

国家自然科学基金项目 (51008299) 资助

中国博士后科学基金项目 (201004811184) 资助

城市原生污水换热设备 设计与计算

吴学慧 著

Design and Calculation of Urban Original Sewage
Heat Transfer Equipment

矿业大学出版社

University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(51008299)资助

中国博士后科学基金项目(201004811184)资助

城市原生污水换热设备 设计与计算

吴学慧 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书采用理论与实践相结合的方法,研究了城市原生污水设备内污水的多相非牛顿流复杂流体的流动与流变特性、对流换热特性、污垢的沉积与增长特性、污垢增长过程中的传热、传质特性等问题。并以此为基础提出了污水换热设备的设计、计算、优化方法,同时对新型高效污水换热设备的开发与研究进行了探讨。

图书在版编目(CIP)数据

城市原生污水换热设备设计与计算/吴学慧著. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2014. 11
ISBN 978 - 7 - 5646 - 2547 - 4

I. ①城… II. ①吴… III. ①城市污水—污水处理设备—换热设备—设计②城市污水—污水处理设备—换热设备—计算 IV. ①X703.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第276960号

书 名 城市原生污水换热设备设计与计算
著 者 吴学慧
责任编辑 杨 廷
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 850×1168 1/32 印张 5.75 字数 149 千字
版次印次 2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷
定 价 24.80 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

能源与环境问题的压力日趋严重,“节能减排”成为世界各国发展的重点策略之一。欧美发达国家建筑能耗约占社会商品总能耗的 30%~40%,其中暖通空调(HVAC, Heating Ventilating and Air Conditioning)系统的能耗占建筑能耗的 50%~60%。科学合理地开发利用绿色可再生能源满足暖通空调系统能耗的需求,这一方面可减小能源供应系统的压力,另一方面对节能减排及空气污染控制提供积极贡献。

城市原生污水以水温适中、数量巨大、分布广泛等特点,成为极佳的可再生绿色低位能源。城市原生污水的水质较差、成分复杂、各尺度污染物含量大,难以直接利用。城市原生污水热能资源化的主要困难是如何完成对城市原生污水的取热与放热,也就是取热系统的设计、计算与选型。对城市原生污水换热设备防堵塞与防除垢技术的研究已经成为该系统研究的热点问题。

本书根据作者多年来对城市原生污水换热设备的研究,并结合国内外最新研究进展,首先对城市原生污水的流变、流动与换热特性进行了介绍,然后阐述了原生城市原生污水换热设备内污垢的增长模型,最后重点介绍了城市原生污水换热设备的设计、计算、选型、优化与新型高效换热设备的开发,为相关的应用提供参考。

本书的研究内容由国家自然科学基金项目(51008299)和中国博士后科学基金项目(201004811184)提供资助。

著 者

2014 年 10 月

目 录

前言	1
第 1 章 城市原生污水热能资源化	1
1.1 概述	1
1.2 城市原生污水热能资源化的研究与发展	12
第 2 章 城市原生污水的流动与换热特性	45
2.1 实验研究系统	45
2.2 系统误差的检测与数据处理方法	54
2.3 城市原生污水流变本构方程	56
2.4 城市原生污水在圆管中的流动特性	63
2.5 城市原生污水在圆管中的换热特性	70
第 3 章 污垢对流动换热的影响	84
3.1 污垢垢质及其增长模型	84
3.2 结垢对传热的影响	89
3.3 污垢增长模型	93
3.4 实验内容	101
3.5 实验结果及分析	102

第 4 章 抗垢纳米涂料的应用与实验	123
4.1 抗垢纳米材料的自清洁机理	123
4.2 纳米涂层管的应用实验及分析	128
4.3 采用纳米涂料管的技术经济分析	137
第 5 章 城市原生污水换热器的设计与优化	141
5.1 城市原生污水换热器的火用分析	141
5.2 城市原生污水换热器的优化设计	148
第 6 章 高效污水换热设备的开发与研究	153
6.1 多管程高效在线清洗污水换热设备	154
6.2 热管高效非清洁水换热设备	156
参考文献	159

