

高寒地区烟囱防积冰技术探索与实践

华电能源佳木斯热电厂

成果主要创造人：罗洪新

成果参与创造人：李新望 姚忠朋

企业概况：

华电能源佳木斯热电厂（简称：佳热电厂）建厂于 1938 年 7 月，是所属于华电能源股份有限公司的四星级热电企业。2014 年，#1 机组在五大电力集团 300MW 湿冷供热机组煤耗排名中，被评为排名第一的标杆机组。佳热电厂有着 78 年厂龄，建厂后，经过六次大规模改造扩建。目前，装机容量 600MW、供热面积 1007 万平方米。经过 78 年的锤炼，拥有着浓厚的历史底蕴和现代化管理能力的佳热电厂，形成了以“家、佳”企业文化为核心的，具有创新力、竞争力的虎狼之师。多年来，佳热电厂以供热为基础、以热电联产齐肩发展为方向，全体员工携手建造“同心、同行、同享”的企业之家，坚定不移地秉承“诚信自强、弘德致远”的企业精神，在三江大地上打造出一座“安全、可靠、绿色”的热电厂。佳热电厂以几代人的忠诚、以抓铁留痕、实干兴业的执行力，以虎狼之师、志在千里的拼搏精神，在热电市场争得一席之地，成为行业内的标杆企业。在发电市场低迷的 2014 年，佳热电厂年盈利达 1.6 亿元。华电集团公司将我国第一套余热回收项目、工业供汽等重点项目，相继安排在佳热电厂进行试点，并取得良好的效果，为其他集团设备改造，积累了丰富的经验，奠定了坚实的基础。佳热电厂做为所在地主要的供热、供电企业，保证安全生产不仅仅是经济效益问题，而是重大的社会责任问题。及时消除设备缺陷，改造存有安全隐患的设备，优化系统运行，既是生产需求也是社会责任与义务。

一、高寒地区烟囱排放口防积冰技术实施背景

佳热电厂，两台 300MW 机组共用一座烟囱，建设于 2008 年，为两台 300MW 机组配套设施，整体设计标高 213.5 米、排放口标高 210 米、烟囱避雷针以排放口为基点 3.5 米、烟囱筒体为双层套筒（内筒为玻化砖砌筑、外筒为钢筋混凝土浇筑）、内外筒排口结合面为钢筋混凝土一次浇筑成型，排放口内径 7 米、排放口结合面宽 850mm、内倾 15°角、排口顶部及外筒外壁 207 至 210 米涂刷耐酸胶泥防腐层。佳热电厂所处地理位置环境条件：极寒天气历史最低温度零下 42℃、风力最高 8.5 级、冬季多为偏东北风。锅炉燃烧后产生的烟气先后经过 SCR 脱硝反应器、静电除尘器、GGH 换热器、石灰石湿式脱硫岛等环保设施。冬季时多为双机运行，排口排烟温度约在 20℃-50℃之间。自 2008 年两台机组投运以来，烟囱排放口在冬季时会积挂大面积冰凌，在春季环境温度升高时或达到一定重量时，冰凌会发生断裂从高空坠落。佳热电厂每年都会出现，因烟囱排放口坠冰造成的下部设备砸损事故，并出现多次人身伤害未遂事件。由于坠冰时间、点位的不确定性，佳热电厂在烟囱排口积冰未得到有效预防、治理前，为保障人身安全，不受坠冰伤害，沿员工巡检路径，自行设计、安装了顶部带有破冰锥的防落物安全通道。

（见图 1）



图 1：安全通道

安全通道的设置，有效的保障了人身安全。但做为一种被动防范安全装置，安全通道无法防范坠冰对设备的防护。解决烟囱排放口结冰问题，是根治隐患的唯一途径。

一) 烟囱排放口积冰生成状态与危害

1、危及人身安全

烟囱下部设备分布密集，行走通道狭小，由于坠冰发生前没有明显的预兆，多次发生人身伤害未遂险情。为防止坠冰伤人，每年都要在巡检通道及区域设置警戒线，封闭部份区域，严重影响了正常的巡检工作。即使如此，坠落在设备上四溅的碎块仍然时时危及着人员安全。

2、腐蚀烟囱排口，降低排口强度

2.1 冬季运行时，由于锅炉燃烧后产生的烟气先后经过 SCR 脱硝反应器、静电除尘器、GGH 换热器、石灰石湿式脱硫岛等环保设施，烟气温度逐步降低，烟气在到达排放口处时与冷空气进行热交换，导致烟温急速下降，烟气中的水份被凝结析出，并与大气中的水份碰撞冷凝成小水滴。因热交换反应集中发生在烟囱排放口，冷凝生成的水滴大部份积留在排放口及烟囱外壁上，并逐渐冻结成大面积冰凌。

