

超大尺度金属屋面的“动态接缝”理念探讨

左伟翔 李 宁 张 建 危帆扬 马 琛
中建五局土木工程有限公司 湖南 长沙 410011

摘 要：伴随着大型交通枢纽、体育场馆等公共建筑的发展壮大，金属屋面单体投影面积动辄数万甚至逾十万平方米。超大面积金属屋面所面临的问题是：温度胀缩、结构变形、施工偏差以及时间推移造成的明显相对位移。传统的刚性接缝把板片“固定”，造成应力集中、板片拱起、防水层撕裂。本文提出一个新概念——“动态接缝”，即能够主动应对各种方向位移、调整应力重新分配并且保证屋面正常使用的接缝设计理念。对它进行阐述、归类并介绍其工作原理，分析温度差引起的变化、结构变形相互作用以及动态密封三个主要内容，从而给出根据位移能力划分等级、构造柔性化、选用具有良好粘弹性的材料以及允许一定范围内的缝隙大小的设计思路。最后讨论这一思想对于金属屋面有关规范、使用寿命以及维修的影响。

关键词：超大尺度金属屋面；动态接缝；位移适应；构造柔性；密封耐久

引言

金属屋面因轻质、高强、防水可靠，成为大跨公共建筑围护结构首选。近年建筑追求“大尺度”与“连续视野”，板块增大、接缝减少。但金属线膨胀系数较高（铝合金约 $2.3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，钢板约 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ），当屋面超过200 m、温差 80°C 时，自由伸缩量可达数十至近百毫米。若变形补偿不足，会导致翘曲、节点剪断或锚固件拉脱。传统接缝采用“有限滑动”，在咬合边预留缝隙，但实际上以约束为主、释放为辅，难以适应超大尺度位移，出现滑动阻力大、密封不良、疲劳破坏等问题。因此需转变设计理念：从“阻止位移”到“接受位移”，从“刚性连接”到“柔性相容”，由此催生“动态接缝”。

1 动态接缝理念的基本内涵

1.1 定义与核心理念

动态接缝是针对超大规模金属屋面而设、能够主动应对多种方向相对位移的一种连接以及防水方式，它有四大变化：由“固定约束”到“可控释放”，由“单一位移适应”到“多向位移解耦”，由“被动受力”到“主动卸力”，由“静密封”到“动密封”。不同于传统的伸缩缝（仅有空隙预留、被动压缩、位移量较小一般 $\leq \pm 20\text{mm}$ ），动态接缝采取整体设计思路，包含位移吸收设施、荷载转移路径改变、密封空间改善以及余量安全系数等，位移量可达到 $\pm 100\text{mm}$ 以上并且具有旋转和平移等功能。

1.2 基本特征

动态接缝应当有以下五个特点：①大位移能力：一个接缝可以承受的位移一般大于等于 $\pm 50\text{mm}$ ，与屋面尺寸有关，也取决于温差以及结构上的运动。②多方向自由度：能够允许伸缩、张开/闭合、垂直面内的平动和平

角位移等。③低约束刚度：接缝对于位移所具有的抵抗力很小，不会把过多的力量施加到板上。④密封跟随性：密封材料在整个位移期间都紧密相连，不会被撕裂或者发生永久性变形。⑤耐久可维护：重要部分能够在规定的的使用寿命期内（至少为25年）保持良好状态，或者易于不用拆掉整个屋顶就可进行替换。

2 动态接缝的力学机理与分类

2.1 位移驱动因素及耦合效应

超大尺度金属屋面的动态位移由三个方面的因素引起并且通常是时间和空间相关的。第一个方面是热位移。由于温度的变化导致的自由膨胀或者收缩与跨度 L 以及温差 ΔT 成正比： $\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$ 。如果屋面受到许多固定的支撑，则总的位移是非均匀的——靠近边缘的位移较大，在中心区域较小。第二个方面是结构变形引起的位移。主体结构受到风荷载、雪荷载、地震及活载的作用发生的挠曲、倾斜、扭曲都将通过支座传至屋面上^[1]。对于大跨度的屋盖，其竖向挠度可以达到跨度的 $1/400 \sim 1/200$ ，因此其上的水平拉伸以及压缩也是不可忽略的。第三个方面是施工及时间的影响。施工时的温度与设计基准温度之间的差异会导致一个初始位移；而混凝土结构主体自身的收缩徐变以及支座的下沉都会造成随着时间推移不断变化的位移。这三个因素结合起来后，在接缝处的总位移就是它们的矢量和，需要考虑最不利的组合。

