

# 舒伯特俱乐部壳形户外演奏场

舒伯特俱乐部壳形户外演奏场是一座用于艺术表演的户外场馆，它位于美国明尼苏达州圣保罗市密西西比河中央的覆盆子岛(Raspberry Island)上。它由舒伯特俱乐部委托建筑并于2002年竣工。在这座壳形演奏场建成之前，这座小岛一直默默无闻，但如今小岛已建有宽敞的行人大道，展示出独特且优美的景观，成了当地一个中心所在。这座建筑物本身呈鞍形(互反曲面)，集混凝土、木材、不锈钢和夹层安全玻璃于一身，形成了一个功能性空间。设计团队设计了一个宽度7.6米的不锈钢网格结构，跨度15.2米，横跨于预浇筑的拱座之间，下方为一座木质框架舞台。蚀刻玻璃板安装在网格结构外面，并由网架提供支撑。

## 材料选择



图 1: 舒伯特俱乐部壳形户外演奏场总览

整体设计是根据周边环境决定的:这一区域容易遭受洪水侵袭并且经常使用融冰盐,因此就排除了封闭式形状的运用,并且意味着其结构要能够耐腐蚀。而且,这座建筑还需要拥有坚实牢固的基础以抵抗洪水所夹带残骸物的冲击。这些因素再加上想要创造一种低维护量但具有高度建筑美的建筑物的愿望,使设计师选择不锈钢来制造这个网格结构。舒伯特俱乐部希望采用一种独特的构造,以吸引人们到访本岛,并将此区域建成一个重要的公共场所。

所有网格部件及界面板均采用(1.4404)以及 S30400 (1.4301)奥氏体不锈钢制造。S31603 不锈钢制作的加强梁用在网格边缘处。之所以选择这些不锈钢牌号,是考虑到这些材料要与邻近的高架道路所带来的悬浮融冰盐发生接触。融冰盐内含有氯化物,这些氯化物有可能导致合金化较低的不锈钢牌号发生腐蚀。



图 2: 壳形演奏场内的不锈钢构件和节点照片(照片来源:James Carpenter Design Associates and Shane McCormick)

不锈钢的表面指定为“优于 ASTM 标准所定义的 4 号表面”<sup>[1]</sup>。4 号表面是一种通用的抛光表面,其外表美观、维护量低并且易于修复。

## 设计

这座建筑物包含了一个 7.6 米宽的互反曲面网架并采用了玻璃顶板,网架横跨于预浇筑的混凝土拱座之上,覆盖着下方的木质框架舞台。桩基通过 3 个位于地下的现场浇筑的混凝土系梁连接至基础桩。这些系梁还起到了承受网架横向推力以及支撑舞台的作用。

设计团队对这座壳形建筑的预期特性进行了分析,目的是优化构件尺寸并得出各连接点所需的设计作用力。聘请了一家专业公司来评估和设计这些连接点。网架按照极限状态理论的原则进行设计以承受 ASCE 所规定的设计载荷<sup>[2]</sup>。

网架的成形是这样的:半径 8.4 米的上凸弧面沿着半径 8.6 米的下凹弧面旋转,具有角度的平面构成了一个四分对称的马鞍形。拱座与网架的端部形成正切关系。这种几何形状的一项明显优点是允许使用相同尺寸和细节的玻璃顶板,且所有玻璃顶板可以均为平面,从而避免了采用价格昂贵且外形难看的弯曲玻璃顶板或三角玻璃顶板。

这个网格结构由两层 1.4404 不锈钢管构成,钢管外径为 48 毫米(1.9 英寸),壁厚根据应力等级分为 5 毫米(0.20 英寸)或 10 毫米(0.40 英寸)。上层网架横跨在拱座之间,下层网架横跨在边梁之间(参见图 3)。上层钢管间距为 600 毫米,作为主要的载荷承受构件,其主要性能就像是一组连接拱。在靠近拱座的倾斜度最大的部分,构架要承受安装在其外部的玻璃顶板以及玻璃顶板之上所存在的各种载荷所带来的局部弯曲应力,其中最大的载荷是雪载荷。把这些钢管定位在顶层是为了能够尽量减少这种弯曲作用力。位于下层的钢管间隔约为 800 毫米,其曲度使这些钢管起到了拉撑上层构件的二级拱架的作用。

横跨在拱座之间的两个边梁由 203 102 13 毫米的中空、带有组装的锥形端的不锈钢结构型材构成。这些边梁也采用 1.4404 不锈钢制作,属于加强整个网格结构的边界元。

这两层钢管网格在构件交叉处用厚壁管件进行连接。这些管件长 51 毫米,直径 34 毫米,壁厚 8 毫米,在制作车间焊接到上层网架上,并通过 12.5 毫米的贯穿螺栓连接至下层网架。在上层钢管的每个构件交叉点均焊接一个长度为 19 毫米的外向部件。此外,还有一层直径 8 毫米的拉杆对角件连接着这两层钢管并起着拉撑构件的作用。



图 3: 这个壳形构造首先在制造商的停车场进行了组装以确保装配良好(图片来源:Tim Eliassen)



