DOI: 10.19666/j.rlfd.202305079

电站锅炉高碱煤燃用技术发展现状及展望

张喜来[1,2]，王志超[1,2]，周广钦[1,2]，郭洋洲[1,2]，杨忠灿[1,2]，姚 伟[1,2]
（1.西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
2.陕西省燃煤电站锅炉环保工程中心，陕西 西安 710054）

［摘 要］在“碳达峰、碳中和”的大背景下，西北地区火力发电在我国电力行业中的重要性进一步提升。该地区高碱煤占比高，锅炉燃用高碱煤过程中极易出现严重结渣和沾污问题，解决高碱煤安全燃用问题对保证我国电力安全有重要意义。对国内外高碱煤燃用技术发展现状进行了介绍，通过十余年的研究，我国高碱煤燃烧技术取得了显著的进步，相关成果已经在电力行业得到了推广应用，锅炉高碱煤掺烧比例由 60%以下提高到了 90%以上，但目前仍未能完全实现全烧高碱煤。对实现全烧高碱煤的几种技术路线进行了介绍，同时对目前燃用高碱煤典型锅炉的设备参数及运行情况进行了介绍分析。总体而言，煤粉锅炉、流化床锅炉、液态排渣锅炉在对高碱煤适应性方面各有优缺点，都还有技术瓶颈需要进一步研究和突破。为最终破解高碱煤安全燃用难题，还需要引入更多的新技术。

［关 键 词］高碱煤；电站锅炉；结渣；沾污；燃烧

［引用本文格式］张喜来，王志超，周广钦，等. 电站锅炉高碱煤燃用技术发展现状及展望[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 133-141.
ZHANG Xilai, WANG Zhichao, ZHOU Guangqin, et al. Present situation and prospect of high alkali coal combustion technology in power plant boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 133-141.

Present situation and prospect of high alkali coal combustion technology in power plant boiler

ZHANG Xilai[1,2], WANG Zhichao[1,2], ZHOU Guangqin[1,2], GUO Yangzhou[1,2],
YANG Zhongcan[1,2], YAO Wei[1,2]
(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2.Technical Research Center for Environmental Protection Engineering of Utility Boiler in Shaanxi Province, Xi'an 710054, China)

Abstract: Under the background of carbon peak and carbon neutralization, the importance of thermal power generation in northwest China has been further increased. Due to the high proportion of high alkali coal in this area, serious slagging and contamination come out easily in the process of burning high alkali coal in boiler. It's of vital importance to solve the problem of safe burning of high alkali coal ensuring the safety of electric power in China. The present situation of high-alkali coal combustion technology at home and abroad is introduced in this paper. With more than ten years' research, the high-alkali coal combustion technology in China has been improved remarkably, and the related achievements have been popularized and applied in the electric power industry. The blending ratio of high alkali coal in boiler has been increased from less than 60% to more than 90%, though the full burning of high alkali coal has not been realized yet. This paper introduces different technical routes to realize full burning of high alkali coal and analyzes the equipment parameters and operation of typical boilers burning high alkali coal. Generally speaking, pulverized coal boiler, fluidized bed boiler and liquid slag boiler have their own advantages and disadvantages in the adaptability to high alkali coal, with technical bottlenecks to be further studied and broken through. In order to ultimately solve the high alkali coal combustion problem, more new technologies need to be introduced.

Key words: high alkali coal; power plant boiler; slagging; fouling; combustion

随着我国“碳达峰、碳中和”战略的提出，火力发电机组逐渐从基核电源加速变为“托底保供”的调峰电源，我国东部部分煤炭供应难度大、环境承载力差的地区燃煤火力发电将优先淘汰，燃

收 稿 日 期：2023-05-15
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2020YFC1910000）
Supported by：National Key Research and Development Program (2020YFC1910000)
第一作者简介：张喜来（1981），男，高级工程师，主要研究方向为高碱煤燃烧特性及结渣沾污防控技术，zhangxilai@tpri.com.cn。

煤火力发电将越来越集中于若干大的煤电基地，主要分布在新疆、内蒙、陕西、山西等地区。

其中新疆是我国重要的能源基地，全区预测煤炭储量为 2.19 万亿 t，约占全国总量的 40%，是未来中国煤炭、煤电及相关产业的主要生产和运营基地之一[1-2]。新疆地区动力煤已经远销云南、湖北等地，西北与西南地区火力发电厂更是逐渐将新疆煤作为主力煤种。

新疆地区动力煤储量丰富，但高碱煤占比高，锅炉燃用此类煤种存在严重结渣和沾污问题，危及锅炉安全运行。高碱煤的安全高效燃烧技术是进入 21 世纪后我国燃煤火力发电行业的研究热点，国内相关研究单位对此进行了大量研究。2015 年，科技部通过国家科技支撑计划项目，组织国内相关研究院所、高校、企业对煤粉锅炉燃用高碱煤问题展开联合技术攻关；2018 年，又通过国家重点研发计划项目，组织相关单位开展高碱煤液态排渣锅炉关键技术研发工作。清华大学等单位还对流化床锅炉燃用高碱煤技术进行了有益探索[3]。

通过十余年的研究，高碱煤燃烧技术取得了较大的进展，但电站锅炉全负荷段 100%全烧高碱煤的技术仍未取得突破性进展。本文对我国高碱煤燃烧技术现状进行了介绍，并在此基础上对全负荷段 100%燃用高碱煤技术发展前景进行了展望。

