

再生水回用工程 MBR 工艺设计及运行

俞开昌, 黄 霞

(清华大学环境科学与工程系膜技术研发与运用中心, 北京 100085)

摘 要 密云县污水处理厂再生水厂工程采用 MBR 处理工艺, 设计规模 4.5 万 m^3/d , 采用国际先进的中空纤维膜组件和模块化设计与安装, 膜组件的清洗维护和整体系统的运行全部实现自动控制。该工程是我国第一座自行设计、自行施工、自行运行的大型膜-生物反应器污水资源化工程。运行表明: 通过采用气、水二相紊流吹扫以及膜系统每周在线 CIP 化学清洗一次等有效的膜污染控制手段, MBR 系统的膜污染可有效控制在一个比较稳定的水平, TMP 平均值 18.2 kPa, 平均瞬时膜通量 32.3 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$, 折合净通量 28.3 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$, MBR 系统实现了长期稳定运行。

关键词 再生水厂; MBR 工艺设计; MBR 工艺调试; 膜污染控制

中图分类号: X703 文献标识码: B 文章编号: 1004-4345(2008)06-0004-05

Design and Operation of MBR Process of Water Reclamation Project

YU Kai-chang, HUANG Xia

(Membrane Technology Development and Application Center,

Environment Science and Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100085, china)

Abstract The water reclamation plant project of Miyun County Sewage Treatment Plant, with design capacity of 45 000 m^3/d , employs MBR treatment process, world advanced hollow fiber membrane components and modularization design and installation, and realizes automatic control on the cleaning and maintenance of membrane components and the operation of the whole system. This project is the first large-size membrane-bioreactor sewage reclamation project of self design, self construction and self operation in China. The operation shows that with the gas-liquid turbulent flow purge and the on-line CIP chemical cleaning of membrane system once a week, the membrane contamination can be controlled at a comparatively stable level, with the average TMP value of 18.2 kPa and average instantaneous membrane throughput of 32.3 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$ corresponding to net throughput 28.3 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$, and the MBR system can realize long-term stable operation.

Keywords water reclamation plant; MBR process design; MBR process debugging; membrane contamination control

密云县污水处理厂位于密云县城的西南部, 是密云县城目前唯一的污水处理厂, 承担密云县城及密云开发区的污水处理。污水处理工艺为水解——好氧处理工艺, 总处理规模为 4.5 万 m^3/d , 设计要求达到国家二级排放标准。为了减少污水厂尾水对下游的污染, 并且解决水资源紧张问题, 密云县政府考虑将污水处理厂尾水进一步深度处理, 达到再生水的水质要求, 回用于亚澜湾小区及潮、白河景观用水补水。

密云污水处理厂再生水厂采用膜-生物反应器 (Membrane Bioreactor, MBR) 处理工艺。MBR 是一

种将膜分离技术与污水生物处理工艺有机结合的新型高效污水处理与再生回用工艺, 它具有出水水质好、稳定、效率高、大大节省占地、易实现充分自动控制等优点, 代表了国际上污水资源化技术的重要发展方向, 是一种极具良好发展和普及前景的高新技术。

1 再生水厂 MBR 工艺设计

密云污水处理厂再生水厂是我国 MBR 工艺首

收稿日期 2008-11-18

863 项目 国家 863 示范工程, 工程项目号: 2002AA601220。

作者简介 俞开昌(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事水污染控制技术研发与应用。

次在大型市政污水资源化中应用的工程,有效控制膜污染和实现膜操作的长期稳定运行是 MBR 成功与否的关键,也是 MBR 工艺风险根本之所在。

1.1 工程规模及进出水水质

根据密云县再生水回用规划,再生水厂建设规模为 45 000 m³/d,回用于亚澜湾小区及潮、白河景观用水补水。

再生水厂水源为密云污水处理厂二级处理后的尾水。根据再生水的用途以及国家现行的水质标准,再生水厂的出水水质标准主要执行《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T 18920-2002)中的城市杂用以及《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921-2002)中的观赏性环境景观用水河道类、水景类的水质要求。再生水厂设计进、出水水质见表 1。

