

全国燃烧节能净化标准化技术委员会 (SAC/TC441)

国家标准

《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》

编

制

说

明

《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》国家标准编写工作组

2024年6月

一、工作简况

1.1 任务背景和意义

随着国家节能减排特别是燃烧器污染物排放标准日趋严格，发展高效清洁低污染物排放燃烧器是国家节能环保的重大需求。气体燃料包括天然气、液化石油气、焦炉煤气、瓦斯气等在燃烧过程中生成污染物氮氧化物 NO_x 。近几年，国家对燃气锅炉氮氧化物的排放进行了严格规定，如北京、天津、西安等地，要求氮氧化物排放不大于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，甚至要求低于 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 。

为了满足实现该标准，国内大量燃气锅炉进行了低氮改造，改造后燃烧稳定性变差，火焰脉动大，出现燃烧室振动现象较为普遍，直接影响到锅炉稳定安全运行，而目前没有相关燃烧室振动限值标准，来指导用户进行安全判定。燃烧室振动已经给供热、机械、电力、民生、食品等行业带来安全隐患，亟需制定标准约束指导用户安全运行。

为了引导、帮助热力生产用户安全生产，项目团队研究提出了气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法，以国家相关的法律、法规为依据，以我国安全运行需求为导向，以提高产品质量、安全水平和产业效益为目标，使得热力生产用户针对燃烧设备稳定运行有法可依，为高效率的气体燃烧设备快速和规范发展提供强有力的技术支持，为我国气体燃烧设备安全标准化体系建设进行有益尝试。

1.2 任务来源

因为目前国内外尚无同类标准，为适应气体燃料燃烧室振动限值及测量方法的需要，由西安热工研究院有限公司、中国科学技术大学、浙江大学、西安交通大学等单位提出编制《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》国家标准的建议。

根据“国家标准化管理委员会关于下达2023年碳达峰碳中和国家标准专项计划及相关标准外文版计划的通知，《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》国家标准项目立项，由全国燃烧节能净化标准化技术委员会（TC441）承担《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》（中文计划号：20232506-T-469，外文版计划号：W20233719）国家标准的制修订工作。

1.3 主要工作过程

1.3.1 草案思路的形成

- (A)基于气体燃料燃烧压力脉动机理研究和工业燃烧装备运行实际需求
- (B)基于气体燃料燃烧室振动等级评价和测量的工业应用实践

(C)基于已有工作测振仪，并结合实际燃气燃烧室振动测量特点

我国针对测振仪实行的相关标准为JJG 676-2019《工作测振仪》，该标准规定了振动仪的类型、性能及标定方法。该标准不适用于燃烧气体燃料的工业燃烧室振动测量，也未给定振动测量方法与振动等级评价。

考虑到我国针对工业振动仪已有通用标准JJG 676-2019《工作测振仪》，在该通用标准基础上，编写小组结合多年在气体燃料燃烧压力脉动机理研究、燃烧室振动测量、振动等级评价的工业应用的成果与经验的基础上，形成了一个《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》的工作组讨论稿。

(D)标委会主要起草单位成员认真讨论，结合工业运行经验，形成编写大纲与思路

标委会有不少成员工作在气体燃料燃烧压力脉动机理与工业燃气锅炉的设计、试验和应用领域，具有丰富的经验。在针对标准编写相关事项、围绕标准目录、大纲如何拟定，工作测振仪的通用技术要求进行详细讨论基础上，确定《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》标准撰写思路：

《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》标准编写基于已有国家通用标准JJG 676-2000《工作测振仪》，结合国内外气体燃料燃烧压力脉动机理、实验室研究、数值计算、技术研究和应用的成果与经验，在此基础上形成了《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》的工作组讨论稿。

1.3.2 主要工作过程

《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》标准从2023年5月19日向全国燃烧节能净化标准化技术委员会(TC441)提出申请，5月31日正式申报，2023年7月20日在国标委组织下进行项目立项答辩，2023年9月28日在国标网上公示，到2023年10月28日公式结束。2023年12月29日经国家标准化管理委员会国标委发文批准，全国燃烧节能净化标准化技术委员会（TC441）承担《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》（中文计划号：20232506-T-469，外文版计划号：W20233719）国家标准的制修订工作。

具体工作进度如下：

2023年4月份，经过调研和论证，形成《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》V1-V3（草案）；