2.2 由烟气中冷凝出的液滴，低落在先期生成的冰凌上，使其厚度、重量不断增加，当重量超过一定量时，或环境温度发生变化时冰凌发生断裂坠落。

2.3 烟气中残留的二氧化硫、三氧化硫与烟气中的冷凝水反应生成硫酸。烟气中冷凝析出的硫酸，会随水滴溶于冰凌中并固附于烟囱表面，对烟囱排口及外壁产生持续的强酸性腐蚀。酸腐蚀造成烟囱排口结构强度降低，使排口变得酥松易裂非常容易从墙体剥离，坠落的冰块会将冻结在一起的烟囱表面防腐层，及腐蚀酥松的墙体一同带下。在夏季时，雨水会对酥松的排口产生冲刷，强度降低的墙体断裂成小块脱落。由于酸腐蚀发生在冰凌下，腐蚀产物与冰凌冻结在一起，而且墙体腐蚀后会发生溶胀体积变大，在温度升高冰凌强度降低时，腐蚀物会随冰凌一起坠落。

3、砸损设备

脱硫、电除尘、烟道等主要厂房及设备都分布在烟囱下部周围，冰凌断裂后一部份坠落在地面，一部份直接坠落在厂房及设备上，坠落的冰块重量从几公斤到一、二百公斤不等。断裂的冰块在 210 米高的排口高速坠下，力量和速度非常惊人，经常砸漏厂房棚顶，砸损监控仪表原件，砸毁烟道保温层，造成烟道壳体变形、泄露。烟道损坏后，在运行中无法进行有效的修复，泄漏的烟气造成周边设备大面积腐蚀、损坏。大体积的冰块如直接坠落在设备上部，极可能砸断、砸漏烟道，如主设备或烟道、管路等被砸毁，将会造成机组停运、供热中断的恶性事故发生。

见



图 2 被坠冰砸坏的吸收塔保温层

图 2、图 3



图 3 被坠冰砸坏的事故浆液箱顶部

二) 烟囱排口防积冰所要达到的目标

- 1、消除冰块坠落安全隐患，保证人身、设备安全。
- 2、通过切实可行的改造，抑制或防止烟囱排口结冰情况发生。
- 3、烟囱排口的腐蚀情况得到治理，并延缓其腐蚀发生周期。

二、实施过程

佳热电厂为保证防冰方案的实效性、可操作性，安排厂生产技术人员及专业维修人员登上烟囱顶部，对运行中的烟囱排口进行了实地勘测，在全面掌握烟囱排口腐蚀、损坏、排烟温度、烟气排放状态等数据情况后，组织全厂专业技术人员进行全面、细致的分析，明确了防冰的必要性、迫切性并确定了防冰目标。为保证防冰效果，彻底解决问

题，了解、掌握更多现场资料，向多家与佳热电厂气候环境、烟囱设计相似的电厂，进行了烟囱排口冬季结冰情况咨询，了解到其他电厂也存在相同问题。但多数电厂都没有很好的完善的解决方案，只有少数几家将机组停运，以投资近两千万改造资金投入，进行了内筒全钛钢改造。由于投资过大，资金无法落实，而且佳热电厂不具备全厂停运，进行改造的施工条件。佳热电厂继而向电力专业设计单位寻求帮助，征求可行的防冰方案，但相关设计单位相继给出的方案，多为内筒改换为钛钢材质内壁或以 316 不锈钢将内筒加高 3 米，两类防冰方案，改造资金在 500 万元至 2000 万元不等。经过对两种改造方案的可行性分析：一）全内筒改造方案：改造资金过大，资金无法落实，而且改造施工需要全厂停运五十天，施工条件不具备无法实施。二）内筒口加高三米方案：改造资金过大，资金无法落实，需要全厂停运三十天，施工条件不具备无法实施。而且，佳热电厂距民航机场 5 公里，处于航空管制区域，排口在原有基础上加高无法获取航管局批准。在两种方案不具备实施的情况下，佳热电厂转向自行解决的方向。在对收集的数据进行分析、研讨后，结合现场实际工况，理顺了解决问题的基本思路，制定了具体改造方案。

