

燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉中压蒸发器 鳍片管泄漏原因

吴 跃^{1,2}

(1. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司华东电力试验研究院, 合肥 230088;
2. 大唐锅炉压力容器检验中心有限公司, 合肥 230088)

摘要: 某燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉中压蒸发器鳍片管在运行期间发生泄漏, 采用宏观形貌和显微组织观察、扫描电镜及能谱分析、物相分析及实验室溶垢试验等方法对其失效原因进行了分析。结果表明: 泄漏管漏点位置及附近腐蚀产物层下组织均无异常; 个别鳍片管局部区域在原始制造时已发生严重腐蚀, 形成了鼓泡状腐蚀产物, 其无法通过化学酸洗溶解去除而遗留下来, 在机组运行期间, 该位置进一步遭受氧腐蚀而发生减薄, 最终导致泄漏; 建议加强中压蒸发器鳍片管的入场验收管理, 重点关注鼓泡状腐蚀、划伤等原始缺陷, 以防止此类泄漏事故再次发生。

关键词: 中压蒸发器鳍片管; 鼓泡; 氧腐蚀; 泄漏

中图分类号: TG113.2 文献标志码: B 文章编号: 1000-3738(2020)11-0021-04

Leakage Causes of Fin Tube of Middle Pressure Evaporator for Heat Recovery Steam Generator of Gas-Steam Combined Cycle Unit

WU Yue^{1,2}

(1. East China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China;
2. Datang Boiler and Pressure Vessel Inspection Center Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: A fin tube of middle pressure evaporator for heat recovery steam generator of gas-steam combined cycle unit leaked during operation. Macroscopic appearance and microstructure observation, scanning electron microscope and energy spectrum analysis, phase analysis and laboratory scale dissolving test were used to analyze the leakage reasons. The results show that the structures under the leakage point and nearby corrosion product layer were normal. Local areas of some fin tubes had been severely corroded during the original manufacturing, forming the blister-like corrosion products, which cannot be removed by chemical pickling and dissolution. During the unit operation, the position was further corroded by oxygen and thinned, which eventually led to the leakage. It was suggested to strengthen the acceptance management of the fin tube of middle pressure evaporator, focusing on the original defects such as blister-like corrosion and scratches to prevent such leakage accidents from recurring.

Key words: fin tube of middle pressure evaporator; blister; oxygen corrosion; leakage

0 引言

燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉属于热量回收设备, 可降低能源消耗, 提高机组热效率和经济效

益, 对于节能减排起着至关重要的作用^[1-2]。中压蒸发器为余热锅炉本体受热面, 采用模块结构, 一般由垂直布置的顺列螺旋鳍片管和进出口集箱组成。鳍片管与进出口集箱连接处的角焊缝因承受结构应力、焊接残余应力以及机组频繁启停产生的交变应力而易发生开裂, 导致泄漏。

某燃气-蒸汽联合循环机组 1 号余热锅炉于

2019年1月24日停炉备用。2月12日对锅炉上水进行启机前准备工作,发现炉底膨胀节及炉底保温疏水漏水量大,初步判断炉膛内部发生泄漏。2月13日进炉膛检查发现,IV区中压蒸发器B模块鳍片管存在两处漏点:鳍片管垂直排布,第一处泄漏管为沿烟气流向里数第5排,从左往右数第2根,漏点(下文称为上部漏点)距离上部小集箱650 mm;第二处泄漏管为沿烟气流向里数第4排,从右往左数第8根,漏点(下文称为下部漏点)距离下部小集箱670 mm。鳍片管均为ASME SA210 A1无缝钢管,规格为 $\phi 38 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$,螺旋鳍片材料为碳钢。将邻近上部漏点的17根管以及邻近下部漏点的13根管割除,对内壁进行宏观检查,未发现异常。锅炉泄漏位置及返修割除管段示意见图1。为了查明该锅炉中压蒸发器鳍片管泄漏原因,作者对第一处泄漏管(上部漏点)进行了理化检验和分析,并提出了相关预防措施。

