

空间棱锥式单元金属屋面施工技术*

王上上

(中铁建设集团有限公司, 北京 100049)

[摘要] 青岛大学城图书馆项目位于沿海地区, 采用棱锥式单元金属屋面系统, 旨在解决传统屋面系统在抗风、防水性及美观方面的不足。该屋面系统包含 302 个三角锥, 具有坡度大和低中部排水特性, 因而对防水和抗风性能有较高要求。通过采用 BIM 技术深化设计, 并结合双层防水及双路径抗风技术, 优化了结构节点和连接方式, 显著提升了屋面的防水性和抗风性, 确保了屋面造型的整体美观。本工程的综合技术应用不仅保证了屋面的整体防渗漏, 也实现了图书馆金属屋面实用与美观的统一。

[关键词] 屋面; 金属屋面; 建筑信息模型; 双层防水; 双路径抗风; 棱锥单元

[中图分类号] TU758.11

[文献标识码]

A

[文章编号]

Construction Technology of Spatial Pyramid Unit Metal Roof

WANG Shangshang

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

Abstract: Qingdao University City Library project, located in a coastal area, employs a pyramidal unit metal roofing system designed to overcome the deficiencies in wind resistance, waterproofing, and aesthetics found in traditional roofing systems. This roofing system comprises 302 triangular cones and features significant slopes with low central drainage, thus demanding high standards for waterproofing and wind resistance. The project utilized BIM technology for in-depth design and incorporated dual-layer waterproofing and dual-path wind resistance technologies to optimize structural nodes and connection methods, and significantly enhanced the roof's waterproofing and wind resistance, while also ensuring the overall visual appeal of the roofing design. The comprehensive use of these technologies not only ensured the roof was completely leak-proof but also successfully achieved a practical and aesthetic integration of the library's metal roof.

Keywords: roofs; metal roofs; building information modeling(BIM); double-layer waterproofing; double-path wind resistance; pyramid unit

0 引言

图书馆作为一个城市的文化地标, 在城市的文化建设中有着非常重要的作用^[1]。在图书馆建造中, 兼顾美观要求的同时, 也要

注重其建设质量, 以满足其基本功能实现。

屋面作为图书馆的第五面, 需满足美观要求。屋面也是图书馆重要的围护结构^[2], 承载着建筑抗风、防水等功能, 为馆内提供舒适环境。传统的屋面系统在抗风揭、防水性、美观等综合性能方面不能兼顾; 而金属屋面耐久性好, 有很强的延展性和可加工性, 易造型, 适用于复杂造型的建筑屋面。

1 工程概况

青岛大学城图书馆项目位于青岛市黄

*中铁建设集团有限公司 2021 年度科技研究开发课题 (LX21-15b)

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

[收稿日期] 2023-07-27

岛区古镇口军民融合示范区内，为地标性建筑。图书馆定位为—座文献信息传输速度快、自动化程度高、数字化功能强的现代化高校图书馆，以服务于大学城内高校为主，同时面向社会开放。图书馆的主体建筑平面呈相对对称布局，地上共 7 层，地下为 1 层。建筑高度为 41.4m。

图书馆屋面投影面积约为 1.38 万 m²，其中铝合金装饰格栅投影面积约为 1 657m²，其余为功能型屋面系统，屋顶表面材料选用表面经过自然钝化的钛锌板。

屋面系统由钛锌板立边咬合系统、不锈钢排水天沟系统、采光天窗系统、铝格栅屋面系统组成。整体的屋面由 302 个单元块组成，每个单元分成 4 个屋面板块，最高点位于整体造型的长轴两侧，最低点位于造型的重心点，最高点与最低点相差 21m。

屋面采光排烟采用侧窗，屋面天沟位于轴线位置，纵横交叉布置。屋面排水系统采用虹吸排水系统与重力排水系统相结合的方式。

建筑造型整体上为椭圆，视觉效果柔和连贯。屋顶设置众多的棱锥造型，如图 1 所示，为侧天窗的实现留出空间。作为各独立单元的棱锥造型，由于排水方向不同，为满足排水要求，屋面在棱锥单元间设置纵横交错的天沟。

