

涡轮表面腐蚀原因分析

王影 谢国君 韩露 逢锦程

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 镍基高温合金涡轮在运行一段时间后表面发生了严重腐蚀、叶片尺寸减小。通过对涡轮表面观察、测试与分析,确定了涡轮表面腐蚀为热腐蚀,腐蚀机理为钠盐热腐蚀,腐蚀介质为含硫钠盐,随着热腐蚀的加重,腐蚀产物不断剥落,导致叶片尺寸逐渐减小。涡轮表面发生热腐蚀原因是由于发动机燃油燃烧不充分,导致表面接触甚至沉积含硫钠盐,在发动机高温的共同作用下发生热腐蚀。

关键词 涡轮,镍基高温合金,热腐蚀,钠盐

中图分类号: TG172.6+1

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.05.014

Failure Analysis of Turbine Surface's Corrosion

WANG Ying XIE guojun HAN Lu PANG Jingcheng

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Nickel-alloy turbine was corroded after worked for a period of time. The size of turbine blades became smaller. Through observation, testing, the corrosion reason of the turbine was found. The results show that the corrosion was sodium salt hot-corrosion. The oxide was fell off which made the size of turbine blade became smaller. Because the fuel oil was not burned all, some sodium-salt deposited on the turbine's surface, which made the turbine corroded.

Key words Turbine, Nickel-alloy, Hot-corrosion, Sodium-salt

0 引言

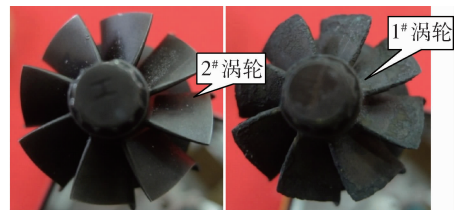
高温合金可在 600 ~ 1 100℃ 的氧化和燃气腐蚀条件下,承受复杂应力且能长时间可靠地工作^[1]。高温合金主要应用在航空航天发动机中,其中涡轮片、导向片、涡轮盘、燃烧室等部件几乎由高温合金制成^[2]。在高温合金中镍基高温合金具有良好的组织结构及蠕变性能,是作为发动机的首选材料^[3],由于发动机长期受到氧化和燃气腐蚀,易使其零部件表面形态、尺寸遭到破坏,从而影响整个发动机正常工作,甚至造成重大安全事故等,而目前对镍基高温合金产品的热腐蚀失效分析所做工作较少。

本文分析对象为表面腐蚀的镍基高温合金涡轮,该涡轮安装到车上仅行驶 7 500 km 后其表面发生了严重腐蚀,涡轮使用环境温度约为 700 ~ 800℃,主要分析涡轮叶片的腐蚀行为,腐蚀机理及腐蚀原因,为镍基高温合金热腐蚀研究提供参考。

1 实验过程与结果

1.1 形貌观察及能谱分析

两件涡轮的宏观形貌见图 1,2# 涡轮为新产品,其形态完好,叶片表面光滑、有光泽,未见腐蚀及损伤痕迹;1# 涡轮为失效件,其整个表面均存在严重的腐蚀现象;与 2# 涡轮相比,1# 涡轮叶片尺寸已明显变小、



