

DOI: 10.7672/sgjs2026080025

# 冰雪综合体 BIPV 金属屋面施工技术\*

段伟,黄昕,陆通,雷京龙,彭晶  
(武汉建工集团股份有限公司,湖北 武汉 430000)

[摘要] 冰雪运动的快速发展激发了冰雪经济活力,成为经济新增长点。利用光伏发电是解决大型室内滑雪场高能耗问题、助力实现国家“双碳”目标的有效手段。以甘露山文创城冰雪综合体为工程背景,对 BIPV 金属屋面进行一体化设计,提出合理的 BIPV 金属屋面构造和施工方法,并总结金属屋面施工要点,建设一体化、轻量化、会发电的超级屋面。

[关键词] 光伏建筑;滑雪场;金属屋面;一体化设计;施工技术

[中图分类号] TU231

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0025-05

## Construction Technology of BIPV Metal Roof for Ice-snow Complex

DUAN Wei, HUANG Xin, LU Tong, LEI Jinglong, PENG Jing

(Wuhan Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

**Abstract:** The rapid development of winter sports has stimulated the vitality of the winter economy and become a new growth point of the economy. Utilizing photovoltaic power is an effective means to solve the high energy consumption problem of large indoor ski resorts and support the national dual-carbon goal. Taking Ice-snow Complex in Ganlu Mountain Literary and Creation City as the engineering background, this paper scientifically analyzes the solar resources at the project location. A unified design of BIPV metal roof is proposed, and a reasonable BIPV metal roof structure and construction method are put forward. The construction points of metal roof are summarized, and a super roof with integrated, lightweight, and power-generating functions is achieved.

**Keywords:** photovoltaic buildings; ski resort; metal roofs; integrated design; construction

### 1 工程概况

武汉甘露山文创城雪世界项目位于黄陂区前川街道(见图1),总建筑面积 $188\,484.65\text{m}^2$ ,平面尺寸长约 $508\text{m}$ 、宽约 $390\text{m}$ ,雪道最大落差 $73\text{m}$ ,最长滑道 $420\text{m}$ ,是华中地区“规模最大、滑道最长、落差最大、滑道最多、设施最先进”的超大室内滑雪场。

项目包含冰雪综合体(含冷区和暖区)、冰雪小镇及停车楼,停车楼位于冷区滑道下方。冰雪综合体冷区面积达 $51\,532.7\text{m}^2$ ,室内温度需长期控制在 $-6^\circ\text{C}$ 才能保证 $2.2\text{万}\text{m}^3$ 的人造雪长年不化。

### 2 BIPV 金属屋面概况

冰雪综合体冷区金属屋面平面投影总面积约 $47\,600\text{m}^2$ ,实际面积约 $5.2\text{万}\text{m}^2$ ,主、次檩约 $1\,800\text{t}$ 。



图1 项目效果

Fig. 1 Effect of the project

整个金属屋面通过主檩支承于大跨度钢结构屋盖桁架上,屋面由北向南呈斜坡状,最高点 $103.13\text{m}$ ,最低点 $27.5\text{m}$ ,屋面坡度 $12.69^\circ$ (见图2)。屋面板采用 $0.6\text{mm}$ 厚镀铝锌镁压型钢板 $80-387-1162$ 屋面板系统,防水层为 $1.5\text{mm}$ 厚聚氯乙烯 PVC 防水卷材,保温层为 $100\text{mm}$ 岩棉(密度 $\geq 160\text{kg}/\text{m}^3$ ),隔汽

\*湖北省住建厅建设科技计划:大型复杂工况室内滑雪场建造关键技术研究(No. 39)