2.2 接缝的变形模式分类

根据接缝吸收位移的方式不同，可以将动态接缝分为以下四种基本类型。即第一种是滑动型，在接缝位置设置滑动支座或者滚动装置使面板可以在支撑结构上自由滑动来吸收伸缩位移，这种类型的接缝对于水平方向

位移有良好适应性但是不能很好地解决垂直位移以及转动问题；第二种是转动型，采用弹性铰、连杆或者折弯板等能够旋转部件来吸收面板之间角度变化及微小长度变化，在屋顶斜边、屋檐等地方经常被使用；第三种是弹性变形型，采用具有良好延展性的材料（例如三元乙丙橡胶、热塑性弹性体）发生拉伸、压缩或者剪切变形来吸收位移，同时起到密封作用，由于这种类型的材料最大伸长率为300%~600%，所以它所能承受的最大位移相当于自身宽度2~4倍；第四种是混合型，就是将上述几种方法相结合来满足多个方向较大位移要求，比如滑动板用于主要方向位移，弹性密封圈用于次要方向位移，而弹性铰则用来应对角度变化。

2.3 约束应力与位移释放的平衡原理

动态接缝设计目的是在“约束过度引起结构破坏”和“约束不足造成刚度过低”之间找到一个折中方案。“约束度” R 用来衡量它： $R = \text{实际传递约束力} / \text{完全约束下理论上可以达到的最大约束力}$ 。当 $R = 1$ 时为完全约束，而 $R = 0$ 时就是自由端。理想的动态接缝应当让其处于0.2~0.5之间——即释放大部分热应力的同时又能给屋顶提供足够的抗风掀能力和整体刚度^[2]。要实现这个目标就需要做到以下几点：合理布置固定点（一般每隔30~50m设一个相对固定的点，其余都是滑动点），并且在接缝位置使用可变刚度方式（小位移时刚度较低使得可以自由运动，在大位移时限制装置起作用阻止进一步移动）。

3 基于位移能力的动态接缝设计方法

3.1 屋面尺度与位移需求的分级

动态接缝设计的第一个步骤就是位移要求。根据平面尺寸大小以及温度分区分区和结构变形特点划分成几个部分，然后对每个区域边缘处期望相对位移进行估算。位移要求按大小分为三个等级：小位移（ $\pm 0 \sim 20\text{mm}$ ），用于分区范围小于50m或者温差得到良好控制的室内空间；中位移（ $\pm 20 \sim 60\text{mm}$ ），用于分区范围在50~120m之间或者室外环境中；大位移（ $\pm 60 \sim 150\text{mm}$ ），用于分区范围超过120m并且会受到全年温差影响的屋顶上。不同等级对应不同类型接缝方式：小位移可以使用弹性填充或者是咬合移动；中位移推荐专用滑移支座加弹性密封带；大位移必须采用组合型动态接缝系统并且要有位移调节设施（例如伸缩搭接板、波纹板等）。

3.2 构造柔性化的实现路径

构造柔性化是通过接缝部位形状以及连接方法改进，减少接缝对于位移所具有的力学约束作用。主要途径有以下几种形式：一种是在接缝处将钢板做成波纹或者 Ω 形

截面，在这个区域内发生弯曲变形来适应位移变化，不需要增加额外滑动装置；波纹部分能够吸收位移大小取决于波峰高度以及波距大小，在设计时应该保证波纹部分在整个预计位移范围内处于弹性状态而不出现塑性变形。第二种是分离式滑动构造，在固定座与支撑件之间放置一块聚四氟乙烯（PTFE）滑板或者是不锈钢-石墨组合滑片，使其摩擦系数保持在0.05到0.1之间从而减小摩擦阻力^[3]。第三种是转动铰链，在两个面板对接位置安装一个同心圆轴铰链，让它们可以围绕这个轴线旋转并用铰链之间的空隙来补偿拉伸和压缩变形。

3.3 材料粘弹性匹配与密封设计

动态接缝密封系统需要做到“随动密封”，即密封材料在位移的过程中一直保持有接触的压力并且不能有永久的残余变形。设计需注意的是：密封材料应该选择粘弹性体，而它的储能模量与损耗模量之比（ $\tan\delta$ ）决定着回弹的能力，一般 $\tan\delta$ 在0.1到0.3之间较为合适，太大浪费能量，太小回弹滞后；密封截面为“ Ω 型”或者“中空D型”，利用压缩进行密封而不是拉伸，压缩量约为原尺寸的15%~25%，保证在接缝最大张口的情况下还有一定的正压力；密封件安装方式是“预压缩+限位”，当接缝宽度处于中间位置时安装密封条使之处于预压缩的状态，留有一定的张开和闭合的空间；由于粘弹性材料的应力松弛会造成密封失效，所以要使用交联度较高、不易松弛的材料并要经过老化实验，在20年后其剩余接触压力至少达到原始值的50%以上。

