

“莫比乌斯环”双曲面异形铝板幕墙施工技术*

赵大勇

(中铁建设集团有限公司, 北京 100049)

[摘要] 随着人们对建筑灵动和张力的要求提升,许多重要的公共场所,如办公楼、商场、体育场、图书馆采用复杂曲线的外观设计,然而也增加了施工难度。青岛大学城图书馆莫比乌斯环双曲面造型幕墙安装施工,采用基于三维控制网的构件空间定位、吊篮软包技术和幕墙深化翻样技术,有效提升了构件的准确性和可靠性,提高了双曲面造型幕墙的安装精度,降低了成品破坏率。

[关键词] 幕墙;莫比乌斯环;双曲铝板;空间定位;深化翻样;施工技术

[中图分类号] TU767 [文献标识码] A [文章编号]

Construction Technology of “Mobius Ring” Hyperbolic Special-shaped Aluminum Plate Curtain Wall

ZHAO Dayong

(China Railway Construction Co.,Ltd., Beijing 100049, China)

Abstract: As the requirement for architectural flexibility and tension increases, many important public places, such as office buildings, shopping malls, stadiums and libraries adopt complex curved exterior design, however, it also increases the difficulties of construction. Mobius ring hyperbolic special-shaped curtain wall installation and construction technology is proposed in the library of Qingdao University City, based on the spatial positioning of 3D control network components, basket soft package technology and curtain wall deepening and turning technology, which effectively improves the accuracy and reliability of components, increases the installation accuracy of hyperbolic special-shaped curtain walls, reduces the destruction rate of finished products.

Keywords: curtain wall; Mobius ring; hyperbolic aluminum plate; spatial positioning; deepening and turning; construction

*中铁建设集团有限公司 2021 年度科技研究开发课题 (LX
21-15b)

[作者简介] 赵大勇, 工程师, E-mail: 294311581@qq.com

[收稿日期] 2023-07-27

1 工程概况

青岛大学城公共场馆一期（图书馆）工程位于青岛市黄岛区古镇口军民融合示范区内，三沙路以东、桃林一路以南、观海台路以北，是一座具有先进技术、完善设施、提供优质服务的现代化大学图书馆，旨在满足大学城内学生的学习需求，并向社会开放。图书馆的外观采用了对称设计，地面 7 层、地下 1 层，建筑高度为 41.4m。

本项目分为 6 个幕墙系统，系统间幕墙形式差异大，且主入口的莫比乌斯环钢结构及幕墙为双曲面造型，且跨度达 60m。幕墙体系技术含量较高，因建筑外形轮廓为椭圆形、幕墙造型较多、系统多变，施工难度大。莫比乌斯环部位锥体突出外表面的尺寸渐变，每个锥体的突出尺寸都不同，且锥体在立面上的排布为无规律排列，锥体间的搭接尺寸多变。突出立面的铝板三角锥体数量多达 1 774 个，穿孔铝板三角锥体数量多达 619 个。莫比乌斯环效果如图 1 所示。



图 1 莫比乌斯环幕墙效果

Fig.1 Effect of Mobius ring curtain wall

2 工程重难点

2.1 钢构件安装测量

主入口莫比乌斯环双曲面异形铝板幕墙，双曲面造型如图 2 所示，铝板内侧钢结构为空间弯扭形状，吊挂生根于主体钢结构，跨度约 60m，钢构件安装测量难度大。而且，莫比乌斯环为异形结构，外观独特，呈现曲面流线造型，因此重点考虑设计可施工性，三维建模难度大^[1]。本工程对结构体系的卸载和稳定性进行实时监测，以确保其质量。然而，大多数构件的定位和控制都需在高空环境下完成，这使得后续安装工作变得极其复杂。