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图 1 两个涡轮的宏观形貌

Fig. 1 Macro-photographs of the turbine

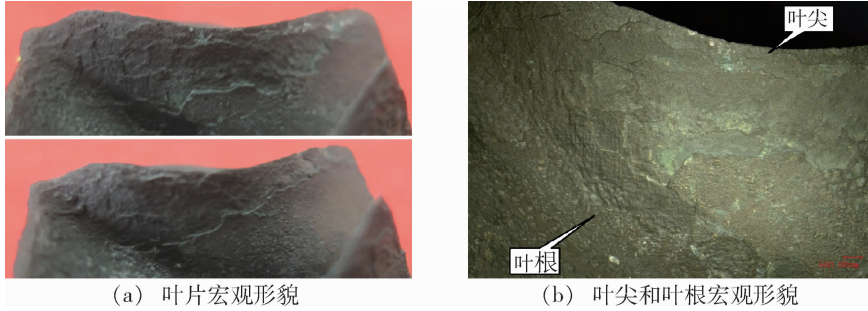
收稿日期:2017-07-31

第一作者简介:王影,1978 年出生,硕士,主要从事机械产品失效分析工作。E-mail:zhuchg@163.com

厚度变薄。

体视显微镜下观察,1#涡轮上8个叶片的腐蚀程度基本相当,叶片表面存在明显的腐蚀坑及片层状剥

落现象,见图2(a),叶尖的腐蚀剥落程度明显高于叶根,见图2(b),叶片表面大部分区域氧化物呈亮黄色,部分区域呈绿色,见图2。



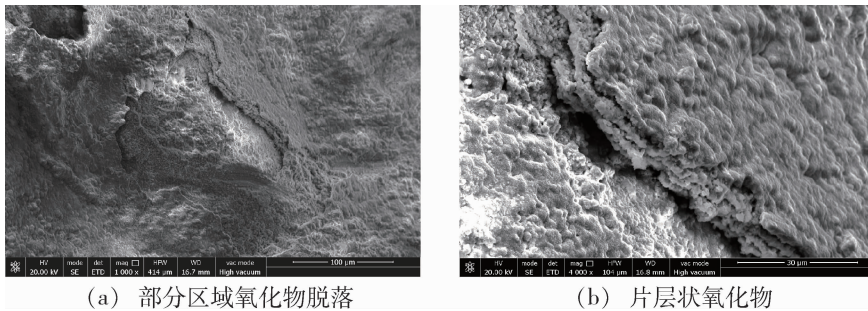
(a) 叶片宏观形貌 (b) 叶尖和叶根宏观形貌

图2 1#涡轮叶片表面腐蚀形貌

Fig. 2 Macro-photographs of the 1#-turbine's corrosion

将叶片分解下来进行微观形貌观察和能谱分析,叶片表面可见片层状氧化形貌,氧化物呈疏松态,部

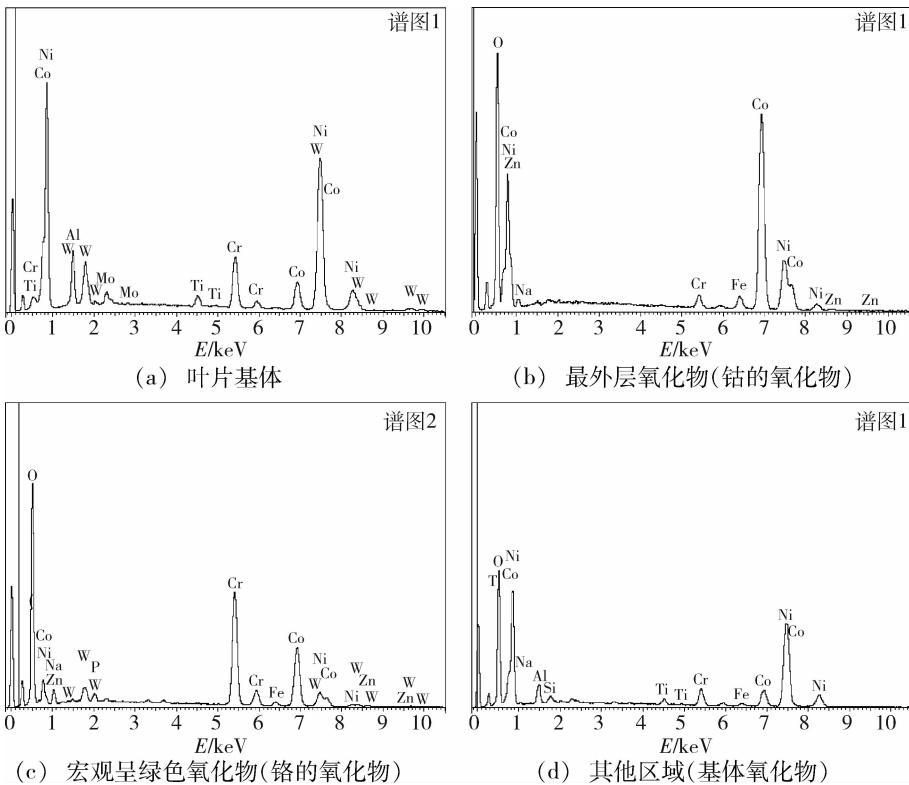
分区域氧化物剥落,见图3。对叶片基体及表面氧化层分别进行能谱分析见图4。



(a) 部分区域氧化物脱落 (b) 片层状氧化物

图3 叶片表面氧化物形貌

Fig. 3 Micro-photographs of oxides on the blade surface



(a) 叶片基体 (b) 最外层氧化物(钴的氧化物)