[作者简介] 段伟,高级工程师,E-mail:365524228@qq.com

[收稿日期] 2025-09-03

层为 0.25mm 厚聚烯烃涂层粘聚聚乙烯隔汽膜,底板为 0.6mm 厚 YX28-205-820 型镀锌钢板(见图 3, 4)。

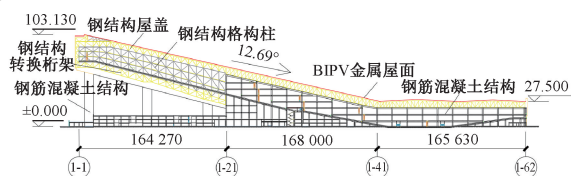


图 2 冷区西侧立面

Fig. 2 West facade of cold zone

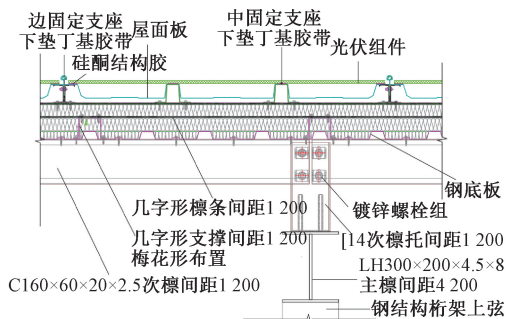


图 3 屋面标准构造剖面

Fig. 3 Standard structure profile of the roof

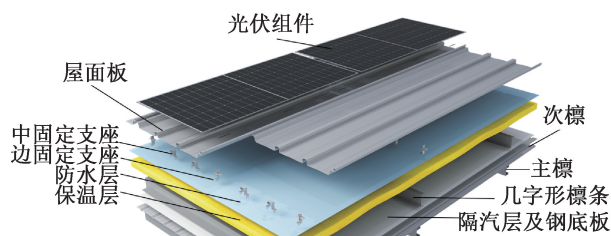


图 4 屋面标准构造

Fig. 4 Standard structure of the roof

光伏屋面主要采用峰值功率为 550W<sub>p</sub> 的单晶硅太阳能组件安装在屋面板上,共 11 000 块,总装机容量为 6MW<sub>p</sub>。225kW 逆变器 8 台,320kW 逆变器 10 台,10kV 高压并网。光伏板敷设面积达 34 000m<sup>2</sup>,属于分布式光伏发电工程,主要由光伏阵列、逆变单元、接入系统等部分组成。

### 3 BIPV 金属屋面一体化设计

#### 3.1 钢结构屋盖与金属屋面协同施工策划

钢结构、金属屋面、光伏组件由同一深化团队在 BIM 软件中建模深化设计,充分将各专业间的碰撞错漏问题前置,统筹考虑 3 个专业的空间关系,提高深化效率。

冰雪综合体冷区整体结构分为高、中、低区(见图 5)。经钢结构方案比选,确定高区与低 2 区、低 3 区采用整体提升方案,中区与低 1 区采用跨外吊装方案。为减少大型吊装机械的成本投入,同时减少

高空作业量,在整体提升区域将包括主檩托、主檩、次檩托、次檩在内的支撑构件在地面随钢结构拼装完成,充分考虑增加构件的荷载后,进而随主体结构一起整体提升。在跨外吊装区域将主檩托与钢结构桁架杆件、主檩与次檩托在地面拼装连接,随后分段吊装至设计位置。如此,可最大限度地减少高空作业和吊装工作量,在减少安全隐患的同时,也有利于质量和工期控制。

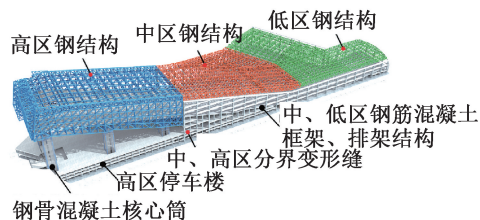


图 5 整体结构分区

Fig. 5 Division of overall structure

主檩分布在屋盖桁架上弦,模数为 4 200mm,与钢结构主、次桁架间距 8 400mm 相匹配。次檩及其上部几字形支撑、几字形檩条、固定支座的模数为 1 200mm,也充分考虑光伏组件宽度 1 128mm。主、次檩模数实现上下协调一致,避免构造层受力不均匀、材料和空间浪费等问题,实现光伏板面积的最大化。主檩通过圆管主檩托、螺栓与主体结构固定,次檩通过槽钢次檩托、螺栓与主檩固定(见图 6)。