2023年5月31日，标委会按程序发起《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方

法》项目提案投票并向国标委申报；

2023年7月20日，参加国标委组织的2023年交通能源与资源环境领域第四次推荐性国家标准立项评估会，进行立项答辩；

2023年9月28日-10月28日，国标委进行了网上公示；

2023年12月29日，国标委发文准立项，中文计划号：20232506-T-469，外文版计划号：W20233719；

2024年1月25日，全国燃烧节能净化标准化技术委员会发“燃标字〔2024〕002号”文：成立《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》国家标准编写工作组，制定了标准编写计划，进行了标准编写分工，提出标准编写的具体要求。西安热工研究院有限公司徐党旗任组长；中国科学技术大学林其钊、浙江大学周昊和西安交通大学车得福任副组长；标准编写工作组成员来自华能陕西发电有限公司等国内二十多家企事业单位。工作组涵盖了科研院所、检验检测机构、制造生产单位、标准化研究以及使用单位，成员具有较强的专业性和广泛的代表性。

2024年3月8日，在江苏省杭州市召开《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》国家标准编写启动会，本领域有关专家（特邀）及标准编写工作组成员参加了启动会，会上对《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》（工作组讨论稿）进行了讨论并提出修正意见，会上和会后共收集意见62条，采纳52条，部分采纳3条；不采纳7条；按意见修正后形成《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》（征求意见稿）。

2024年3月21日-5月21日，按程序，标委会会通过邮件将修正后完成的《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》（征求意见稿）发给委员单位、相关研究院、学校和企业当中征求意见，同时在国标委网站上和TC441网站网上公示征求意见，收集整理汇总意见100条，国家标准编写工作组对征求意见稿收集的100条意见逐条开展讨论、斟酌修正整理，最终采纳92条（包括无意见11条），部分采纳0条，未采纳8条，形成送审讨论稿。

2023年6月7日—至今，标委会将修正后完成的《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》（送审讨论稿）通过邮件及本TC网站上发给委员单位、相关研究院、学校和企业征求意见，收集整理汇总意见0条，相关工作正在进行中。

二、标准编制原则和主要内容

2.1 标准编制原则

本标准的编制遵循“系统性、科学性、统一性、协调性、适用性、规范性”的原则，注重标准的可操作性和利用方便性。

本标准依据GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定要求，确定标准的结构和组成要素；坚持科学性原则，标准模式与理论基础及标准要求之间具有清晰的逻辑关系，即理论-模式-标准要求，逐层转化，作到结构合理，层次清晰，体现科学性原则；坚持先进性和实用性相结合的原则，既广泛吸收经典术语和词汇，又吸收和借鉴先进概念；坚持可操作性原则，即标准应在具有广泛的适用性的基础上，有较高的可操作性。

本标准基于前期气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法工业实践基础，遵循JJG 676-2000《工作测振仪》中有关振动仪的类型、性能及标定方法规定的基本要求，针对燃用气体燃料（瓦斯气、天然气、高炉、焦炉、兰炭尾气或电石尾气）等的工业燃烧室运行过程中振动测量要求、方法以及相关振动限值等特点制定。

2.2 标准主要内容

《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》标准规定了气体燃料燃烧所引起燃烧室振动等级评价，并对气体燃料燃烧振动测量方法、仪器标定及不同工业燃烧室测量位置做出规定。

该标准适用于燃烧气体燃料的工业燃烧室。

主要技术内容包括提出并规定气体燃料燃烧所引起燃烧室低频振动等级限值、气体燃料燃烧所引起燃烧室内热声压力波动幅值、测量仪器标定方法及不同工业燃烧设备测量位置、具体气体燃料燃烧振动频率、振动速度及振动位移测量方法、具体气体燃料燃烧热声频率及热声压力幅值测量方法、测量结果数据处理及记录。

三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

随着工业燃气锅炉朝大容量、低排放方向发展，锅炉产生振动的情况越来越多，振动原因也越来越复杂。目前，对于绝大部分锅炉燃烧室振动，主要有流体流动不稳定、燃烧（极限）不稳定和热声不稳定三种原因。

流体流动不稳定是指由于燃烧室内流体流动处于不稳定状态而出现的涡脱落现象，严重的还会出现稳定的湍流流动在统计学上随机不稳定现象，具体而言，实际燃烧室内的流动是一种典型的、常见的随机不稳定现象，这是因为燃烧室内的流动存在

