \times 24 h) $\leq 20\%$ 。

为计算分析基础误差对于钢拱架变形的影响,建立了钢拱架的实体模型,如图 5 所示。模型采用 Solid187 软件建立单元,共计 17 811 个单元、36 856 节点。为了模拟吊装完成后的受力状态,约束一侧拱脚底板的十个预埋螺栓孔与地面刚接,在另一侧拱脚底板施加位移荷载,对整体模型施加重力荷载。分别在拱脚施加 100 mm 的横向和纵向位移荷载,拱架模型位移结果如图 6 与图 7 所示,可得基础横向与竖向误差会导致拱脚附近的拱架出现等值横向或纵向位移。因此从拱架变形影响吸声板施工可以得出,基础中心横向误差限制应为 13 mm。再结合单侧基础横向误差限值,故基础的横向误差限制为 8.5 mm。

在基础纵桥向的误差讨论中,主要考虑的是基



图 5 拱架模型

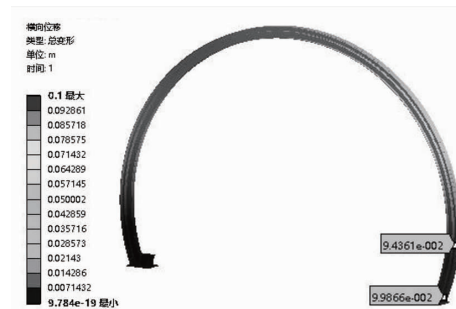


图 6 基础 100 mm 横向误差拱架位移

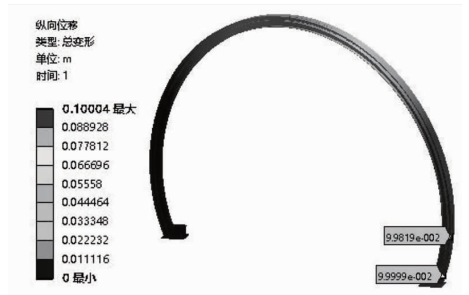


图 7 基础 100 mm 纵向误差拱架位移

础产生纵向误差会影响单元板槽内搭接长度。具体要求如下:在一般位置单元板一侧顶到限位板时,另一侧与翼缘搭接应大于 50 mm;简支梁伸缩缝位置,单元板一侧顶到限位板一侧搭接应大于 75 mm。通过式(2)可以计算出一般位置拱架的纵向位移容许误差为 8 mm、相对伸缩缝位置为 5 mm,即在安装吸声板时,若拱架纵向位置偏移 5 mm(8 mm)会导致伸缩缝位置(一般位置)单元板的搭接长度不符合要求,故认为基础纵向的误差限值为 5 mm。

$$\Delta = L_1 + L_2 + L_3 - L_4 \tag{2}$$

式中: Δ 为纵向容许误差, mm; L_1 为翼板弦长, mm; L_2 为单元板长度, mm; L_3 为隔板到腹板的距离, mm; L_4 为拱架间距, mm。 $L_1 \sim L_4$ 的取值如表 1 所示。

以横、纵、竖三个方向的误差均为 30 mm 时的拱架受力状态为基础,每次将单个方向的误差值从 30 mm 减少到 0,得到拱架的最大主应力与最大切应力结果

表 1 L_1-L_4 取值汇总表 单位:mm

位置	L_1	L_2	L_3	L_4
一般位置	160	1 860	38	2 000
伸缩缝附近	180	1 450	30	1 580

如表 2 与表 3 所示,将结果绘制为折线图如图 8 所示。通过对图 8 分析可知,当三个方向都存在误差时,横向误差对应力产生的贡献最大。从应力影响的角度分析,当三个方向误差都小于 26 mm 时,产生的应力均在允许范围之内。

表 2 单方向误差变化拱架最大主应力 单位:MPa

误差值/cm	x	y	z
3	169.49	169.49	169.49
2.5	148.74	162.31	169.17
2	127.99	155.13	168.85
1.5	107.24	147.95	168.53
1	86.491	140.77	168.21
0.5	65.74	133.59	167.89
0	44.99	126.41	167.57

表 3 单方向误差变化拱架最大切应力 单位:MPa

误差值/cm	x	y	z
3	65.27	65.27	65.27
2.5	57.29	62.46	65.17
2	49.31	59.65	65.07
1.5	41.335	56.85	64.98
1	33.36	54.04	64.88
0.5	25.38	51.23	64.79
0	17.41	48.43	64.7

通过以上基础误差分析可以得出,在考虑应力安全的情况下,基础纵、横、竖三个方向的误差限值均为 26 mm,在不影响施工情况下的基础横向误差限值为 8.5 mm,基础纵向误差限值为 5 mm。

