

煤矸石烧结砖的热值利用与节能测算模型研究

王云^{1,2}, 潘云², 张军营¹

(1. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 山西省社会科学院能源所, 山西 太原 030006)

摘要:煤炭开采和洗选加工过程中排放出大量的煤矸石, 发展煤矸石烧结砖可节约大量能源, 有利于新型建材“绿色”可持续发展。根据能源的梯级利用原理, 综合考虑煤矸石烧制砖的原料配比、工艺技术以及主要设备情况, 系统地构建了煤矸石砖热值利用节能测算模型, 以山西煤矸石烧制砖为例进行了测算和分析, 结果表明, 2010年山西煤矸石烧结砖行业共节约99.38万t标准煤。

关键词:煤矸石; 建材行业; 热值利用; 节能量

中图分类号: TU522; X751

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)06-0025-05

Study on Utilization of Calorific Values of Coal Gangue Bricks and Calculating Model of Energy Savings

WANG Yun^{1,2}, PAN Yun², ZHANG Junying¹

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Institute of Energy Resources, Shanxi Academy of Social Sciences, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: The large amount of gangues will be produced in the processes of mining and washing of coal, and the development of coal gangue bricks can save a lot of energy resources and also help the green sustainable development of new building materials. Based on the principle of cascade utilization of energy, considering the ratio of raw materials in preparing the coal gangue bricks, technology and techniques, as well as major equipment, the calculating model for utilization of calorific values and energy savings of coal gangue bricks was systematically constructed and, measurements and analysis were done taking the gangue brick prepared with Shanxi coal gangue as example. The results showed that total energy of approximate 993 800 tons of coal equivalent was saved in the industry of coal gangue bricks in Shanxi Province in 2010.

Key words: coal gangue; building materials industry; utilization of calorific value; energy savings

节能工作不仅是建设资源节约型、环境友好型社会的战略举措, 更是贯彻落实科学发展观、实现可持续发展目标的重要手段。一直以来, 建材行业都是耗能大户, “强化节能、保护环境”现已成为建材行业发展中必须解决的首要问题^[1]。煤矸石制作烧结砖项目充分利用煤矸石中的热值, 并对生产过程中产生的大量余热进行合理的回收和利用, 是继煤矸石发电后的又一项煤矸石综合利用工程, 是消除不符合发电要求的煤矸石的有效、彻底的途径之一, 不仅有利于促进煤炭产业的资源二次利用和转型发展, 也有利于促进砖瓦建材行业“绿色”可持续发展^[2]。

收稿日期: 2011-5-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972102, 50936001); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB227003); 山西省统计局科技项目(JN201009)。

作者简介: 王云(1978—), 男, 山西平陆人, 副研究员, 博士, 主要从事能源系统综合评价等方面的研究。

Email: wangyun1978@163.com.

1 山西煤矸石烧结砖热值利用的必要性

煤矸石是同煤炭伴生的含碳量较低的岩石,煤炭工业生产过程中会排放出大量的煤矸石。山西是我国的煤炭大省,全省118个县级行政区中94个县地下有煤,91个县具有煤矿,这些煤矿的生产导致大量煤矸石的生成,对山西部分有代表性的煤矿煤矸石放射性强度检测结果显示,山西从北到南的几处具代表性的煤矿所产煤矸石,无论是内照射指数,还是外照射指数均小于1,其产销与使用范围不受限制。

随着产地不同,层位不同和开采方式不同,煤矸石的化学组成变化很大,但一般在一定范围内浮动。山西省6大煤田(大同、宁武、西山、沁水、霍西和河东)的代表性煤矸石检测资料显示,绝大部分煤矿的煤矸石SiO₂含量高,一般均在40%~60%之间,Al₂O₃含量低,大部分在20%左右,Fe₂O₃含量变化幅度较大。碳含量大于6%、发热量低于2 090 kJ/kg的煤矸石可用作水泥的混合材、混凝土骨料和其它建材制品,也可用于复垦采煤塌陷区和回填矿井采空区;含碳量为6%~20%、发热量介于2 090~6 270 kJ/kg的煤矸石可以生产砖、水泥等制品;含碳量大于20%、发热量为6 270~12 550 kJ/kg的矸石一般用于燃料。