1 高碱煤的煤质特性

1.1 高碱煤定义

长期以来，国内外对高碱煤并没有明确的定义。中国电力企业联合会标准《电站煤粉锅炉入炉燃料的分类和选择》[4]于 2018 年发布，首次对高钠（碱）煤给出了明确定义，以煤灰中折算 Na_2O 质量分数（K_2O 折算为 $0.66Na_2O$）为依据，将高碱煤分为 3 类：Ⅰ类高钠（碱）煤折算 Na_2O 质量分数为 2.5%~3.0%；Ⅱ类高钠（碱）煤折算 Na_2O 质量分数为 3.0%~5.0%；Ⅲ类高钠（碱）煤折算 Na_2O 质量分数大于等于 5.0%。按此标准，煤灰中折算 Na_2O 质量分数超过 2.5%即属于高碱煤。其中Ⅰ类高碱煤指的是现役非高碱煤锅炉通过必要改造后可以正常燃用的煤种，Ⅱ类高碱煤大体上是进行了针对性设计的锅炉才可安全燃用的煤种，Ⅲ类高碱煤是目前还无法长周期全负荷 100%全烧的煤种。

1.2 典型高碱煤煤质特性

新疆煤矿资源主要集中在北疆（准东、准南）和东疆（哈密）地区。其中准东地区煤炭基本都是高碱煤，哈密地区高碱煤占比也很高。上述 2 个地区是我国高碱煤的主要分布地区。根据西安热工研究院有限公司（以下简称西安热工院）多年以来对新疆各矿区煤种进行的测试分析，不同矿区甚至同一矿区的不同煤层的煤质参数也有很大的差别，但总体上呈现高水分、低灰分、中等发热量、煤灰中高钠的特性。表 1 为部分矿区典型高碱煤主要煤质参数。

表 1 国内若干高碱煤主要煤质参数
Tab.1 Main parameters of high alkali coal in China

项目	准东五彩湾煤	准东将二矿煤	准东红沙泉煤	哈密大南湖煤	哈密沙尔湖煤	哈密淖毛湖煤
w_{ar}(M)/%	27.30	26.40	20.70	24.80	29.10	22.20
w_{ar}(A)/%	7.25	9.26	8.69	17.20	7.84	7.89
$Q_{net,ar}$/(MJ·kg^{-1})	19.13	20.53	20.33	15.88	16.06	20.08
DT/℃	1 320	1 350	1 250	1 290	1 290	1 120
ST/℃	1 330	1 360	1 260	1 300	1 300	1 130
FT/℃	1 350	1 380	1 280	1 320	1 310	1 150
$w(SiO_2)$/%	17.08	25.27	30.09	40.67	29.10	39.83
$w(Al_2O_3)$/%	6.99	9.52	9.41	20.99	15.88	11.05
$w(Fe_2O_3)$/%	11.60	12.51	18.71	9.40	8.36	10.62
w(CaO)/%	27.53	26.42	23.31	11.19	29.32	21.24
w(MgO)/%	7.42	3.64	5.03	4.77	4.52	1.62
$w(Na_2O)$/%	6.08	5.54	4.39	4.61	6.11	4.08
$w(K_2O)$/%	0.46	0.38	0.47	1.58	0.26	1.08
$w(TiO_2)$/%	0.61	0.52	0.60	0.99	0.63	0.46
$w(SO_3)$/%	21.65	5.71	6.85	5.20	5.15	9.23

由表 1 可见，高碱煤的典型特征是煤灰中 Na_2O 质量分数比较高，因此行业内早期习惯上将此类煤种称为高钠煤。考虑到碱金属 K_2O 对结渣与沾污的影响不可忽略，同时为了与神府东胜等矿区的高碱土金属（CaO、Fe_2O_3）强结渣煤加以区别，目前行业内普遍将此类煤种简称为高碱煤。

传统上以灰熔点高低可以判断煤在锅炉内燃烧过程中的结渣性能。按表 1 中灰熔点数据，部分高碱煤结渣性并不强，但实际锅炉上的燃用效果显示这些高碱煤在锅炉内燃用过程中均具有极强的结渣和沾污特性。因此，常规的灰熔点判别指标已经无法全面表征高碱煤的结渣和沾污性能，必须以灰成分为主综合评判高碱煤的结渣与沾污性能[5-6]。

西安热工院进行了数十台锅炉掺烧高碱煤现场试验。从试验结果来看，高碱煤锅炉的结渣和沾污与国内早期常见的神华煤等有较明显的区别。图 1 为某 150 t/h 锅炉进行全烧准东高碱煤试验时

炉膛结渣和对流受热面沾污情况。神华煤等锅炉的结渣主要发生在炉膛高温区（上层燃烧器到燃尽风区域），但高碱煤的结渣主要是因碱金属的气化和凝结引起，因此和烟气接触的位置（从顶棚管到冷灰斗）都有可能结渣。同时因高碱煤极低的灰熔点，水冷壁上一般很难形成很厚的渣层，达到 3~5 cm 时即会因渣层表面达到熔融温度而呈液态，在水冷壁上形成“流渣”，液态渣到达冷灰斗后温度降低而凝固，导致冷灰斗出现“堆渣”。这在很多发电企业出现过，也是导致机组被迫停运的主要原因。到了对流受热面，此时的灰分基本已经凝固成颗粒，但因碱金属的存在，固态颗粒也有很强的黏结性，很容易出现图 1 所示的沾污现象，而且该现象在约 600 ℃以上的烟温范围内都可能发生。

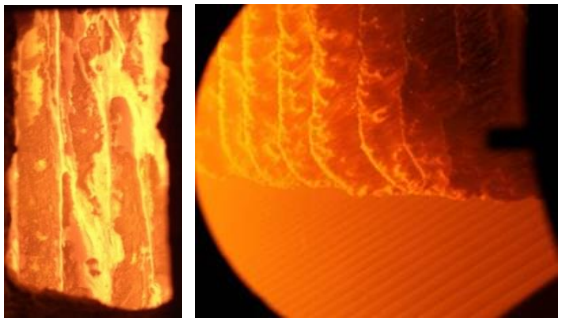

图 1 高碱煤锅炉结渣和沾污
Fig.1 Slagging and fouling of high alkali coal boilers

除了结渣与沾污问题，高碱煤普遍水分较高，易导致制粉系统干燥出力不足。尤其是常规中低水分烟煤锅炉改烧高碱煤时，因锅炉一次风温低，为满足磨煤机出口温度要求，只能大幅增加一次风量，使得一、二次风配比失调，炉内动力场偏离设计值。此外，过高的一次风速还极易导致煤粉细度变粗、火焰中心升高、煤粉气流刷墙等。上述问题对于燃用非结渣煤种锅炉的影响可能主要是锅炉效率、NO_x 生成等，但对于燃用强结渣高碱煤的锅炉会进一步加剧结渣过程，因此改烧高碱煤的锅炉除了要直接解决结渣和沾污的问题，还要同步解决制粉系统干燥出力不足的问题[7]。