表 1 再生水厂设计进水、出水水质			
序号	指 标	设计进水水质	设计出水水质
1	pH	6.0~9.0	6.0~9.0
2	色(度)	≤ 50	30
3	嗅	-	无不快感
4	浊度(NTU)	≤ -	5
5	化学需氧量 COD,mg/L	≤ 100	-
6	5日生化需氧量 BOD ₅ ,mg/L	≤ 40	6
7	氨氮,mg/L	≤ 25	5
8	TP	≤ 1.5	0.5
9	阴离子表面活性剂,mg/L	≤ 5	0.5
10	溶解氧,mg/L	≥ -	1.0
11	总大肠菌群,个/L	≤ -	3
12	悬浮物(SS)	≤ 80	10
13	石油类,mg/L	≤ 5	1.0

1.2 MBR 工艺流程

密云县污水处理厂二级处理尾水接入再生水厂进水提升泵房的集水池,经潜水泵提升后进入细格栅间,通过 0.5 mm 的转鼓网状细格栅过滤,去除毛发等纤维状物质,以保证后续膜处理系统的正常运行。细格栅过滤后的出水经管道混合器加药后进入曝气池,再进入膜池,在抽吸泵抽吸作用下经膜过滤形成出水,出水经臭氧消毒脱色后回用。工艺流程如图 1 所示。

1.3 预处理工艺设计

国外 MBR 工艺运行经验表明,预处理设计直接影响 MBR 系统的稳定运行及膜使用的寿命。进水中物理性污染物,尤其是纤维状物质(如细小纤维屑、毛发等)极易缠绕在膜丝上,损伤膜丝或者吸附上大量污泥形成泥饼使膜丝成结而不能正常振动,导致膜有效过滤面积减小、膜污染加剧,最终严重影响膜系统的稳定运行。

超细格栅是为了防止纤维状物质进入膜-生物反应器,以免缠绕在膜丝上,影响膜的污染控制效果和膜的使用寿命,细格栅对膜的维护和保养非常重要。本工程采用转鼓型超细格栅。格栅间内设置 2 道超细格栅,栅前后各设 1 个手电动闸板。流道宽度 2 000 mm,超细格栅距 0.5 mm。超细格栅设置油脂泵和反冲洗泵,根据时间周期或栅前后水位自动控制反冲洗,反冲洗水源采用栅后出水。栅渣经过冲洗压榨后排入渣斗外运。

