

钢结构现场组装流水化生产安全风险辨识与闭环管控研究

杨世明

北京城建集团有限责任公司
DOI:10.32629/jpm.v7i8.9005

[摘要] 现场组装引入流水化组织后，钢结构施工的安全风险由静止于工位转为随构件流动，传统以单项工序为对象的辨识思路难以覆盖节拍压缩带来的风险叠加。本文提出风险具有构件依附与工位迁移双重属性，构建以工位与节拍为纵横坐标的二维辨识框架，据此定位关键风险因子并完成四色分级；在管控端，将闭环的最小单元由工序收缩至工位交接面，设置交接闸门与“三不交接”规则，配合隐患台账销号与动态监测预警，形成可回溯的循环改进机制。应用表明，该机制有利于压缩隐患滞留时间，缓解流水节拍对安全冗余的挤占。

[关键词] 钢结构；流水化组装；风险辨识；分级管控；闭环管理

Research on Safety Risk Identification and Closed-Loop Control for Streamlined On-Site Assembly of Steel Structures

Yang Shiming

Beijing Urban Construction Group Co., Ltd.

[Abstract] With the introduction of streamlined assembly methodologies into on-site construction practices, the safety risks associated with steel structure construction have shifted from being static at individual workstations to being dynamic and evolving alongside the movement of structural components; consequently, traditional risk identification approaches—focused solely on individual construction processes—become inadequate for capturing the cumulative risks arising from rhythmic compression. This paper posits that risks possess dual attributes: component dependency and workstation mobility, and proposes a two-dimensional risk identification framework using workstations and construction rhythm as its horizontal and vertical coordinates. Based on this framework, key risk factors are identified and classified into four risk levels. On the control side, the smallest unit of the closed-loop management process is scaled down from individual construction processes to the workstation handover interface; a handover gate and the "Three-No-Handover" rule are implemented, complemented by the closure of hazard records and dynamic monitoring and early warning systems, thereby establishing a traceable, cyclical improvement mechanism. Practical application demonstrates that this mechanism helps reduce the dwell time of potential hazards and alleviates the erosion of safety redundancy caused by streamlined construction rhythms.

[Key words] Steel structures; Streamlined assembly; Risk identification; Tiered control; Closed-loop management

钢结构的构件大多在工厂预制，运到现场之后再行装配，装配化的程度比较高，因此在工业厂房与公共建筑当中应用得比较广泛；为了压缩工期，不少项目把制造业当中的流水作业方式引入到现场的组装环节，即按照构件的类型划分工位，再以固定的节拍把起吊、就位、校正、连接等工序连续地组织起来推进；这种做法提高了作业的效率，同时也改变了安全风险

的出现规律；流水化并不等于把若干道工序简单地并联在一起，它在安全管理上的思路与传统的分部分项管理存在实质性的差别，直接沿用以前的做法往往难以兼顾；以往的做法多把注意力集中在单个工序的危险源排查以及专项方案的落实上，对于工序被拆解之后重新串联所引起的风险传递，关注相对不足；当一榀钢梁在数小时之内依次经过多个工位时，任何一个

环节出现的处置偏差,都有可能被后续的工序从物理上覆盖,从而形成常规巡检难以发现的隐蔽问题;本文正是从此处入手,讨论流水化条件之下风险的识别、分级以及闭环管理的实现路径。

1 流水化组装安全风险的特殊形态

1.1 风险的附着迁移特性

流水化作业把原本由一个班组连贯完成的构件安装,拆解成若干个节拍一致的工位动作,风险由此获得两重属性;其一是构件依附性,缺陷一旦在构件上形成,便随构件在各工位之间移动,不因施工主体更换而消除;其二是交接转移性,上一工位尚未闭合的问题,以半成品状态被下一工位接收,接收方通常默认前序工作已通过验收,风险责任边界由此变得模糊,现场那种“谁都说过、最终无人负责”的情形,在流水化项目中更突出;风险在流动中不只简单平移,在交接环节还可能被放大,前一工位的安装偏差若未校正,直接改变后一工位的受力条件与作业空间,使原本可控的动作转为高风险动作;由此看来,管理对象应从固定作业岗位,转向流动中的构件本身。

流水化生产最核心的约束是节拍,即每个工位都须在规定时间内完成规定动作;计划工期被压缩时,现场往往以并行作业换取节拍达标,吊装、校正、焊接等工序便在同一作业面上同时展开,风险在时间与空间维度上同步叠加;其特殊性在于,单独考察每道工序,风险未必升高,但若若干中等风险在同一时段、同一垂直空间内并存,耦合后果远大于各自独立作用之和;节拍压力还会诱导作业人员压缩必要的中间环节,如省略试吊悬停、提前拆除临时支撑、未待螺栓终拧便松钩,这些环节正是安全余量所在,一旦被节拍挤占,系统抵御扰动能力便明显下降。

