

# 焦炉烟气脱硫脱硝生产实践

骆春嘉, 李春燕, 李伟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司煤焦化工分公司, 内蒙古包头 014010)

**摘要:** 文章详细介绍了焦炉烟气脱硫脱硝系统工艺流程和生产运行过程中出现的问题。通过采取调整焦炉加热制度、焦炉本体灌浆及脱硫脱硝系统密封、脱硝系统改造、加强煤气管线保温、降低煤气中杂质等措施, 使脱硫脱硝系统稳定运行, 烟气排放指标合格, 延长了脱硫脱硝系统的检修周期, 减少检修频次, 保证焦炉烟气排放月均小时合格率达到95%以上。

**关键词:** 焦炉烟气; 脱硫脱硝系统; 生产运行; 加热炉

中图分类号: X784

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)04-0013-06

## Production Practices on Desulfurization and Denitrification for Flue Gas of Coke Oven

Luo Chunjia, Li Chunyan, Li Wei

(Coal Coking Chemical Industry Branch Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd.,  
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In this paper, the process flow and problems in process of production and operation for desulfurization and denitrification system of flue gas of coke oven are introduced in detail. The operation of the system is stable, emission indexes of flue gas are acceptable, repair cycle of the system is extended so that repair frequency is reduced and hourly qualified rate per month of emission for flue gas of coke oven is guaranteed to be over 95% through taking such measures as adjusting the heating schedule of coke oven, grouting of coke oven, sealing desulfurization and denitrification system, reforming denitrification system, strengthening heat preservation of gas pipeline as well as reducing impurities in gas.

**Key words:** flue gas of coke oven; desulfurization and denitrification system; production and operation; heating furnace

随着环保法规的日益严格, 尤其是在燃煤电厂、钢铁厂以及焦化厂等高硫排放行业, 人们一直在寻找工艺水平更先进、净化效果更好和运维成本更低的脱硫脱硝技术, 因此也推动脱硫脱硝技术不断推陈出新。目前, 脱硫技术可分为湿法脱硫和干法脱硫两种, 典型的湿法脱硫技术包括石灰石-石膏法脱硫和氨法脱硫。石灰石-石膏法是以石灰石浆液

吸收二氧化硫生成亚硫酸钙, 再氧化为石膏, 该技术理论成熟, 脱硫效率高, 应用范围广, 但是设备易腐蚀, 投资运行成本高, 副产物处理难; 氨法脱硫技术是利用氨水吸收二氧化硫生成亚硫酸铵, 再氧化为硫酸铵, 该工艺具有脱硫效率高、副产物可资源化利用的优势, 但是氨气易挥发, 有二次污染风险, 同时对设备材质要求高、投资大。干法脱硫技术主要为

循环流化床干法脱硫技术,烟气通过流化床,二氧化硫与流化床内的脱硫剂(如消石灰)反应达到脱硫的目的,该工艺系统简单,占地小,投资运行成本低,无废水产生,但脱硫效率相对湿法低,脱硫剂利用率有待提高。

脱硝技术包括选择性催化还原法(SCR)与选择性非催化还原法(SNCR)。SCR 技术是在催化剂的作用下,氨气与氮氧化物反应生成氮气和水,该技术脱硝效率高,系统成熟稳定,维护成本相对较低,但一次投资成本高。SCR 系统建设需购置脱硝反应器、氨气储存与供应系统和脱硝催化剂等设备和物料,同时系统运行温度要求严格,SCR 反应需要在一定的温度范围内才能达到较高的效率,另外需注意催化剂中毒和氨逃逸的问题。SNCR 技术是在高温条件下,尿素或氨水等还原剂直接与氮氧化物反应生成氮气和水,与 SCR 脱硝技术相比,SNCR 技术不需要催化剂及相应的反应器等昂贵设备,初期投资成本降低,SNCR 系统主要由还原剂储存与输送系统、喷射系统和控制系统等组成,结构相对简单,占地面积小,安装和调试周期短,可快速投入运行。但 SNCR 技术脱硝效率低,一般在 30%~80% 之间,不如 SCR 技术脱硝效率高,难以满足日益严格的环保排放要求。其他新型的脱硝技术还有超低温 SCR 脱硝技术、电子束辐射法、微生物脱硝技术等,需要进一步研究以降低成本,提高稳定性和效率。