根据山西煤矸石化学成分检测数据分析,适合于全内燃和超内燃烧砖的煤矸石约占80%左右,且数量巨大,用其做砖,可以做到烧砖不用煤,节约大量煤炭,还能有效节约土地、保护环境,推进山西墙体材料的革新^[3]。因此,发展煤矸石烧结砖项目,充分利用其自身的热值和热量,符合山西建设国家清洁能源基地的战略要求,也有利于产业结构优化和山西省节能目标的实现。

2 山西煤矸石烧结砖的热值利用与节能量测算

截至2010年,山西省煤矸石制砖企业共约170家,最大设计产能为36 000万块标砖,95%以上为隧道窑,年产量达到447 224万块标砖。山西发展煤矸石烧结砖热值利用在技术上已经成熟,并且具有非常丰富的工业实践经验和一定的行业发展基础。根据《企业节能量计算方法》(GB/T 13234—2009)并结合参考文献^[8],构建节能量计算公式为

$$\Delta E_c = \sum_{i=1}^n (E_{Dbi} - E_{Dji}) M_i = \sum_{i=1}^n \Delta E_{Di} \times M_i \quad (1)$$

其中: ΔE_c —按产量计算的总节能量,t(标准煤); E_{Dbi} —第*i*个制砖企业当年的单位产品能耗,t(标准煤)/万块标砖; E_{Dji} —第*i*个制砖企业基准年的单位产品能耗,t(标准煤)/万块标砖; M_i —第*i*个制砖企业当年的实际产量,万块标砖; n —煤矸石制砖企业的数量,个; ΔE_{Di} —第*i*个制砖企业的单位产品能耗节能量,t(标准煤)/万块标砖。

在式(1)基础上,根据能源的梯级利用原理,综合考虑煤矸石烧制砖的原料配比、工艺技术以及主要设备情况^[9],构建了煤矸石砖热值利用节能量测算模型。主要包括内燃烧砖节能量模型、余热干燥砖坯节能量模型和余热建筑供暖以及发电节能量模型,这些节能模型的构建和测算将为煤矸石制砖热值利用的节能统计、考核与监测工作提供决策依据。

2.1 内燃烧砖节能量计算

煤矸石烧结砖生产线以煤矿固体废弃物——煤矸石为制砖原料,无需加入任何燃料,利用煤矸石自身的发热量焙烧制品,其发热量的高低在很大程度上影响煤矸石砖的产量和质量。根据近年来生产经验总结,千克煤矸石发热量在1 672~2 090 kJ时为最佳,在不用外投煤的情况下靠煤矸石自身的发热将砖烧好,实现了全内燃烧砖^[10]。该阶段节能量计算公式为

$$\Delta E_{cl} = \sum_{i=1}^{k_1} (Q_{si} \tau_{si} E_{si} + Q_{si} \tau_{si} E_{si} \sigma_{si}) + \sum_{i=1}^{k_2} (Q_{li} \tau_{li} E_{li} + Q_{li} \tau_{li} E_{li} \sigma_{li}) \quad (2)$$

其中: ΔE_{cl} —使用煤矸石作为替代燃料的年节能量,t(标准煤); k_1, k_2 —隧道窑和轮窑制砖企业的数量, $k_1 + k_2 = n$,个; s, l —隧道窑制砖和轮窑制砖企业; Q_i —第*i*个制砖企业当年的设计产能,万块标砖; τ_i —第*i*个制砖企业的实际产能利用率, $\tau_i = M_i / Q_i$,%; E_{si} —隧道窑万块砖煤耗,t(标准煤)/万块标砖; E_{li} 为轮窑万块砖煤耗,t(标准煤)/万块标砖; σ_i —烧结砖的孔洞率,%。