1 理化检验及结果

1.1 宏观形貌

由图2可知,失效管漏点附近内壁表面粗糙不平,存在鼓疱状腐蚀产物,腐蚀产物外层呈砖红色,用刀片将其刮破,可从内壁剥离下大量黑色粉末状腐蚀产物和少量红棕色块状产物,清除腐蚀

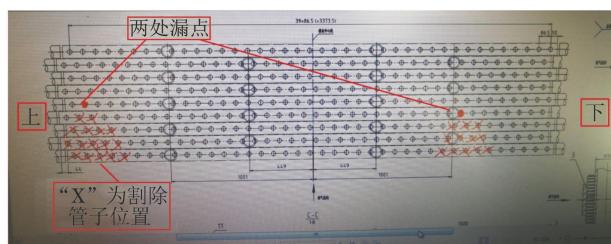


图1 中压蒸发器泄漏位置及返修割除管段示意

Fig. 1 Schematic of middle pressure evaporator leakage locations and cutting tubes for repair

产物后内壁出现溃疡状陷坑,可见该鼓疱状腐蚀产物分为两层,包括外层砖红色腐蚀产物和内部的黑色粉末及少量红棕色块状产物,说明鳍片管发生了典型的氧腐蚀^[3-4]。另将距漏点250 mm处切开,可见管内壁仅存在一层薄而均匀的砖红色腐蚀产物。

1.2 显微组织

在失效鳍片管泄漏位置及其附近内壁腐蚀产物处分别切取金相试样,经打磨、抛光后,采用体积分数4%的硝酸酒精溶液腐蚀,通过Carl Zeiss Axio Observer A1m型光学显微镜观察显微组织。由图3和图4可知:漏点及附近内壁处存在腐蚀层,管的有效壁厚为0.95~1.40 mm,远低于2.7 mm的设计壁厚;鳍片与管外壁焊接时存在未熔合缺陷;漏点处母材组织为铁素体+珠光体,未见老化;漏点及

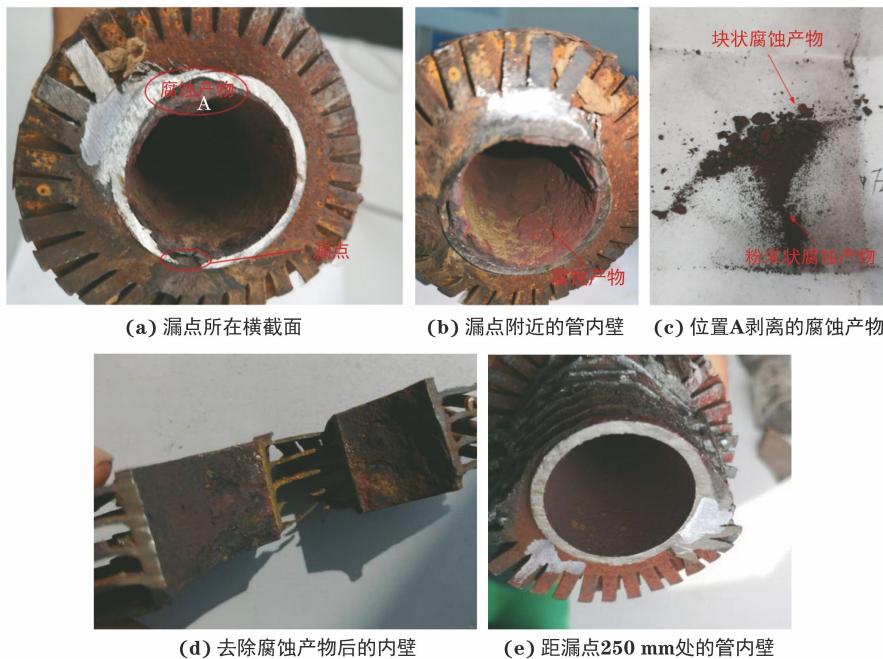


图2 失效鳍片管的宏观形貌

Fig. 2 Macromorphology of failed fin tube: (a) cross section of leakage point; (b) inner wall of tube near leakage point; (c) corrosion products stripped at position A; (d) inner wall after removal of corrosion products and (e) inner wall of the tube 250 mm away from the leakage point