不断变化且复杂的卡门涡流，当卡门涡流频率与烟道声学驻波频率、管子固有频率耦合时可能发生燃烧室振动，这种振动的频率分布和空间分布都比较分散，很难造成比较大的直接破坏。

燃烧(极限)不稳定是指极限条件下发生的自点火、吹熄、回火等瞬态的不稳定过程。这些燃烧室内瞬态的不稳定过程与反应动力学、火焰对流场的影响、喷嘴形式、传热传质过程、强剪切作用、火焰当量比、流速等有密切关系，燃烧(极限)不稳定会引发工况的突变，瞬间形成较为严重的破坏，因此在气体燃料燃烧室的设计和验证过程中一定要合理设计、确定边界条件并且留存余量，避免燃烧(极限)不稳定现象发生。

热声不稳定又被称为热声振动，这类不稳定发生时特征较为明显，往往会形成强烈的压力波、巨大的噪声，同时燃烧室内火焰发生剧烈脉动，压力和放热的脉动对燃烧室造成特定频率下大幅度的机械应力或热应力，进而导致锅炉发生剧烈振动，缩短燃烧室的工作寿命，严重时迫使锅炉停机。此外，燃烧放热与声波传播两种物理过程会发生正反馈的耦合，相互强化，使得燃烧室内存在强烈且持续的压力脉动，形成更大的破坏作用。通常，热声不稳定是燃气锅炉燃烧室发生振动的主要原因。

据不完全统计，目前工业燃烧设备以超低氮运行的燃烧模式，超过50%以上都存在不同形式的振动，严重威胁设备寿命及人身安全。为此，国内科研单位和工厂基于气体燃料燃烧压力脉动机理研究和工业燃烧装备运行实际需求，研发并建立了气体燃料燃烧压力脉动特性、振动特性、振动测试方法及振动等价评价。

针对气体燃料燃烧室振动特性，西安热工研究院、浙江大学、西安交通大学等单位就气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法进行了实验室理论、数值计算、试验和工业性试验。研究内容包括气体燃料燃烧所引起燃烧室低频振动等级限值、气体燃料燃烧所引起燃烧室内热声压力波动幅值、测量仪器标定方法及不同工业燃烧设备测量位置、具体气体燃料燃烧振动频率、振动速度及振动位移测量方法、具体气体燃料燃烧热声频率及热声压力幅值测量方法、测量结果数据处理及记录。

3.1 气体燃料燃烧振动的数值模拟研究

由于目前大多数工业燃气锅炉燃烧室振动是由于热声振荡引起，因此针对气体燃料燃烧室内火焰波动机理以及其激发热声振荡的规律进行了数值计算研究。图3-1为研究对象计算模型及相关尺寸。燃烧室形式为单管形，由5个圆柱组成，燃烧室的入口连接燃烧器，出口直接连接大气，理论上出口连接的面积为无穷大，声波能量将全部反射回燃烧室内部，然而考虑到实际情况，出口面积不可能为无穷大，因此，在燃烧

室内设置了一个宽度为0.05m，直径为0.05m的单极子声源，距燃烧器0.2m，用于模拟燃烧热释放的波动。

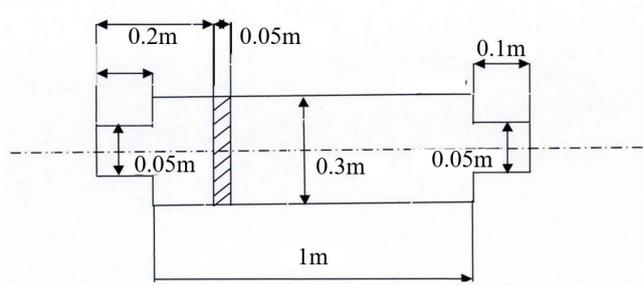


图3-1 模型燃烧室示意图

瑞利准则指出，当热释放与声压波动耦合时，将会出现振荡现象，声压的振幅将随时间逐渐增大。如图3-2所示，当火焰面波动热释放时，声压波动会出现火焰面模型激发情况，图3-2还显示了声压波动最终随着时间逐渐变大，热声振荡最终被激发。图3-3是发生热声振荡时的 p 、 q 耦合情况（ p -火焰面模型热释放压力， q -燃烧室动态压力），结果表明热声振荡发生时， p 、 q 之间存在强烈的耦合关系，显然满足瑞利准则，实现了火焰热释放和声波耦合，互相激发促进的正反馈现象。