4 屏障钢结构施工误差限值分析

在讨论钢结构的误差限值时,应以每个节段的拱架翼板弦长为误差讨论对象,拱架的中间节段与边节段拱架翼板弦长为设计尺寸,分别为 7 942 mm 与 7 282 mm,如图 9 所示。将上节的实体模型按设计尺寸分为三段,依此模型模拟计算整形内力。

所用材料为 Q355D 钢材,其抗拉容许应力,容许剪应力。经计算得出,与节段两端向内收缩调整相

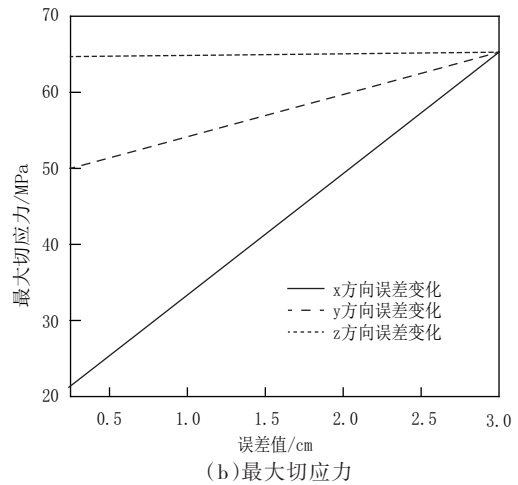
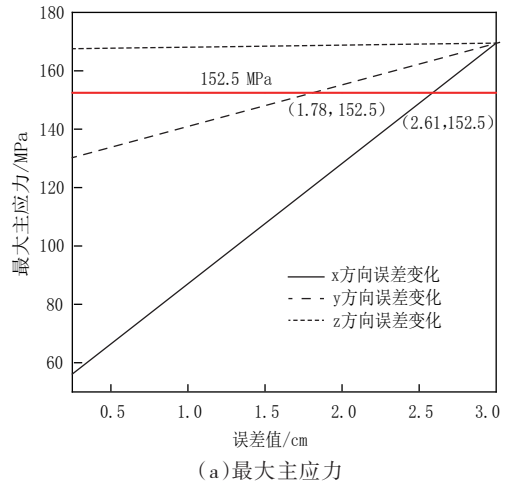


图 8 误差影响对比图

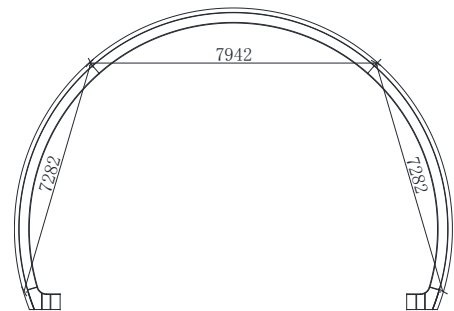


图 9 拱架三节段翼板弦长示意图 (单位:mm)

比,在节段拱架两端向外拉伸调整的情况下,拱架产生的内力最大,故在计算中误差模拟类型应为后者。

当中间节段误差达到 18 mm 时,计算结果如图 10 所示,此时中间节段拱架最大主拉应力为 151.76 MPa,最大主切应力为 85.1 MPa。当边段误差达到 16 mm 时,计算结果如图 11 所示,此时边段拱架的最大主拉应力为 150.8 MPa,最大主切应力为 83.9 MPa。为保证整形内力满足要求,各节段拱架翼板弦长误差需控制在 16 mm 以内。