包钢股份煤焦化工分公司为了满足焦化行业超低排放要求,新建 7 套焦炉烟气脱硫脱硝装置,项目采用“SDS 干法脱硫 + SCR 脱硝技术”。随着行业发展及国家对于环保要求的不断提高,2023 年公布的《关于推进实施焦化行业超低排放的意见》中要求脱硫脱硝后净烟气排放月均小时合格率达到 95% 以上,因此在无备用脱硫脱硝系统的前提下,延长脱硫脱硝系统检修周期,减少检修频次,保证脱硫脱硝系统长期稳定运行成为焦炉烟气治理的难点。

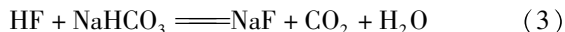
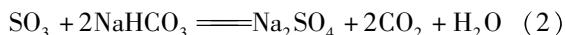
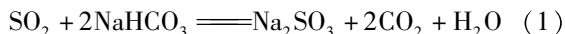
## 1 反应机理

### 1.1 脱硫反应机理

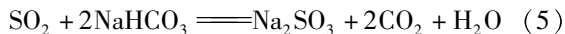
包钢焦化脱硫脱硝项目采用 SDS 干法脱硫技术,脱硫剂通过高效喷射及均布装置,进入系统内被烟气热量激活,比表面积迅速增大,与焦炉烟气充分接触,发生物理、化学反应,烟气中的二氧化硫等酸性物质被吸收净化<sup>[1]</sup>。

碳酸氢钠作为脱硫剂,通过化学吸附脱除烟气

中的酸性污染物,同时还可以通过物理吸附脱除一些有机和无机的微量物质。碳酸氢钠细粉直接喷入温度高于 160 ℃ 的烟气中,高温下碳酸氢钠分解生成碳酸钠、水和二氧化碳。生成碳酸钠时,不存在晶格,因此该反应是非常活跃的,当烟气温度高于 140 ℃,碳酸氢钠会立刻与烟气中的酸性污染物发生反应,当烟气温度在 160~230 ℃ 之间,可自发的与烟气中的酸性污染物进行下列反应生成硫酸钠,实现脱除二氧化硫的目的。

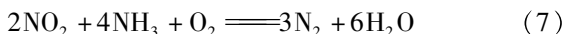


少部分二氧化硫发生下列反应。



### 1.2 脱硝反应机理

脱硫后的烟气经过除尘器进入 SCR 反应器,供氨系统向烟气中喷入氨气,在 180~350 ℃ 的温度区间,烟气中的氮氧化物在 SCR 反应器中催化剂的催化作用下与氨气发生化学反应生成氮气和水<sup>[2]</sup>。在 SCR 脱硝反应器内,氮氧化物通过以下反应被还原。



SCR 工艺氮氧化物脱除效率很高,喷入烟气中的氨气几乎完全和氮氧化物反应,但有一小部分氨气不参与反应而是作为逃逸氨离开了反应器。一般来说,对于新的催化剂,氨逃逸量很低,但是随着催化剂失活或者表面被飞灰覆盖或堵塞,氨逃逸量就会增加,为了维持氮氧化物脱除率,就必须增加反应器中氨氮摩尔比。当不能保证预先设定的脱硝率或氨逃逸量的指标时,就必须在反应器内添加或更换新的催化剂以恢复催化剂的活性和反应器的性能。

催化剂作为中低温 SCR 脱硝工艺的核心,其质量和性能直接关系到脱硝效率的高低,因此一般都是量身定制的,即依据烟气成分、特性以及烟气净化目标来确定,催化剂的性能(包括活性、选择性、稳定性和再生性)无法直接量化,而是综合体现在一些参数上,主要有活性温度、几何特性、机械强度、化学成分等<sup>[3]</sup>。

## 2 工艺流程

焦炉烟气在进入烟囱前被引风机从地下室烟道

引出,通过烟气管道输送至脱硫反应器。脱硫剂粉末通过投放孔被喷射到烟气管道内,脱硫剂在烟气管道内被烟气热量激活,比表面积迅速增大,与烟气充分接触,烟气中的二氧化硫与脱硫剂发生一系列的物理、化学反应,完成脱硫反应的第一步。充分脱硫后的烟气经过布袋除尘器过滤,进行第二步脱硫