2 高碱煤燃烧技术研究现状

2.1 国外高碱煤燃烧技术研究概况

从世界范围来看，美国、德国、澳大利亚等均有高碱煤分布。美国的高碱煤多为烟煤，与我国准东高碱煤比较接近；德国和澳大利亚高碱煤主要是褐煤[8]。虽然有较大储量的高碱煤存在，但国外的高碱煤基本都是通过与低碱煤掺烧，将碱金属质量分数降低到安全水平后再入炉燃烧，没有长周期全烧或大比例掺烧高碱煤的需求，也缺少相关经验。

国外虽然没有长周期全烧高碱煤的现实需求，但其电站锅炉也出现过燃用高碱煤引起的结渣问题，因此对电站锅炉安全燃用高碱煤技术也进行了一定的研究，总结出了一些原则性技术方向，如尽可能选用较低的热负荷参数（炉膛容积热负荷 q_V、炉膛断面热负荷 q_F 和燃烧器区域壁面热负荷 q_B），布置尽可能多的吹灰器，要进行深入的运行参数优化等。目前国内的高碱煤锅炉技术发展也大体上沿用这些技术思路。

2.2 国内高碱煤燃烧技术研究

在我国新疆高碱煤尚未大规模开发利用之前，国内大多数的烟煤和无烟煤矿区煤灰中碱金属（Na_2O+K_2O）质量分数小于 3%。广西晚二叠纪煤田个别矿区和煤层中碱金属质量分数较高，可达 7%～8%。而在褐煤中，碱金属质量分数则经常大于 3%。最突出的是广西捻坪黄华洞 I 号矿层的灰成分中，（Na_2O+K_2O）质量分数高达 12.08%[8]，内蒙古胜利褐煤中个别煤层的（Na_2O+K_2O）质量分数也较高。上述煤矿周边均有足够储量的低碱煤，通过掺配后可将煤灰中碱金属质量分数降低到安全水平，未见长期全烧或大比例燃用这些煤的报道。

在我国高碱煤大规模开发利用之前，国内相关科研单位即已对煤中碱金属对燃烧的影响展开研究。东南大学[9-11]、华中科技大学[12]等较早地对煤中钠的赋存形态、燃烧过程中的迁移规律等进行了研究。在准东高碱煤大规模开发以后，西安交通大学[13]、浙江大学[14]、上海理工大学[15]等高校针对准东高碱煤，对煤中碱金属的赋存形态、燃烧过程中钠的释放规律、迁移过程等进行了机理性研究。文献[16-17]中对我国高碱煤中碱金属迁移转化规律及结渣沾污机理研究进展进行了比较全面的介绍。总体而言，通过上述基础研究，基本上掌握了高碱煤的结渣、沾污机理，为后续结渣、沾污防控技术开发提供了理论指导。

我国高碱煤储量大，尤其是准东地区周边没有足够储量的低碱煤可供掺烧，只能大比例甚至全烧高碱煤，这是国外未曾面对的问题。国家科技部将新疆高碱煤安全高效燃用问题列入了 2015 年度国家科技支撑计划项目，组织国内煤燃烧、锅炉制造领域的主要研究力量，对大型煤粉锅炉全烧高碱煤

技术开展了联合攻关。通过项目实施，提出了新建660 MW 机组锅炉全烧高碱煤的一体化设计方案[18]，目前 3 个示范工程已全部投运。从实际运行结果来看，高碱煤掺烧比例得到了大幅提高，但全负荷段100%全烧高碱煤的目标还未完全实现。

流化床锅炉是煤粉锅炉之外在电力行业得到广泛应用的另一种炉型。新疆地区大型流化床锅炉很少，目前仅华电米东电厂有 2 台 300 MW 机组流化床锅炉在役。该厂 2010 年大比例燃用高碱煤时出现了严重的受热面沾污问题，2 台锅炉相继被迫停炉清理；目前其准东高碱煤掺烧比例一直控制在70%以下，难以进一步增大掺烧比例。清华大学针对流化床锅炉全烧高碱煤技术问题进行了较深入研究，提出了相应技术方案。主要思想是通过受热面优化布置，利用灰的循环冲刷对流受热面进而防止沾污层生成。利用该技术建造的 260 t/h 纯烧高碱煤流化床锅炉运行 1 年后检查发现，锅炉结渣、沾污控制较好[3]，目前存在的问题是对流受热面磨损较严重，影响机组长周期运行，如何在防沾污和防磨损方面实现平衡还待进一步研究。