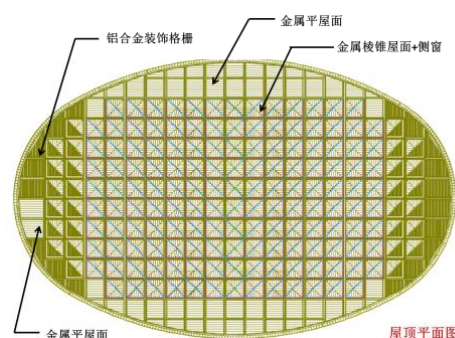


图 1 屋面棱锥排布示意

Fig.1 The prismatic arrangement of the roof

2 工程重难点分析

1)屋面施工涉及多个系统，造型复杂，工期难控制。屋面造型的整体平滑度、顺滑度控制难度大，同时多专业、多界面进行交

叉交接，节点构造复杂、外观定位难度大。

2)屋面由 302 个三角锥组成，坡度较大，且屋面中间低，承担排水较多，对此部位防水要求高，且防水卷材被支座穿透，连接区域易发生渗漏。

3)图书馆工程位于空旷区域，青岛夏季盛行东南风，风力大，工程的整体抗风性能要求高。

因此，天沟与屋面间的密封性非常关键。本项目金属屋面的施工重难点为防水、抗风。

3 施工操作要点

3.1 施工工艺流程

施工工艺流程为：BIM 深化设计、三维定位→测量放线→地面拼装骨架→骨架吊装→天沟系统安装→底板安装→泡沫玻璃铺设→防水卷材铺设→玻璃安装→固定支座安装、双路径抗风系统安装→降噪网安装→屋面板安装。

3.2 BIM 深化设计、三维定位

1)确定钢结构三维空间模型。在土建及钢结构等施工阶段，屋面专业复测及时跟进，利用 3D 激光数据扫描仪对钢结构进行全方位扫描。理论结合数据，在施工前期对卸载的钢结构进行现场三维扫描测量，利用点云模型与理论下料模型再次进行校核，仔细核对钢结构主体偏差。针对偏差过大部分，在屋面工程施工前，会同钢结构专业人员进行调整，确保理论模型与现场工况一致性，为金属屋面各系统安装打好基础。

2)各功能层空间定位。利用金属屋面基础表皮模型进行分析，如图 2 所示，结合现场复测数据，各功能层由最终装饰板层从外向内进行尺寸控制来保证最终建筑效果。屋面施工精度通常受限于钢结构、土建安装和沉降误差^[3]。在关键工序（檩条、底板、固定支座）利用 BIM 坐标点、三维测量技术进行精确定位，同时设计可调差的节点方式进行累积误差“消化”^[4]。结合单元施工工艺，减少高空作业、提高安装质量、确保施工精度。



图 2 金属屋面基础表皮模型构建

Fig.2 Construction of metal roof foundation skin model

3)施工前由总包方协调各施工单位进行理论模型匹配,在安装前消除理论碰撞,确保屋面板块 100%理论预下料。

4)输出数据。基于 BIM 模型,坐标定位提取,导出三维坐标,生成现场安装控制坐标。加强外形控制。

在保证建筑外观的同时,对檐口铝板进行分析,结合工厂铝板的加工工艺,利用 Grasshopper 二次开发编程技术,优化加工方案。与 BIM 管理平台进行物料跟踪进度管理,采用 BIM 模型协同化设计、所有构件进行预下料加工,提高加工精度,缩短工期。