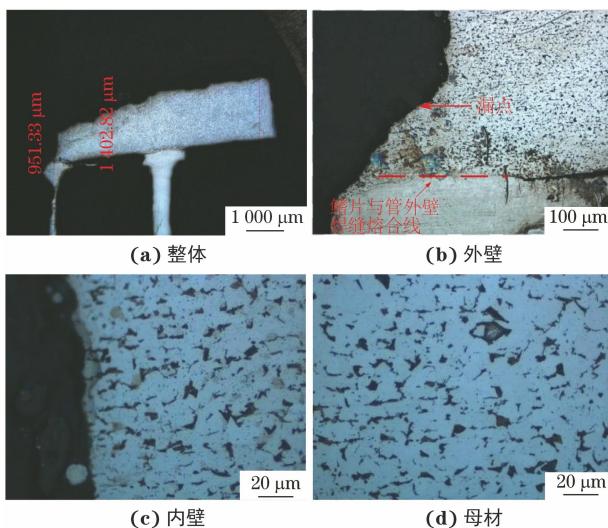


图 3 鳍片管漏点位置的显微组织

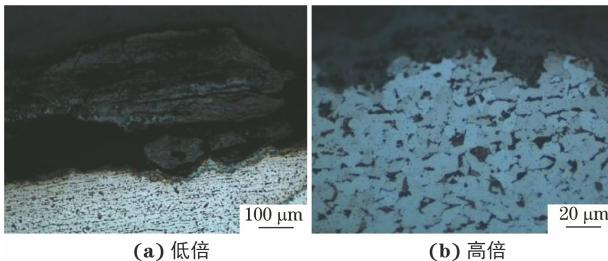
Fig.3 Microstructures of the leakage point of the fin tube:
(a) whole; (b) outer wall; (c) inner wall and (d) base material

图 4 鳍片管漏点附近内壁腐蚀产物及其下显微组织

Fig.4 Corrosion products on inner wall near the leakage point of the fin tube and underlying microstructure: (a) at low magnification and (b) at high magnification

内壁腐蚀产物下的组织均为铁素体+珠光体,无脱碳现象和晶间微裂纹。

1.3 腐蚀产物的化学成分

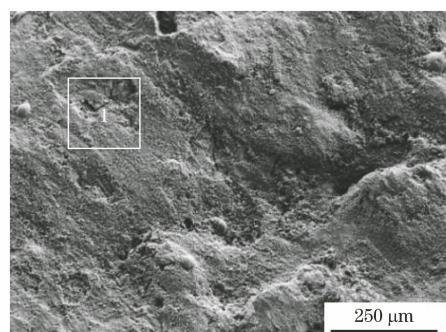
利用蔡司 sigma300 型热场扫描电镜(SEM)附带的能谱仪(EDS)对图 2(c)中剥离的腐蚀产物进行能谱分析。由图 5 可知,该腐蚀产物以铁和氧元素为主,为铁的氧化物,此外还含有少量碳和磷,无氯等腐蚀性元素。

1.4 腐蚀产物物相组成

利用布鲁克 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD)对上述腐蚀产物进行物相分析。由图 6 可知,该腐蚀产物为 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 的混合物。可以推断鼓泡下的红棕色产物为 Fe_2O_3 , 黑色产物为 Fe_3O_4 ^[5-6], 进一步说明该中压蒸发器鳍片管内壁泄漏是由氧腐蚀所导致。

1.5 溶垢性能

截取锅炉泄漏管段及相邻未泄漏管段进行实验



(a) 腐蚀产物SEM形貌

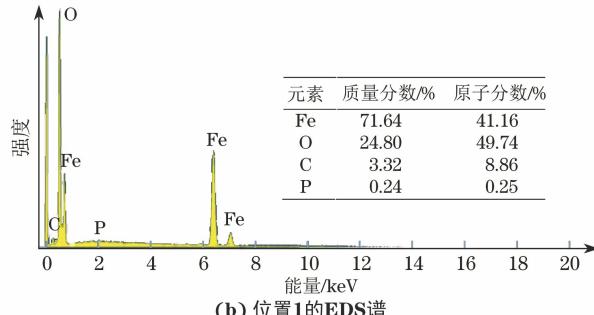


图 5 鳍片管内壁腐蚀产物的 SEM 形貌及 EDS 谱

Fig.5 SEM morphology (a) and EDS spectrum (b) of corrosion products on inner wall of the fin tube