根据制砖企业生产实践,通常烧成每块砖所需原料的内燃值约为 $2.299 \times 10^3 \sim 2.717 \times 10^3$ kJ,折合每万块砖煤耗约为 785.71 ~ 928.57 kg^[11]。由于利用煤矸石自身含有的发热量来焙烧制品,可按照《JC428-91 砖瓦工业隧道窑热平衡、热效率测定与计算方法》^[12] 和《JC 791-2007 轮窑热平衡、热效率测定与计算方法》^[13] 通过式(3)进行测算:

$$E_Q = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k_1} \sum_{i=1}^{k_1} E_{si} + \frac{1}{k_2} \sum_{i=1}^{k_2} E_{li} \right) = \frac{1}{2 \times 4.182 \times 7\,000} \left(\frac{1}{k_1} \sum_{i=1}^{k_1} Q_{Dw_{si}} m_{si} + \frac{1}{k_2} \sum_{i=1}^{k_2} Q_{Dw_{li}} m_{li} \right) \quad (3)$$

其中: E_Q —全省煤矸石制砖企业每万块砖平均耗标准煤,kJ; Q_{Dw_i} —第*i*个煤矸石制砖企业内燃料干燥基低位发热量,kJ/kg; m_i —第*i*个煤矸石制砖企业每万块砖内燃料(干燥基)掺配量,kg。

根据山西制砖企业的矸石所占比例、烧失量、砖的重量等因素以及生产数据,取全省煤矸石制砖企业每块砖内平均掺煤矸石量约为 1.35 kg,经换算可得每万块砖内燃料(干燥基)掺配量 m_i 约为 1.35×10^4 kg;山西的煤炭资源分布在全省 11 个市的 94 个县(区),煤矸石的分布即在煤炭资源的分布区域内,通过抽样对煤矸石发热量进行统计分析,可知适于制砖最佳热值(1.67 ~ 2.09 MJ/kg)的约占 11.48%;不适宜制砖的低热值矸石(< 1.67 MJ/kg)的约占 13.11%,超热值(> 2.09 MJ/kg)矸石约占 75.41%^[10],在此基础上结合煤矸石企业制砖中矸石所掺平均比例 54%,可估算全省煤矸石制砖企业所用煤矸石的平均干燥基低位发热量(Q_{Dw_i})为 1 732 kJ/kg。依据以上数据和式(3),可测算得到每 1 万块烧结砖含 800 kg 左右标煤的热量。

根据《JC982-2005 砖瓦烧结窑炉》中 5.1.1 条规定^[14]:隧道窑万块砖煤耗小于 4.97×10^6 kJ,轮窑万块砖煤耗小于 4.60×10^6 kJ,按千克标准煤热值 29.27 MJ 计算,隧道窑万块砖耗标准煤 E_{si} 为 1.696 t,轮窑万块砖耗标准煤 E_{li} 为 1.569 t。2010 年全省煤矸石烧结砖企业数量(n)约为 171 家(不包含煤矸石掺比 30% 及以下企业,考虑试产和停产的企业),其中,隧道窑制砖企业数量 k_1 约为 157 家,轮窑制砖企业数量 k_2 为 14 家,全省总设计产能 Q 约为 1 127 944 万块标砖,实际产量 M 为 447 224 万块标砖,现有产能利用率 τ 约为 37% 左右,煤矸石烧结砖瓦平均孔洞率约为 20% 左右。依据以上数据和公式(2) 计算该阶段共节约煤炭约 84.43 万 t 标准煤,其中隧道窑制砖节约煤炭约 78.12 万 t 标准煤,轮窑制砖节约煤炭约 6.30 万 t 标准煤。

2.2 余热利用节能量计算

煤矸石制作烧结砖是利用煤矸石本身所含热能烧砖,在焙烧窑内需要经过预热、烧结以及冷却三个过程。煤矸石砖的烧成温度一般为 950 ~ 1 050 °C,在高温焙烧和保温后进入冷却段其温度仍在 800 °C 左右,此时砖已经烧结,晶型转化基本完成。进入冷却段的砖带有大量热量,这部分热量通过热辐射、对流的方式向窑墙、窑顶、窑车以及助燃空气传递,致使窑车、窑体和多孔砖本身蓄热偏多,最终散发到大气中,从而造成了极大的浪费。焙烧窑生产是连续性的,在冷却段每个位置的环境温度也是相对稳定的,此时的热源洁净无烟尘,这就为余热利用提供了稳定的热源^[15]。目前,煤矸石烧结砖余热利用在生产过程中得到广泛应用,主要利用方式有余热干燥、供暖、热水以及发电等。