3.3 骨架吊装

本工程檩条均采用地面单元式拼装,然后通过塔式起重机和汽车式起重机吊至屋顶高空堆放平台后,通过高空安全走道搬运至施工区域,如图 3 所示。

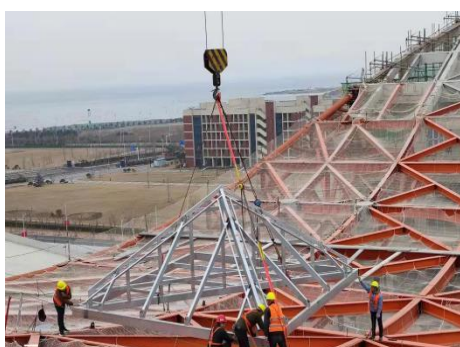


图 3 棱锥体骨架吊装

Fig.3 Lifting for pyramid framework

在安全走道无法伸及的区域,将可移动架板固定在钢檩条上,铺 10mm 厚木板,用钢管做两边栏杆,一个区域完工后将其拆除

并移至另一个区域。

檩条吊装就位后穿入螺栓,先检查已安装檩条顶面是否平齐,确认顶面调成一致后再拧紧螺栓。钢檩条高差可通过在连接件上开椭圆孔来调节。

3.4 天沟系统安装

为预防超强降水可能导致的排水不及时,水渗透进屋面,南北向坡度天沟做 30cm 高倒 U 形挡水措施,将高处流下来的水从东西向天沟引流排走。

镀锌天沟未设置传统的伸缩缝,而是在与骨架搭接处的折边采用长圆孔自攻螺钉固定,通过天沟板折边的长圆孔解决天沟伸缩问题,镀锌天沟板长度方向未做通长满焊,考虑了分段来减少天沟伸缩量,如图 4 所示。



图 4 天沟系统安装

Fig.4 Gutter system installation

3.5 泡沫玻璃、防水卷材铺设

泡沫玻璃铺设前利用 BIM 三维软件进行预排板,铺设时左右错缝铺设,带沥青的一面向上,在遇到角部要切斜口时使角部拼接密实。

为防止泡沫玻璃长时间暴露,其铺设与防水卷材铺设同步进行,在裸露和交接缝处用彩条布等物覆盖。

防水卷材的铺设方向应该顺排水方向进行热熔化焊接,搭接宽度 $\geq 80\text{mm}$,铺设防水卷材前应对泡沫玻璃基层进行清理。先按预先布置图准确放线,并预先铺设防水卷材,需按排水坡度进行顺坡错缝搭接铺设,如图 5 所示。



图 5 棱锥防水卷材铺设

Fig.5 Pyramid waterproofing membrane laying

钛锌板不锈钢固定支座的自攻螺钉虽穿透了 SBS 防水卷材，但未穿透泡沫玻璃，在项目现场做样板进行蓄水试验，发现泡沫玻璃和防水卷材热熔粘接后可起到防水效果。

3.6 双层防水技术

本工程为一级防水屋面，构造做法为（由上至下）：0.7mm 厚 25-430 型钛锌板屋面；6mm 厚通风降噪丝网；2 层 3mm+3mm 厚 SBS 改性沥青防水卷材；1.5mm 厚四面尺尺盘，间距 430mm×350mm；100mm 厚保温泡沫玻璃，上层沥青贴面，下层玻纤贴面；1.0mm 厚 YX35-190-950 型镀铝锌钢底板；140×80×4 热镀锌钢矩形管，材质为 Q235B。

1) 屋面第 1 道防水体系为 0.7mm 厚 25-430 型钛锌板屋面，第 2 道防水层为 2 层 3mm+3mm 厚 SBS 改性沥青防水卷材。即使第 1 道防水层出现渗漏也可通过第 2 道防水层排至天沟，避免发生内部积水、渗漏，如图 6 所示。

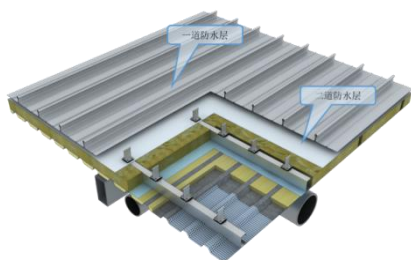


图 6 金属屋面双道防水体系

Fig.6 Double waterproofing system for metal roofing

2) 屋面板咬合缝布置在排水方向背面。防止雨水沿屋面主排水方向排水不及时浸入屋面内部。屋面板板头处采用刚度加强件

对屋面板头加固及外堵头打胶密封固定，设置滴水片，防止强风时板头漏水。

3) 设置集水井和挡水板。在天沟雨水斗位置设置集水井，天沟底部未积深雨水时，集水井已积满，提前形成虹吸流增加安全储备（虹吸系统形成虹吸流需 100mm 以上积水深度）。天沟底部坡度 $>15^\circ$ 的天沟每间隔 10m 及集水井下侧设置挡水板，使高速下滑的雨水减速及阻挡至虹吸集水井，使其确保雨水快速汇入集水井后形成虹吸流，虹吸斗需设置保护罩。