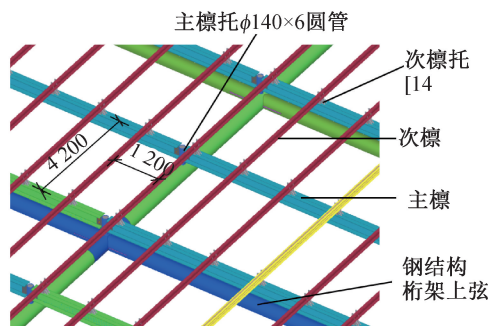


图 6 主、次檩与钢结构协同施工

Fig. 6 Collaborative construction of purlins and steel structures

#### 3.2 金属屋面与光伏组件协同深化

传统的滑动式屋面板上安装 BIPV,其支撑构件布置采取铝合金肋夹夹在直立锁边板板肋的卷边部位,限制了屋面板的伸缩滑动。屋面板的温度伸缩引起铝合金夹具位置发生变化,进而导致抗风揭能力下降,甚至出现拉裂、挤压破坏,最终导致屋面漏水或被风掀起。

为解决上述问题,设计与光伏组件尺寸相匹配的 80-387-1162 宽体屋面板(见图 7),由 2 个边肋和

2个中肋组成,均经镀锌处理,边肋边采用圆口铰合直立锁缝的连接方式,中肋边采用卡扣式连接方式,钢板强度 $\geq 300\text{MPa}$ 。光伏板宽度为1128mm,屋面板宽度为1162mm,考虑两边共34mm的施工空间和误差,光伏板基本能够覆盖屋面板的宽度范围,能将有限的金属屋面面积最大化利用,提高发电面积。光伏板在屋面板宽度方向共有4个呈线状的支撑点(2个边肋、2个中肋),使光伏板受力更均匀。同时,底部镂空且顺坡度的特点有利于形成烟囱效应,便于光伏组件散热、提高发电量(见图8)。设计专属卡扣中固定支座和可拆卸连接的边固定支座(见图9),用于固定屋面板。光伏组件可通过自动化打胶与屋面板快速连接。

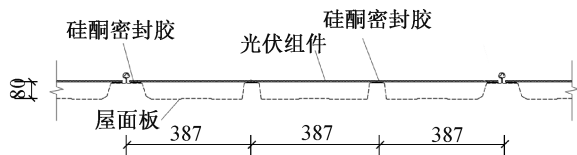


图7 屋面板

Fig. 7 Roof panel

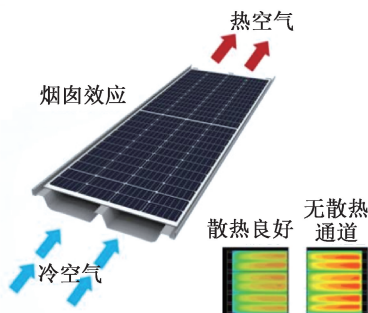


图8 光伏板下的烟囱效应

Fig. 8 The chimney effect under solar panels

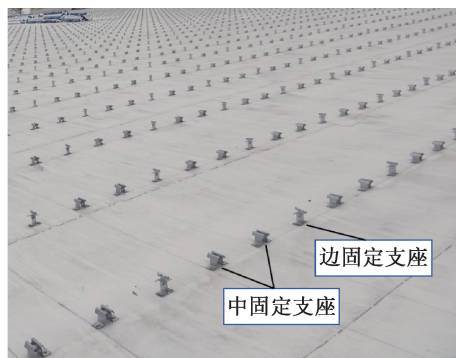


图9 边固定支座和中固定支座

Fig. 9 Edge support fixed seat and middle support fixed seat

### 3.3 光伏系统主要组件

采用 $2\,272\text{mm}\times 1\,128\text{mm}\times 5\text{mm}$ 单晶硅电池组件,组件重29kg,采用单组分硅酮结构胶黏结组件,