第 1 章 城市原生污水热能资源化

1.1 概述

1.1.1 能源与环境问题

环境和能源问题是人类社会发展与进步所面临的最大挑战。可持续发展战略在全世界范围内的提出与实施,既是人们的自我警觉,也是维持人类社会健康蓬勃发展的必由之路。石油危机和工业现代化的矛盾,使人们对不可再生矿物能源的有限性及其使用的局限性有了更深刻的认识。合理有效地开发利用能源已成为全世界瞩目的焦点。

在我国,能源结构极其不合理,2012 年,全国一次能源消费总量 33.8 亿 t 标准煤,比 2006 年增加 8.1 亿 t 标准煤,增长 31%,年均增长 5%。能源结构为,煤炭占 68.5%,原油占 17.7%,天然气占 4.7%,水电、核电占 7.9%^[1]。煤炭提供了我国 70%左右的能源供应^[2],而且其燃烧利用效率也很低^[3]。国务院于 2012 年 10 月 24 日发表了《中国的能源政策(2012)》白皮书,要求进一步推动节能减排政策,加强可再生能源的开发与利用。

随着经济建设和文明程度的提高,建筑耗能在全社会总能耗中所占的比例也不断增大,建筑节能的意义也越来越重大。据报道,2012 年法国、丹麦等一些欧洲发达国家建筑能耗占其国民经济总能耗的 30%~40%,其中暖通空调(Heating Ventilating and

Air Conditioning, HVAC) 系统的能耗占建筑能耗的50%~60%^[4]。

暖通空调系统的能耗也是我国能源消耗的重要组成部分。我国目前城镇建筑消耗的能源为全国商品能源的23%~26%,建筑能耗历年平均值占总能耗的19.8%,而建筑能耗的比例还将继续攀高,最终趋向发达国家33%的水平。我国在建筑能耗中,暖通空调能耗约占85%。据预测,按照目前建筑能耗水平,2020年我国需要增加1.4亿t/a的标准煤用于采暖,增加4000亿~4500亿(kW·h)/a的用电量^[4-5]。

暖通空调系统是能耗大户也是大气污染的主要因素之一。我国建筑耗能主要是来自燃煤,建筑耗能引起的CO₂排放占总排放量的19%~20%。建筑耗能中,暖通空调采暖耗能几乎占85%。由此可以推算出,暖通空调在全国温室气体排放中的贡献率约在15%以上^[4]。对各大城市环境监测的数据表明,70%烟尘、85%SO₂、60%NO_x、71%CO和85%CO₂的排放主要来自燃煤^[6]。我国已成为世界上仅次于美国的第二大温室气体排放国^[2]。在全球空气污染最严重的10个城市中,中国占5个,包括北京、上海、沈阳、西安和广州^[4],这5个城市属于典型的供暖或空调城市。

因此,在暖通空调领域,节约能源与环境保护可以看作是一个问题来解决,即节约一次能源基本上就符合了环境保护的要求。节约能源基本上可从两个方面开展:一是减少量的消耗,如围护结构内外保温措施、节能窗、控制窗墙比、容积率等措施;二是提高能源的利用效率,主要是一次矿物能源的利用效率,如我国燃煤锅炉供暖的效率只有70%左右^[7],如果采用热泵供暖,一次能源的利用效率可达120%左右^[8]。

1.1.2 城市原生污水作为冷热源的优点

“节能减排”技术主要有两方面的含义:一方面从量上着手,根

据热力学第一定律,减少系统的损失和浪费,提高能源单位利用率;另一方面从质上着手,依据热力学第二定义,开发利用低品质可再生能源(如地热、太阳能、风能等)来代替高品质不可再生的矿物能源(如煤、石油、天然气等),以达到节能减排的目的。开发利用低位可再生能源是暖通空调系统节能的主要手段之一。热泵供暖空调系统利用低位能源满足使用的要求,具有良好的节能环保性^[9]。低位冷热源作为热泵冷热源具有如下特点^[10-11]:

(1) 一次能源利用率高。若按电驱动热泵制热性能系数 4.0 计算,低位冷热源作为热泵冷热源系统的一次能源利用率均会大于 1.3,而利用其他矿物燃料供暖时一次能源利用率则在 0.7~0.9 之间。