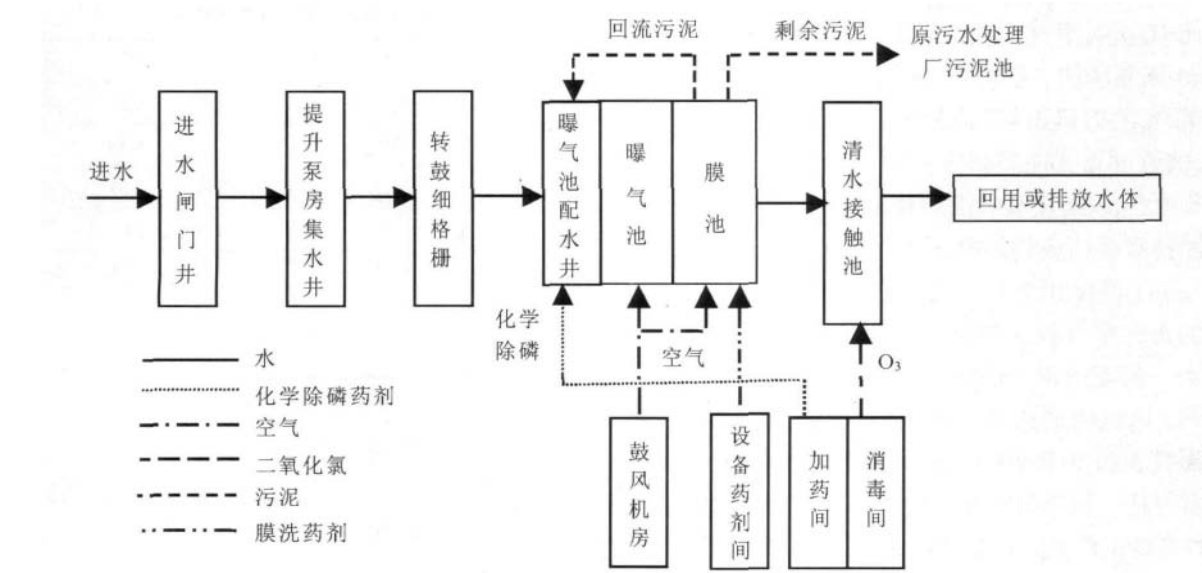


图 1 密云县污水处理厂再生水厂工艺流程

1.4 膜及膜组件的选择

MBR 工艺中膜投资约占总投资的 2/3,膜寿命长

短直接关系到系统的投资和运营成本,从而影响到项目生命周期的财务平衡。结合本工程的特点,经过

与多家国际著名膜供应商交流和多次专家会的论证,确定采用浸没式 PVDF 中空纤维膜及其组件,PVDF 膜具有很好的机械强度、抗污染潜力以及化学稳定性(抗氧化性)。工程最终采用的是 Mitsubishi 公司的 PVDF 膜及其组件,膜孔径 $0.4\ \mu\text{m}$ 。

1.5 曝气池、膜池工艺设计

膜—生物反应器包括好氧曝气池、膜池及设备药剂间,好氧池中采用微孔曝气,膜池中采用粗孔曝气。曝气池有效容积 $4\ 320\ \text{m}^3$,水力停留时间(HRT)为 $2.3\ \text{h}$,分为 2 个系列,可独立运行。每系列池由 3 个推流式廊道组成,廊道宽 $6\ \text{m}$,长 $24\ \text{m}$,有效水深 $5\ \text{m}$ 。曝气池前端设置 2 台闸门和 2 台可调堰门,用于配水配泥。内设微孔曝气管曝气,微孔曝气管每根长 $1\ \text{m}$,单根服务面积 $1.5\ \text{m}^2$,氧转移效率不 $<26\%$,微孔曝气管共 576 根。由于出水总磷要求很严格,低于 $0.5\ \text{mg/L}$,所以采用化学除磷措施。本设计在曝气池进水配水井处投加化学除磷药剂。

膜池有效容积 $3\ 240\ \text{m}^3$,水力停留时间(HRT)为 $1.7\ \text{h}$,共分 2 个系列。每系列分为 3 格,每格膜池中设 7 个膜箱,单个膜箱产水量 $1\ 071.4\ \text{m}^3/\text{d}$,膜通量 $0.714\ \text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$,约合 $30\ \text{L}/\text{m}^2/\text{h}$ 。

1.6 膜污染控制设计

膜污染是膜技术应用中面临的关键问题,它将影响膜的稳定运行,决定膜的清洗周期和膜的更换频率,膜污染被认为是影响 MBR 工艺经济性的最主要原因。为了有效控制膜污染,本工程采取了相应的技术措施:(1)正向空气扫洗;(2)间歇抽吸;(3)维护性在线清洗;(4)恢复清洗。正向空气扫洗是指膜系统过滤时,系统配套的鼓风机同时开启,相应地控制阀门开启,鼓风机通过设置在膜块下的粗孔管曝气,对膜丝表面进行吹扫,以防止膜表面颗粒物质的大量沉积。

间隙抽吸是指膜的抽吸出水泵连续运行一定时间(如 $7\ \text{min}$),再停止运行一定时间(如 $1\ \text{min}$),而此时膜丝的正向空气扫洗鼓风机还在运行,在气泡形成的气水二相紊流剧烈的扰动下,膜丝获得足够强度的振动,这将使过滤时沉积在膜丝表面的少量颗粒物脱离膜表面,使膜表面的污染物得到清除。

通常每周一次要进行膜块的加药化学反冲洗,称作维护性在线清洗(Clean-In-Place,CIP)。维护性在线清洗可设计成自动控制。在系统运行过程中,自动地对每个膜池分别进行化学在线清洗而无需操作人员投入。高强度、高化学抵抗力 PVDF 膜的发展,使这种频繁的维护性在线清洗成为可能。而工艺自动化使清洗

操作变得极为简单。维护性在线清洗工艺能被工程设计为自动操作程序,而不需要人工干涉。即便采用了这些维护性措施,跨膜压力(Transmembrane pressure, TMP)也会缓慢地达到最高值或终止值。一旦达到终止值,各膜块需要从池中取出,进行化学药剂浸泡以去除结垢物质,恢复渗透性。该流程称作恢复清洗,通常根据堵塞情况 1~2 年进行一次。一旦膜块需要清洗,膜块将被拆下并浸泡在清洗槽里。根据垢的类型,可采用不同化学溶剂进行清洗,次氯酸钠用于有机垢,弱酸用于无机垢。经过一段时间的浸泡后,膜的过滤性能得到恢复后,将膜组件重新安装回生产线。