沿组件长边方向进行通长打胶,完成屋面打胶后,进行组件黏结,硅酮结构胶黏结层厚度 $> 3\text{mm}$ ,宽度 $> 15\text{mm}$ 。相较于夹具或压块等点连接方式产生的集中应力,胶粘方式的线状受力更均匀,系统更稳定。

在光伏组件性能方面,其匹配了M10电池片,具备555W超高发电功率,21.7%高转化率。组件表面采用钢化玻璃材质,可直接踩踏,并可承受直径25mm、速度23m/s的冰雹冲击。同时,双玻无边框组件不积灰,无热斑现象,保证了发电更稳定、更高效。

### 4 抗风揭试验

本工程金属屋面施工体量大、屋面单板又长又高,屋面防风是施工控制的重中之重。为了保证屋面的防风性能,通过调整主、次檩间距和板型截面,在屋面构造理论抗风揭能力满足要求后,还应在施工前通过抗风揭试验验证屋面板的真实抗风揭能力,金属屋面构造要以抗风揭试验结论为准。

采用静态法分别对檐口高压区和低压区、大面标准区的BIPV金属屋面构造进行抗风揭试验。结果表明,2种受检光伏屋面构造的抗风揭压力值分别为 $-7.7, -6.3\text{kPa}$ ,抗风揭系数分别为2.26,2.86,均满足规范要求。

### 5 关键施工技术

#### 5.1 施工工艺流程

钢结构整体提升区域主要施工流程为:钢结构桁架地面拼装 $\rightarrow$ 主、次檩地面安装 $\rightarrow$ 钢结构整体提升 $\rightarrow$ 底板安装 $\rightarrow$ 几字形檩条及支撑件安装 $\rightarrow$ 隔汽膜铺设 $\rightarrow$ 岩棉板铺设 $\rightarrow$ PVC防水层安装 $\rightarrow$ 固定支座安装 $\rightarrow$ 屋面板安装 $\rightarrow$ 光伏组件安装。

钢结构跨外吊装区域主要施工流程为:钢结构桁架地面分段拼装 $\rightarrow$ 主檩托安装 $\rightarrow$ 桁架分段吊装 $\rightarrow$ 主檩与次檩托地面安装 $\rightarrow$ 主檩与次檩托分段吊装 $\rightarrow$ 次檩吊装 $\rightarrow$ 底板安装。

#### 5.2 施工要点

##### 5.2.1 主、次檩安装

主、次檩均采用栓接方式与其檩托连接固定,檩托安装完成、校核无误后,开始安装主、次檩。安装时应控制檩条与钢屋盖的高度,确保檩条安装完成后平滑无折弯现象。次檩安装采用人工及运输小车相结合的方式,第1条檩条安装完成后,采用卷扬机往前牵引的方式进行移动,继续安装后续的次檩。

##### 5.2.2 钢底板安装

钢底板长6m、宽0.82m,固定时先打入起始边

波谷的自攻螺钉,再打入自由端波谷的自攻螺钉,最后打入板中间波谷的自攻螺钉,依次安装。钢底板长向应顺排水坡度方向安装,搭接成线;短向搭接长度应大于1个波长,长向搭接长度 $\geq 100\text{mm}$ 。

### 5.2.3 岩棉板铺设

保温层采用50mm+50mm的双层岩棉,施工期间应尽量减少保温材料暴露时间,提前准备防雨苫布,施工完后及时将未覆盖岩棉料进行临时覆盖。铺设时注意必须铺设严密,接缝处采用搭接,防止形成冷桥。同时,尤其要重点保证节点部位的施工质量,节点部位的封堵要做到位,如几字形支撑和几字形檩条内应严格用切割好的岩棉塞填密实(见图10)。