为彻底解决全烧高碱煤问题，科技部于 2018 年设立了国家重点研发计划项目“新型高碱煤液态排渣锅炉关键技术”，目前已在华能杨柳青电厂完成工业示范。168 h 试验结果显示，炉膛和对流受热面未发现严重结渣和沾污问题，但受试验条件限制未能进行更长时间的验证试验。与固态排渣锅炉不同，液态排渣锅炉尾部的总灰量要显著减少，这对缓解沾污有利。但因气态碱金属难以在炉膛内被有效捕集，更容易在尾部受热面出现富集，这对防止对流受热面沾污又是不利的。施圣康[19]介绍了 Leland olds 电厂液态排渣旋风炉燃用高钠褐煤时的运行情况，碱金属在锅炉尾部出现明显富集，经检测飞灰中 Na_2O 质量分数达 25%，锅炉尾部沾污严重，其认为液态排渣锅炉不适用于燃用高碱煤。周广钦[20]、贾子秀[21]等的试验结果也显示，液态排渣锅炉高温区中碱金属呈气态，并不能很好地被液态渣捕集，大部分随烟气进入尾部对流受热面，导致尾部烟气中碱金属质量分数更高。因国内缺乏液态排渣锅炉长周期燃用高碱煤的实践经验，液态排渣锅炉燃用高碱煤技术还需要进行更深入研究。

除了研究新的全烧高碱煤锅炉技术，对于早期投运的锅炉，因其未按高碱煤进行针对性设计，只能采取措施尽量提高高碱煤的掺烧比例，而无法全烧高碱煤。现役非高碱煤锅炉燃用高碱煤最简单直接的方法就是与低碱煤掺烧。大量运行实践证明，根据锅炉设备具体条件及掺烧煤种煤质参数，选择合理的掺烧比例并尽量优化运行参数后，可以保证锅炉安全掺烧高碱煤[22]。

因新疆地区低碱煤储量不足，且价格偏高，为降低燃料成本，相关单位对高碱煤灰改性技术进行了大量研究[23]，市场上也推出了多种高碱煤防结渣添加剂。综合考虑到添加剂使用效果、使用成本、供应能力等因素，经过大量机理分析[24-25]及试验研究[26]，发现高碱煤矿伴生的高岭土在现阶段最适合作为防结渣添加剂。目前准东地区绝大部分发电企业已经用高岭土替代了低碱煤，显著降低了企业燃料成本。

高碱煤引起结渣和沾污的根源是煤灰中碱金属（新疆煤主要是钠）质量分数高。相关单位开发了准东高碱煤脱钠技术，经测试脱钠煤的结渣和沾污特性明显减弱[27]，但该技术目前主要还面临大规模生产的成本控制问题，距离商业化运行还有较大距离。

除了从燃料本身着手，相关单位还对锅炉改造技术进行了大量研究。对于新疆高碱煤，主要从结渣、沾污防控和提高制粉系统干燥出力 2 方面展开研究。西安热工院开发的技术已进入了工程应用阶段。在结渣防控方面，主要是对燃烧器进行针对性改造，包括切圆优化、旋流强度优化、新增防渣风系统等。这些是防控结渣的主动措施。对于大比例燃用高碱煤的锅炉，结渣只能尽量减轻，而无法完全杜绝，因此可靠的吹灰系统就成为高碱煤锅炉安全运行的重要保障。高碱煤锅炉普遍实现了吹灰器的全覆盖，如 30 万等级机组锅炉炉膛吹灰器数量由常规锅炉的 60 只左右普遍增加到 100 只以上。此外，为防止制粉系统干燥出力不足导致的一次风率过高，破坏炉膛动力场，西安热工院针对性开发了提高制粉系统干燥出力技术[28]，目前已经在新疆地区多台机组上得到应用，将一次风温由改造前的290~320 ℃提高到了 340~380 ℃，满足了燃用高水分高碱煤时制粉系统干燥要求。通过综合性改造，提高锅炉对高碱煤适应能力，高碱煤掺烧比例由不足 60%提高到了 80%左右。

3 现役机组锅炉高碱煤燃用现状

经过十余年的研究，国内在高碱煤燃用技术领域取得了显著的进步，相关技术应用于发电企业后也取得了良好的效益。本节对国内燃用高碱煤典型

机组目前的运行情况进行介绍。

炉膛大小，尤其是炉膛关键热负荷参数对结渣、沾污防控能力有直接影响，机组容量不同，其炉膛热负荷参数等有很大的差异。总体上来说，机组容量越小，炉膛热负荷参数越高，结渣、沾污防控能力越差[3]。为便于对比，本文按机组容量分为 150 MW 等级、300 MW 等级、660 MW 等级 3 类，分别对锅炉高碱煤燃用现状进行介绍。

3.1 150 MW 等级机组锅炉高碱煤燃用现状

新疆地区供热机组及自备电站多，目前仍有大量 150 MW 等级机组在役，表 2 为典型机组锅炉设备参数及运行性能。

由表 2 可见，这些机组锅　炉热负荷参数均较高，炉膛容积热负荷 q_V 普遍在 100 kW/m^3 以上，截面热负荷 q_F 在 3.2~3.5 MW/m^2，燃烧器区壁面热负荷 q_B 在 1.15~1.25 MW/m^2。

表 2 150 MW 等级机组锅炉设备参数及运行性能

Tab.2 Boiler equipment parameters and operation performance of 150 MW power generation unit

项目	阜康发电①	阜康热电②	中泰阜康③	新疆众和④
锅炉蒸发量/(t·h^{-1})	480	440	540	520
机组容量/MW	150	125	150	150
炉膛断面尺寸/m	11.34×10.41	10.41×10.41	11.36×11.36	11.36×11.36
上一次风距屏底距离/m	13.02	13.15	13.52	14.15
炉膛容积热负荷/(kW·m^{-3})	111.2	126.0	112.7	111.0
炉膛截面热负荷/(MW·m^{-2})	3.35	3.45	3.38	3.28
燃烧器区壁面热负荷/(W·m^{-2})	1.21	1.25	1.16	1.23
磨煤机配置	4×MPS150	4×ZGM80N	4×ZGM65G	4×ZGM80G
锅炉设计一次风温/℃	307	273	336	380
高碱煤掺烧比例/%	~80	＜65	~80	~70