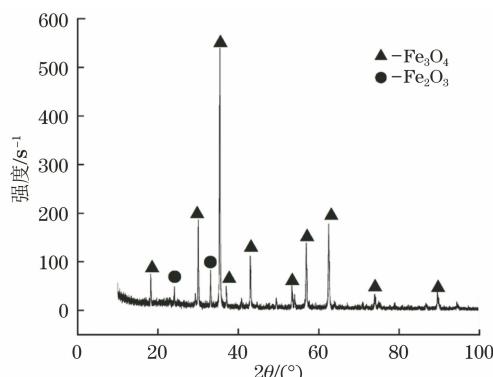


图 6 鳍片管内壁腐蚀产物的 XRD 谱

Fig.6 XRD spectrum of corrosion products on inner wall of the fin tube

室溶垢试验。采用 95.5% (质量分数, 下同) 除盐水 + 0.5% 缓蚀剂 + 4% 盐酸配制的清洗液对泄漏管段进行第一次清洗, 将清洗液和泄漏管段水浴加热至 60 °C, 清洗 30 min (即恒温放置 30 min), 该处理方式与基建期化学清洗工艺条件相同。由图 7(a) 及图 7(d) 可以看出, 第一次清洗后, 管样内壁的鼓泡状腐蚀产物未溶解, 清洗效果不明显, 而侧面鳍片表面薄而均匀的腐蚀产物消失, 露出金属本色。将酸洗液中盐酸的质量分数提高至 6%, 清洗时间延长至 40 min, 进行第二次清洗, 由图 7(b) 可知管样内壁腐蚀产物亦无明显变化。不添加缓蚀剂, 采用 6% 盐酸溶液对泄漏管段进行第三次清洗, 清洗时间

为 40 min, 内壁腐蚀产物仍无明显变化。采用与泄漏管段第一次清洗时的相同条件对未泄漏管段进行清洗, 约 5 min 后, 其内壁处薄而均匀的腐蚀产物即

清洗干净。由此说明, 蒸发器运行期间, 鳍片管内壁正常形成的薄而均匀的腐蚀产物易溶解去除, 而漏点附近的鼓泡状腐蚀产物很难用盐酸溶液溶解去除。

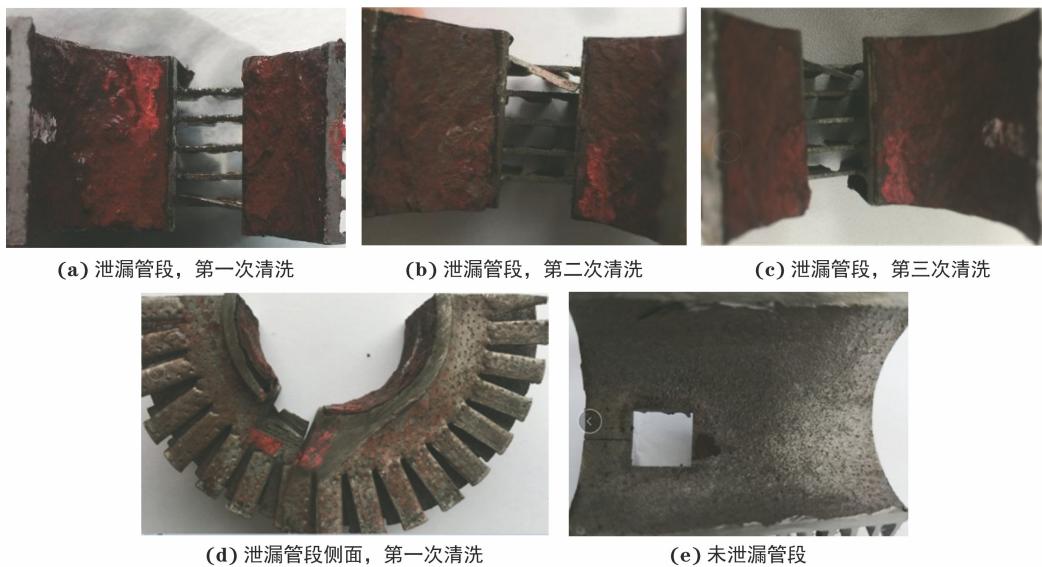


图 7 鳍片管泄漏管段及相邻未泄漏管段溶垢试验结果

Fig. 7 Scale dissolving test results of the fin tube leaking section and adjacent unleaked tube section: (a) leaking tube section, the first cleaning; (b) leaking tube section, the second cleaning; (c) leaking tube section, the third cleaning, (d) side of leaking tube section, first cleaning and (e) unleaked tube section