1、解决问题的的基本思路

1.1 分析冰凌的生成原因

烟囱排口的冰凌生成需具备四个基本条件：一是水份，形成冰凌的水份来源有两种途径；一种是烟气中的水份随着烟气温度降低，从烟气中冷凝析出形成雾滴。第二是外界的冷空气与热烟气与进行热交换时，大气中的水份因热交换反应凝结成水滴。二是气压，在冬季低气压时，烟囱排口的烟气受低气压及风力影响，会沿烟囱排口外侧向下倒流，倒流距离 0-3 米不等，当烟气周围气压相同时，烟气才会向大气中扩散。三是温度（环境温度与排口烟温），排口结挂冰凌多发生在，气温低于零下 10℃ 以下时，烟温与环境温度温差大，热交换速度快，在此条件下，排口烟温降温快，烟气中水份冷凝析出快，冷凝出的雾滴滴落在排口上结冰冻结速度快，排口墙体温度低，溶解、烘干水份能力降低。四是积水生成冰凌需要在载体上滞留一定的时间及附着的载体。佳热电厂在确定了排口冰凌生成条件后，召集技术人员逐一研讨解决方案。

1.2 分析烟囱排口损坏、腐蚀原因

确定排口腐蚀、损坏原因，才能防止排口基层发生脱落，并以此排查烟囱排口腐蚀、损坏，与冰凌生成是否具有关联性。

排口的积冰在溶解发生坠落时，会将冻结在一起的防腐层从排口剥离。失去防腐保护的烟囱排口，会被烟气中硫份生成的硫酸腐蚀，发生在排口的酸性腐蚀会造成排口基层酥松并出现裂纹。腐蚀后质地酥松的排口表面，非常易于存留烟气中形成的雾滴。而在排口裂缝中的积冰，因冰形成的胀力及含有的强酸性物质，会进一步加深了对烟囱的损毁程度。

2、改造方案论证及实施

佳热电厂，针对造成排口冰凌生成的四个基本条件，确定了基本设计方向。在对水份、气压、温度三个条件进行分析后发现，一水份通过运行调整能有所减少，但效果不明显根本无法达到干烟气状态，而且无法避免大气中水份影响。气压、温度也无法通过改造、调整设备解决。在无法改变冰凌生成的三个基本条件下，佳热电厂将改造思路，放在如何抵消或抑制这三个条件的上，并将改变烟气在排口滞留时间，及减少载体截面积做为设计主线。冰凌的生成需要时间及承载体，为减少烟气在排口的通过时间，佳热电厂将排口顶面内倾角由 15 度角，改为内倾 35 度角（见图 4、图 5）。