①华电阜康发电有限公司简称阜康发电。
②华电阜康热电有限公司简称阜康热电。
③中泰化学阜康能源有限公司简称中泰阜康。
④新疆众和股份有限公司简称新疆众和。

新疆众和锅炉的设计煤是准东高碱煤，但锅炉设计时对高碱煤的认识还不深入，除了一次风温设计值较高可以满足制粉系统干燥出力外，锅炉主要参数与其他几个按常规烟煤设计的锅炉基本没有明显区别，使得结渣、沾污防控能力也无明显提高。

在掺烧高碱煤初期，4 个企业锅炉高碱煤掺烧比例均难以超过 60%，阜康热电锅炉高碱煤掺烧比例更是只能控制在 50%以下。西安热工院对阜康发电和中泰阜康锅炉进行了改造（燃烧系统、吹灰系统、制粉系统改造、运行参数深度优化调整），对新疆众和锅炉进行了运行参数深度优化调整，同时企业自行大幅增加了吹灰器数量，目前 3 个企业锅炉高碱煤掺烧比例达到 70%~80%。阜康热电仅进行了燃烧系统优化调整，目前高碱煤掺烧比例难以超过 65%。

3.2 300 MW 等级机组锅炉高碱煤燃用现状

表 3 为新疆地区几个有代表性的 300 MW 等级机组锅炉参数及高碱煤掺烧情况。

信发铝电 300 MW 机组锅炉为常规烟煤锅炉，容积热负荷高，一次风温也低，燃用高碱煤时同时存在制粉系统干燥出力不足及结渣、沾污问题，高碱煤掺烧比例基本在 60%~70%，基于现有设备很难再进一步提高。

其余 3 个企业的锅炉设计煤即为高碱煤，设计一次风温高，磨煤机干燥出力满足要求，主要差异在结渣、沾污防控能力方面。

五彩湾 1 期机组是准东地区投运的首台 350 MW 等级机组，锅炉采用前后墙对冲燃烧方式，因设计时国内对高碱煤的认识还不深入，结渣和沾污防控措施考虑不足，投运初期高碱煤掺烧比例最高只能达到 75%，炉膛结渣和对流受热面沾污均很严重。为解决大比例燃用高碱煤问题，电厂先后进行了锅炉运行参数深度优化调整、防结渣添加剂掺烧等工作，最终选择高岭土作为添加剂，目前掺烧 8%~10%左右高岭土，锅炉运行平稳。

新疆其亚是准东地区较早投产的企业。其锅炉使用切圆燃烧方式，采用了更低的热负荷参数；为了降低燃烧器区域燃烧强度，比常规设计增加了 1 台磨煤机；锅炉也配置了足够多的吹灰器：整体上对高碱煤的适应能力有了较大提高，与低碱煤掺

烧时高碱煤掺烧比例可达到 80%。

天池昌热机组是新疆地区后期投运的设计燃用高碱煤的 300 MW 等级机组，锅炉设计阶段即对燃烧系统、吹灰系统进行了针对性优化，采用了更低的炉膛热负荷参数，尤其是容积热负荷是目前同容量机组中的最小值之一，是目前新疆地区对高碱煤适应能力最强的锅炉，在与低碱煤掺烧时高碱煤掺烧比例可达到 80%以上。

表 3 300 MW 等级机组锅炉设备参数及运行性能
Tab.3 Boiler equipment parameters and operation performance of 300 MW power generation unit

项目	信发铝电①	五彩湾 1 期②	新疆其亚③	天池昌热④
机组容量/MW	300	350	360	350
炉膛断面尺寸/m	14.05×14.02	15.10×13.68	15.42×16.54	14.63×14.63
上一次风距屏底距离/m	19.98	23.15	20.47	22.02
炉膛容积热负荷/(kW·m^{-3})	99.92	86.27	81.28	78.19
炉膛截面热负荷/(MW·m^{-2})	4.41	4.44	3.82	4.32
燃烧器区壁面热负荷/(W·m^{-2})	1.39	1.48	1.17	1.20
磨煤机配置	5×HP863	5×ZGM95N	6×HP863	6×MPS170HP-IIA
设计一次风温/℃	315	379	374	369
高碱煤掺烧比例/%	60~70	~75	~80	~80

①新疆农六师煤电有限公司简称信发铝电。
②华电五彩湾发电有限公司 1 期简称五彩湾 1 期。
③新疆其亚铝电有限公司自备电厂简称新疆其亚。
④新疆昌吉特变能源有限责任公司简称天池昌热。

3.3 600 MW 等级机组锅炉高碱煤燃用现状

表 4 为新疆地区近年来投运的设计燃用准东高碱煤的 660 MW 机组，包括了国内三大锅炉厂不同技术流派的产品。

表 4　600 MW 等级机组锅炉设备参数及运行性能
Tab.4 Boiler equipment parameters and operation performance of 600 MW power generation unit

项目	特变北一①	五彩湾 2 期②	恒联③	华电北一④
锅炉厂家	哈锅⑤	哈锅	上锅⑥	东锅⑦
炉型	∠型	∠型	塔式	∠型
燃烧方式	切圆	对冲	切圆	对冲
机组容量/MW	660	660	660	660
炉膛截面尺寸/m	20.40×19.08	25.87×16.67	20.36×20.36	23.53×16.98
上一次风与屏底距离/m	27.1	27.9	28.3	27.2
容积热负荷/(kW·m^{-3})	59.41	50.4	64.38	59.26
截面热负荷/(MW·m^{-2})	3.98	3.72	3.84	3.84
燃烧器区壁面热负荷/(MW·m^{-2})	1.18	0.84	1.21	1.08
磨煤机配置	6×MPS212HP-II	7×ZGM113K-II	6×ZGMII3K-III	6×ZGM113K-III
高碱煤掺烧比例/%	~90	~97	~92	~90
掺配物质	高岭土	高岭土	高岭土	高岭土