2 再生水厂 MBR 工艺运行

本工程最终共安装 $3.0\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{d}$ 的膜及膜组件。经过一年多的实际运行,主要运行情况简述如下。

2.1 运行水量

工程经过 3 周后,系统基本达到稳定水平,于 2006 年 4 月下旬开始试运行。经过约 2 个月的试运行,工程进入正常运行阶段。到目前为止,工程实际来水量为 $2.2\sim 2.9\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{d}$ 。高峰时间基本达到膜系统的设计处理水量 $3\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

2.2 进、出水水质

由于密云开发区的各个企业内部的污水处理还没有完善,工程实际进水水质比较恶劣,各种污染物指标浓度达到设计进水水质的 2~3 倍。密云实际运行的进、出水水质情况(2006.7~2007.3)见表 2、图 2、图 3。

表 2 实际运行进出水水质情况表

项目	水质指标	COD _{cr}	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	浊度
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	NTU
进水	最大值	796	361	78.8	4.35	
	最小值	87.8	26.2	31.8	1.07	
	平均值	226.3	82.3	61.6	2.64	
出水	最大值	61.4	6.3	4.35	1.2	0.952
	最小值	7.4	0.4	0.02	0.06	0.012
	平均值	41.4	2.6	1.07	0.41	0.282

从表 2、图 2 可以看出,再生水厂实际进水 COD_{cr} 浓度在 $87.8\sim 796\ \text{mg/L}$ 之间,平均值 $226.3\ \text{mg/L}$,约为设计进水的 2.3 倍;再生水厂实际出水 COD_{cr} 浓度平均值 $41.4\ \text{mg/L}$ 。MBR 系统表现出很强的抗有机污染负荷冲击能力。

从表 2、图 2 可以看出,再生水厂实际进水 NH₄⁺-N 浓度在 $31.8\sim 78.8\ \text{mg/L}$ 之间,平均值 $61.6\ \text{mg/L}$,约为设计进水的 2.5 倍;再生水厂实际出水 NH₄⁺-N 浓度