(c) 宏观呈绿色氧化物(铬的氧化物) (d) 其他区域(基体氧化物)

图4 叶片基体及表面氧化物能谱图

Fig. 4 EDS of the blade and the oxides

能谱分析结果如下:

(1) 叶片基体: 主要含有 Ni、Cr (9.7%)、Co (9.2%)、W (10.8%)、Mo (2.9%)、Al (5.8%)、Ti (1.6%) 元素, 为镍基高温合金, 能谱图见图 4(a);

(2) 表面氧化物: 最外层氧化物主要含有 O、Co 元素, 主要为钴的氧化物[图 4(b)]; 宏观呈绿色区域的氧化物主要含有 O、Cr 元素, 为铬的氧化物, [图 4(c)]; 其他区域的氧化物主要含有 O、Ni、Cr、Co、W、Al 元素, 为基体氧化物, 能谱图见图 4(d); 但各层氧化物成分中均含有少量的 Na 元素。

1.2 金相分析及能谱分析

在 1# 涡轮叶片(腐蚀)及 2# 涡轮叶片(未腐蚀)上分别取样制备成金相试样进行组织观察和能谱分析, 取样位置见图 5。

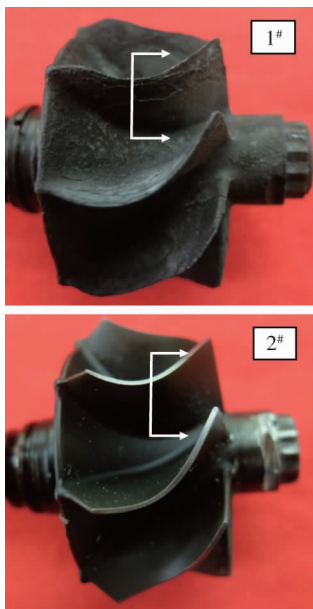


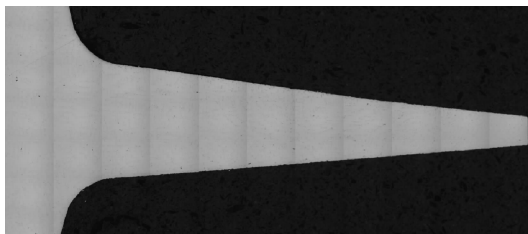
图 5 涡轮叶片金相取样位置

Fig. 5 Metallographic analysis area of the blade

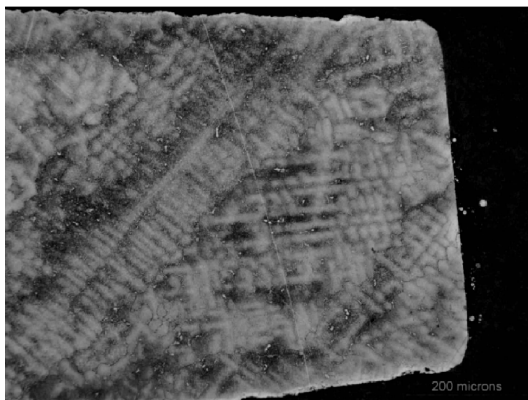
2# 涡轮叶片为完整叶片, 叶片表面未见明显的涂覆层, 叶片横剖面为梯形; 叶片基体的组织为铸造高温合金组织, 组织见图 6。

1# 涡轮叶片横剖面已经由原来的梯形腐蚀为三角形, 叶片表面附着较厚的灰色氧化物, 氧化物呈层状, 叶片叶尖位置氧化物存在明显的层状剥落现象, 见图 7。以上形貌特征表明叶片是从表面向内部逐层腐蚀, 表面生成的氧化物较疏松, 在运转的过程中外层部分氧化物发生剥落。

对涡轮叶片上选取三个区域的氧化物进行面扫描能谱分析(包括叶尖位置、叶片表面、表面部分氧化物脱落区), 结果表明三个区域的分析结果基本一致, 氧化物内除了基体元素和较高的 O 元素外, 在氧化物底部(与基体分界面处)均存在 S 和 Na 元素, 各区域面扫描分解结果见图 8~图 10。