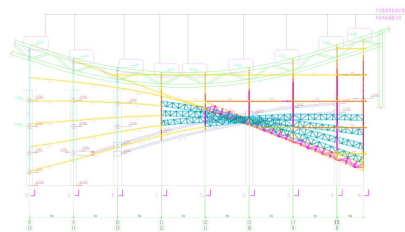


图 2 莫比乌斯环双曲面造型

Fig.2 Hyperbolic modeling of Mobius ring

2.2 吊篮升降破坏成品

本工程幕墙系统完成面进出尺寸差异大，出结构面尺寸大，吊篮搭设不能一次到位，分 2 次搭设，主龙骨施工及内侧面板完成后再进行吊篮外调报验和施工造型部分，这样便会导致吊篮对施工成品造成破坏。因此，需着重考虑成品保护问题，主要考虑吊篮上升、下降时会碰撞造型铝板。

2.3 大面造型系统拼接

本工程大面造型较多，不同面板错位拼接衔接，且排版不规律，易出现系统性渗漏隐患。大面块铝板拼接安装具有伸缩缝隙宽度尺寸难于控制、累积变形过大等技术难题。

3 工艺原理

3.1 三维控制网空间定位技术

在主入口莫比乌斯环双曲面异形铝板幕墙安装时事先建立三维空间控制网，同时结合平面控制网精准定位双曲面异形铝板幕墙龙骨及其他构件位置。根据莫比乌斯环三维模型，精准提取各连接件的三维坐标，然后通过放样安装固定连接件^[2]。

按幕墙方案图纸和幕墙深化节点，提取分格控制坐标点，采用 Rhino 软件对幕墙系统进行 1:1 建模，利用软件导出的 1:1 模型加工造型骨架及面板。在三维实体模型中，考虑各项数据，体现胶缝、伸缩缝等，最后用 Rhino 软件将铝板外幕墙展现出来，并进行铝板编号以便指导施工^[3]。

3.2 吊篮软包处理

为解决吊篮对成品的破坏问题，本项目对吊篮四周进行软包围处理，箱体造型尽量采用独立单元整体安装，且固定方式采用栓接，从而大大降低吊篮上升、下降时碰撞造型铝板等的概率。

3.3 深化翻样幕墙结构

由于本项目大面造型多，幕墙造型结构复杂，大面造型排版及龙骨安装成为施工重难点。为解决施工过程中大面造型相关问题，在项目开始就做好深化设计幕墙结构形式、收口节点，并单独深化龙骨布置图，且设定编号尺寸，定尺加工，按编号上墙安装。同时，采用“由低到高，区域施工”的施工原则，避免由于结构变形、标高不规则变化等因素出现施工质量问题^[4]，以保证建筑线条流畅、外形美观。

4 操作要点

施工工艺流程主要为：幕墙深化翻样→测量定位放线→后置埋件安装→立柱安装→吊篮搭设→水平龙骨安装→铝板安装→打胶嵌缝。

4.1 幕墙深化翻样

在幕墙深化设计阶段，通过构建幕墙控制模型，利用主体结构基础模型的空间关系，深入探索单元框架的演变，并将其转换为实体幕墙单元，从而研究其可建造性和性能，经设计院审核，再进行细节设计，最终将其转换成三维可视化模型，拆分施工单元，并将其拆解、分段，每个构件都编上号码，经过多次校准，最终标记出构件尺寸，以供工厂加工使用。幕墙加工企业获取 BIAD 100%信息数据后深化翻样实体幕墙单元。采用单元式、装配式施工解决高空安装、焊接施工难题，将大量工作转为地面进行，整体吊装，缩短施工工期，减小施工难度。

4.2 测量定位放线

本工程阅览区幕墙系统结构形式为非常规框架形式，单层立柱不贯通，长短不一且交错布置，结构受力形式多变，龙骨排版及安装难度极大，板面造型多变，玻璃与铝板三角体箱盒造型交错不规则布置，造型突出尺寸大，最大达 700mm，不同幕墙形式交接收口多，收口质量控制难。故采用三维控制网技术，在测量放线时利用 Rhino 软件对现场进行 1:1 建模，按模型数据和现场条件指导测量放线。