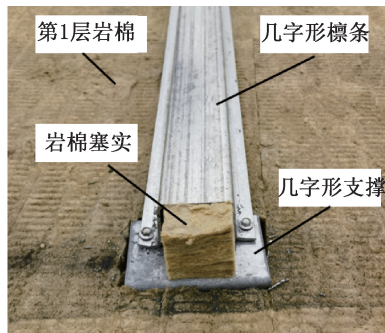


图10 檩条保温措施

Fig. 10 Thermal insulation measures of purlins

### 5.2.4 PVC防水卷材安装

PVC防水卷材自然展开铺设在岩棉层面上,长边顺排水坡度方向铺设,搭接宽度 $\geq 100\text{mm}$ ,采用热风焊接连接,连接宽度 $\geq 30\text{mm}$ ,接缝处材质同母材。

### 5.2.5 固定支座安装

固定支座是屋面面板的支撑件,其为屋面荷载传递到檩条的受力构件,其安装质量直接影响屋面面板的抗风性能。本工程主要有中固定座、边固定座2类,总体呈间距1200mm阵列布置,每相邻2个边固定支座间均匀设置2个中固定支座。在防水卷材铺设完成后,进行固定支座的放线定位,位置校核无误后,固定支座下垫丁基胶带,并用自攻螺钉与几字形檩条固定,自攻螺钉必须带有抗老化的密封圈,并在固定支座位置做防水附加层处理。

### 5.2.6 屋面板安装

本工程东西向跨度大,南北向较长,为减少漏水隐患,屋面板通长连续不搭接,屋面板最长单块板长达87.58m,且最大高度达103.13m,给屋面板运输增加了困难。屋面板采用与板型配套的特制压板机现场地面压板,采用斜坡滑轨槽直接将屋面板输送到屋面的运输方式。由屋面上卷扬机牵引成型板块,使其在滑轨槽内运输,滑轨槽宽

170mm,侧壁高500mm,内侧由彩钢板封闭。整个滑轨槽主要通过两侧的钢丝绳与钢屋盖下弦杆固定。

### 5.2.7 天沟伸缩缝安装

由于屋面排水天沟较长,在温度变化的情况下会产生热胀冷缩,故本工程1.3m宽、0.4m深、3mm厚不锈钢天沟每隔30m设置1道伸缩缝,以防屋面水槽因钢结构变形使水槽板开裂。

### 5.2.8 光伏组件安装

光伏组件主要安装流程为:屋面清洗→组件拆箱转运→组件安装前横向定位→黏结面清洗→金属屋面打胶黏结→组件接线→结构胶固化,测试黏结状态。

#### 1) 屋面清洗

采用清洗工具、水管对屋面进行大面积清洗,使屋面板表面无块状泥土、铁屑、紧固件等。禁止砂纸、钢丝球、刀片等刮擦金属屋面,禁止残留油污。

#### 2) 组件拆箱转运

采用50t汽车式起重机将重约1.2t的整箱组件吊至屋面檐口附近堆放,堆放点位置应经设计计算复核通过。应及时拆箱,搬动组件时,2人抓住组件2个短边将组件取出。组件需平行于屋面板放置着地,不允许角部先着地,不允许组件边缘放到直立锁边上。用作业荷载500kN的大疆T60专业无人机将单块质量29kg的光伏板运至待安装的屋面位置附近(见图11),再人工微调至指定位置,如第1列组件放置于第3列,有序分散,组件背面向上,不允许叠放超过2块,叠放时组件负极在上、正极在下。组件边角不得磕碰屋面,叠放组件时留出人员行走通道。



图11 光伏组件无人机转运

Fig. 11 Photovoltaic module drone transportation

#### 3) 组件安装前定位

组件安装前按图纸进行精确定位,在屋脊处采用钢丝对组件矩阵起点进行定位,并做好标记。

#### 4) 黏结面清洗

在采用结构胶黏结组件前,需使用酒精和清水对屋面板黏结面进行清洗,并在30min内施胶完毕,确保屋面板与光伏组件牢固黏结。

### 5) 金属屋面打胶黏结

采用自动打胶机对金属屋面进行打胶作业(见图 12),按屋面板边肋和中肋位置进行打胶,从一侧开始,第 1 列从上往下打胶,第 2 列从下往上打胶。每打完 1 列停止打胶,等待组件黏结完成。若打胶车过快,为防止胶表干导致黏结失效,需在表干前黏结完光伏板,打胶机施工速度可稍慢于光伏板施工速度。