3.4 容差管理与冗余设计

由于超大楼体金属屋面施工不可避免存在一些误差，在动态接缝中需要考虑三种类型的施工误差：由于温度变化导致安装温度差异（实际安装温度与设计基准温度之间的差别）、板材加工尺寸公差（每块板长边 $\pm 2 \sim 5\text{mm}$ ）、支撑点位置偏差（ $\pm 5 \sim 10\text{mm}$ ）。因此，在动态接缝的设计中应当设置一个“容差区间”，即在接缝拼装过程中可以有一定的初始偏移而不会影响其正常使用。这可以通过如下两种方式来实现：在接缝移动部分设置较长的圆孔，圆孔的方向与容差方向相同；使用带有调节功能的连接器，利用螺栓及腰形槽进行调节^[4]。此外还需要考虑冗余设计理念：对于重要的位移吸收途径至少要有两个不同的方案（如主要方案是滑动支座，备用方案是弹性波纹板），即使其中一个方案出现问题，另一个也能保证整个建筑的安全性。

4 动态接缝理念对金属屋面体系的系统性影响

4.1 对标准体系的挑战与重构

目前我国现有的有关金属屋面的技术规范文件（例

如《建筑金属围护系统工程技术标准》JGJ/T 473)对接缝构造的要求主要是以“有限滑动”为基础提出的,所规定接缝的最大间距以及最小滑动量等参数未能满足超大面积屋面的需求。而动态接缝的概念则需要对现行的标准进行如下改革:第一是采用根据不同位移能力划分等级的方法来进行设计,把接缝看作是可以设计的产品而不是一种成品;第二是要对接缝的各种性能进行量化,比如位移能力等级、滑动阻力系数、疲劳寿命(循环次数)、密封压力衰减率等;第三是要有相应的检测标准来验证这些性能是否达标,如多向位移循环加载试验、温度-位移耦合试验以及加速老化之后密封性的检查等。

4.2 对耐久性评价体系的影响

传统的屋面耐久性评估主要考虑材料自身的老化问题(例如涂层粉化、金属锈蚀),而动态接缝的存在使得对屋面的评价从单一材料的老化扩大到整个机械系统疲劳及磨损的问题。滑动副的摩擦磨损寿命、弹性体的应力松弛以及疲劳断裂、转动铰的间隙增长等因素都直接影响到一个屋面的整体寿命。因此有必要提出“动态接缝耐久性等级”的概念,在一定预期位移循环次数下(例如2000次、5000次、10000次,代表30年内温差和大风的情况)以及一定允许性能下降比例基础上进行划分。而对于特别大的屋面,接缝系统的维修方便性应当纳入其耐久性的要求中去,比如设置维修空间或者使用可拆卸的盖板等。

4.3 对维护策略的引导

采用动态接缝使金属屋面维护由“被动维修”变为“主动检测”,需要针对动态接缝编制定期检查计划:每3~5年检查接缝位移能力,检测滑动部分摩擦系数变化

(用便携式摩擦仪测试)、密封材料压缩永久变形等;每10年做一次模拟位移试验,看最大允许位移有无因灰尘、锈蚀或者老化而降低的情况。对于出现的问题,则按严重程度处理:给滑动面加油、调节预紧力、局部更换密封条到全部更换接缝组件。

5 结语

超大尺度金属屋面超过传统接缝所能承受最大位移,“动态接缝”概念出现。所谓“动态接缝”,即把接缝从简单的缝隙填补者转变为积极应对位移的部件,在构造上柔化,在材料上选择具有良好粘弹性材料并留有足够的余量以解决由于温度变化引起的位移、结构变形以及施工误差等带来的问题。本文对动态接缝的概念、分类、设计理念及其影响因素进行阐述,提出了一套完整的动态接缝理论体系。分析表明,动态接缝并非一种单独的技术,而是贯穿整个金属屋面的设计、生产、施工、保养等全过程的理念。随着建筑物越来越大,“动态接缝”的进一步研究对于保证超大尺度金属屋面的安全性和功能性具有非常重要的现实意义和实际应用价值。

参考文献

- [1]刘宝辉,霍凯,付东亮.金属屋面模块化设计与建造技术[J].中国建筑防水,2026,(1):21-26+52.
- [2]侯兆新,龚超.大型建筑金属屋面系统及其抗风策略[J].土木工程与绿色建筑,2026,2(3):10-18.
- [3]朱坤,陈鹤.金属屋面防水系统构造的设计研究[J].中国建筑金属结构,2026,25(9):34-36.
- [4]谭凯.钢结构压型金属板屋面的施工技术关键点分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(22):10-12.