在 0.02~4.35 mg/L 之间,平均值 1.07 mg/L。MBR 系统具有很好的硝化效果,表现出很强的抗氨氮负荷

冲击能力。

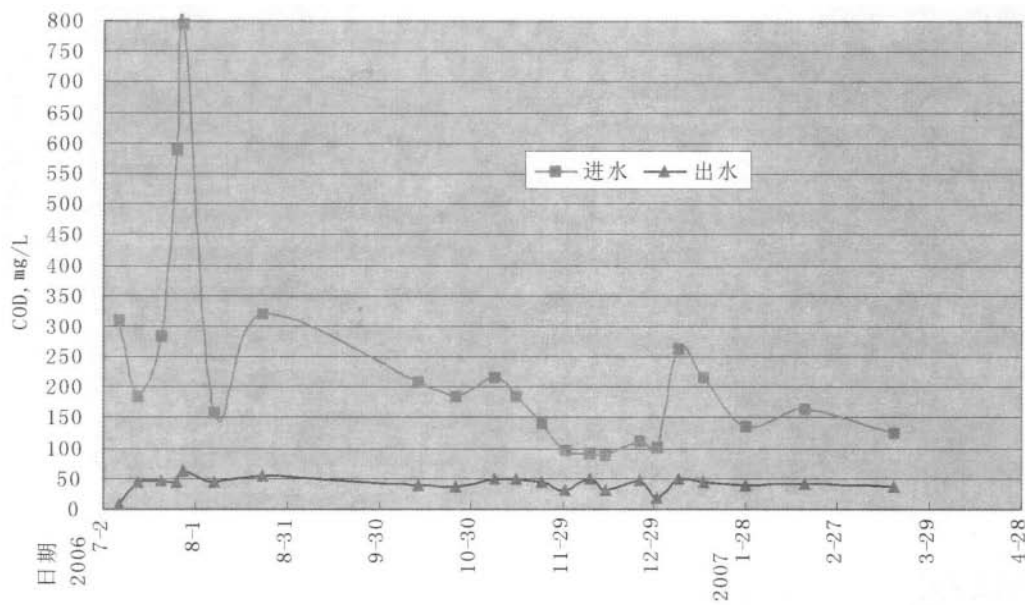


图 2 2006.7~2007.3 实际进、出水 COD_{Cr} 浓度变化

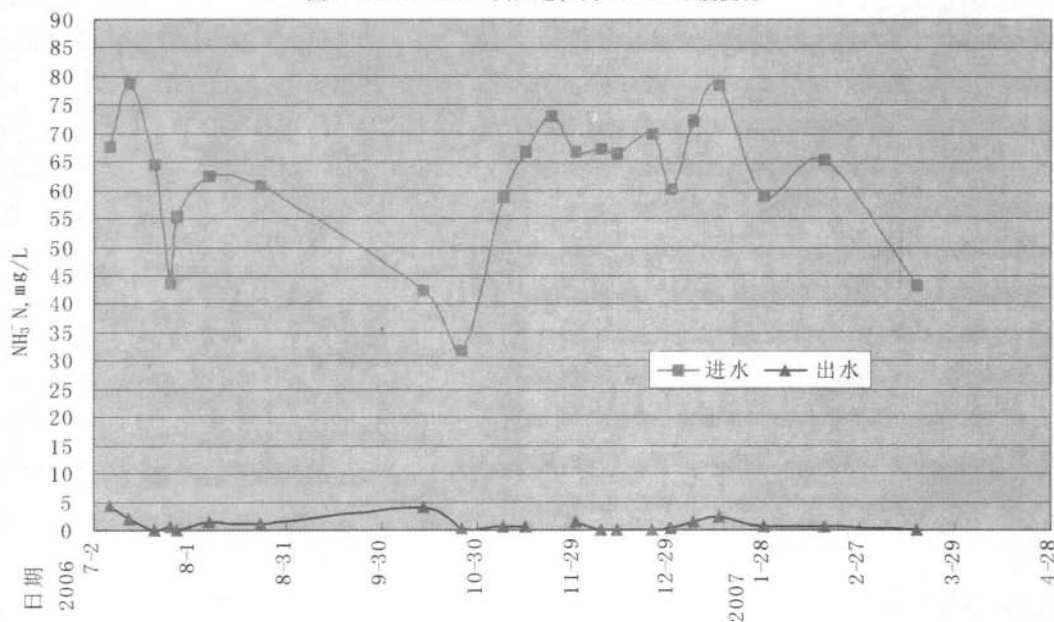


图 3 2006.7~2007.3 实际进、出水 NH_4^+-N 浓度变化

2.3 膜污染控制措施与结果

再生水厂现使用了 4 格膜池 (1#、2#、5#、6#),每个膜池 6 个膜箱。4 组膜池独立运行,可分别计量其处理能力和膜阻力发展状况。每周 1 次的在线化学维护性清洗,清洗药剂采用 NaClO 溶液,浓度 500 mg/L。1# 膜池运行的膜通量以及 TMP 情况见图 4^[1]。

从图 4 可以看出:PVDF 膜的运行瞬时膜通量在 24.4~38.9 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$,平均 32.3 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$;折合净通量 21.4~34.03 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$,平均 28.3 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$ 。膜线运行的 TMP

比较稳定,在 8.1~31.4 kPa 间变化,平均 18.2 kPa,且在相近的膜线产水量下,冬天的 TMP 约为夏天的 1.5 倍。从膜线开始试运行到目前为止,膜箱没有进行过体外的恢复性清洗。膜线可以实现长期稳定地运行。