(2) 环保可再生性。低位冷热源属于清洁能源,利用它们几乎没有环境污染;而且绝大多数低位冷热源属于可再生能源,符合可持续发展的总体战略。

(3) 可调节能源地理分布不均匀性。低位冷热源多为非矿物性的自然资源,既可填补一次能源的匮乏,也在一定程度上调节了能源地理分布的不均匀性。

目前暖通空调领域研究和应用的可再生性清洁能源系统包括太阳能供热及吸附式制冷系统、土壤源热泵空调系统、地下水源热泵空调系统、空气源热泵系统等^[12-15]。这几种冷热源应用在当前甚至以后都存在一定的局限性:

(1) 空气源热泵在以供暖为主的寒冷地区受到室外温度的限制,能源利用效率很低,在以制冷空调为主的热带地区不可避免地给城市区域带来热岛效应。另外,空气热容量小,机组装机容量及项目规模受到限制^[16-17]。

(2) 地下水源热泵存在的主要问题是:我国水资源贫乏,地下水作为可再生性冷热源受到水资源保护等问题限制,井水回灌技术要求较高,不合理的成规模应用可能引发环境地质问题,另外还

有水井枯竭、老化等问题^[18-19]。

(3) 土壤源系统传热效率低,埋管数量与占地空间很大,初期投资高,在住宅密集度、容积率高的繁华城市区域内受到地理条件限制,机组装机容量要小,目前还难以实现大规模应用^[20-21]。

(4) 太阳能与日照时间及昼夜变化有关,需要附辅热源或蓄能系统,太阳能集热器初投资很大,目前建筑用能还很难承担,仅限于太阳能热水器的使用,另外太阳能制冷系统还处于研制开发阶段^[12]。

相对这些冷热源,城市原生污水具有独特优势,是一种理想的低位冷热源。城市原生污水是工业废水与生活城市原生污水的总和,是城市余热型可再生性清洁能源,包括城市原生污水与二级出水,作为热泵冷热源具有如下特点:

(1) 城市原生污水水量为城市供水量的 85% 以上^[22],数量巨大,据文件统计,2010 年我国年城市原生污水排放量达 1 050 亿 m^3 ^[23],见表 1-1,若全部将城市原生污水热能再生利用(城市原生污水按 5℃ 温降、单位面积采暖负荷 50 W/ m^2 计算),城市原生污水源热泵系统可供暖空调建筑面积为 12 亿 m^2 以上,按我国 2010 年新增城市建筑面积 6 亿 m^2 计算,为城市年新建建设面积的 2 倍左右。

表 1-1 2010 年我国主要城市原生污水排放量及城市原生污水热能资源化冬季可供暖面积

地区	所属省份 (自治区)	城市原生污水 排放量/万 t	冬季排放量 /万 t	冬季平均 水温/℃	冬季可供暖 面积/万 m^2
北京市	北京市	141 651	30 717	12	1 617.6
天津市	天津市	65 235	16 590	11	873.7
石家庄市	河北省	24 583	6 287	12	331.1

续表 1-1

地区	所属省份 (自治区)	城市原生污水 排放量/万 t	冬季排放量 /万 t	冬季平均 水温/℃	冬季可供暖 面积/万 m ²
唐山市	河北省	20 285	4 282	12	225.5
邯郸市	河北省	12 959	3 540	13	186.4
保定市	河北省	8 500	1 801	13	94.9
秦皇岛市	河北省	9 163	2 453	11	129.2
太原市	山西省	22 556	6 655	13	350.5
大同市	山西省	5 840	1 451	11	76.4
长治市	山西省	6 000	1 614	11	85.0
晋城市	山西省	2 100	498	12	26.2
临汾市	山西省	2 449	566	12	29.8
呼和浩特市	内蒙古自治区	9 488	2 519	13	132.7
包头市	内蒙古自治区	8 232	1 798	11	94.7
鄂尔多斯市	内蒙古自治区	1 908	449	11	23.7
呼伦贝尔市	内蒙古自治区	1 923	505	10	26.6
沈阳市	辽宁省	54 429	15 051	12	634.1
鞍山市	辽宁省	19 300	4 835	11	203.7
大连市	辽宁省	28 242	6 559	11	276.3
抚顺市	辽宁省	9 774	2 084	12	87.8
锦州市	辽宁省	10 536	3 084	11	129.9
长春市	吉林省	23 555	6 089	12	256.5
吉林市	吉林省	17 821	4 261	12	179.5
四平市	吉林省	1 870	521	12	21.9
辽源市	吉林省	2 280	562	11	23.7
哈尔滨市	黑龙江省	32 016	8 667	12	304.3
齐齐哈尔市	黑龙江省	7 265	1 991	11	69.9
大庆市	黑龙江省	19 365	4 587	11	161.1
牡丹江市	黑龙江省	14 185	3 102	11	108.9