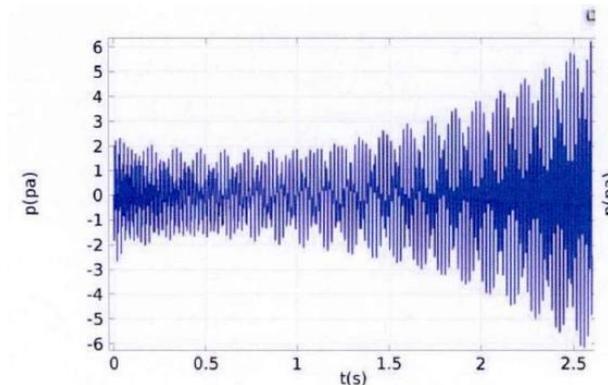


图3-2 火焰面模型激发热声振荡图

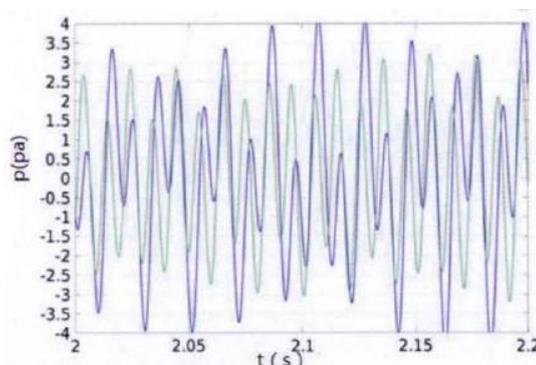


图3-3 火焰面模型激发热声振荡 p 、 q 耦合图

3.2 实际燃气锅炉燃烧室振动等级评价及测量方法试验研究

实际燃气锅炉燃烧室振动等级评价及测量方法试验主要包括气体燃料燃烧振动频率、振动速度、振动振幅及等级评价，试验在西安热电阳光热力有限公司开展。

3.2.1 锅炉概况

西安热电有限责任公司3号锅炉为某锅炉厂家自主开发研制了QXS116-1.6/130/70-Q全自动燃气热水锅炉，锅炉类型为全膜式水冷壁全自动燃气热水锅炉，配套水冷型节能器和空冷型冷凝器。设备参数如表3-1所示。

表3-1 锅炉设计参数

项目	数值
额定功率/ MW	116
额定蒸汽压力/ MPa	1.6
额定温度/°C	130
给水温度/°C	70
适用燃料/	天然气
燃料低位发热量/ kJ/Nm ³	33244.78
锅炉效率/%	95.91
燃料消耗量/ Nm ³ /h	13626.61

3.2.2 现状及分析

(1) 西安阳光热力有限公司#3天然气锅炉为微正压燃烧方式，自从2020年建成投产后，水冷壁墙面及炉本体在低负荷状态振动不明显，随锅炉负荷的增加外保温护板出现明显晃动现象，经常造成水冷壁泄露等问题，具体见图3-4，严重威胁锅炉的安全稳定运行。#3炉目前最大安全稳定负荷运行在70MW。



图3-4 振动造成水冷壁鳍片撕裂

(2) #3炉运行过程中炉内燃烧压力波动相对较大，#3炉中负荷（60~70MW）波动范围±100Pa，高负荷波动（80~90MW）范围为±200Pa，具体见图3-5。