3 结 论

密云县污水处理厂再生水厂采用膜—生物反应器(MBR)工艺,设计规模 4.5 万 m^3/d ,膜系统实际安装规

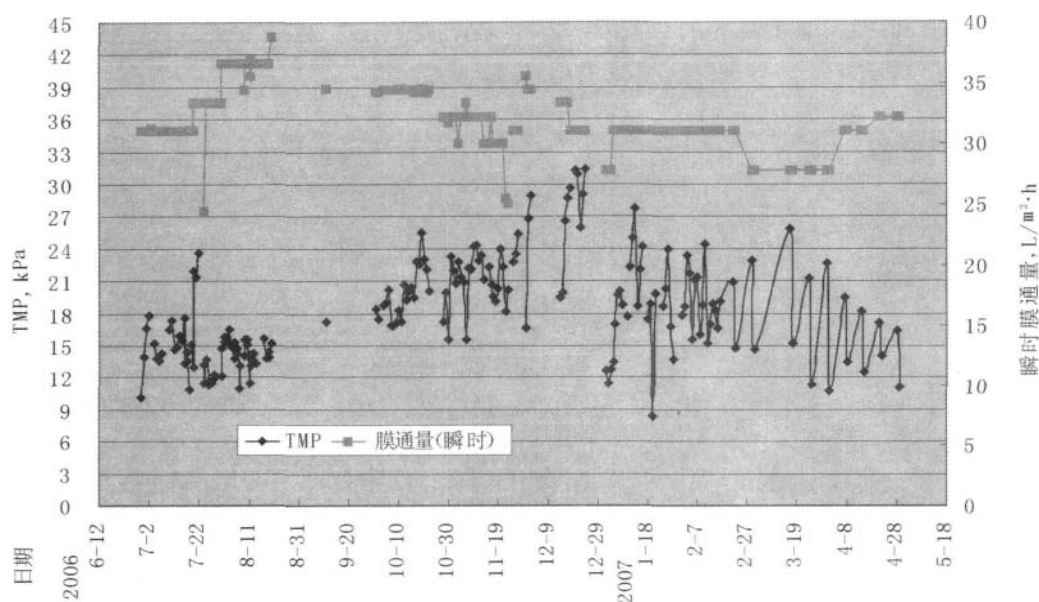


图 4 1# 膜池运行的膜通量以及 TMP 情况

模 3 万 m^3/d , 目前实际运行水量 2.2~2.9 万 m^3/d 。再生水厂实际进水 COD_{Cr} 浓度平均值 226.3 mg/L , 约为设计进水的 2.3 倍, 实际出水 COD_{Cr} 浓度平均值 41.4 mg/L ; 实际进水 NH_4^+-N 浓度平均值 61.6 mg/L , 约为设计进水的 2.5 倍, 实际出水 NH_4^+-N 平均值 1.07 mg/L 。MBR 系统表现出很强的抗水质污染负荷冲击能力。

运行表明, 通过采用气、水二相紊流吹扫以及膜系统每周在线 CIP 化学清洗一次等有效的膜污染控制手段, MBR 系统的膜污染可有效控制在一个比较稳定的水平, TMP 平均值 18.2 kPa , 平均瞬时膜通量 32.3 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$, 折合净通量 28.3 $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$; MBR 系统实现

的长期稳定运行。

密云县污水处理厂再生水回用工程是我国第一座自行设计、自行施工、自行运行的大型膜—生物反应器污水资源化工程。该工程的建成与成功运行体现了我国 MBR 的技术研发、工艺集成、应用规模和先进性达到了国际领先水平, 标志着我国的 MBR 污水处理与资源化技术跨入了世界前列, 是我国大型 MBR 应用的里程碑。

参考文献

- [1] 俞开昌. MBR 污水处理工艺的研究应用现状与发展展望[R]. 北京: 中国膜工业协会工程与应用专业委员会, 2007, 5.

欢迎订阅《有色冶金设计与研究》杂志

《有色冶金设计与研究》创刊于 1980 年, 是中国瑞林工程技术有限公司 (南昌有色冶金设计研究院) 主管、主办, 国内外公开发行的省级重点科技期刊, 是一份在有色矿山、冶金化工、民用建筑、市政建设等方面具有鲜明专业特色的技术类期刊。

本刊设有采矿工程、选矿工程、冶炼工程、机电与仪表、建筑工程与城市规划、市政与环境工程、国际合作与交流、管理与其他等 8 大栏目, 涉及有色采矿、选矿、冶炼、化工、工业与民用建筑、给排水及尾矿、电气、仪表、机械、总图运输、环境保护、热能通风、工程承包、工程建设监理、技术经济、概预算和电子计算机应用等多个专业。刊登内容包括新技术、新设计、新工艺、科研成果、工程施工及生产经验总结等论文, 以及一些国外工程设计、国外考察、工程承包管理等方面的论文。本刊适用于上述专业相关的生产、科研、设计、施工、院校等单位或个人。

《有色冶金设计与研究》为双月刊, 大 16 开本, 每期页码 56P, 每期定价 8 元, 全年 48 元。

欢迎广大读者到各地邮政局订阅, 邮发代号 44-117, 亦可直接向本刊邮购。

地址 江西省南昌市八一大道 1 号 《有色冶金设计与研究》编辑部

邮编 330002 电话 (传真) 0791-6264291 E-mail: ysyj@chinajournal.net.cn