反应,脱硫副产物被收集下来。脱硫除尘后的烟气由 SCR 脱硝反应器进行脱硝处理,烟气中的氮氧化物在催化剂的作用下与喷入的氨气发生化学反应,生成氮气和蒸汽,达到脱硝的目的。脱硫脱硝处理后的烟气由引风机抽引至原焦炉烟囱排入大气。工艺流程见图 1。

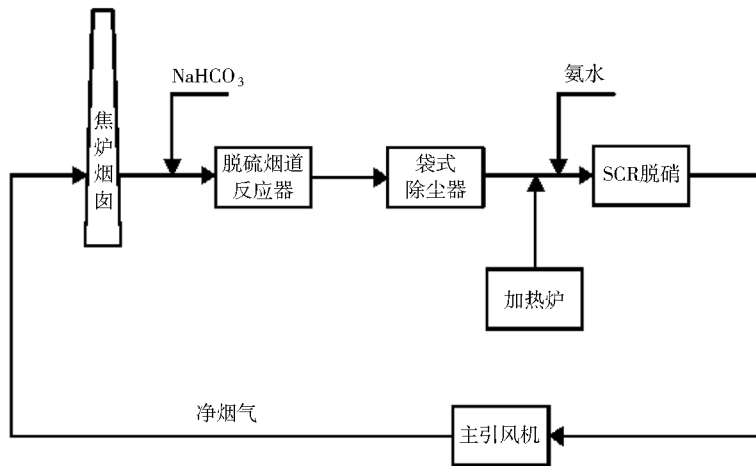


图 1 脱硫脱硝工艺流程图

### 3 脱硫脱硝系统中存在的问题

#### 3.1 脱硫脱硝系统运行阻力大

为了保证焦炉正常加热所需吸力,焦炉地下室机、焦侧分烟道翻板调节阀位通常控制在 50% ~ 60% 之间。脱硫脱硝系统的阻力包括脱硫反应器阻力、布袋除尘器阻力和脱硝反应器阻力。正常生产时,通过合理匹配脱硫脱硝主引风机电机频率、烟道取气阀开度,控制相对稳定的分烟道调节阀位,实际控制主引风机电机频率见表 1。

表 1 正常生产时主引风机电机频率与各点阻力

主风机电机频率/Hz	风机入口吸力/Pa	脱硫器阻力/Pa	除尘器阻力/Pa	脱硝塔阻力/Pa	分烟道调节阀位/%
46.5	4 816	485	969	2 065	30
43.0	4 480	432	1 010	2 276	53

脱硫脱硝系统各点阻力在工艺设计中已经确定,如果运行中发现阻力短时间内急剧增加,除尘器阻力从 1 000 Pa 逐渐升高到 2 000 Pa,脱硝塔阻力从 1 700 Pa 急剧升高至 3 100 Pa,系统阻力变大,造成焦炉烟道吸力不足,烟道调节阀位增大,不具备调节功能。此时只能依靠增加主引风机电机频率来抵消系

统阻力,风机电机频率过高,电机电流增大,存在跳车隐患。系统阻力增大时主引风机电机频率见表 2。

表 2 系统阻力增大时主引风机电机频率与各点阻力

主风机电机频率/Hz	风机入口吸力/Pa	脱硫器阻力/Pa	除尘器阻力/Pa	脱硝塔阻力/Pa	分烟道调节阀位/%
47	5 253	352	1 997	1 732	82
47	5 615	386	1 203	3 004	84

通过上述分析,除尘器阻力和脱硝塔阻力对风机频率和烟道阀位影响至关重要,如果阻力增大,势必造成烟道吸力降低,这就需要增加主引风机吸力来克服阻力,提高焦炉烟道吸力,保证焦炉正常加热。如果阻力异常增大,主引风机无法克服阻力,焦炉分烟道调节阀位长期 100% 运行,无法调节,影响焦炉加热。

分析脱硫脱硝系统阻力增大的原因,由于 SDS 干法脱硫使用碳酸氢钠作为脱硫剂,碳酸氢钠与二氧化硫反应的主要产物为硫酸钠,硫酸钠固体颗粒在系统中循环,靠除尘系统布袋过滤收集,一旦除尘系统布袋堵塞或其他原因导致布袋除尘效率低下,大量固体颗粒粉末附着在脱硝塔催化剂床层,造成系统阻力增大。