3.7 双路径抗风技术

3.7.1 加强抗风薄弱区域的抗风措施

由于金属屋面风荷载特性，抗风性能的实现需对薄弱处支座等进行加强^[5]。

针对局部抗风薄弱环节，采取双路径抗风处理，加设抗风配件。天沟边缘的支座改用勾搭形式的不锈钢滑梯支座，并通过 Z 形支撑将屋面板的风荷载传导至主结构上，整体结构采用插接可滑移的节点，使屋面板与支座和抗风配件共同抵抗风荷载来解决斜切屋面板端部抗风能力薄弱问题，保证屋面系统整体和局部风荷载较大区域的抗风性能，如图 7 所示。

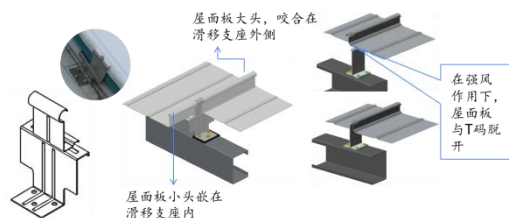


图 7 抗风滑梯支座

Fig.7 Anti-wind sliding bearing

针对抗风薄弱区域的屋面板施工，进行多次收边咬合，确保此部位屋面板咬口紧密，咬合完毕后立刻固定抗风构件施工^[6]。

3.7.2 屋面系统未封闭状态下的抗风能力加强

屋面板安装前，提前关注气象资料，屋面铺装时避开大风、雨季等不良天气。施工过程中遇恶劣天气时，应及时停止施工。从屋面被风揭破坏的实例分析，直立缝屋面系统通常在边缘区域最先被破坏，采用柔性防水材料与刚性防水材料对已铺完的屋面板侧面部位进行封堵^[7]，加设临时抗风件，防

止屋面被破坏。

4 质量控制

4.1 质量控制标准

按《建筑安装工程施工及验收规范》《建筑安装工程质量评定标准》、GB 50207—2012《屋面工程质量验收规范》GB 50345—2012《屋面工程技术规范》等相关规范、规程、标准的质量约定执行。

4.2 质量控制措施

金属屋面由多个系统构成,包含很多机械连接组合。因此,金属屋面的整体质量水平取决于组合构造中最薄弱的位置,需保证每个系统的质量^[8]。

4.2.1 BIM 深化设计的质量保障措施

在 BIM 三维模型建立时,要综合考虑屋面构造层次和屋面板的适应性与最终钢结构的理论模型匹配情况进行微调,统一在设计院给定的趋势线进行分格布置,以确保屋面装饰板分格统一。利用可调差的节点设计及现场测量技术,实现屋面系统全程理论预下料,保证每个构件的安装精度,从而实现最终的建筑外观。

4.2.2 抗风施工质量保障措施

在设计阶段根据基本风压进行风荷载组合,在天沟处屋面板头自由为收缩端,屋面板头咬合在周期性的风荷载作用下会松弛变形,影响屋面板的咬合力^[9],且天沟区域为屋面受力最集中区域,根据设计院提供的基本风压进行风荷载组合,计算屋面板的咬合力、支座与钢盘底座的抗拔力,保证此部位的受力达到2倍的计算极限值^[10],从而保证抗风施工质量。

扣件安装时要控制好螺钉的紧固程度,避免出现沉钉或浮钉,确保屋面不锈钢扣件安装质量。不锈钢扣件安装完成后,严格检查不锈钢扣件的安装要求及允许偏差,保障屋面板的抗风性能。

4.2.3 防水施工质量保障措施

根据风荷载的系数对角区、边区、边角区进行抗风加强。避免卷材宽度方向裁开布置后卷材焊接工作量大幅度增加而影响施工质量。

泡沫玻璃的施工均按规范^[11]进行技术

交底,施工过程中对接缝处均按规范要求采用密封胶进行密封。SBS 改性沥青防水卷材热熔施工均按规范^[12]进行技术交底后再进行施工,全过程巡查,严控安全 and 质量。

5 结语

青岛大学城图书馆项目金属屋面运用 BIM 技术协同建立模型,采用双层防水技术、双路径抗风技术等,解决了施工防水抗风、造型的整体平滑度、顺滑度控制难度大等重难点问题,为今后类似空间棱锥式单元金属屋面施工提供了实际施工经验。

参考文献:

[1] 李勇慧,白兴勇.图书馆与城市文化建设[J].国家图书馆学刊,2007(3):66-69.