(a) 叶片横剖面的形貌



(b) 组织形貌

图 6 2# 涡轮叶片横剖面、组织形貌

Fig. 6 Metallographs of the 2#-blade

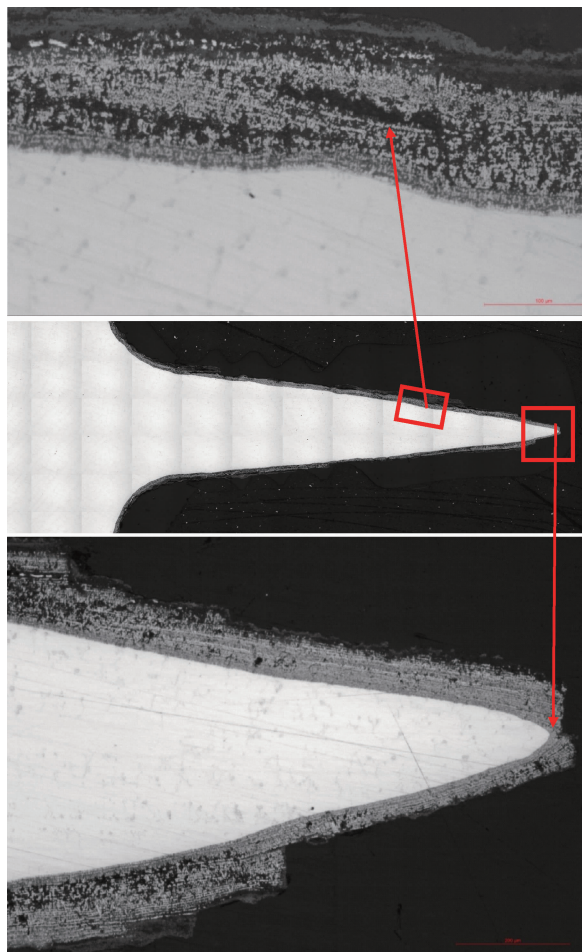


图 7 1# 涡轮叶片横剖面、组织形貌

Fig. 7 Metallographs of the 1#-blade

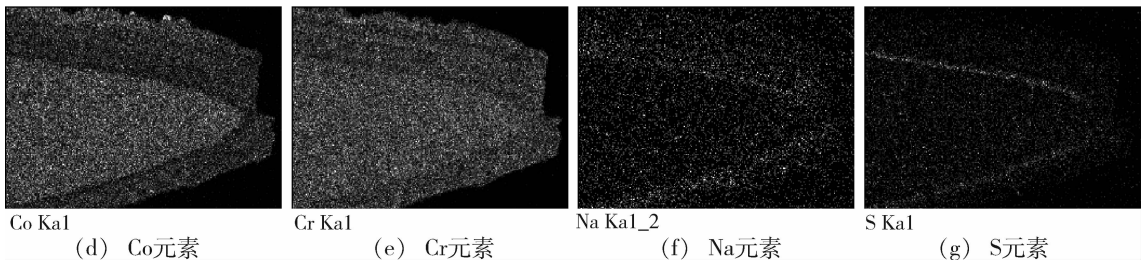
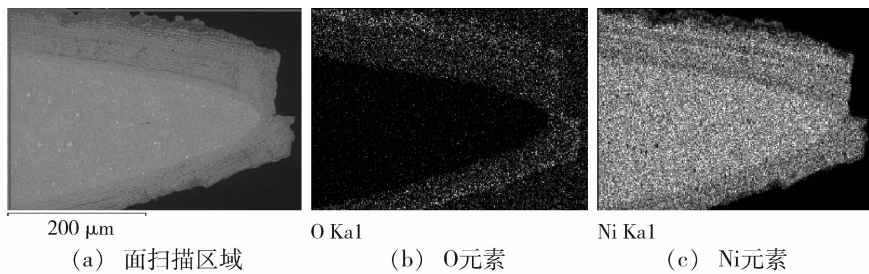