①新疆准东特变能源有限责任公司简称特变北一。
②华电五彩湾发电有限公司 2 期简称五彩湾 2 期。
③新疆恒联电厂有限公司简称恒联。
④华电新疆五彩湾北一发电有限公司简称华电北一。
⑤哈尔滨锅炉厂有限责任公司简称哈锅。
⑥上海锅炉厂有限公司简称上锅。
⑦东方电气集团东方锅炉股份有限公司简称东锅。

恒联是表 4 几个电厂中最先投运的，采用了上锅的切圆燃烧塔式锅炉，容积热负荷采用了较大值，但锅炉对高碱煤的适应性也达到了比较高的水平，目前掺烧 8%左右高岭土的情况下结渣和沾污可控，机组可长周期安全运行。恒联锅炉运行情况显示，塔式锅炉在燃用高碱煤领域有一定的优势。

华电北一采用了东锅的前后墙对冲燃烧方式Π型锅炉，也选取了比较低的热负荷参数，与低碱煤掺配时高碱煤的安全掺烧比例在 80%左右，与高岭土掺配时高碱煤掺烧比例可达到 90%以上。从现场测试结果来看，除了结渣、沾污问题，限制高碱煤比例提高更主要因素是锅炉辅机选型偏小，余量不足。

特变北一选用的哈锅切圆燃烧Π型锅炉，锅炉热负荷参数与华电北一接近，但对高碱煤适应性相对较强，目前与低碱煤掺配的情况下高碱煤比例可达到 85%左右，与高岭土掺配时高碱煤掺烧比例可以达到 90%。

五彩湾 2 期机组是国家科技支撑计划项目的示范工程之一。由表 4 可见，该锅炉采用了最低的热负荷参数，已经是目前 660 MW 等级机组锅炉的最低值。为了降低燃烧器区域壁面热负荷，比常规设计多选了 1 台磨煤机，采用了 7 台磨煤机的配置方式。另外，锅炉还配备了带有智能吹灰的水力吹灰系统（主要作为应急保障措施，实际运行中基本不投运）、更宽的受热面间距、针对性设计的燃烧器等。通过采取以上措施，五彩湾 2 期 660 MW 机组是目前已投运机组中对高碱煤适应性最强的，在掺配 3%左右高岭土的情况下即可长周期安全稳定运行。运行 1 年后检查发现，受热面基本没有明显的结渣和沾污，预估在水力吹灰器正常投运的情况下，锅炉具有全烧高碱煤的潜力。

西安热工院同步调研了准东地区已投运的其他几台 660 MW 机组运行情况，发现在采用了低的炉膛热负荷参数后，炉膛结渣问题已经得到显著改善，只是偶有出现，目前存在的主要问题是屏区及对流受热面沾污，说明降低炉膛热负荷参数是高碱煤锅炉开发的正确方向，后期进一步提高高碱煤掺烧比例的难点是对流受热面沾污问题。

3.4 小结

从上述企业锅炉高碱煤燃用情况来看，新建锅炉提高高碱煤适应性的主要技术措施是采取低的关键热负荷参数（即炉膛放大、燃烧器间距拉开等）、燃烧器针对性设计、拉大对流受热面间距、吹灰器全覆盖、启动后运行参数深度优化调整等，高碱煤掺烧比例可达到 90%以上。对于大量在役锅炉改烧高碱煤，炉膛已无法进行大的改造，只能在燃烧系统、吹灰系统、制粉系统等方面针对高碱煤特性进行针对性改造，尽可能提高对高碱煤适应能力，高碱煤掺烧比例最高也只能达到 80%左右。

表 5 为新疆地区若干企业锅炉高碱煤燃用比例和煤质参数，数据均来源于近期锅炉性能试验报告。这些企业的锅炉或在设计过程中采取了针对性技术措施，或进行过大比例燃用高碱煤运行优化及改造，整体上对高碱煤适应能力比较好，其高碱煤燃用水平可以代表同类锅炉的先进水平。由表 5 可见，通过针对性改造后，300 MW 及以下容量机组锅炉可长周期安全燃用灰中 Na_2O 质量分数为 3%左右的高碱煤（考虑到 K_2O，煤灰中碱金属质量分数在 4%左右）；经过针对性设计，660 MW 等级机组锅炉可燃用煤灰中 Na_2O 质量分数为 4%左右的高碱煤（煤灰中总的碱金属质量分数在 5%左右）。

表 5 典型锅炉高碱煤燃用情况
Tab.5 Combustion of high-alkali coal in typical boilers

项目	阜康发电	中泰阜康	新疆其亚	五彩湾 2 期
机组容量/MW	150	150	360	660
高碱煤掺烧比例/%	80	80	80	97
灰中 Na_2O 质量分数/%	2.89	2.98	3.02	4.05
灰中 K_2O 质量分数/%	1.47	2.35	1.61	1.76
灰中折算碱金属质量分数①/%	3.86	4.53	4.08	5.21

①根据文献[4]，煤灰中折算碱金属质量分数等于 $w(Na_2O)+0.66w(K_2O)$。

从历年西安热工院对新疆高碱煤的取样及各企业送样化验结果来看，哈密地区高碱煤灰中 Na_2O 质量分数多在 4%以下，而准东地区高碱煤灰中 Na_2O 质量分数多在 4%以上。因此可以说现有技术已经可以实现 100%燃用哈密地区高碱煤，但全燃准东高碱煤技术还需要进一步研究。

4 结论及展望

4.1 主要结论

1）本文对我国高碱煤燃烧技术发展现状及现役锅炉高碱煤燃用情况进行了介绍。大比例甚至全烧高碱煤是我国面临的独特问题，国外可供借鉴经验少，必须自主研发。通过十余年的研发，我国高碱煤燃用技术已经取得了巨大的进展，锅炉高碱煤燃用比例已经由不足 60%提高到 90%以上。