2.2.1 余热干燥节能量计算

余热干燥是指利用风机从焙烧窑冷却段抽取热风,送往干燥室干燥砖坯。为满足余热干燥抽取热风的需要,在窑体冷却段设置多组取热支管,在送热风机的作用下,热风首先通过支管进入送热总管道,而后被送入干燥室干燥砖坯。取自焙烧窑冷却段的热气体无尘且不含有害气体,可用于成型后湿砖坯的干燥,含水率由 16% 左右降至 2% 左右,以便使砖坯进入焙烧窑后易于燃烧。干燥室干燥水汽经排潮风机排空,这是目前焙烧窑余热的主要利用方式^[16]。该阶段一次码烧干燥室的热源来自于隧道窑或轮窑烧砖的余热和烟热,无需外热,实现了热能的二次利用,其计算公式为

$$\Delta E_{e2} = \frac{10Gw\eta}{4.182 \times 7000} \left(\sum_{i=1}^{k_1} Q_{si} \tau_{si} E_h + \sum_{i=1}^{k_2} Q_{li} \tau_{li} E_h \right) \quad (4)$$

其中: ΔE_{e2} —使用余热和烟热干燥砖坯的当年节能量,t(标准煤); G —砖坯质量,kg; w —砖坯成型水分,%; η 为热风炉效率,%; E_h —干燥室每万块砖坯热耗,kJ/kg。

根据 2010 年山西省统计局对山西煤矸石制砖企业情况的实际调查数据,干燥室每万块砖坯热耗 E_h 约为 5 016 kJ/kg,全省砖坯平均质量 G 约为 2.5 kg,砖坯成型平均水分 w 约为 16%,制砖企业热风炉平均效率

η 约为 60%，依据以上数据和公式计算该阶段共节约煤炭约 12.87 万 t 标煤，其中隧道窑制砖节约煤炭约 11.84 万 t 标煤，轮窑制砖节约煤炭约 1.03 万 t 标煤。

2.2.2 余热供暖和发电节能量计算

利用先进的低温余热锅炉技术，将隧道或轮窑产生的余热进行有效收集并转化为可用的蒸汽或热水，用于生产、厂区供热以及生活洗澡等，使煤矸石热量得到充分利用，余热锅炉系统省去了锅炉的燃烧系统工程和建筑工程，不仅不产生粉尘污染和化学污染，且不消耗能源，无需配备风机等设备，节约运行费用。同时，还可利用纯低温余热发电技术来有效回收热能。纯低温余热发电是利用 550℃ 左右的烟气余热产生低压过热蒸汽，以推动蒸汽轮机做功发电，该系统的特点是结构简单，易于管理，完全利用余热，无需外加热源发电。经过十几年发展，中国的低温余热发电技术已成熟可靠，以水泥窑余热发电技术为代表，除汽轮机本体效率比日本略低外，总体技术水平已经赶上国际先进水平，目前已在国内的石油化工、水泥、建材、制糖等行业得到了普遍应用，拥有较为成熟可靠的技术工艺。在主要考虑余热建筑供暖和发电方面利用情况下，该阶段节能量计算公式为

$$\Delta E_{c3} = \Delta E_{c3b} + \Delta E_{c3e} = \frac{1}{6\,000} \sum_{i=1}^n Q_i \tau_i \alpha Q_b + \frac{1}{5\,000} \sum_{i=1}^n Q_i \tau_i \beta Q_e \quad (5)$$

其中： ΔE_{c3} —使用余热供暖和发电的年节能量，t(标准煤)； ΔE_{c3b} 、 ΔE_{c3e} —利用余热供暖和发电的当年节能量，t(标准煤)； α 、 β 分别为利用余热供暖和发电所占比例，%； Q_b 、 Q_e 分别为供暖节能量和发电节能量，t(标准煤)；其中，余热建筑供暖可根据式(6)进行测算。

$$Q_b = 3\,600 \times 24D \frac{KF(t_n - t_w)a}{4.182 \times 7\,000 \times 1\,000\,000} \quad (6)$$