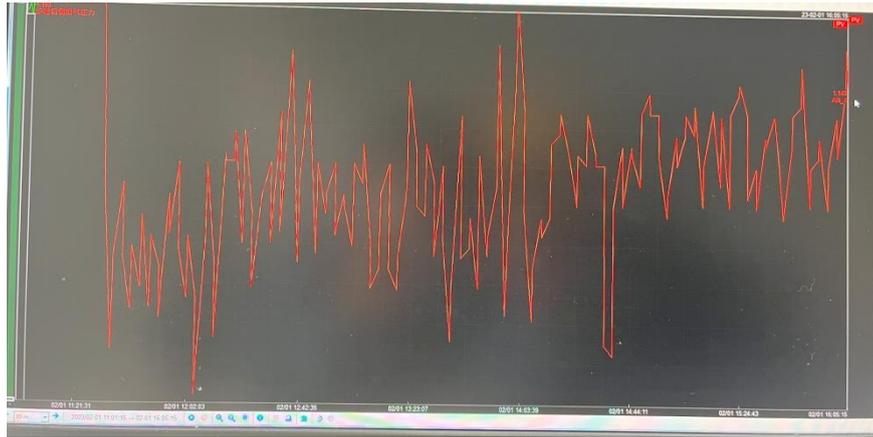


图3-5 #3炉87MW压力波动趋势图

(3) 目前#3炉顶平台及供气管道等设备支撑点均在锅炉炉顶位置，受到锅炉炉膛本体振动，炉顶位置布置的设备振动较大，一方面供气管道存在由振动导致焊缝裂开的风险，另一方面对运行检修人员的人身安全会带来一定危害。

(4) 目前#3炉在供暖季为了保证安全运行，锅炉控制在中低负荷（<70MW）运行。未来随着周边供热量增大，目前的安全锅炉负荷达不到供热需求，急需提升锅炉安全运行负荷，满足未来供热需求。

3.2.3 振动测试及分析

(1) 振动测试仪器及探头

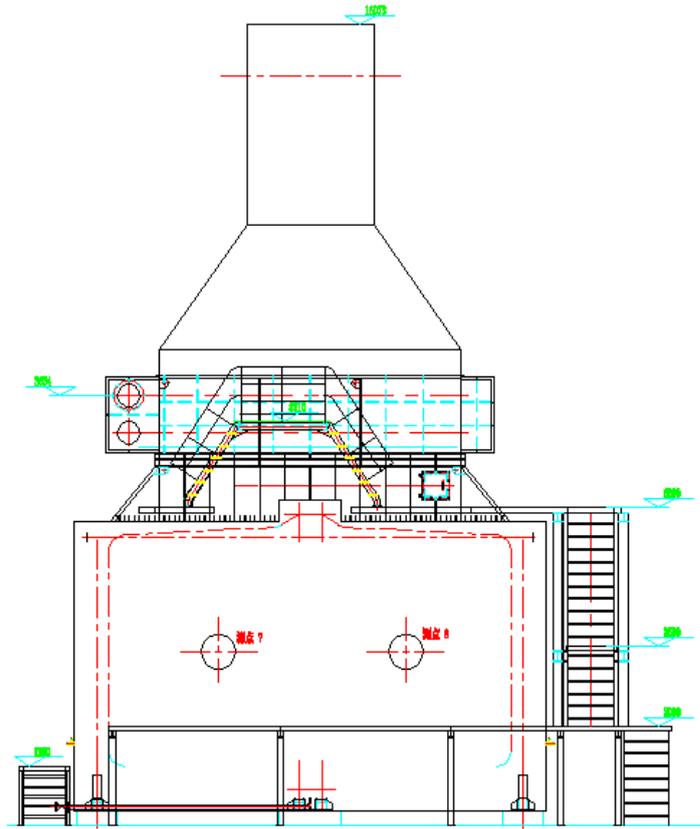
本次针对西安热电阳光热力有限公司#3炉振动测试采用GE Bently生产Scout140-EX型振动测试仪进行，分别采用加速度探头及气动探头对炉膛外墙及内部烟气压力脉动进行了测量，测试中所使用的仪器及探头信息如下表3-2所示。