图 8 叶片叶尖位置氧化物能谱图

Fig. 8 EDS of the oxides on blade surface oxide

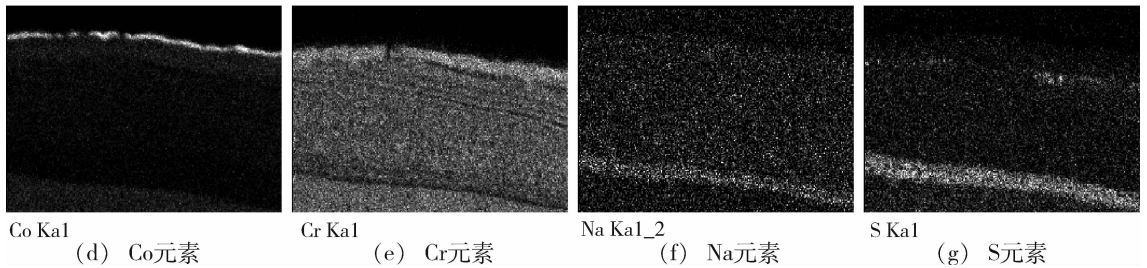
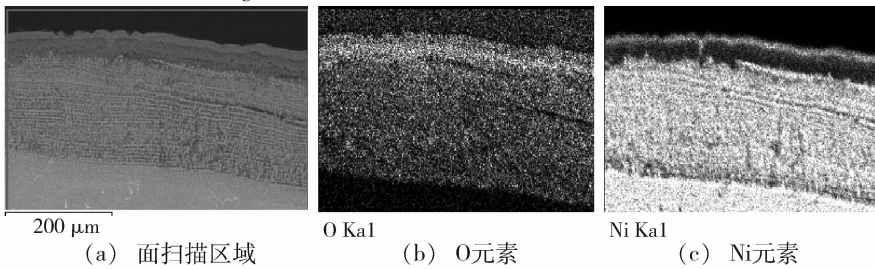


图 9 叶片表面氧化物较厚区域的能谱图

Fig. 9 EDS of oxides on the blade surface oxide

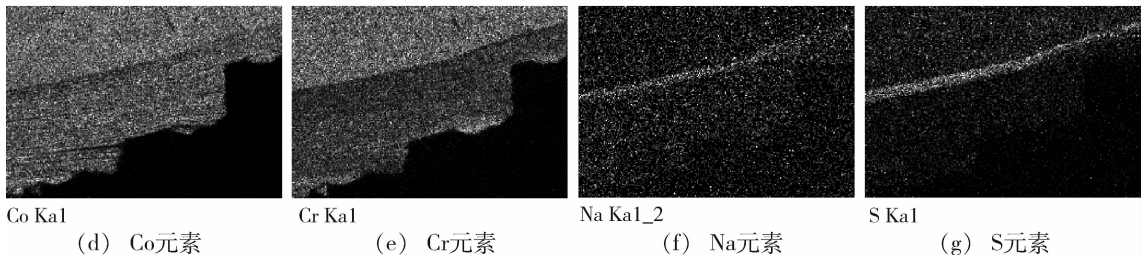
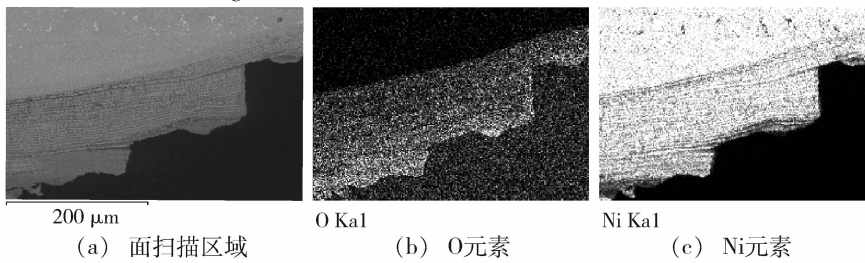


图 10 氧化物部分脱落区域的能谱图

Fig. 10 EDS from spalling region of oxides on the blade surface

2 分析讨论

涡轮安装到车上行驶 7 500 km 后发现其表面存
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 5 期

在严重腐蚀, 涡轮叶片尺寸变小、厚度变薄, 叶片表面
存在明显的腐蚀坑及片层状剥落现象, 而且叶尖的腐

蚀剥落程度明显高于叶根,能谱分析结果表明叶片表面氧化物除基体元素和较高的 O 元素外,还含有少量的 Na 元素。结合涡轮表面宏微观形貌特征及其使用温度分析认为涡轮表面腐蚀应为热腐蚀。高温盐腐蚀是材料在熔盐特定环境中的中温腐蚀,一般在 600~900℃ 发生加速腐蚀,高温盐腐蚀速度比纯氧化高得多,加之热腐蚀易产生孔蚀,其危害性更大,影响高温腐蚀速度的因素主要有气相成分、气体流速、沉积盐成分、沉积盐速度、沉积盐厚度、环境温度等^[4-7]。