其中： D —采暖周期(一年 5 个月)，150 d； K —围护结构的传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； F —围护结构的传热面积， m^2 ； t_n —冬季采暖室内计算温度， $^\circ C$ ； t_w —采暖室外计算温度， $^\circ C$ ； a —透风系数，一般建筑物 $a = 1.00$ ，框架式建筑或建筑在不避风高地上的建筑物，风速小于 4 m/s，风力缓和的地方， $a = 1.25 \sim 1.50$ ；风速大于 4 m/s，风力强劲的地方， $a = 1.50 \sim 2.00$ 。

根据煤矸石制砖余热供暖实践和测算，年产 6 000 万块煤矸石空心砖厂可安装两台 4 t 余热锅炉，可满足山西地区传热面积 F 约为 16 000 m^2 的建筑物采暖(围护结构的传热系数取 1.35 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)，室外计算温度 $-14^\circ C$ ，室内计算温度 $18^\circ C$ ， $a = 1.00$ ^[17]。在煤矸石制砖企业采用烧结砖废气余热发电技术回收烟气余热余能方面，可选配 500 ~ 1 000 kW 的余热发电系统，年产标砖 5 000 万块的制砖企业全年可发电 600 万度电^[17]，按照 GB-T 2589-2008 综合能耗计算通则规定：1 万度电约合折标煤 1.229 t。按照占总产量比重 40% 的企业进行余热供暖，占总产量比重 20% 的企业进行余热发电，根据以上数据和式(5)和式(6)经测算该阶段可实现节能量约为 2.08 万 t 标准煤，其中供暖节能约为 0.85 万 t 标准煤，发电节能约为 1.23 万 t 标准煤。

通过以上测算，2010 年山西省煤矸石烧砖行业，每 1 万块烧结砖约含 800 kg 左右标煤的热量，通过对煤矸石热值的梯级利用，可实现内燃烧砖阶段节能约为 84.43 万 t，余热干燥阶段节能约 12.87 万 t，余热建筑供暖和发电节能约 2.08 万 t，共计节能量约为 99.38 万 t。在此基础上进一步测算可知，随着山西煤矸石烧砖行业产能利用率的不断提高，煤矸石制砖行业还存在巨大的节能潜力(表 1)。

3 结论和建议

充分利用煤矸石资源发展煤矸石烧结砖，

表 1 山西煤矸石制砖企业节能量变动趋势表

Tab. 1 The tendency of energy savings in coal gangue brick enterprises in Shanxi province

产能利用率/%	ΔE_{c1}	ΔE_{c2}	ΔE_{c3}	ΔE_c
37	844 265.8	128 717.4	20 823.66	993 806.9
50	1 140 900.0	173 942.4	28 140.09	1 342 982.0
60	1 369 080.0	208 730.9	33 768.11	1 611 579.0
70	1 597 260.0	243 519.4	39 396.12	1 880 176.0
80	1 825 440.0	278 307.9	45 024.14	2 148 772.0
90	2 053 619.0	313 096.4	50 652.15	2 417 368.0
100	2 281 799.0	347 884.8	56 280.17	2 685 964.0

可实现节煤、节地、建筑节能、减少含硫气体和二氧化碳排放,产生巨大的经济效益、社会效益和环境效益。根据以上测算结果和数据分析,提出以下建议:

1) 加快煤矸石制砖企业规模化和大型化发展,通过扩大市场规模、淘汰落后产能、提高工艺技术等措施,逐步提升行业的产能利用率,充分发挥煤矸石在制砖行业的节能潜力。各煤矸石制砖企业可与供暖企业、煤炭企业加强合作,通过强强联合和项目建设示范,为后续余热利用的大规模推广积累经验。