LI Y H, BAI X Y. Library and urban culture construction [J]. Journal of the National Library of China, 2007(3): 66-69.

[2] 张晓峰.蓄水屋面隔热构造与节能性能研究——以苏州大学炳麟图书馆为例[J].建筑节能,2008(1):23-25.

ZHANG X F. Research on thermal insulation structure and energy saving performance of rainwater harvesting roof——taking Binglin Library of Soochow University as an example [J]. Building energy efficiency, 2008(1): 23-25.

[3] 严国兴,严吉涛.兰州奥体中心体育场金属屋面工程施工技术[J].城市建筑,2021,18(19):144-146,160.

YAN G X, YAN J T. Construction technology of metal roof engineering for Lanzhou Olympic Center Stadium [J]. Urbanism and architecture, 2021, 18(19): 144-146,160.

[4] 佟克龙.大跨度异形钢屋盖结构设计施工关键技术[J].施工技术(中英文),2023,52(08):51-54,60.

TONG K L. Design and key construction technologies of long-span irregular steel roof structure [J]. Construction technology, 2023, 52(8): 51-54,60.

[5] 宣颖,谢壮宁.大跨度金属屋面风荷载特性和抗风承载力研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(3):41-49.

XUAN Y, XIE Z N. Research progress on wind load characteristics and wind resistance bearing capacity of long-span metal roofs [J]. Journal of building structures, 2019, 40(3): 41-49.

[6] 易伟.360°锁缝板防水一体化施工技术[J].建筑技术开发,2019,46(9):69-71.

YI W. 360° lock seam plate waterproof integrated construction technology [J]. Building technology development, 2019, 46(9): 69-71.

[7] 邓卫宁.国外金属屋面系统分析[J].四川建筑科学研究,2009,35(1):90-93.

DENG W N. Analysis of foreign metal roofing system [J]. Sichuan building science, 2009, 35(1): 90-93.

[8] 黄唯,吴耀华.金属屋面在我国工程应用中存在的主要问题及分析[J].工业建筑,2013,43(6):150-156.

HUANG W, WU Y H. Main problems and analysis of metal roofing in engineering application in China [J]. Industrial construction, 2013, 43(6): 150-156.

[9]雷君武,卢建文,刘彪,等.沿海地区双曲面高抗风揭性能金属屋面施工技术[J].施工技术(中英文),2023,52(11):98-101,112.

LEI J W, LU J W, LIU B, et al. Construction technology of double curved surface metal roof with high wind resistance performance in coastal areas [J]. Construction technology, 2023, 52(11): 98-101,112.

[10] 方佩岚,刘艳巍.为世界最大会展中心穿上靓丽的金属外衣[N].建筑时报,2018-08-09.

FANG P L, LIU Y W. Put on a beautiful metal coat for the world's largest exhibition center [N]. Building Times, 2018-08-09.

[11]上海市建筑科学研究院(集团)有限公司,上海建科检验有限公司,浙江振申绝热科技有限公司.泡沫玻璃绝热制品:JC/T 647—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

Shanghai Research Institute of Building Sciences (Group) Co.,Ltd.,Shanghai Jianke Technical Assessment of Construction Co.,Ltd.,Zhejiang Zhenshen Thermal Insulation Technology Co., Ltd. Cellular glass product for thermal insulation : JC/T 647—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

[12]山西建筑工程(集团)总公司,上海市第二建筑有限公司.屋面工程质量验收规范:GB 50207—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

Shanxi Construction Engineering (Group) Corporation,Shanghai No.2 Construction Co.,Ltd. Code for acceptance of construction quality of roof: GB 50207 — 2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.