

市政排水改造工程有限空间作业安全管理研究

赵欣喜 刘继龙 陈子庚

中国市政工程中南设计研究总院有限公司

摘要:近年来,为提升出水水质,改善各地的人居环境,污水处理厂改造工程、污水管网改造工程大规模上马,成为当今我国市政工程领域的热点之一。这些改造项目相对新建工程,现场条件更为复杂,特别是施工人员面临的有限空间作业风险较大,如果不能加以严格管控,很容易酿成严重的事故,因此需要各级安全管理人员高度重视。

关键词:市政排水改造;事故树分析;有限空间作业

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.02.075

一、市政排水改造工程中的有限空间作业的特点

有限空间是指封闭或部分封闭、进出口受限但人员可以进入,未被设计为固定工作场所,通风不良,易造成有毒有害、易燃易爆物质积聚或氧含量不足的空间。一般有以下几个特点:①空间有限,与外界相对隔离;②进出口受限或进出不便,但人员能够进入开展有关工作;③未按固定工作场所设计,人员只有在必要时进入开展临时性工作;④通风不良,易造成有毒有害、易燃易爆物质积聚或氧含量不足。

市政排水改造工程中,有限空间作业主要有管道施工和厂内施工两大类。在有限空间内,往往存在大量污水、污泥等物质,不断进行各种复杂的生化反应,消耗氧气的同时产生大量的有毒有害气体。由于通风不良,硫化氢、甲烷等气体会在有限空间内聚集,一旦人员在没有防护的情况下进入,将会发生中毒、窒息等伤害。若作业人员开展切割、焊接等动火作业,还可能点燃有限空间内的可燃气体,引起爆炸。

二、市政排水工程安全事故统计分析

本文通过查阅互联网上公开的事故调查报告,统计了2018年至2020年涉及市政排水领域的21起安全事故。经统计,这些安全事故中,累计死亡58人,受伤20人。市政排水工程领域的人身伤亡事故类型主要包括中毒与窒息、坍塌、淹溺、爆炸等。其中,中毒和窒息事故发生14起,占安全事故总数的66.7%,死亡人数44人,占死亡人员总数的75%。平均每起安全事故死亡3.14人,受伤1人。中毒与窒息主要发生在池底清淤、设备更换、设备改造、新旧管线驳接的过程中。在多次中毒和窒息事故中,营救人员在安全防护措施不到位的情况下盲目施救,导致群死群伤,社会影响极其恶劣。因此在市政排水改造工程中,必须针对中毒窒息采取有效的预防措施。

三、中毒窒息事故的危險源分析

(一) 中毒窒息事故的根源

事故致因理论体系中的轨迹交叉理论认为,事故的

发生的原因是人的不安全行为和物的不安全状态。人的不安全行为和物的不安全状态在同一范围内同时出现,则可能导致事故的发生。如果能够避免人的不安全行为和物的不安全状态在同一时间、同一地点出现,则可以避免事故的发生。人的主观性比较强,提高人的安全意识和安全行为能力是一个时间跨度较长的过程。为避免事故的发生,轨迹交叉理论更多地强调加强对物的管理,消除物的不安全状态,避免人与物的轨迹发生交叉。

施工过程中的安全事故是由各种不安全因素引起的,既包括施工人员的不安全行为,施工现场材料设备的不安全状态,外部环境不良等直接因素,也存在管理制度不健全,现场监督管控缺失等间接因素。从事故发生根源入手,可以避免事故的发生,或者降低事故的危险性。

(二) 市政排水改造工程事故树分析

事故树分析法是一种演绎分析法,利用求解事故树模型中最小割集、最小径集以及结构重要度等指标,确定可能引起事故发生的原因组合,并估计事故发生的概率,为最终的安全风险评价与安全风险管控提供依据。