1)按设计标准，对结构控制线进行精确调节，并尽可能靠近结构边界，同时保证其距离柱的距离，确保其距离 $\leq 1\ 000\text{mm}$ 。按设计标准，使内控线和放样图的距离保持一致，并通过全站仪对其进行实时监督，确保无任何重复，最终完成对周围结构的精确测量，从而达到完美的封闭效果^[5]。

2)根据给定的轴线、基准点和控制线，将其分

割开来，并使用测量仪器精确计算每条外部控制线的距离，然后使用全站仪检查这些外部控制线的交叉处，最后将它们组织起来，构建一个完整的、由多个二级控制点组成的二级控制系统。在二级控制网的基础上，进一步搭建三维控制网，准确评估建筑物的实际尺寸和预期尺寸^[6]，如图 3 所示。

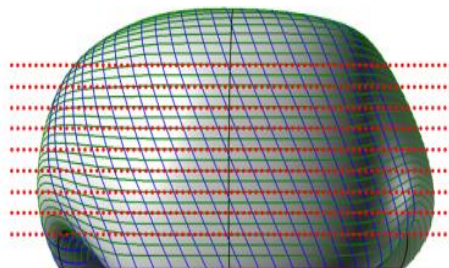


图 3 幕墙外单元轮廓线

Fig.3 Outline of the elements outside the curtain wall

4.3 后置埋件安装

根据测量定位放线的点位，在钢结构梁或柱上标识后置埋件安装位置，包括水平高度和后置埋件中心位置。初步安装后置埋件，应及时校核高度和中心位置，确保准确后再用锚栓进行加固。

4.4 立柱安装

作为整个铝板幕墙支撑固定结构，立柱安装首先要根据图纸尺寸确定基准轴线安装基准框架，基准框架施工完毕后，确认标高及进出等尺寸与图纸相符无误后，进行大面积框架施工，在安装时应对每层框架的标高、垂直度、分格尺寸跟踪检查并做记录。

1)前期准备：钢立柱、短梁牛腿依据深化图纸下料切割，尺寸偏差控制在 $\pm 1\text{mm}$ ，将下料好的型材进行去毛边、飞边、除锈、编号处理，安装前喷涂 1 遍防腐 2 遍底漆处理。

2)立柱安装：钢立柱安装须从底边定位向上推移，将立柱与锚板翼板焊接连接，在立柱上标记牛腿位置，牛腿位置准确性和质量将影响整个铝板幕墙的安装质量，须将牛腿平面轴线误差控制在 2mm 以内。

3)牛腿安装：因铝板每层错开、向上逐层收缩，须依据图纸将加工后的牛腿短梁进行编号处理，将编号的牛腿依次焊接至立柱上用来锚固弧形钢梁。

4.5 吊篮搭设

本工程幕墙系统完成面进出尺寸差异大，出结

构面尺寸大，吊篮搭设不能一次到位，分 2 次搭设，考虑吊篮上升、下降时会碰撞造型铝板，对吊篮四周进行软包围处理，箱体造型尽量采用独立单元整体安装，并且采用栓接固定方式，如图 4 所示。