表3-2振动测试所用的仪器及探头

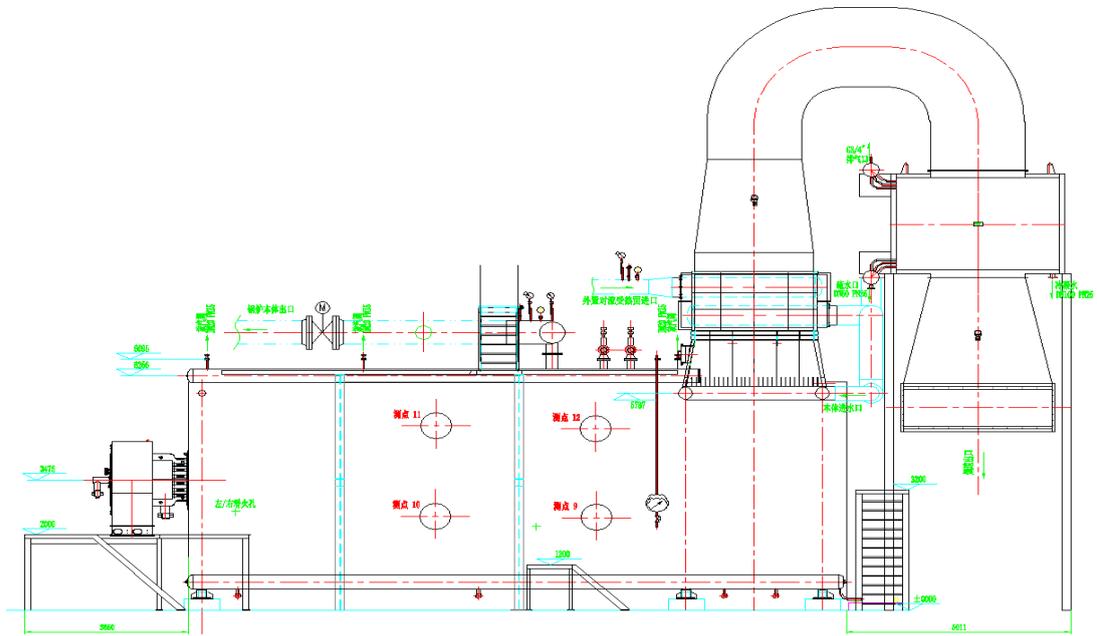
序号	仪器名称	型号/规格	准确度等级
1	本特利测试仪	scout140ex	0.01mm/s
2	加速度探头	100mv/g	0.01g
3	气动压力探头	PCB 06B50	0.1Pa

(2) 炉顶壁面振动测点分布

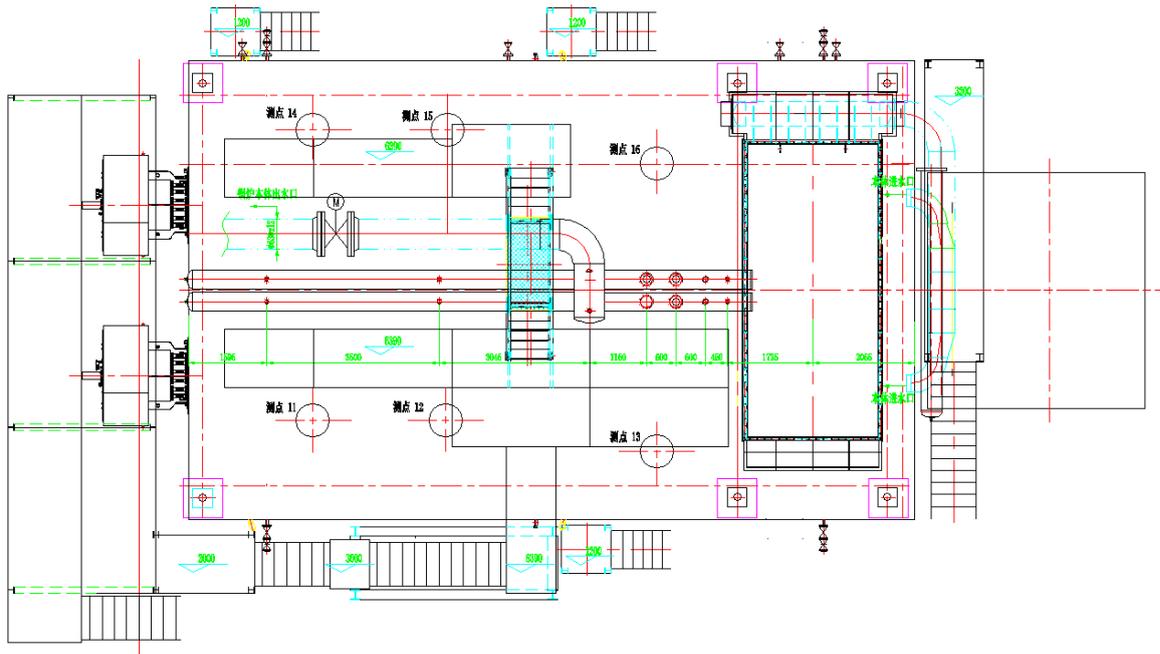
根据#3炉振动整体分析，在炉本体上布置了18个测点，前后墙各2个测点，两侧墙各布置4个测点，顶部布置了6个测点。锅炉本体振动测点布置示意图如图3-6所示。