金相分析结果表明叶片横剖面已经由原来的梯形腐蚀成三角形,表面附着较厚的灰色氧化物,氧化物呈层状;能谱分析结果表明氧化物内除了基体元素和较高的 O 元素外,在氧化物底部均存在 S 和 Na 元素,表明该涡轮的热腐蚀介质应为含硫钠盐。

综合涡轮表面形态、能谱成分分析及涡轮使用温度分析认为:涡轮表面腐蚀为热腐蚀,机理为钠盐热腐蚀,腐蚀介质为含硫钠盐,含硫钠盐主要是由于发动机燃油燃烧不充分,导致表面接触甚至沉积含硫钠盐。

3 结论

通过对涡轮表面腐蚀的观察与分析认为:

1) 涡轮表面腐蚀为热腐蚀,机理为钠盐热腐蚀,腐蚀介质为含硫钠盐;

2) 涡轮表面发生热腐蚀原因是由于发动机燃油燃烧不充分,导致表面接触甚至沉积含硫钠盐,在发动机高温的共同作用下发生热腐蚀。

参考文献

[1] 黄福祥,王家正,王炳林,等. 中国航空材料手册[M]. 北京:中国标准出版社,2001:5.

[2] 胡状麒,刘丽荣,金涛,等. 单晶镍基高温合金的发展[J]. 航空发动机,2005,31(03):1-7.

[3] 徐强,张辛红,韩杰才等. 先进高温材料的研究现状和发展[J]. 固体火箭技术,2002,25(03):51-55.

[4] REN Xin, WANG Fuhui, WANG Xin. High-temperature oxidation and hot corrosion behaviours of the NiCr-CrAl coating on nickel-based superalloy[J]. Surface and coatings Technology, 2005, 198: 425-426.

[5] 李伟银,刘红飞,赵双群. 新型镍基高温合金 950℃ 氧化行为的研究[J]. 材料热处理学报,2008,29(30):28-30.

[6] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社,2003:258-259.

[7] 卢旭东,田素贵,陈涛,等. 高铬镍基合金熔融硫酸盐热腐蚀过程中内氧化和内硫化行为的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2014,43(1),79-83.

欢迎订阅《宇航材料工艺》

《宇航材料工艺》(双月刊)创刊于 1971 年,是中国科技论文统计用刊、中国中文核心期刊,已被国际宇航文摘《IAA》、美国化学文摘《CA》、金属文摘《METADEx》、《中国期刊网》、万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》等多种文摘和数据库收录。《宇航材料工艺》主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践。除大量刊登学术类技术论文、研究报告、综述和专论外,还刊登新材料、新工艺、新产品及技术改造、生产经验、科技见闻及会议信息等。

刊号 $\frac{\text{ISSN1007-2330}}{\text{CN11-1824/V}}$ 双月刊,全年 6 期,共 120 元/年 国外订价:120 美元/年

1. 编辑部订阅(E-mail: rtao703@163.com; 电话: 010-68383269)

注意:每年 12 月至次年 3 月底本单位财务封账,不开发票,开账后可补开。

(1) 信汇。户名:航天材料及工艺研究所;开户银行:工行东高地支行;帐号:0200006509008800374; 税号:12100004000053103。需注明:订阅《宇航材料工艺》。

(2) 邮汇。北京 9200 信箱 73 分箱《宇航材料工艺》编辑部。邮编:100076。

2. 联合征订服务部订阅(E-mail: lhzd2002@sina.com; 电话: 022-23973378, 23962479)

信汇。户名:天津市河西区联合征订服务部;开户行:工行天津市尖山支行;帐号:0302060509104619603; 行号(大额系统支付号):102110000381;网址:WWW.LHZD.COM;邮件:lhzd2002@sina.com。

邮汇。邮编:300385,地址:天津市西青区大寺泉集北里别墅 17 号,收款人:联合征订服务部。