### 3.2 加热炉故障检修

加热炉在使用过程中耐火砖会出现老化破损,甚至大范围脱落;或者加热炉因温度控制失当烧穿本体,导致耐火砖脱落,需要重新砌筑。因加热炉本体空间限制,施工周期较长,一般在 5~7 天,加上耐火砖冷态砌筑后烘炉升温的时间,很难保证焦炉烟气每月 95% 以上小时均值达标排放的要求。

### 3.3 加热炉炉膛温度低,脱硝效果不好

SCR 脱硝系统主要由脱硝反应器、喷氨系统和加热炉组成,SCR 脱硝工艺的原理是烟气与氨气混合后,在催化剂的作用下,发生选择性催化还原反应,生成氮气和水。通常 SCR 脱硝催化剂的活性温度区间为 300~400 °C,催化剂对烟气分布、流向、温度等有明确要求,而加热炉的设置就是满足催化剂对烟气温度的要求。加热炉配置一套主烧嘴和一个点火烧嘴,燃料为焦炉煤气,实际运行中发现,加热炉炉膛温度偏低是由焦炉煤气管道堵塞和加热炉点火喷嘴堵塞造成。

### 3.4 冬季煤气管线冻堵

SCR 脱硝系统的加热炉燃烧焦炉煤气提高烟气温度,焦炉煤气管线冻堵易发生在高空管廊管道变径、低点处,主要原因有以下几点。一是管道中含水,焦炉煤气是含水的可燃气体,冬季天气寒冷,当温度低于焦炉煤气中水蒸汽的饱和温度时,煤气中的水便会在管道中冷凝析出,造成管道内煤气含水。煤气管道设计有疏水排水器,靠近母管处的煤气温度相对较高,煤气中的水分来不及在管道中凝结,使得靠近母管处的疏水排水器无水流出,而管道末端距离母管较远,温度降低较多,凝结出来的水也较多,长期积累的大量煤气冷凝水得不到及时处理,导致疏水排水器由于铁锈或煤气中含有的杂质造成堵塞,影响排水效果。二是管道运行温度过低,冬季室外温度较低,管道内介质温度也低,若没有良好的管道保温措施,管道内介质极易发生冻堵。三是煤气中杂质影响,焦炉煤气中含有焦油、萘等杂质,在低温环境下,这些杂质的黏性会增加,容易附着在煤气管线的内壁上,与凝结的水混合后,会进一步降低混合物的冰点,使其更容易冻结,同时也会缩小煤气管线的流通截面,增加冻堵的可能性。因此无论是预防还是处理,只要消除上述因素就可以从根本上解决管道冻堵。

### 3.5 烟气量小,系统吸力不足

焦炉正常加热时机、焦侧分烟道需要保证足够

的吸力,在机、焦侧分烟道吸力的作用下,从废气盘空气盖板处吸入空气与进入焦炉燃烧室煤气混合燃烧,以供焦炉正常加热,同时该吸力还为废气流动提供动力。脱硫脱硝烟气来源是焦炉燃烧后产生的废气,复热式焦炉既可以使用焦炉煤气加热,也可以使用贫煤气加热。由于热值不同,焦炉煤气和贫煤气燃烧后产生的废气量差距很大,考虑空气过剩系数和焦炉实际温度要求,燃烧焦炉煤气比燃烧贫煤气废气量少 30%~50%。脱硫脱硝系统根据最大烟气流匹配一台主引风机,通过主引风机抽引产生吸力,使进入脱硫脱硝系统的烟气能够流动起来,同时满足焦炉热工制度要求,经脱硫脱硝处理后的净烟气由主引风机抽引入原焦炉烟囱排放。当焦炉由贫煤气倒换焦炉煤气加热时,由于烟气量变小,主引风机不能全功率运转,导致焦炉机、焦侧分烟道吸力无法调节。由于烟气量小,脱硫脱硝系统主引风机转速不能太高,只有约 60% 效能,所以有一部分焦炉烟气短路,造成焦炉烟气中二氧化硫不能稳定达标。

### 3.6 烟气中氧含量的控制

根据现行焦化行业超低排放标准,为规范焦炉废气排放,统一排放数据的计算和比较,同时防止焦炉燃烧废气稀释排放,选择 8% 作为废气基准氧含量,根据基准氧含量对焦炉废气污染物排放量进行折算,当氧含量大于 8%,折算后污染物排放指标大于实测排放指标,当氧含量小于 8%,折算后污染物排放指标小于实测排放指标,氧含量等于 8%,不参与折算。因此,烟气氧含量对控制污染物达标排放具有十分重要的意义。