1.2 流水化场景下的识别难点

1.2.1 静态识别方法与动态工况之间的错位

现行做法多采用清单式的识别方式,按照分部分项工程把危险源逐项列出,再逐项定级,这种做法隐含的前提是风险源所处的位置与状态相对稳定;流水化作业打破了这一前提,同一个工位在不同的班次、不同的构件类型、不同的天气条件之下,风险的构成差别明显,同一个构件在不同的工位上又呈现出不一样的风险形态;以静态的清单去套动态的工况,容易产生两类偏差,一类是漏识,即清单未能涵盖节拍调整之后新出现的交叉作业情形,另一类是误判,即沿用以往的经验给动态变化的工位赋予固定的等级,致使管理的强度与实际的风险相互脱节;因此,识别的对象应当从风险源本身,转向风险源与工位之间的组合关系。

1.2.2 闭环断口的隐蔽化

闭环管理的难点并不在发现隐患,而在于确认隐患是否已经消除,流水化作业之下的这一确认变得更为困难;前道工序所形成的缺陷,常被后道工序从物理上遮蔽,高强螺栓尚未终拧便被后续的构件覆盖,坡口清理不彻底便进入焊接,临时支

撑尚未按要求设置便开始上层的安装,这一类问题在外观检查当中均难以识别;各个工位只对自己所承担的动作负责,缺少复核前序成果的动力,缺陷往往要等到结构的受力状态出现明显变化时才暴露出来,此时已经错过了最佳的处置时机;隐蔽断口的存在表明,闭环管理的关键节点并不在工序的内部,而在工序与工序相互衔接的部位。

2 面向流水化工序的风险识别与分级

2.1 工位—节拍二维识别框架

2.1.1 二维耦合矩阵的构建

针对上述的错位,本文把识别所用的坐标由单一的工序,扩展为由工位与节拍共同组成的二维结构;横向按照流水线的实际工序列出全部的工位,纵向按照节拍阶段划分为构件进场、起吊就位、临时固定、永久连接、验收移交等,其中的每一格对应一个工位与一个节拍的组合单元,逐格地去判断风险的构成与等级,由此形成覆盖整条流水线的耦合矩阵;矩阵的作用在于把风险在时间与空间上的属性显性化,同样是吊装工位,在首件安装的节拍之下与在高空连拼的节拍之下,风险完全不同,同样一道连接工序,在标准节拍之下与在抢工节拍之下也不相同;逐格判断虽然在前期增加了一些工作量,却能够把交叉作业、节拍压缩等难以表述的情形,转化为可以标注、也可以追溯的具体单元;在矩阵构建的阶段,可以借助建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)技术,在虚拟的环境当中预演流水组织,提前暴露出工序之间的冲突与空间上的干涉,使矩阵的底数更加贴近实际;与按照分部分项罗列的传统清单相比,矩阵的颗粒度更细,也更加贴合流水线实际的运行节奏。

2.1.2 耦合传导与关键因子的聚焦

矩阵建立起来之后,还需要进一步去识别风险之间的传导关系;在流水化作业当中,风险很少孤立地导致事故,多数表现为初始偏差、中间放大、最终失稳这样一个链式的过程;测量放线当中出现的微小误差,在构件就位时被放大为轴线的偏移,进而导致螺栓孔对位困难,现场若强行敲击或者以火焰扩孔,连接的可靠性随之下降,结构在尚未形成整体稳定之前遭遇风荷载,便有可能发生失稳;识别这一类链条,可以采用专家评判与现场数据相结合的方式,计算末端风险对各前端因素的敏感程度,敏感度较高的因素即为关键的控制点;对于关键控制点,应当优先配置管理的资源,而不是在各个工位上平均用力。

2.2 风险分级与差异化的管理强度

2.2.1 四色分级的强度匹配

按照后果的严重程度与发生的可能性,可以把矩阵当中的各个单元划分为重大、较大、一般、低四个等级,分别以红、橙、黄、蓝四种颜色加以标识;分级的关键之处在于让管理的强度与等级精确地匹配起来,红色单元须编制专项方案并组织专家论证,施工的全过程实行旁站监护,经企业层级复核之后

方可进入下一工位;橙色单元由项目层级制定专项的措施,落实每日的巡查与工序验收;黄色单元纳入班组的自检与专职安全员的抽查;蓝色单元以常规的交底和日常的巡检加以覆盖;实践当中常见的偏差有两种,一种是等级的评定偏高而配置的措施偏低,另一种是把低风险的单元按照高标准去管理,从而造成了资源的浪费,因此分级的结果应当随着施工的进展定期地进行复核,避免出现一次定级、全程不变的情况。

2.2.2 流动工位的动态定级

流水化作业当中还存在一类流动工位,即作业人员与机具跟随构件在流水线上移动的作业形式,例如高空螺栓的紧固、随进度延伸的生命线布设、移动操作平台上的作业等;这一类工位的风险等级不宜固定下来,同样的作业内容,位于结构的边缘与位于结构的中部、处于首层与处于高层,风险的差别很大;建议采用基准等级加修正系数的定级方式,先以作业的内容确定一个基准等级,再按照作业高度、临边的距离、交叉作业的密度、气象条件等设定修正项,在班前交底的时候根据实际情况确定当班的等级;这种做法虽然使交底环节的工作量有所增加,却能够使管理的强度更加贴合当日的实际工况。