2 失效原因分析

鳍片管漏点位置及腐蚀产物层下组织未见异常, 仅漏点附近内壁存在非正常鼓泡状腐蚀产物, 而距漏点 250 mm 处管内壁光滑平整, 仅有运行期间形成的一层薄而均匀的腐蚀产物, 且腐蚀产物与金属基体紧密结合, 无分层现象, 呈现出正常的受热面管内壁沉积状态^[7]。此外, 割除的 30 根鳍片管内壁亦光滑平整。说明中压蒸发器仅个别管内壁局部区域存在鼓泡状腐蚀产物, 这些区域在机组运行期间极易进一步遭受氧腐蚀发生减薄而导致泄漏。

该中压蒸发器运行时烟气侧温度为 230~250 °C, 水侧温度约为 220 °C。余热锅炉同一受热面接触烟气的温度相对一致, 不同高度区域热负荷基本相同, 因此水蒸气中的铁元素在蒸发器中与氧元素受热发生反应形成的沉积物应为均匀状态, 即腐蚀产物均匀平滑, 而不会在局部区域形成分层的鼓泡状腐蚀产物。

发生泄漏的 1 号机组于 2018 年 11 月 28 日整套启动, 第一次点火; 12 月 11 日至 18 日进行 168 h 满负荷试运, 整套启动仅耗时 20 d。在此期间, 系统的冷态冲洗提前开始, 启动过程中同时加强热态冲洗和

锅炉排污工作, 系统铁含量较低, 其中 168 h 满负荷试运期间, 给水中的铁含量仅为 7~11 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 远低于 DL/T 1717—2017 标准要求(不高于 30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。另外, 该锅炉从投产到中压蒸发器发生泄漏仅 40 余 d, 其中运行 24 d, 停备 19 d。在水汽系统铁含量较低、运行时间极短以及余热锅炉受热面热负荷均匀的条件下, 理论上该鳍片管局部区域不会形成分层的鼓泡状腐蚀产物。溶垢试验显示蒸发器正常运行形成的腐蚀产物薄而均匀, 极易被盐酸溶解去除, 而漏点附近的鼓泡状腐蚀产物不能通过锅炉基建期间的化学清洗工艺(采用盐酸溶液)去除, 由此充分说明泄漏管局部区域存在的非正常鼓泡状腐蚀产物是在原始制造条件下遗留的, 推测是由内壁局部区域积水导致管壁发生严重氧腐蚀所致, 试运行时, 该区域进一步遭受腐蚀发生减薄而最终导致泄漏。

3 结论及建议

(1) 该中压蒸发器个别鳍片管局部区域在原始制造条件下已发生严重氧腐蚀, 形成了鼓泡状腐蚀产物, 其无法通过锅炉基建期间的化学酸洗溶解去除而遗留下来, 在机组运行期间, 该区域进一步遭受腐蚀发生减薄而最终导致泄漏。

(下转第 28 页)

材料的安全系数;优化齿轮箱组装涂胶工艺,减小合箱面间隙,以降低腐蚀性气体对齿轮箱的影响。

参考文献:

- [1] 张增强.地铁传动齿轮箱设计关键技术研究[J].机械工程与自动化,2017,204(5):119-120.
- [2] LI G Q, LIU Z M, WANG W J, et al. Fatigue crack mechanism study on high-speed EMU gearbox[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 99-105.
- [3] CHAN K S, JONES P, WANG Q G. Fatigue crack growth and fracture paths in sand cast B319 and A356 aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 341(1/2): 18-34.
- [4] HAN S W, KUMAI S, SATO A. Effects of solidification

structure on short fatigue crack growth in Al-7%Si-0.4%Mg alloy castings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 332(1/2): 56-63.