2) 虽然目前有各种各样的余热回收利用方式,但仍普遍存在着余热利用率低、浪费严重的问题,因此,应加快研发和利用制砖工艺与余热锅炉结合技术,在不影响制砖工艺的前提下,遵循生产过程中产生余热、余压、余能利用“梯级利用,高质高用”的原则,优先把高热量余热余能用于做功、供暖,低热量余热用于制砖物料的预热、干燥窑砖坯的烘干。

3) 充分发挥行业协会、政府主管部门的服务职能,提供信息、技术、政策及管理支持,以降低节能项目实施门槛,促进行业节能工作的开展。落实和协调好各种优惠政策,包括节能奖励和补贴,上网电价优惠,利用CDM机制、优先立项、优惠信贷等相关支持,为煤矸石制砖企业持续发展创造条件。

参考文献:

- [1] 杨晓艳,姬长生. 煤矸石的综合利用[J]. 煤炭技术,2007,26(10):108-110.
YANG Xiaoyan,JI Changsheng. Comprehensive utilization of the coal gangue[J]. Coal Technology,2007,26(10):108-110.
- [2] XIAO W. The reuse and recycle of coal gangue[J]. Environmental Science and Technology,2009,22(1):121-125.
- [3] BIAN Z F,DONG J H,LEI S G,et al. The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland[J]. Environmental Geology,2009,58(3):625-34.
- [4] 中华人民共和国国家标准. GB/T 13234-200,企业节能量计算方法[S].
- [5] 朱建军,刘思峰,张里,等. 基于灰色组合预测的节能政策能源节约量测算模型[J]. 软科学,2009,23(5):42-45.
ZHU Jianjun,LIU Sifeng,ZHANG Li,et al. Energy saving calculation model on energy saving policy based on grey combination forecast[J]. Soft Science,2009,23(5):42-45.
- [6] LI H Q,BAO W J,XIU C H,et al. Energy conservation and circular economy in China's process industries[J]. Energy,2010,35(11):4273-4281.
- [7] 李扬,苏宜强,刘骁. 节能量的测量及其不确定度的研究[J]. 电力需求侧管理,2010,12(4):11-14.
LI Yang,SU Yiqiang,LIU Xiao. A study on the measuring method of energy saving and its uncertainty[J]. Power Demand Side Management,2010,12(4):11-14.
- [8] Efficiency Valuation Organization. International performance measurement & verification protocol 2007, Volume I: concepts and options for determining savings[EB/OL]. [2010-04-10]. <http://www.Evo-world.org>.
- [9] 王玉明. 同煤塔山矿煤矸石制烧结砖工艺技术及应用[J]. 洁净煤技术,2009,15(6):102-104.
WANG Yuming. Application of coal gangue making sintering brick technology in Ta-shan coal mine[J]. Clean Coal Technology,2009,15(6):102-104.
- [10] 隋广田. 论煤矸石烧结空心砖原料制备和码烧生产工艺的技术特点[J]. 中国煤炭,2001,27(9):31-33.
SUI Guangtian. On the technical characteristics of raw material preparation,stacking and sintering process for the production of coal gangue hollow bricks[J]. China Coal,2001,27(9):31-33.
- [11] 陈海军,郭利坤. 怎样使煤矸石砖烧得又好又快[J]. 砖瓦,2007(5):23-24.
- [12] 中华人民共和国行业标准. JC428-91,砖瓦工业隧道窑热平衡、热效率测定与计算方法[S].
- [13] 中华人民共和国行业标准. JC791-2007,轮窑热平衡、热效率测定与计算方法[S].
- [14] 中华人民共和国行业标准. JC982-2005,砖瓦烧结窑炉[S].
- [15] 刘奇志,王德永. 谈煤矸石烧结砖厂余热利用[J]. 砖瓦,2008(1):44-45.
- [16] 孙兴平,王文谋,邓建国. 煤矸石烧结空心砖的节能减排分析[J]. 砖瓦,2010(2):25-27.
- [17] 张迪,刘昕,宋玲玲,等. 煤矸石制砖余热发电研究[J]. 环境保护,2009(10):86-88.
ZHANG Di,LIU Xin,SONG Lingling,et al. Cogeneration of coal gangue brick[J]. Environmental Protection,2009(10):86-88.