(c) 后壁面振动测试测点



(d) 右侧墙壁面振动测试测点



(e) 顶部墙壁面振动测试测点

图3-6 锅炉本体振动测点分布图

(3) 振动测试数据分析

本次针对#3炉振动测试试验时，在#3锅炉60MW、70MW、80MW、90MW负荷工况下进行，图3-7给出#3炉各测点振动速度随着负荷变化趋势。

通过现场测试得知，炉墙振动在锅炉中高负荷以上时开始显现，振动最剧烈位置位于炉顶中、后区域水冷壁壁面和后墙中间部位（图3-7(c)、(d)），#3振动烈度最大为39.68mm/s，振动以低频为主，振动频率约10~13Hz左右。#3炉炉墙振动都随着负荷的增大而增大。振动测试时，考虑到锅炉运行安全因素，#3炉测试最大负荷为90MW。

通过目前#3炉本体水冷壁固定情况发现，仅两侧墙有钢梁加固，炉顶、炉底及炉后未有钢梁加固，炉顶、炉底及炉后水冷壁刚性较弱，振动较大，侧墙、前墙区域振动较小。

一般而言，燃烧系统中的烟气具有十分繁多的声学固有频率。他们主要是由声波在燃烧室内传播、反射叠加形成驻波而产生的，这与固体的固有频率有所区别。相同的是，如果外部激励源频率与其中一个频率吻合，则会激发烟气分子共振，表现为压力大幅波动。这类燃烧激振常见于带固体机械周期运行部件的燃烧设备中，例如风机、旋流器等。

结合振动测试数据、实际运行情况及振动产生的原理，西安阳光热力有限公司#3

锅炉本体振动的原因如下：首先炉膛内烟气流存在一定强度的压力脉动；其次烟气流的压力脉动与炉墙振动存在频率交叠及能量交换，最后炉墙壁面振动属于低频振动范畴，因此可以判定，造成炉墙振动的原因：炉膛内烟气压力脉动强度略偏高，炉墙炉顶外壁面刚度明显偏弱。