3 流水化生产的闭环管理机制

3.1 交接闸门与三不交接规则

3.1.1 工位交接面的闭合设计

既然闭环的断口多出现在工序的衔接之处,闭环的最小单元就应当从工序收缩到工位的交接面上;具体的做法是在流水线每一处工位的移交点设置交接闸门,把交接的动作由口头确认改为书面验收,形成可以核查的交接记录;闸门的开启须同时满足三个条件,即所谓的三不交接:前序工序未通过验收的不交接,发现的问题未整改销号的不交接,接收方未对前序成果复核确认的不交接;以钢柱的安装为例,柱脚螺栓的终拧、垂直度的校正、临时支撑的设置这三项,须全部验收合格并留下记录,方可移交至钢梁吊装的工位;上一构件尚未完成永久固定之前,不得进入下一构件的流水安装;闸门机制的本质是把安全的确认嵌入流水节拍,使之成为节拍的一部分,而不是节拍之外的附加负担;闸门设置的位置应当与工位的物理分界保持一致,避免在同一作业面之内重复设置或者遗漏设置。

3.1.2 隐患台账的销号与责任锚定

交接闸门所产生的记录,应当汇入统一的隐患台账,按照发现、登记、整改、复核、销号这五个步骤流转,每一个步骤都须明确责任人、完成的时限与验收的人;在流水化作业当中,隐患的责任锚定须细化到具体的工位与构件的编号,而不是笼统地记在某一个班组的名下,否则一旦出现返工,便难以追溯到原始的处置人;台账的销号须由交接的双方与专职的安全管理人员共同确认,避免整改流于形式;对于反复出现的同类隐患,台账应当触发原因分析这一环节,判断其究竟系措施不当、交底不足还是节拍设置不合理所致,再从源头上加以调整,而不是简单地重复整改。

3.2 信息化支撑下的循环迭代

3.2.1 动态监测与阈值预警

交接闸门解决的是节点上的确认问题,工位内部的实时状态仍须依靠监测的手段;对起重设备的运行参数、结构的位移与变形、高空作业人员的定位、焊接作业的环境等关键的量测点布设传感装置,把实时的数据与设定的阈值进行比对:接近阈值时提示注意,达到阈值时发出预警,超出阈值时自动触发停工与处置的流程;监测数据的真实性是预警能够发挥作用的前提,传感器的安装位置不当、校准不及时、数据传输中断等,都会造成数据的失真,使预警形同虚设,因此监测设备的维护与数据的校核,应当纳入日常检查的内容之中。

3.2.2 数据留痕与循环改进

流水化作业每完成一轮循环,便积累下一批交接记录、隐患台账与监测的数据;这些数据若仅仅用于归档,价值比较有限;按照工位、构件、班组分列统计隐患的发生频次与滞留的时长,可以识别出流水线当中比较薄弱的环节——某一个工位的问题反复出现,往往说明该工位的节拍设置或者工艺安排本身存在缺陷,而不是作业人员偶然的失误;据此再去调整工位的划分、修正节拍的参数、优化交接的内容,便形成了执行、检查、改进这样一个循环;BIM技术可以用来在虚拟的环境当中预演调整之后的流水组织,提前检验工序之间是否存在冲突,从而减少方案变更所带来的次生风险。

4 结语

流水化的组织方式改变了钢结构现场组装当中风险的分布规律:风险随构件而流动,在交接当中发生转移,在节拍被压缩时相互叠加,闭环的断口也趋于隐蔽;本文提出的工位与节拍二维识别框架,把风险在时间上与空间上的属性转化为可以标注的耦合单元;以工位的交接面作为最小的闭环单元,以交接闸门和三不交接为核心的管控设计,把安全的确认嵌入到了流水节拍之中;再辅之以动态的监测和由数据驱动的循环改进,使管理的强度能够随着工况进行调整;后续还可以进一步研究节拍参数与安全余量之间的量化关系,为流水化施工的组织设计提供更加直接的依据。

[参考文献]

- [1]王超.门式钢结构厂房施工过程中安全风险识别与控制策略[J].砖瓦,2025(10):150-152.
 - [2]梁永强.大跨度钢结构厂房施工风险评估及控制措施研究[J].工程技术研究,2024,9(20):159-161.
 - [3]胡韞频,李超,李宗亮,等.大跨度钢结构施工安全风险评价 IHFACS-BN 模型及应用[J].中国安全科学学报,2021,31(8):147-154.
 - [4]梁清,郭东林.钢结构桥梁项目危大工程标准化安全管理模型构建及实证[J].安全,2026,47(7):49-55.
- 作者简介:杨世明,男,汉族,1981年10月生,河北省深泽县人,在职研究生学历,中级工程师,注册一级建造师。