图 12 自动打胶机作业

Fig. 12 Automatic glue machine operation

### 6) 组件接线

组件接线时需穿软底鞋,且确保鞋底下无沙子、石粒等尖锐物质。先将开口波纹管穿入组件正极直流线缆上,然后按图纸进行组件间接线,端子连接完成后塞入组件负极侧,扣合塑料线卡,确认端子完全在组件下方,且保证卡接后,MC4 插头不贴在屋面板上。安装完成效果如图 13 所示。



图 13 BIPV 金属屋面成型效果

Fig. 13 Effect of BIPV metal roofs

### 7) 结构胶固化,测试黏结状态

每 500 块随机抽样 1 块进行拉力测试,每块组件测试 4 点,位置为四角打胶处。向上垂直提拉拉力计数值 $>400\text{kN}$ ,保持 15s。记录包括测试组件条码、测试拉力值、测试后黏结是否良好等,如测试不良,加抽组件,同时不良组件需进行返修。

## 6 结语

1) 运用 BIM 软件对钢结构屋盖与金属屋面进行协同施工策划,得到与钢结构屋盖施工相匹配的金属屋面主、次檩施工方式,大大减少了高空作业

的同时,有利于质量控制和施工进度。通过统筹考虑包括次檩、几字形支撑、几字形檩条、固定座、屋面板板型在内的各构造层模数,较好地匹配了光伏组件产品尺寸,最大化地利用了屋面空间。选择新型高性能光伏组件,提高了光伏组件的耐久性、安装效率和发电效率。

2) 抗风揭试验为金属屋面的结构安全提供了重要依据,验证了包括高风压区、低风压区在内的各金属屋面构造的安全性。

3) 提出了本工程 BIPV 金属屋面的施工流程和施工要点,实现了  $5.2\text{万 m}^2$  BIPV 金属屋面高效高质量施工,对今后高能耗、大面积的类似场馆金属屋面设计和施工具有参考意义。

### 参考文献:

- [1] 叶翔,郑锐恒,管世林,等. 绍兴国际会展中心异形大跨钢结构—金属屋面一体化施工[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(11): 78-81.  
YE X, ZHENG R H, GUAN S L, et al. Integrated construction of steel structure-metal roof of special-shaped large-span in Shaoxing International Exhibition Center [J]. Construction technology, 2022, 51(11): 78-81.
- [2] 郑志涛,李闯,李昕,等. 直立锁边曲线型屋面防渗漏控制技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(15): 12-16.  
ZHENG Z T, LI C, LI X, et al. Anti-leakage control technology of vertical locking curved roof [J]. Construction technology, 2024, 53(15): 12-16.
- [3] 罗涛,魏振力,杨玺. 光伏建筑一体化(BIPV)在工业厂房的应用分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(1): 70-71.  
LUO T, WEI Z L, YANG X. Application analysis of BIPV in industrial plant [J]. Intelligent building & smart city, 2021(1): 70-71.
- [4] 刘飞,王博,周志健,等. 国家会展中心(天津)工程超大面积高强铝镁锰节能金属屋面设计与施工[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(24): 20-24, 44.  
LIU F, WANG B, ZHOU Z J, et al. Design and construction of super-large high-strength aluminum, magnesium and manganese energy-saving metal roof for National Convention and Exhibition Center (Tianjin) project [J]. Construction technology, 2021, 50(24): 20-24, 44.
- [5] 戴姝,张文超. 不同倾角对 BIPV 系统斜面总辐照量的影响分析[J]. 建筑节能(中英文), 2024, 52(3): 115-119.  
DAI S, ZHANG W C. Effect of different inclination angles on the total irradiation of BIPV system incline [J]. Building energy efficiency, 2024, 52(3): 115-119.
- [6] 王上上. 空间棱锥式单元金属屋面施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(18): 98-101, 146.  
WANG S S. Construction technology of spatial pyramid unit metal roof [J]. Construction technology, 2024, 53(18): 98-101, 146.