由结论可知,若弦长误差控制在 16 mm 以内,在整形时结构处于应力-应变曲线的弹性阶段,因此拱架整形时容易产生误差复原,故还应考虑拼装后

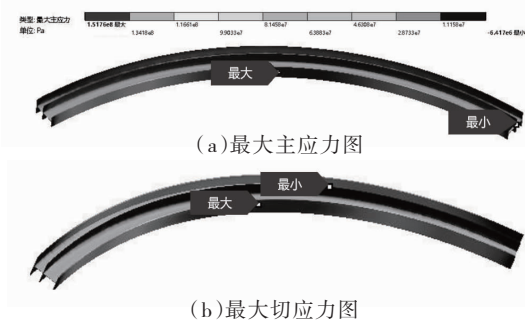


图 10 中间节段拱架 18 mm 误差引起应力图

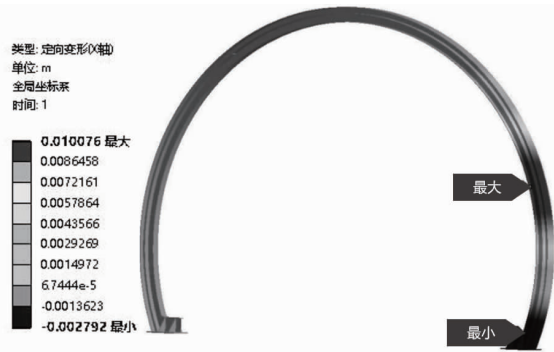


图 13 边段翼板弦长 10 mm 误差结构横向位移图

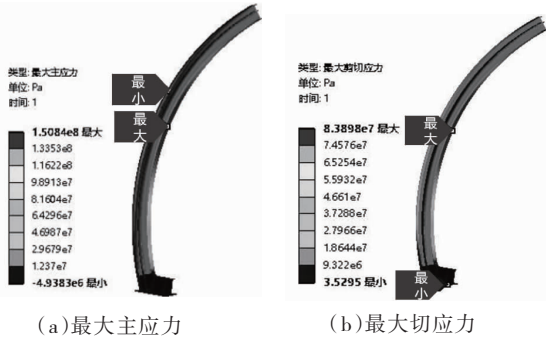


图 11 边段拱架 16 mm 误差引起应力

三节段的误差累加。如图 12 与图 13 所示,中间节段弦长误差为 10 mm 时将引起拱脚位移 13 mm,边段翼板弦长误差为 10 mm 时将引起拱脚位移 2.8 mm。当三节段翼板弦长误差均为 1mm 时,总共会引起拱脚位移 1.6 mm。结合上节的结论,从应力的角度考虑,三个方向的误差均需小于 26 mm,等比算出节段弦长误差限值应为 16 mm。纵桥向误差限值 26 mm,平均三个节段,每节段两端面中心高差限值为 8.7 mm。故节段弦长的误差限值为 16 mm,节段两端面中心的高差限值为 8.7 mm。

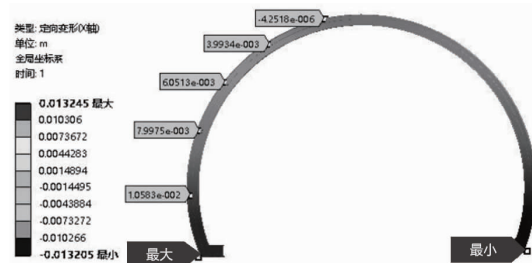


图 12 中间段翼板弦长 10 mm 误差结构横向位移图

5 结语

本文以津兴铁路为工程背景,介绍了高铁全封闭声屏障的基础施工及钢拱安装两个关键阶段的施工流程,并针对两个施工过程进行了误差限值分析,

所得结果对实际工程具有指导意义。研究主要工作及所得结论如下。

(1)总结了高铁全封闭声屏障在基础及拱架施工过程中的误差源:基础施工误差主要源于纵桥向和横桥向误差,竖向误差对整体工作性能影响较小,可忽略不计;拱架施工误差主要源于节段弦长误差。

(2)提出了全封闭声屏障基础的施工误差限值:基础的纵横桥向误差限值分别为 8.5 mm 与 5 mm。对拱架基础三个方向的误差进行对比分析后发现,在基础误差引起的拱架次内力中,横桥向基础误差对最终施工结果产生的影响最大,实际工程中应着重对横桥向基础误差加以控制。

(3)提出了全封闭声屏障钢拱架的施工误差限值:三节段翼板弦长误差限值为 16 mm,每个节段的两端面中心高差限值为 8.7 mm。

参考文献:

- [1] 杨得旺.高速铁路桥上全封闭声屏障降噪效果研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [2] 伍向阳.铁路全封闭声屏障降噪效果试验研究[J].铁道标准设计,2019,63(12):177-181.
- [3] 毛小艺.高速铁路全封闭声屏障车致脉动风压分析[D].成都:西南交通大学,2020.
- [4] 李小珍,杨得旺,高慰,等.高速铁路半、全封闭声屏障振动与降噪效果研究[J].噪声与振动控制,2018,38(增刊1):8-13.
- [5] 金健,张腾飞,李宝革,等.铁路全封闭声屏障工程中提高U形预埋螺栓安装精度的方法[J].交通世界(上旬刊),2020(12):20-21.
- [6] 周振雷.T形构件焊接反变形控制量的研究[D].秦皇岛:燕山大学,2015.
- [7] 茅云生,彭伟,刘彬,等.反变形法对焊接角变形的控制影响研究[C]//2019年船舶结构力学学术会议论文集.武汉理工大学交通学院:中国造船工程学会船舶力学学术委员会,2019:113-119.
- [8] GB/T 30649—2014,声屏障用橡胶件[S].