焦炉烟气脱硫脱硝系统投产后,氧含量大于 8%,折算后污染物排放指标大幅增长,不能达到超低排放要求,同时为了污染物达标排放,只能加大药剂投入,控制更低的实际排放指标,以求折算后能够达标排放,因此大幅增加运行成本。

## 4 脱硫脱硝系统运行优化

### 4.1 脱硫脱硝系统增加膜片式声波清灰器

利用脱硫脱硝系统停机检修的机会对脱硝反应器进行适当改造,增加膜片式声波清灰器,以氮气为动力源,吹动具有张力的圆形膜片,膜片产生低频振动从而产生高能量声波,声波通过扩音筒,在催化剂仓内产生球面纵波形成共振,减少烟气中的粉尘在脱硝反应器内附着,延缓脱硝反应器阻力增大速度,延长脱硝反应器的检修清灰周期,以达到超低排放

的要求。

#### 4.2 增加备用加热炉

新采购一台加热炉作为两套脱硫脱硝装置的备用设备,当主体加热炉出现砖体脱落需要重新砌筑时,直接启用备用加热炉,现场切换备用加热炉只需1小时,将加热炉检修时间从5~7天缩短为1小时,减少焦炉烟气超标次数,确保脱硫脱硝后净烟气排放月均小时合格率大于95%。

#### 4.3 加热炉点火喷嘴改造

加热炉温度低的主要原因是焦炉煤气中的杂质较多,堵塞煤气喷嘴。稳定焦炉煤气净化工艺,提高焦炉煤气品质,同时煤气管道内增加蒸汽吹扫装置,利用蒸汽清扫管道内的杂质,达到净化焦炉煤气的目的。对点火器进行改造,将点火喷嘴直径由之前的0.2 mm增加至2 mm,增大煤气流通面积,改造后,实际运行发现增大点火喷嘴直径并未对加热炉加热及运行产生影响。

#### 4.4 加强煤气管线疏水和保温

根据焦炉煤气管线冻堵的原因分析,解决冻堵主要从两个方面着手。一是要去除管道内积水,由于焦炉煤气本身含有大量冷凝水,在煤气管道“U型”部位增加疏水排放阀,定期进行检查和疏水排放,如果发现冷凝水多,可以将放水阀常开,使水自动流出,避免在煤气输送的过程中形成水障。疏水排水器要定期清理铁锈等杂物,保持排水畅通。另外焦炉煤气的压力、温度要稳定,不能忽高忽低。二是加强管道保温,对一些容易冻堵的部位,如阀门、弯头、三通等,增加保温层厚度提高局部温度。管道保温有传统保温和电保温两种方式。电保温是将电缆带缠绕在要保温的管道上,电缆形成了类似磁感应线圈的装置,磁场在中心位置强度最大,线圈产生的热量由管道中心沿管道径向传递,形成保温层。实际运行中,可采用传统保温和电保温相结合的方式,大大提高保温效果。另外对于已经冻堵的管道,也可快速解冻恢复。

#### 4.5 适量增加焦炉燃烧废气

烟气量小是由于焦炉由贫煤气倒换焦炉煤气加热造成,所以要想从根本上解决此类问题,要求焦炉尽量用贫煤气加热,此外保持焦炉生产过程的稳定,避免大幅度生产负荷波动,稳定的生产工况有助于维持相对稳定的废气产生量,使主引风机能够在较为理想的负荷范围内运行。脱硫脱硝系统吸力最终影响焦炉吸力,为避免吸力过小导致焦炉燃烧系统

进空气量减少,引发安全事故,需在焦炉燃烧系统增加联锁装置,当吸力低于安全值时,焦炉交换机自动停止加热。

#### 4.6 焦炉烟气氧含量控制

(1)焦炉炉体、设备密封。定期对小烟道、炉头、拉条沟部位进行抹补、灌浆,改进焦炉热修、维护方式,引进新的陶瓷焊补技术,对问题炉墙进行重点处理。

重点对地下室分烟道砖缝、废气盘底座与分烟道连接处进行密封,减少焦炉烟道系统窜漏。密封后焦炉烟气氧含量明显下降,焦炉烟气氧含量见表3。

表3 焦炉烟气氧含量 %

炉号	加热煤气种类	位置	调整前	调整后
1号焦炉	高炉煤气	机侧	6.8	4.5
		焦侧	7.2	4.6
2号焦炉	焦炉煤气	机侧	10.2	7.4
		焦侧	11.1	8.1
3号焦炉	焦炉煤气	机侧	9.8	7.4
		焦侧	10.1	7.2
4号焦炉	高炉煤气	机侧	6.9	4.3
		焦侧	7.01	4.6