市政排水改造工程的有限空间包括配水井、泵房、污泥池、密闭式渠道、管道等。在清淤、清管、设备调整安装、新旧管线驳接的过程中,施工人员都必须在有限空间内停留、施工。通过对各事故案例的调查研究,本文选取了16个基本事件,并根据事故致因理论,将其按照环境不良、防护失效、管理缺失、应急不到位等四个方面进行分类,建立了以下事故树模型:

事故树中的原因事件及代码

代码	事件	代码	警示标志	代码	事件
T	中毒窒息	X1	通风设备坏	X10	防护用品使用错误
A1	环境不良	X2	通风设备安设不当	X11	防护用品质量差
A2	防护失效	X3	未持续通风	X12	未开具作业票
A3	管理缺失	X4	环境温度高	X13	安全交底不到位
A4	应急不到位	X5	沉积淤泥过多	X14	监护人员未履职
B1	通风不足	X6	未与运行系统采取隔离措施	X15	应急预案未演练
B2	气体持续产生	X7	监测仪器故障	X16	现场应急装备不足
B3	监测问题	X8	气体监测未持续进行		
B4	个人防护	X9	监测位置选用不当		

(1) 事故树的结构函数如下

$$T=A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4=(X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+X_6) \cdot (X_7+X_8+X_9+X_{10}+X_{11}) \cdot (X_{12}+X_{13}+X_{14}) \cdot (X_{15}+X_{16})$$

(2) 通过结构函数求最小割集

{X₁, X₇, X₁₂, X₁₅}, {X₁, X₈, X₁₂, X₁₅}, {X₁, X₉, X₁₂, X₁₅} ……，最小割集共有180个，即引起有限空间中中毒窒息事故的发生可以有180种情况。

(3) 结构重要度排序为

$$I_{15}=I_{16}>I_{12}=I_{13}=I_{14}>I_7=I_8=I_9=I_{10}=I_{11}>I_1=I_2=I_3=I_4=I_5=I_6$$

(4) 求最小径集

最小径集是能够避免顶上事件发生的基本事件的组合，本事故树的成功树结构函数为。

$$T=A_1+A_2+A_3+A_4=(X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6) + (X_7 \cdot X_8 \cdot X_9 \cdot X_{10} \cdot X_{11}) + (X_{12} \cdot X_{13} \cdot X_{14}) + (X_{15} \cdot X_{16})$$

成功树的最小割集，就是事故树的最小径集，有几个最小径集，就有几个消除事故的途径，即：

$$P_1=\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6\}$$

$$P_2=\{X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}\}$$

$$P_3=\{X_{12}, X_{13}, X_{14}\}$$

$$P_4=\{X_{15}, X_{16}\}$$

(三) 事故树模型结果分析

根据事故树分析原理，最小割集数量表明系统的危险性，最小径集的数量则代表了消除危险的途径。市政排水改造工程中有限空间作业中毒与窒息事故树模型中，顶上事件发生的最小割集为180个，说明该作业过程存在多种危险因素，需要对作业进行严格控制。该事故树模型的最小径集有4个，因此需要从作业环境、个

人防护、应急处理、安全监控，等方面加强管控，才能避免有限空间作业中毒窒息致人伤亡事故的发生。

1. 作业环境方面

在事故树分析模型中，环境因素是数量最多的类别，是有限空间内中毒和窒息事故发生的根源。有限空间相较外界条件具有更高的温度和湿度，施工人员在作业过程中反应速度会下降，增加了事故的危险性。

作业初始阶段，施工人员进入充满有毒气体的有限空间后即有可能出现急性中毒。即使在初始阶段，作业环境是安全的，由于有限空间内各种条件不断变化，作业过程中的风险仍不容忽视。在作业过程中也可能由于生化反应、外部有害物质进入等原因导致危害事件的发生。尤其是春夏两季，气温较高，有限空间内的生化反应强度大，有毒气体释放速率相较其他季节更快，达到足以致命的浓度。在一些有限空间内，即使有毒气体含量不高，也有可能由于氧气浓度低于阈值，造成作业人员作业超过一定时间即会出现缺氧甚至窒息。