图 4 吊篮软包围处理防护

Fig.4 Soft surrounding treatment and protection of hanging basket

4.6 水平龙骨安装

由于铝板幕墙的复杂性，其中次级龙骨大小和材料选择也有所变动。根据调整后建筑模型，利用三维放线定位技术进行现场实际放样，确定主龙骨的上下空间位置^[6]。

因铝板幕墙为曲面异形导致次龙骨规格尺寸不一，加工时须参照深化设计图纸分段加工、统一编号、分类存储，如图 5 所示。

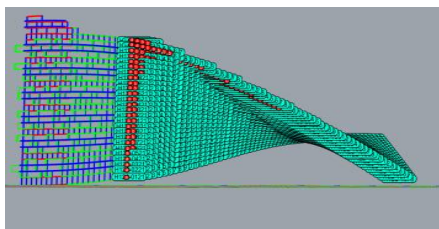


图 5 龙骨编号及定位点

Fig.5 Keel number and positioning point

1)水平钢龙骨在加工场地先焊接成型，经校正后再上墙，如图 6 所示。



图 6 龙骨焊接成型

Fig.6 Welding and forming for keel

2)主、次龙骨的安装尺寸误差在外控制线尺寸范围内“消化”，误差值不得向外延伸。根据

轴线处控制钢丝线为基准，进行龙骨分格安装，如图 7 所示。



图 7 龙骨分格安装

Fig.7 Grid installation of keel

3)龙骨焊接施工完成后进行自检，如图 8 所示，重点检查焊缝质量及几何尺寸，自检合格后填写隐蔽工程验收单，报监理单位验收，验收合格后再将焊缝涂二次防锈漆。



图 8 焊接施工

Fig.8 Welding construction

4.7 铝板安装

莫比乌斯环部位锥体突出外表面的尺寸渐变，每个锥体的突出尺寸都不同，且锥体在立面上无规律排列，锥体间的搭接尺寸多变。宽度方向投影主要分为单分格、双分格、三分格，锥体外边缘突出玻璃外表面 700mm。单分格三角锥体外表面积约 3.27m²，双分格三角锥体外表面积约 5.3m²，三分格三角锥体外表面积约 7.34m²。单分格三角锥体宽度为 1 150mm，双分格三角锥体宽度为 2 200mm，三分格三角锥体宽度为 3 250mm，高度方向分为 1 150mm、1 300mm 2 个规格，每个三角锥体左右突出玻璃表面的尺寸为由 175mm 渐变至 550mm，铝板厚度为 3mm，三角锥体搭接部位通过共用 100mm 高的盒子铝板衔接。

铝板面为双曲面，下料精度要求高，且铝板单元板块必须通过三维建模指导下料，如图 9 所示。前期须进行深化设计，经设计单位同意后，将一块块铝板分解成平面，然后下单由厂家加工。项目材

料人员负责按现场需要的顺序对厂家跟踪和清点到货。

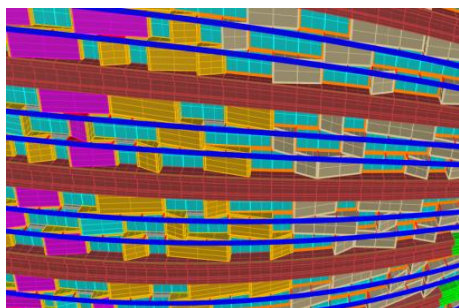


图9 铝板模型

Fig.9 Aluminum plate model

1)材料到场后进行分类、分区运输,保证一次就位,避免积压和二次搬运。为了满足竖缝宽度20mm及竖向对缝的安装精度,必须在每条龙骨上均画出控制线,避免累积误差。

2)将分类好的铝板吊运至指定位置,铝单板安装应按板块分配图上板号安置就位^[7],用不锈钢螺栓在次龙骨上初步固定,调整横、竖缝间隙符合要求后再固定。铝板安装时左右、上下的偏差 $\leq 1.5\text{mm}$ 。

3)依据编号图的位置,按要求拉横向和竖向控制线的铝板施工安装,如图10所示。

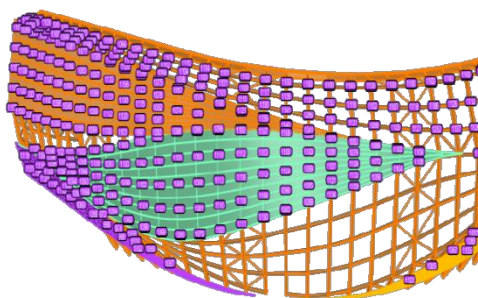


图10 铝板及格栅编号

Fig.10 Aluminum plate and grid numbering

4)铝板安装过程中,根据编号图指示,对铝板安装进行操作,必须沿着纵横方向精确操作,以确保刚架稳定性,并且对于支撑点位置,必须采取必要措施确保其稳定性。

4.8 打胶嵌缝

1)撕开铝板保护膜折边部分,在 90° 转角折边处贴上美纹纸,应折 90° 转角,要求美纹纸一次贴到位,用力抹平,不发生美纹纸折皱现象。

2)在铝板缝隙处密实平直填充泡沫棒。注胶时顺序按从上至下或从左至右,按直线一次打完胶。

3)撕去美纹纸呈外向 45° 倾斜拉扯,撕去铝板

保护膜,用中性清洁剂清洁铝板。

5 结语

1)双曲幕墙和传统幕墙相比其系统更为多变复杂、下料精度要求高,对幕墙安装质量控制细节的要求越来越高,采用三维控制网技术能提高下料精度、避免材料浪费、降低施工成本^[8]。