(2)脱硫脱硝系统密封及调整。对烟道插板阀、原有烟道翻板阀处进行密封,使用旧皮带将插板阀两侧所有进气口全部封堵。对脱硫脱硝系统检查并进行密封,尤其是加热炉、除尘器的法兰连接处。合理调整脱硫脱硝风机转速,减少脱硫脱硝系统的漏风率,降低原烟气氧含量。

通过采取以上措施,焦炉烟气氧含量从10%降低至7%左右,脱硫脱硝净化后氧含量由11%降到8%左右。

## 5 结束语

生产实践证明,SDS干法脱硫+SCR脱硝技术能够有效降低焦炉烟气中二氧化硫、氮氧化物的含量。在生产运行中通过增加膜片式声波清灰器、增加备用加热炉、加强煤气管线疏水和保温、增加焦炉燃烧废气量、改造加热炉点火喷嘴、有效控制焦炉烟气氧含量等措施,焦炉烟气氧含量大幅降低,污染物月均小时排放合格率大于95%,同时在保证焦炉烟气满足超低排放要求的前提下,降低了氨水、小苏打

的用量,降低了脱硫脱硝系统运行成本。

2010,39(8):13-16.

### 参 考 文 献

[1] 马双忱,金鑫,孙云雪. SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵的生成机理与控制[J]. 热力发电,

[2] 蔡承佑. 焦炉烟囱 NO<sub>x</sub> 排放控制刍议[J]. 燃料与化工,2013,44(5):1-3.

[3] 张立,陈崇明,王平. SCR 脱硝催化剂的再生与回收[J]. 电站辅机,2012,33(3):27-30.

## 参考文献著录规则(一)

### 1 专著

著录格式:

主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识]. 其他责任者. 版本项. 出版地:出版者,出版年:引文页码[引用日期]. 获取和访问路径. 数字对象唯一标识符.

示例:

[1] 陈登原. 国史旧闻:第 1 卷[M]. 北京:中华书局,2000:29.

[2] 哈里森,沃尔德伦. 经济数学与金融数学[M]. 谢远涛,译. 北京:中国人民大学出版社,2012:235-236.

[3] 北京市政协民族和宗教委员会,北京联合大学民族与宗教研究所. 历代王朝与民族宗教[M]. 北京:民族出版社,2012:112.

[4] 全国信息与文献标准化技术委员会. 信息与文献 都柏林核心元数据元素集:GB/T 25100—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010:2-3.

### 2 专著中的析出文献

著录格式:

析出文献主要责任者. 析出文献题名[文献类型标识/文献载体标识]. 析出文献其他责任者//专著主要责任者. 专著题名:其他题名信息. 版本项. 出版地:出版者,出版年:析出文献的页码[引用日期]. 获取和访问路径. 数字对象唯一标识符.

示例:

[1] 周易外传:卷 5[M]//王夫之. 船山全书:第 6 册. 长沙:岳麓书社,2011:1109.

[2] 程根伟. 1998 年长江洪水的成因与减灾对策[M]//许厚泽,赵其国. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京:科学出版社,1999:32-36.

[3] 贾东琴,柯平. 面向数字素养的高校图书馆数字服务体系研究[C]//中国图书馆学会. 中国图书馆学会年会论文集:2011 年卷. 北京:国家图书馆出版社,2011:45-52.

### 3 连续出版物

著录格式:

主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识]. 年,卷(期)-年,卷(期). 出版地:出版者,出版年[引用日期]. 获取和访问路径. 数字对象唯一标识符.

示例:

[1] 中华医学会湖北分会. 临床内科杂志[J]. 1984,1(1)-. 武汉:中华医学会湖北分会,1984-.

[2] 中国图书馆学会. 图书馆学通讯[J]. 1957(1)-1990(4). 北京:北京图书馆,1957-1990.