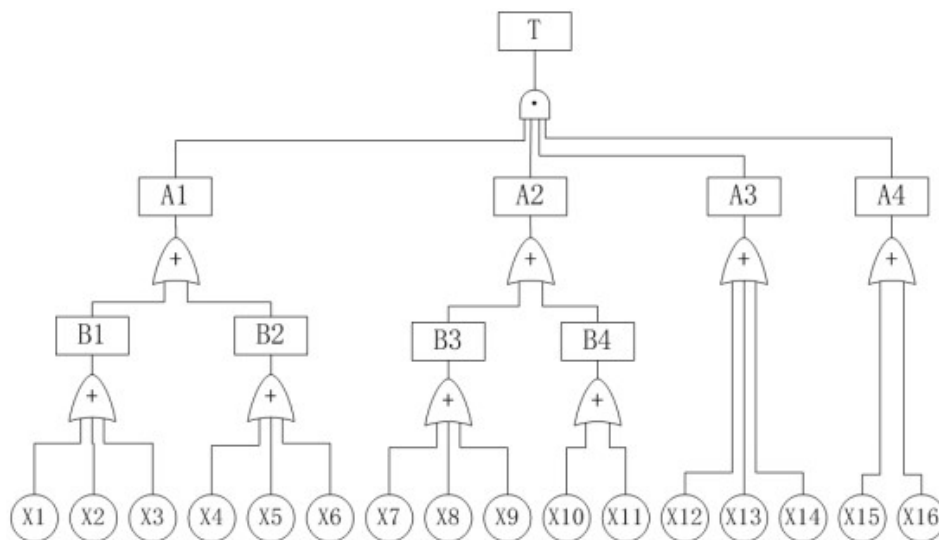
2. 个人防护方面

安全防护是有限空间作业的基本前提，也是保障作业人员生命安全的最后一道屏障。如果安全防护装备选用不当或者质量存在缺陷，那么施工作业人员将直接吸入超量的有害气体，导致中毒事件的发生。因此，必须针对作业环境特点选择防护装备。

3. 作业管理方面

X₁₂（未开具工作票），X₁₃（安全交底不到位），X₁₄（监护人员未履职）这三个基本事件的结构重要度排序为第二。这一结果表明安全管理制度的执行情况对有限空间中中毒与窒息事故的发生有较高的相关度。

在实际作业前，如果能够严格履行作业票、安全交底的管理程序，一方面可以使施工人员提前知悉施工作业危险性及应采取的应对措施，另一方面也可以集思广益，让施工人员对交底的内容进行查缺补漏，使整个作



有限空间作业中毒窒息事故树

业方案具备更高的安全性和可操作性，提升施工作业的安全水平。监护人员的工作是极为关键的。若监护人员不能履职履责，将导致有限空间内发生险情后无法被及时发现，导致错过救援的宝贵时间。

4. 应急处置方面

上文的事故树模型表明， X_{15} （应急预案未演练）， X_{16} （现场应急装备不足）这两个基本事件具有最高的结构重要度。其在现实中的意义为，即使由于各种原因在有限空间内发生了中毒与窒息的危险，但是只要在现场配备足够的应急装备，在较短的采取科学的应急救援措施，就能在最大程度上避免人员伤亡的发生。中毒窒息事件发生后，如果相关应急装备配备不齐全，非专业人员不了解相关流程盲目施救，甚至会使得事故的危害扩大，发生群死群伤的恶性事件。因此加强应急救援能力是避免中毒窒息引起人员伤亡的重要手段。

四、有限空间作业的安全保障措施

结合前文对有限空间内中毒与窒息事故的分析，以及当前市政排水改造工程中的生产条件，施工人员安全意识，防护装备水平等，本文从以下四个方面提出安全保障措施。

（一）环境控制

环境控制是有限空间安全管控的重中之重。其主要目的是在有限空间内维持适宜的作业环境，保障作业人员的安全。

作业区域的气体检测需要在作业全程连续进行，应选用复合式气体检测报警仪，监测多种有毒气体的含量。人员进入有限空间前，检测应从出入口开始，沿人员进入方向进行。垂直方向的检测由上至下，至少进行上、中、下三点检测。若有限空间内存在未清除的积水、积泥或其他物料残渣时，应先在有限空间外利用工具进行充分搅动，使有毒有害气体充分释放。