2）通过针对性设计，包括炉膛热负荷合理选取、受热面优化布置、燃烧系统优化设计、吹灰系统优化设计等，新建锅炉燃用灰中 Na_2O 质量分数 4%以下高碱煤问题已经可以解决，但燃用更高 Na_2O 质量分数高碱煤的技术问题仍有待进一步研究。

3）大量现役 300 MW 及以下等级机组锅炉对高碱煤适应能力较弱，通过燃烧系统、吹灰系统、制粉

系统等的优化改造，可将高碱煤掺烧比例提高到80%左右，但进一步提高掺烧比例技术还有待突破。

4）塔式锅炉在选用更大的热负荷参数情况下，可以达到Π型锅炉相同的高碱煤适应能力，显示塔式锅炉在高碱煤结渣、沾污防控方面有一定的优势。

5）固态排渣煤粉锅炉、流化床锅炉、液态排渣锅炉在燃用高碱煤时各有自身的优缺点，但考虑到固态排渣煤粉锅炉和流化床锅炉存量机组数量占绝大部分，这 2 种类型锅炉燃用高碱煤技术突破的需求更为迫切。

4.2 高碱煤燃烧技术展望

1）对于准东、哈密等地区，煤矿本身伴生的高岭土等矿物作为添加剂，已经可以用较低的成本很好地解决锅炉燃用高碱煤时的结渣、沾污问题，足以保障周边机组的长周期安全稳定运行。但新疆煤目前已经成为整个西北、西南地区的主力煤种，后期的燃用量还将进一步增大，这些地区没有高岭土等低成本添加剂可供掺配，锅炉大比例掺烧甚至全烧高碱煤技术仍有较大的需求。

2）前期已经确认降低炉膛尖峰温度水平、抑制碱金属的挥发、减少烟气与受热面接触等是减轻高碱煤锅炉结渣和沾污的有效技术途径，现阶段采用的炉膛放大、燃烧器间距拉开等措施也都是遵循这一原则，但这些措施有其局限性，因此需要研究新的技术方案，如烟气再循环技术、高效贴壁风技术、温和与极度低氧稀释（moderate & intense low oxygen dilution，MILD）燃烧技术、智能燃烧技术。这些技术或技术组合，有可能是进一步破解高碱煤燃烧难题的钥匙。

［参 考 文 献］

［1］ 周新贞, 王海, 邓建. 依靠新疆优势煤炭资源支持中原经济区建设[J]. 中州煤炭, 2013(8): 127-130.
ZHOU Xinzhen, WANG Hai, DENG Jian. Relying on Xinjiang's advantageous coal resources to support the construction of Central Plains Economic Zone[J]. Zhongzhou Coal, 2013(8): 127-130.

［2］ 赵菲菲, 敬莉. “一带一路”背景下的新疆煤炭产业生态产业链构建研究[J]. 伊犁师范学院学报(社会科学版), 2015(3): 56-62.
ZHAO Feifei, JING Li. Research on the construction of Xinjiang coal industry eco-industrial chain under the background of “one belt one road”[J]. Journal of Yili Normal University, 2015(3): 56-62.

［3］ 史航, 吴海燕, 吴玉新, 等. 260 t/h 纯烧准东煤循环流化床锅炉设计与运行[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 28-32.
SHI Hang, WU Haiyan, WU Yuxin, et al. Design and operation of the 260 t/h circulating fluidized bed boiler burning Zhundong coal[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 28-32.

［4］ 电站煤粉锅炉入炉燃料的分类和选择: T/CEC 154—2018[S]. 北京: 中国电力企业联合会, 2018: 1.
In-furnace fuel classification and selection for the coal burning power boilers: T/CEC 154—2018[S]. Beijing: China Electricity Council, 2018: 1.

［5］ 刘家利. 准东煤灰熔融性与灰成分相关性分析[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(5): 99-102.
LIU Jiali. Correlation analysis of ash fusibility and ash composition of Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5): 99-102.

［6］ 刘家利, 苏国庆, 张小宏, 等. 高碱金属煤煤灰沾污特性评价方法[J]. 热力发电, 2016, 45(1): 9-13.
LIU Jiali, SU Guoqing, ZHANG Xiaohong, et al. Evaluation method for ash fouling characteristics of coals with high alkali content[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(1): 9-13.

［7］ 常家星, 杨忠灿, 李尚华, 等. 480 t/h 锅炉改烧准东煤改造[J]. 热力发电, 2014, 43(3): 116-119.
CHANG Jiaxing, YANG Zhongcan, LI Shanghua, et, al. Retrofitting for burning Zhundong coal for a 480 t/h boiler[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(3): 116-119.

［8］ 杨忠灿, 刘家利, 姚伟. 准东煤灰沾污指标研究[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(2): 81-84.
YANG Zhongcan, LIU Jiali, YAO Wei. Fouling index of Zhundong coal ash[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(2): 81-84.

［9］ 汉春利, 张军, 刘坤磊, 等. 煤中钠存在形式的研究[J]. 燃料化学学报, 1999, 27(6): 575-578.
HAN Chunli, ZHANG Jun, LIU Kunlei, et al. Mode of occurrence of sodium in coals[J]. Journal of fuel chemistry and technology, 1999, 27(6): 575-578.

［10］张军, 汉春利, 刘坤磊, 等. 煤中碱金属及其在燃烧中的行为[J]. 热能动力工程, 1999, 14(2): 83-85.
ZHANG Jun, HAN Chunli, LIU Kunlei, et al. Various forms of alkali metal in coal and its behavior during coal combustion[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. 1999, 14(2): 83-85.

［11］张军, 汉春利, 颜峥, 等. 煤中钠在燃烧初期行为的研究[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(1): 49-53.
ZHANG Jun, HAN Chunli, YAN Zheng. Experimental studies on the behavior of sodium for coal in the initial stage of combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(1): 49-53.