2)青岛大学城公共场馆一期(图书馆)项目莫比乌斯环幕墙系统结构复杂、造型多变、施工要求精度高,双曲面异形铝板加工及施工难度大,采用Rhino进行参数化建模技术可很好地解决这一难题。

3)同时,吊篮软包技术和幕墙深化翻样技术的结合应用在一定程度上减少了成品损坏,符合国家建筑绿色发展与低碳环保的要求,产生良好的工程效果。

参考文献:

- [1] 张月楼,刘祥,张良兰,等.“莫比乌斯环”环状落地大跨度拱形桁架多层钢结构设计及施工控制研究[J].建筑结构,2022,52(S2):513-518.
ZHANG Y L, LIU X, ZHANG L L, et al. Research on the design and construction control of “Mobius ring” annular floor-to-ceiling large-span arched truss multi-storey steel structure[J]. Building structure, 2022,52(S2):513-518.
- [2] 何小波,张健,徐攀.大型单元式双曲面铝板幕墙施工技术[C]//2021年全国土木工程施工技术交流会论文集(中册),2021.
HE X B, ZHANG J, XU P. Large unit type hyperbolic aluminium curtain wall construction technology[C]//Proceedings of the 2021 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference (Volume 2), 2021.
- [3] 何茂林,刘家平,严琳,等.基于Rhino技术的双曲铝板幕墙施工方法[J].建筑施工,2022,44(12):2919-2922.
HE M L, LIU J P, YAN L, et al. Construction method of hyperbolic aluminium curtain wall based on Rhino technology[J]. Building construction, 2022, 44(12): 2919-2922.
- [4] 陈浩,杨蒙,王跃,等.基于BIM技术的双曲面铝板金属幕墙模块化施工工艺[J].建筑施工,2021,43(1):43-46.
CHEN H, YANG M, WANG Y, et al. Modular construction process of hyperbolic aluminium sheet metal curtain wall based on BIM technology[J]. Building construction, 2021,43(1): 43-46.
- [5] 徐子涵,黄锟,李伟鹏,等.基于BIM技术的旋转坡道双曲铝板设计与安装方法研究[J].建筑技术,2023,54(4):402-405.
XU Z H, HUANG K, LI W P, et al. Research on the design and installation method of double curved aluminium panels for rotating ramps based on BIM technology[J]. Architecture technology, 2023, 54(4): 402-405.

- [6] 向伟明,童华炜,周艳杰.倒置保温层铝板轻质屋面施工新技术[J].施工技术,2013,42(15):64-67.

XIANG W M, TONG H W, ZHOU Y J. New technology of inverted insulation layer aluminium sheet lightweight roof construction[J]. Construction technology, 2013, 42(15): 64-67.

- [7] 张立刚,张文斌,吕洋,等.BIM技术在莫比乌斯环状钢结构工程中的应用[J].建筑机械化,2022,43(10):105-107.

ZHANG L G, ZHANG W B, LÜ Y, et al. Application of BIM technology in Mobius ring steel structure project[J]. Construction mechanization, 2022, 43(10): 105-107.

- [8] 苏杭,聂际兴,余沛,等.双曲面三角形凹凸面铝板幕墙施工技术[J].施工技术,2015,44(6):92-94,103.

SU H, NIE J X, YU P, et al. Construction technology of a aluminium curtain wall with hyperbolic triangular concave-convex surface[J]. Construction technology, 2015, 44(6): 92-94, 103.