机械强制通风需要在作业全程连续进行，通常使用成套的移动式风机与风管。有限空间仅有1个进出口时，应将通风设备出风口置于作业区域底部进行送风。有限空间有2个或以上进出口、通风口时，应在临近作业人员的处所送风，远离作业人员处进行排风。并采取防止有害气体循环进入有限空间。为防止其他处所的有毒气体进入有限空间，还应对连接有限空间的其他管线采用闸门、盲板等进行封堵。

（二）防护装备

有限空间内的作业人员，应配备正压式呼吸器、正压式长管呼吸器等呼吸辅助装置。由于不能有效滤除所有的有害气体，有效使用时间无法精确掌控，无法应对缺氧环境等原因，有限空间作业不得使用自吸式呼吸器和过滤式呼吸器。作业开始前，需要对呼吸设备进行全面检查，确保状态良好。作业过程中，防护装备出现异常应立即撤离作业现场。

（三）安全管理

对参与有限空间作业的人员，必须进行防毒、防窒息、急救等安全知识的教育。经培训考试合格后方准上

岗。

有限空间作业开始前，需开具有限空间作业票。作业票中需要列明有限空间作业的地点，作业时间，安全防护配备，安全措施等信息，并由安全、运营等专业的人员签认。

作业过程中，监护人员应在有限空间外全程持续监护，不得擅离职守，主要做好两方面工作：一方面需要跟踪作业人员的作业过程，与其保持不间断的信息，发现有限空间气体环境发生不良变化、安全防护措施失效和其他异常情况时，应立即向作业人员发出撤离警报，并采取措施协助作业人员撤离；另一方面，需要防止未经许可的人员进入作业区域。

（四）应急救援管理

现场项目部需要制定具备实操性的有限空间作业应急救援预案，至少每半年进行一次全员参与的演练。在作业过程中人员出现中毒、窒息等紧急情况时，必须严格按照应急预案流程进行救援，严禁盲目施救造成事故损失的进一步扩大。

施工现场应该配备足够数量的应急装备，做到定期检查，确保状态良好。

五、有限空间作业的其他注意事项

有限空间作业除了防止中毒窒息事故的发生之外，还需要主要注意以下几点：（1）按照国家相关要求，在潮湿的有限空间内作业，电动工具及照明的电气不应超过12V安全电压，避免发生触电事故。（2）作业人员长时间在温度过高、湿度很大的环境中作业，可能会导致人体机能严重下降。高温高湿环境甚至导致人员发生热衰竭、失去知觉或死亡。因此，在有限空间内不宜连续工作，需要定期轮换到室外进行休息。（3）有限空间中积聚的易燃易爆物质与空气混合形成爆炸性混合物，若混合物浓度达到其爆炸极限，就会发生燃爆事故。因此，有限空间内的动火作业需要在确保可燃气体浓度低于限值的情况下方可开展。

参考文献

- [1]朱崇明,朱国珍,曾斌.污水处理厂安全评价分析.安全,2008(11):19-21.
- [2]刘宁.我国污水处理厂事故统计分析对策研究[J].中国安全生产科学技术,2012,008(006):125-128.
- [3]娄维国.人机工程原理在城南污水厂工程中的应用[J].中国石油大学胜利学院学报,2013,27(2):29-32.
- [4]林宙峰.基于AHP的城市污水处理厂安全风险分析与防控.安全与健康,2014(4):41-43.
- [5]周先军,汪林.基于HAZOP与模糊评价对污水处理厂的研究[C]//油气田勘探与开发国际会议.陕西省石油学会;西安石油大学,2015.
- [6]胡勇,刘晓强.污水处理厂安全生产现状及对策.环境与发展,2019,31(11):34-34.