图 4：原烟囱排口（顶面内倾 15°）



图 5：新型防冰装置（内倾 35°）

烟气经过在改造前与改造烟囱排口状态（见图 6、图 7）

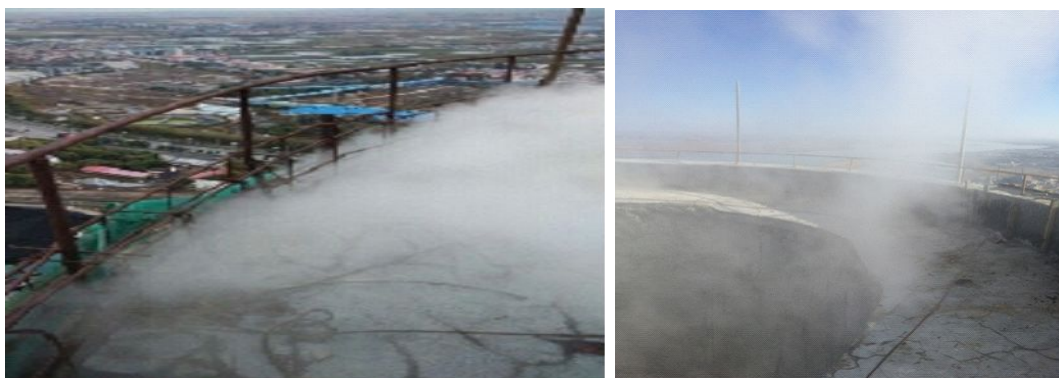


图 6：排口没有防冰装置时烟气长时间滞留在排口顶面处

图 7：由于防冰装置的顶面宽度只有 25cm 宽，烟气无法长时间停留

由于排口角度增大，及防冰装置顶部宽度只有原顶面宽度的 32%，减少了烟气在排口平面停留的时间，同时积留在排口的冷凝水由于，排口的大倾角设计会流入烟囱内，被不断排出的热烟气烘干。排口顶面角度的改变，解决了排口顶面积水问题。新设计的防冰装置对抑制低气压及风力对烟气排放影响也具有明显效果。因防冰装置设置在排放口最外沿，烟气因气流及气压原因沿烟囱外壁倒流时，因防冰装置顶面积减少及角度原因，改变了大气流经排口的方向，减少了气流及气压对烟气的影响，使烟气迅速脱离排口，减少烟气在排口的通过时间避免向下发生倒流。佳热电厂改变了，烟囱排口常规的，宽平顶面设计惯例，沿烟囱外口设计了高 750mm、厚 250mm 的钢筋混凝土防冰墙，将墙体顶端设计成内倾 35 度角斜面。使排口端面由 850mm 宽，缩减至 250mm，排口表面积的大幅减小，减少了大气压力流对烟气压制时，烟气下部的承载面积，使烟气通过排口时间和接触面积大幅减少，避免了水份积留在排口上。为增加防冰墙的导热性，防止冷凝水在排口外部结冰，在设计防冰墙钢筋内笼框架时，采用 15cm 间距的高密度横向排列方式，并将纵向主筋与烟囱筒体钢筋相连，通过钢筋将烟囱内热量传导至防冰墙内、外部，增加防冰墙蓄热能力。在防冰墙浇筑时，改变了预埋钢筋必须封闭于混凝土中的传统方法，采取开放式外露设计，裸露钢筋进行相连焊接，并用耐酸胶泥进行表面防腐处理，此设计形式相当于为排口加设了加热装置，通过钢筋的良好导热性能将内部温度传导至外壁，由于筒壁温度的提高，使烟囱外壁积挂的水份无法快速冻结，重而抑制了积冰的生成。单层防冰墙设计方式相当于在排口增加了烟气蓄热器，使烟气温度未大幅降低前，即离开排口扩散于大气中，同时，烟气通过防冰墙时，会对防冰墙产生烘烤、加热的作用。少量挂落在外壁的水滴，因烟囱外壁温度不具备结冻条件，无法形成冰凌，即时在极寒天气条件下生成小面积冰凌，也会因筒壁热量的不断传导及烟气与大气的吹扫，逐渐化解而无法形成大面积冰凌。随环境抑制了低温生成冰凌的条件。

2.1 治理烟囱排口损坏、腐蚀的具体措施

腐蚀是造成排口损坏的直接原因，而损坏的排口又为冰凌生成提供了有利的载体。原排口顶面是用玻化砖砌筑的，强度低、交接面易破损进水。佳热电厂，在对顶面基础承载力进行测算后，将顶面设计改造为，钢筋混凝土浇筑面，并在表面敷挂 5mm 厚度的耐酸胶泥，进行防腐处理。使其烟囱顶面与防冰墙结合为一体，避免了腐蚀及水浸的发生。

三、实施效果

佳热电厂在不影响机组正常运行，烟囱正常排烟工作的条件下，以工期 25 天，高质、快速的完成了烟囱防冰装置设计、改造工程。改造后，烟囱运行至今的三个月中，经历了最低气温零下 33℃；连续 7 天零下 30℃低温天气；最高风力 6 级、连续偏东北风向 70 天；单机组运行 6 天，等不利运行条件下，实现排口墙体无腐蚀脱落、外壁无冰凌生成的预期效果（防冰装置安装前后对比见图 8、图 9）。2015 年 2 月，佳热电厂派专业人员登上烟囱顶部，进行了烟囱排口检查，检查证实防腐层基面完好，墙体未发生裂纹损坏现象。佳热电厂防冰墙改造工程总投资：35 万元，改造工期 25 天，在保证防冰、防腐效果的同时，节约资金近 500 万元。佳热电厂在确定改造方案前，从施工工艺、作

业环境、应用材料、天气变化影响等方面因素进行了全面细致的分析、确认，并确定了完善的改造计划。防冰墙加高基点在排口 210 米，加高后筒体高度为 210.75 米，未超过 213.5 米的原设计标高。佳热电厂创新的设计思路，防冰墙设置于外筒顶部、顶面大内倾角的独特改造方案，使改造工程可以在烟囱运行条件下进行，解决了防冰墙改造必须全厂停运的重要问题。



图 8：防冰装置安装前排口积冰情况

积冰厚度：500mm
积冰高度：5000mm



图 9：防冰装置安装后排口冬季运行情况

佳热电厂此次防冰墙改造工程，从信息采集、数据分析、原因确认、设计、施工、检查、效果评估等诸多环节，严格按照计划、实施、检查、总结四个方面逐步进行推进。佳热电厂领导对此项工程给予了高度重视，成立了以生产厂长为组长、生技部主任、检修分场主任为副组长、生技部相关专业为组员的项目攻关组。由于设计理念及改造方案为高寒地区首例，没有现场实际应用经验或数据做为参考，而且改造资金极其有限。在此条件下项目组群策群力，反复推敲每一组数据，细化每一段工艺标准、核实每一米耗材，最终以成功的改造效果，最低的改造成本，完成了防冰墙改造工程。项目的成功实施，为高寒地区电厂烟囱排放口防冰凌治理，打造了成功示范案例。由于，改造成本低、施工工期短、可在烟囱运行时进行施工、防冰效果显著等优点，其设计理念及改造方案，对高寒地区使用高位烟囱的电厂或其他领域企业具有实际应用意义，极具推广价值。