［12］刘小伟, 徐明厚, 姚洪, 等. 煤中钠元素赋存形态对亚微米颗粒物形成的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(9): 1589-1592.
LIU Xiaowei, XU Minghou, YAO Hong, et al. Study of occurrence mode of sodium effect on the submicron ash particle formation during coal combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics. 2009, 30(9): 1589-1592.

［13］翁青松, 王长安, 车得福, 等. 准东煤碱金属赋存形态及对燃烧特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(3): 216-221.
WENG Qingsong, WANG Changan, CHE Defu, et al. Alkali metal occurrence mode and its influence on combustion characteristics in Zhundong coals[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(3): 216-221.

［14］刘敬, 王智化, 项飞鹏, 等. 准东煤中碱金属的赋存形式及其在燃烧过程中的迁移规律实验研究[J]. 燃料化

学学报, 2013, 42(3): 316-322.
LIU Jing, WANG Zhihua, XIANG Feipeng, et al. Modes of occurrence and transformation of alkali metals in Zhundong coal during combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 42(3): 316-322.

[15] 陈川, 张守玉, 刘大海, 等. 新疆高钠煤中钠的赋存形态及其对燃烧过程的影响[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(7): 832-838.
CHEN Chuan, ZHANG Shouyu, LIU Dahai, et al. Existence form of sodium in high sodium coals from Xinjiang and its effect on combustion process[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(7): 832-838.

[16] 江锋浩, 张守玉, 黄小河, 等. 高碱煤燃烧过程中结渣机理研究进展[J]. 煤炭转化, 2018, 41(2): 1-8.
JIANG Fenghao, ZHANG Shouyu, HUANG Xiaohe, et al. Research progress on slagging mechanism during high alkali coal combustion process[J]. Coal Conversion, 2018, 41(2): 1-8.

[17] 吕俊复, 史航, 吴玉新, 等. 燃用准东煤过程中碱_碱土金属迁移规律及锅炉结渣沾污研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 377-385.
LYU Junfu, SHI Hang, WU Yuxin, et al. Transformation of AAEM and ash deposition characteristics during combustion of Zhundong coal[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 377-385.

[18] 赵勇纲, 王志超, 张喜来, 等. 纯燃高碱煤 660 MW 机组防结渣沾污一体化设计[J]. 热力发电, 2018, 47(3): 104-122.
ZHAO Yonggang, WANG Zhichao, ZHANG Xilai, et al. Integrated design of anti-slagging and fouling for a 660 MW unit burning pure high alkali coal[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(3): 104-122.

[19] 施圣康. 锅炉向燃用劣质煤发展[J]. 发电设备, 1988(2): 44-45.
SHI Shengkang. Development of boilers to burn inferior coal[J]. Power Equipment, 1988(2): 44-45.

[20] 周广钦. 准东煤立式旋风炉燃烧及沾污特性试验研究[D]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2019: 22-30.
ZHOU Guangqin. Experimental study on combustion and contamination characteristics of Zhundong coal in vertical cyclone furnace[D]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. 2019: 22-30.

[21] 贾子秀, 周广钦, 李宇航, 等. 碱性金属在立式旋风炉上的迁移规律研究[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 81-86.
JIA Zixiu, ZHOU Guangqin, LI Yuhang, et al. Migration law of alkaline metal in vertical cyclone furnace[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 81-86.

[22] 宋清泉, 屠竞毅, 郑少亮, 等. 高钠煤在 660 MW 机组塔式锅炉上的燃用实践[J]. 锅炉技术, 2017, 48(4): 40-44.
SONG Qingquan, TU Jingyi, ZHENG Shaoliang, et al. Practice of high sodium coal combustion for updraft boiler in 660 MW unit[J]. Boiler Technology, 2017, 48(4): 40-44.

[23] 王学斌, 魏博, 张利孟, 等. 温度和 SiO_2 添加物对准东煤中碱金属的赋存形态及迁徙特性的影响[J]. 热力发电, 2014, 43(8): 84-88.
WANG Xuebin, WEI Bo, ZHANG Limeng, et al. Effect of temperature and silicon additives on occurrence and transformation characteristics of alkali mental in Zhundong coal[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(8): 84-88.

[24] 乌晓江, 张翔, 陈楠. 高岭土对新疆高碱煤沾污结渣特性的影响研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(2): 5-9.
WU Xiaojiang, ZHANG Xiang, CHEN Nan. Effect of adding clay on ash fouling/slagging characteristic of Xinjiang high alkali coal[J]. Boiler Technology, 2017, 48(2): 5-9.

[25] 沈铭科, 邱坤赞, 黄镇宇, 等. 准东煤掺烧高岭土对固钠率及灰熔融特性影响研究[J]. 燃料化学学报, 2015, 43(9): 1044-1051.
SHEN Mingke, QIU Kunzan, HUANG Zhenyu, et al. Influence of kaolin on sodium retention and ash fusion characteristic during combustion of Zhundong coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2015, 43(9): 1044-1051.

[26] 李宇航. 准东煤防结渣添加剂应用试验研究[D]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2018: 15-50.
LI Yuhang. Experimental Study on additive applied against slagging of Zhundong coal[D]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. 2018: 15-50.

[27] 陈川, 张守玉, 施大钟, 等. 准东煤脱钠提质研究[J]. 煤炭转化, 2013, 36(4): 14-18.
CHEN Chuan, ZHANG Shouyu, SHI Dazhong, et al. Study on sodium removal for Zhundong coal upgrading[J]. Coal Conversion, 2013, 36(4): 14-18.

[28] 姚伟, 杨忠灿, 蒙毅, 等. 一种提高燃用高水煤种锅炉的热一次风温度的方法: ZL 2013 10224299.4[P]. 2016-03-02.
YAO Wei, YANG Zhongcan, MENG Yi, et al. A method for increasing the temperature of hot primary air of boiler burning high water coal: ZL 2013 10224299.4[P]. 2016-03-02

（责任编辑　刘永强）