- [5] 鲁薇华,王汝耀.铝-硅合金锶变质作用衰退的研究[J].特种铸造及有色合金,1995,15(2):1-5.
- [6] 王洪飞,赵建祥,唐正华.锶盐复合变质剂对ZL104铝合金的变质效果[J].轻合金加工技术,2012,40(9):32-36.
- [7] 刘德林,李春光,陶春虎,等.铍青铜弹簧片应力腐蚀开裂分析[J].腐蚀与防护,2012,33(5):452-455.
- [8] 王忠,曾艳梅. SS9型机车齿轮箱裂纹分析及改进[J].电力机车与城轨车辆,2005,28(3):61.
- [9] 穆山,李军念,王玲,等.海洋大气环境金属防护涂层技术与工艺研究[J].装备环境工程,2012,9(1):81-84.
- [10] 冯一可.2A50铝合金在含有较低氯离子浓度溶液中的腐蚀性能研究[J].科技视界,2019,275(17):104-106.

(上接第 24 页)

(2) 建议加强中压蒸发器模块鳍片管的入场验收管理,采用内窥镜抽查管内壁的鼓泡状非正常腐蚀、划伤等原始缺陷,以防止此类泄漏事故发生。

参考文献:

- [1] 赵延灵.余热锅炉不锈钢烟管开裂原因分析[J].理化检验(物理分册),2020,56(1):34-37.
- [2] 孙猛.硫磺回收酸性气废热锅炉的设计[J].化工管理,2015(32):12.

- [3] 朱永满,叶致富.锅炉水汽系统金属腐蚀及控制方法[J].化学工程与装备,2019(8):197-199.
- [4] 粟岗,黄庆富.锅炉氧腐蚀的预防[J].云南化工,2018,45(2):32-33.
- [5] 郑准备,李秀广,杨占君,等.火电厂 330 MW 锅炉水冷壁管泄漏原因分析[J].热加工工艺,2017,46(17):255-256.
- [6] 施燮钧,王蒙聚,肖作善.热力发电厂水处理(上)[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [7] 林俊滨.超(超)临界锅炉高温管内氧化皮形成机理及堵塞规律研究[D].广州:华南理工大学,2010.

中文核心期刊《机械工程材料》2021 年征订启事

《机械工程材料》杂志创刊于 1977 年,由上海材料研究所主办,为中国机械工程学会材料分会会刊,是国内外公开发行的有关工程材料研究与生产应用的专业技术期刊,是中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

《机械工程材料》杂志报道内容涵盖金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料以及复合材料等传统及新型工程材料的最新研究及应用成果,主要栏目有综述、试验研究、新材料新工艺、材料性能及应用、纳米材料、残余应力、物理模拟与数值模拟、失效分析等,可供从事与材料生产研究相关的研发与技术人员阅读参考。近年来,《机械工程材料》杂志抓住国内外研究热点,推出了“先进陶瓷材料”“物理模拟与数值模拟”“先进复合材料”“电子陶瓷”“增材制造”等专题报道,受到了广大读者的欢迎。

《机械工程材料》杂志为大 16 开,每期 100 页以上,每月

20 日出版,国际标准连续出版物号为 ISSN 1000-3738,国内统一连续出版物号为 CN 31-1336/TB,国际期刊刊名代码(CONDEN)为 JGCAEL。国内各地邮政局(所)或本刊发行部均可订阅,邮发代号 4-221,发行价 22 元/册,264 元/年,可以破季破年订阅;本刊发行部还提供电子期刊订阅服务,电子期刊为 PDF 格式,通过 E-mail 发送给读者,订阅价为 90 元/年,比邮购费用低一半,且比邮局发行快 10 天左右。

欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!

投稿网址: <http://www.mat-test.com/Submission>

联系地址:上海市虹口区邯郸路 99 号。邮编:200437

编辑部: 021-65556775-368, 021-65541496

mem@mat-test.com

发行部: 021-65556775-311, 021-65527634

wm@mat-test.com

广告部: 021-65556775-319, 021-65544943

admem@mat-test.com