图 4: 准备发送至现场的弯曲构件(图片来源:Tim Eliassen)



图 5: 第一个弯曲构件的安装(图片来源:舒伯特俱乐部)



图 6: 弯曲边梁和网架构件的安装  
(图片来源: 舒伯特俱乐部)

每个外向部件可内穿一根贯穿螺栓, 用来连接一块玻璃连接板。玻璃顶板本身的设计并不承受载荷。对角拉撑构件为 1.4301 不锈钢杆, 屈服强度为 758 牛 / 毫米<sup>2</sup>, 通过固定在厚壁管件上的机加工扣环与厚壁管件连接。这些构件以一种米字形进行布置, 4 个对角构件在 4 个结构块上形成了一个完整的“X”形。在网架与两个预浇筑拱座之间均采用一块连续弯曲的 13 毫米厚板作界面。这两块厚板由不锈钢部件专业厂商提供给混凝土承包商, 可以帮助控制网架连接的位置。曾考虑过的另一方案是在预浇筑车间内、在网架端部的每个接头处置入埋入件, 但那肯定将导致网架端部接头的错位。

## 分 析

进行了详细的非线性有限元建模以便加深对设计方案特性的理解以及优化设计。材质和几何非线性因素均被纳入考虑。这项分析还针对该结构对于多顶板失稳的敏感性进行了评估。

采用一种弹塑性可变割线模量方法对不锈钢件进行了建模。这意味着高应力区得到了软化, 从而降低了几何刚度并让载荷得到了重新分配。这种建模方法类似于通常采用的可变裂纹混凝土模型。进行了非线性迭代处理, 直至所有构件均分配了一个对应于其峰值应力的弹塑性模量。采用各种载荷组合条件确定了设计应力和纵向弯曲载荷, 其中考虑了与美国北部环境相一致的雪载荷以及适当的温度差异。计算所用的雪载荷为: 均匀雪载荷为 1.9 千牛 / 米<sup>2</sup>, 偏移雪载荷为 2.9 千牛 / 米<sup>2</sup>。温度差异约为 50℃。此项分析得出使用载荷下的最大变形为 38 毫米。

## 制作和安装

作为基础, 两个拱座位置的下方都分别打入了 14 根摩擦管桩并浇筑充填了混凝土。由于空间限制以及现场下方土壤结构不良, 所以选择了打桩方式而不是开挖和浇筑的方式。由于对拱座表面外观以及两拱座之间的严密公差的高标准要求, 拱座采用了预浇筑制作方式。每个拱座在设计上都是一个单独的锥形曲面部件, 其重量超过了 50 吨, 并在一端设有内置梯级, 另一端设有斜坡弯道。



图 7: 壳形演奏场建筑相交节点  
(图片来源: 舒伯特俱乐部)

所有放线工作在一天之内完成。在最终测量完成后,所有网架端头连接的位置与其要求位置的偏差都在 3 毫米之内。

边梁、钢管和对角杆的装配花费了 3 天时间,最终定位、接头对准、螺栓拧紧、边梁与拱座顶板的焊接以及表面加工要求用时 2 周。承包商对 25% 的节点进行了现场测量以确保网架的实际形状符合分析模型。该测量发现了一处横向错位的情况,但是也表明实际形状与分析模型之间的差异控制在最低程度之内。在重新校准之后,所有节点的位置均位于各自规定坐标的 12 毫米范围之内。玻璃顶板在网络的顶角处通过铣削加工制作的铝制钻石形夹板与网架相连接。全部玻璃顶板完全就位耗时 1 周。硅酮密封又花费了 4 周时间。

舒伯特俱乐部壳形户外演奏场已建造近 10 年了,至今仍没有任何锈蚀褪色的迹象。在拱座处曾经有一些涂鸦,但已经被洗刷掉了。这座建筑物赢得了美国钢结构学会 2004 年度工程设计优秀奖以及美国工程师协会全国理事会 2004 年度结构工程设计优秀奖。



图 8: 玻璃顶板的安放  
(照片来源:舒伯特俱乐部)



图 9: 壳形演奏场建筑的夜晚景观  
(照片来源:Don F. Wong)

本案例信息由 SOM LLP 和 TriPyramid Structures 友情提供

## 参考资料和文献

- [1] ASTM A480/A480M-09b. Standard Specification for General Requirements for Flat Rolled Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip.
- [2] ASCE. 建筑物和其它结构最小设计载荷。
- [3] McCormick S., Besjak C., Stanton Korista D. and Baker W. (2004) Schubert Club Band Shell, Saint Paul, Minnesota, USA. Structural Engineering International Volume 14 No2 pp 140-141.

结构用不锈钢网上信息中心:  
[www.stainlessconstruction.com](http://www.stainlessconstruction.com)

本系列结构用不锈钢案例研究由 Team Stainless 赞助



## 采购详情

客户:	舒伯特俱乐部
建筑师:	James Carpenter Design Associates
土木工程师和结构工程师:	Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM)
主承包商:	Meisinger Construction and TriPyramid Structures.
制作厂	Van Noorden