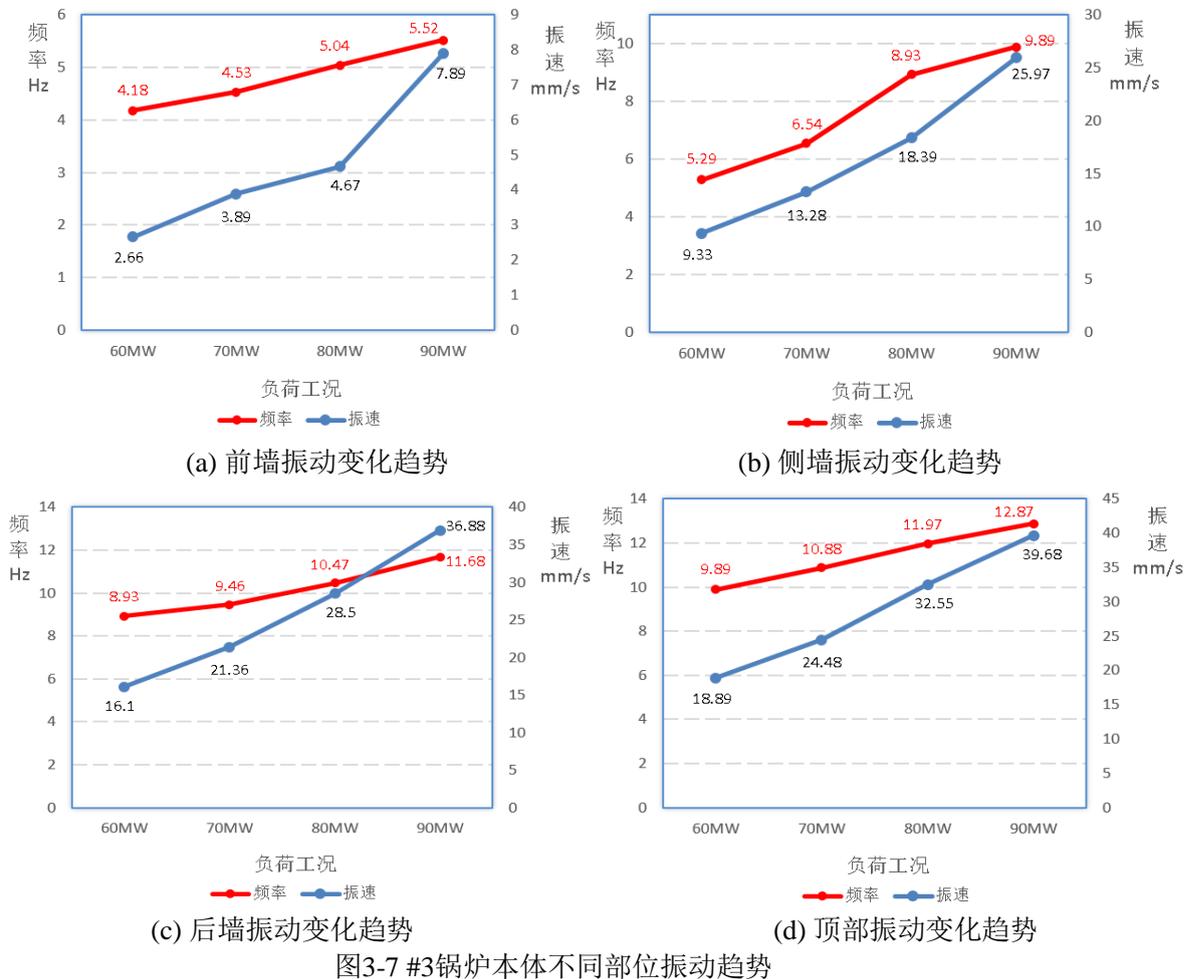


图3-7 #3锅炉本体不同部位振动趋势

3.2.4 实际燃气锅炉振动等级评价

锅炉本体振动烈度的评价和振动限值，根据以往锅炉振动测量案例，结合测试及现场实际情况来看，锅炉运行在 70MW 以上负荷工况，振动加剧明显，不同位置振动等级不同，严重区域振动速度处于 32.55-39.68mm/s，振动频率处在 11.97-12.87Hz，属于剧烈振动等级，对锅炉正常运行造成影响，有损坏本体和附属设备的风险，需要及时开展振动防治改造；70MW 以下负荷，振动速度为 18.89-24.48mm/s，振动频率为 10Hz 以内，属于正常振动等级，振动程度可以接受，锅炉可以连续稳定运行，但需定期检查，观察每个工况振动发展状况。

3.3 预期经济效果

据不完全统计，目前以超低氮运行燃烧模式的工业燃烧设备中超过 50% 以上都存

在不同形式的振动，严重威胁设备寿命及人身安全。气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法可为燃烧设备提供规范的运行标准，可应用于钢铁、化工、民生、电力等领域的燃气燃烧设备，具有广阔的应用和推广前景。目前国外也无针对燃烧室振动等级评价和测量方法等相关标准，可在国内标准制定基础上推行国际标准，提高我国在气体燃料燃烧室振动测试领域的国际地位。此外，国内气体燃料燃烧设备数量约十几万台，考虑到后期新建，对本标准需求量巨大，可为用户及制造商产生上百亿元经济效益。

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况

目前国内外在气体燃料燃烧室振动等级评价及测量方法方面还未有明确的相关专业标准。

本标准的建立规范和指导现役或新建的以气体燃料燃烧为主的工业燃烧室的安全稳定运行，确保其在运行过程中不会发生由振动引起的安全问题及重大经济损失

五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因；

目前在国内外针对气体燃料燃烧领域，制定的标准主要体现在污染物排放方面、自动控制方面、设备安全运行方面等，还未涉及气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法。

本标准制定过程中，要对振动仪器类型、性能及标定进行详细要求及规定，参照了国家质量技术监督局发布的《工作测振仪》JJG 676-2019标准内对振动仪器的类型、性能及标定方法的要求。

其余振动测量要求、方法及相关振动限值规定均为首次提出，没有参照国内外其余标准。

六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本标准与现行法律、法规和强制性国家标准不存在任何冲突、矛盾或重复；
本标准可为相关工业燃气装备针对燃烧室振动制定防治措施提供指导。

七、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在制定过程中未出现过重大分歧意见。

八、涉及专利的有关说明

本标准不涉及专利。

九、实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议

本标准发布后，应组织相关教育、科技、文化、设计、制造和用户对标准进行宣贯，统一振动等级评定以及测量方式基本概念的表述，消除或减少歧义，规范振动测量技术的发展及衍生产品的叙述表达。

十、其它情况说明

无。

全国燃烧节能净化标准化技术委员会（SAC/TC441）
《气体燃料燃烧室的振动等级评价及测量方法》
国家标准编写工作组
2024年06月07日