(2) 城市原生污水水温相对较高且其随季节变化幅度较小,通常在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,具有冬暖夏凉的冷热特点,温度全年在 $10\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,适合暖通空调冬夏两用,供暖时水温较地下水温高 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,制冷时较空气温度低 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24]。

(3) 城市原生污水是载热水体,热容量大,相对空气源、土壤源而言,换热设备具有很高的传热效率,热泵系统运行效率高,空气源、土壤源热泵制热系数在 3.5 以下,而水源热泵可高达 4.5 甚至以上 [15,25-26]。

(4) 作为城市废热之一,城市原生污水占城市区域废热百分比很高,日本东京占近 40% [27],我国各城市所占比例为 $10\%\sim 16\%$,是城市废热回收潜力最大的部分 [28]。

(5) 城市原生污水量大面广,在市区内既可分散性小规模应用,也可建设大型热泵站,系统机组装机容量可为 $100\sim 2\,000\text{ kW}$,甚至更大。

开发利用城市原生污水作为热泵冷热源为建筑物供暖空调除具有节能环保效益,符合生态建筑的发展趋势,另外作为一种资源,还具有两个以下优越性:

① 城市原生污水能源区域分布优越。我国能源资源分布不均,煤炭等矿产资源有 60% 分布在华北,水力资源有 70% 分布在西南,而经济发达、工业化和人口较集中(约占全国人口总数的 37%) 的南方八省一市的能源却比较缺乏,煤炭量占全国的 2% ,水力资源仅为 10% [4]。而城市原生污水热能分布于各大中城市市区内,与人口及城市工业化程度成正比,将城市原生污水作为一种新能源,在适当优化能源结构的同时,缓解了能源缺乏及分布的不均匀性问题。在目前可利用条件下,城市原生污水源热泵能为 10% 的建筑物供暖空调。

② 可实现水资源的综合利用。城市原生污水热能再生利用是城市原生污水资源化的三个内容(即城市原生污水回用、污泥回

收与城市原生污水热能再生利用)之一。城市原生污水回用包括回用于农业、工业、生活杂用及景观用水等,而目前回用于工业的主要用途是工业循环冷却水。当回用于工业时,例如电厂冷却水、冷却塔补水,而若直接将城市原生污水作为冷源,利用城市原生污水以显热的形式带走热量,则省去了高额的水处理费用,但同样达到了节省清水资源消耗的目的。

目前日本、美国等国城市原生污水回用于工业占总回用水量的30%,美国城市原生污水回用总量为 $9.4 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$,按30%考虑回用于工业时,相当于工业节水 $3.3 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[29]。由此可见,城市原生污水热能利用对于节约水资源而言意义重大,这对我国水资源问题的解决也是很好的借鉴。

1.1.3 城市原生污水资源化的主要问题

城市原生污水作为暖通系统的冷热源的主要困难应为水质问题。开始,不可能水处理,城市原生污水水质差,污物含量大,包括大小尺度悬浮固体及溶解性化合物^[30-31],要实现城市原生污水冷热量的有效传递与转换,必须克服污物对换热设备的阻塞与污染问题,并深入认识城市原生污水在管内流动的流动阻力与换热特性^[32-34]。通过对几个现有项目的研究与分析,城市原生污水冷热源系统主要存在以下问题:

(1) 城市原生污水流动、换热的计算与分析。对于城市原生污水流动和换热特性的研究是整个系统阻力、换热系数计算的根本,也是整个系统合理匹配、节能运行、优化设计的依据^[30],而且还是分析研究污垢生长特性的重要理论依据。但是由于城市原生污水是一种多相、多粒径、非均质的固-液两相流,微观的流动机理和管内的速度分布是十分复杂的,尤其是污物的尺径分布广,不规则,我们很难建立精确的物理数学模型来描述或求解流动方程^[30]。当前,将清水计算公式应用于城市原生污水的处理方法,

导致了系统能耗过高、运行调节困难等问题。

对已知系统而言,由文献[35]可知光滑管内紊流换热关联式为:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (1-1)$$

即:

$$h = f(v^{0.8}, \lambda^{0.6}, c_p^{0.4}, \mu^{-0.4}, d^{-0.2}) \quad (1-2)$$

对已知牛顿流体,流体的物性以 $Pr^{0.3}$ 来影响管内流体与管壁间的传热,由此可见流体的黏度、导热系数的物性参数对系统的传热影响很大,由于城市原生污水较清水有明显的差异,按照清水的计算方法和参数来设计系统是不合理的。可见,对城市原生污水的流动与换热特性提出一种简捷的计算方法是城市原生污水冷热源推广应用的当务之急。

(2) 城市原生污水换热器的堵塞及结垢。城市原生污水属于非清洁水源,水质很差,内中含有的化学物质、胶体、微生物、藻类、有机液滴、微尺寸固体杂物、大尺寸固体杂物等都会对换热器表面造成不同程度的污染。在换热表面软垢形成之后,换热热阻将有 60%~85% 集中在城市原生污水对流换热侧^[36-37]。

根据美国 HTRI/TEMA Joint Committee 推荐的河水的污垢热阻为 0.352~0.528 ($m^2 \cdot K$)/kW^[38-39],《工业循环水处理设计规范》(GB 50050—2007)规定:敞开式循环水系统的污垢系数为 0.171~0.344 ($m^2 \cdot K$)/kW。暂时还没有可直接应用于城市原生污水的可借鉴值。而且不同的规范标准给出的污垢系数范围相差较大,使系统的设计面临选择的困难。由于城市原生污水换热器内污垢系数数据的空白,目前的设计参数主要参考美国 TEMA 标准,其适用性有待商榷。

由于污垢热阻的影响,换热器设计选型时必须增加足够的面积余量,此举不仅增加了系统初投资的费用,而且占用了更多的空间,对系统的运行费用也有不利影响。作者于 2006 年 8 月 1 日到

16日在北京清河边采用板式换热器的实验结果也有力地支持了这种观点。该实验抽取的是清河水,水深近1.2 m,从表观来看,非常清澈,可以看见0.5~0.8 m深处的河堤。在中等流速[换热器压差在8 mH₂O(1 mH₂O=9.8 kPa)左右]下运行7天后,换热表面如图1-1所示,软垢污染非常严重,厚度达到0.5~1.0 mm,表面非常粗糙,在软垢严重的局部流道几乎被完全堵塞。图1-2是换热器在较高流速(换热器压差在14 mH₂O)下运行2天后换热面的污染情况,最大厚度也在0.2 mm左右。需要强调说明的是上述河水是在经过网眼为0.8~1.0 mm的过滤网过滤之后再进入板式换热器的。图1-3是哈尔滨望江宾馆壳管式城市原生污水换热器在使用1个月后的污染情况。

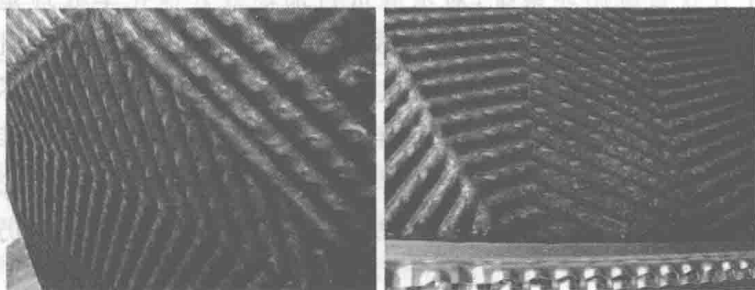


图1-1 城市河水中等流速下对板式换热器的污染

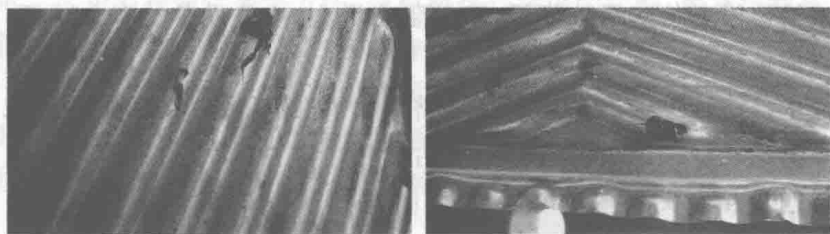


图1-2 城市河水高流速下对板式换热器的污染



图 1-3 被原生城市原生污水阻塞与污染的换热设备

城市非清洁水源对换热表面的污染非常严重。由于它们都属于开式直流循环系统,对水源进行加药或其他化学处理是不可行的,运行成本太高,而且造成二次环境污染。虽然采用机械的除垢方法值得借鉴,但目前成熟稳定的机械除垢系统还不多见,而鉴于此系统的可靠性、稳定性、经济性问题,还难于推广应用^[40,41]。而孙德兴等在文献[42]中提出的人工按时清洗是目前清除换热器污垢的主要方法,但人工清洗维护的周期仍需进一步的研究。

(3) 城市原生污水换热器的腐蚀。据调查表明,90%以上的换热设备都存在腐蚀和污垢问题^[43]。由于腐蚀和污垢的存在,造成换热设备传热系数降低,流动阻力增大,换热设备的寿命减短,进而造成了一系列的经济问题。据工业发达国家统计,因腐蚀造成的经济损失约占当年国民经济生产总值的4.70%^[44];而1992年英国和美国用于污垢的费用占国民生产总值的0.25%,英国、新西兰和澳大利亚为0.1%,德国和日本为0.25%^[45]。由此可见,腐蚀和污垢给各国工业造成的损失是巨大的。腐蚀和结垢问题是相辅相成的,换热设备表面的腐蚀为其他不洁物质聚积在换

热表面提供了条件,也就是促进了污垢的形成。同时污垢形成后,由于垢层下缺氧,又为进一步的腐蚀创造了条件。在回收城市原生污水热能时,由于城市原生污水水质的复杂性,含有大量的腐蚀性离子和难溶性离子,换热设备的腐蚀和结垢问题成为影响该项技术能否推广的关键问题^[46]。日本对管材腐蚀做过一些实验研究^[47],研究结果见表1-2。

表1-2 日本城市原生污水源热泵系统管材腐蚀实验研究结果

管材材质	实验依据	使用年限	水质	应用情况
铜镍合金	1/3 极限 厚度	3 年	—	—
铜		1 年	二级出水	东京都森崎水处理厂
钛		无腐蚀	一级出水	东京后乐城市原生污水泵站
镀铝		—	一级出水	东京汤岛城市原生污水泵站

(4) 换热强化。由于城市原生污水水质、换热面的腐蚀和结垢等的影响,城市原生污水换热器的换热系数较一般清水换热器低。作者对哈尔滨望江宾馆和北京悦都酒店污染后的换热器进行试验检测发现,其换热系数为 $700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 左右,大约是清洁时的 $1/2$ 。过低的换热系数,要求有较大的换热面积和较高的运行费用^[48],这严重地影响了系统的整体性能,使系统节能效果降低。采用何种强化换热方法,减小换热器污染的影响,提高换热性能,也是城市原生污水源热泵亟待解决的难题之一。

综上所述,要实现城市原生污水热能资源化主要面临着以下几个问题:① 换热设备及系统堵塞;② 城市原生污水流动与换热特性;③ 换热设备污垢特性及其对策;④ 换热设备的腐蚀。