专家论坛

基于等效热值的高炉喷吹煤粉性价比评价模型

王广伟，吴君毅，曾宇，詹晓婷，宁晓钧
（北京科技大学冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：以高炉喷煤体系为研究对象，基于Hess定律与热化学原理，构建了修正的等效热值（Q_e）计算模型，有效量化了有机质裂解、水分气化、脱硫反应及灰分造渣等过程的热支出效应。研究结果表明，受还原性气氛及吸热反应制约，煤粉的实际贡献仅为理论总放热量的45%~50%。特别是灰成分对造渣耗热具有显著的非线性影响，高硅铝酸性灰煤种因需配加大量熔剂，其造渣热支出约为低灰煤的3.6倍。进一步构建基于Q_e的性价比评价指数（k值）表明，煤粉经济性受有效热贡献、灰成分造渣耗热、可磨性及综合成本共同控制。高挥发分烟煤凭借低灰、易磨、低造渣热的综合优势，其经济性优于高热值但难造渣的无烟煤。高挥发分烟煤虽基础热值较低，但因低灰、易磨和造渣耗热低，仍具有较好经济适用性；部分高热值无烟煤则可能因造渣和研磨成本较高而削弱使用价值。该评价体系为钢铁企业实现基于使用价值的配煤优化与降本增效提供了理论依据。

关键词：高炉喷煤；等效热值；灰成分；造渣耗热；性价比评价
中图分类号：TF5 **文献标志码：**A **文章编号：**1006-4613(2026)03-0001-08
DOI：10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 03. 001

Cost-performance Evaluation Model for Blast Furnace Pulverized Coal Injection Based on Equivalent Heating Value

WANG Guangwei, WU Junyi, ZENG Yu, ZHAN Xiaoting, NING Xiaojun
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: With the blast furnace coal injection system taken as the research object, a modified equivalent heating value (Q_e)calculation model was established based on Hess′s law and thermochemical principles which effectively quantified the heat expenditure effects of processes including organic decomposition, moisture gasification, desulfurization, and ash slagging. The results showed that constrained by the reducing atmosphere and endothermic reactions, the actual effective heat contribution of coal powder was only 45%~50% of its total theoretical heat release. Particularly, ash composition exerted a significant non-linear influence on slagging heat consumption. For high-silica-alumina acidic coal with acidic ash, large amounts of flux were required, resulting in a slagging heat penalty approximately 3.6 times that of low-ash coal. Furthermore, a Q_e-based cost-performance index (k) showed that pulverized coal economy was governed by effective heat contribution, slagging heat from ash, grindability, and overall cost. High-volatile bituminous coal, though lower in calorific value, remained economical due to low ash, easy grinding, and low slagging heat. Some high-calorific anthracites lost value from higher slagging and grinding costs. This provides a theoretical basis for steel enterprises to

基金项目：京津冀环境综合治理国家科技重大专项资助（2025ZD1206100）
王广伟，博士，教授，博士生导师，主要从事高炉炼铁、资源综合利用、冶金过程节能减排等研究。E-mail：wgw676@163.com

optimize coal blending based on use value, thereby achieving cost reduction and efficiency improvement.

Key words: blast furnace coal injection system; equivalent heating value; ash composition; slagging heat consumption; cost-performance evaluation

高炉喷吹煤粉是炼铁工序优化能源结构与降低碳排放的核心技术[1-4]。随着高风温、高富氧、大喷煤工艺的普及,特别是喷煤比突破200 kg/t铁水后,风口回旋区及炉缸的多相流体动力学与热化学状态日益复杂[5-10]。行业焦点已由追求喷吹量的提升转向高效、安全、低碳的精准喷煤,科学评价煤粉在极端工况下的真实热贡献,成为实现高炉顺行与降本增效的关键[11-13]。

长期以来,工业界主要依据弹筒发热值进行煤质评价与贸易结算。然而,该指标基于常温纯氧环境测定,包含了水蒸气冷凝潜热,且忽略了煤粉在高温(>2 000 ℃)、高压及还原性气氛下的复杂热行为[14-17]。热力学分析表明,水分的高温气化、有机质裂解、灰分升温造渣及硫分在渣铁间的分配均需消耗巨大热量。若忽略这些热支出,单纯以实验室热值指导生产,将系统性高估煤粉的入炉有效放热能力,导致炉缸热制度波动及燃料比失真[18-22]。

为弥补传统评价体系的局限,学界引入了等效热值(Q_e)理论,主张通过扣除物理化学过程耗热来修正低位发热量。尽管现有研究在理论框架上已趋成熟,但多基于理想稳态或通用炉型,缺乏针对特定企业高铝渣系及差异化造渣制度的实证建模。此外,在双碳背景下,如何将等效热值模型与配煤经济性进行深度耦合分析,仍是当前研究的薄弱环节[23-26]。

基于此,本文构建了适用于特定高炉工况的改进型喷吹煤粉等效热值计算模型。重点探究煤粉工业分析及灰成分对有效热值的非线性影响机制,并建立基于等效热值的性价比评价指数(k值)。通过对比不同煤种及配煤方案的真实热贡献与经济效益,旨在量化热支出效应,揭示高热值并不等同于高价值的错误认识,为钢铁企业实现基于使用价值的配煤优化提供理论依据。

1 实验与计算方法

1.1 实验原料与物化特性

实验选取的煤样是目前高炉喷吹所使用的9种煤样,煤样种类包括烟煤、无烟煤和喷吹用混煤。其中煤样1和煤样2为烟煤,煤样3~煤样6为无烟煤,煤样7~煤样9是喷吹用混煤。煤样工业分析、元素分析和弹筒发热量见表1。

表1 煤样工业分析、元素分析及弹筒发热量

Table 1 Proximate Analysis, Ultimate Analysis and Bomb Calorific Value of Coal Samples

煤样	工业分析(质量分数)/%			元素分析(质量分数)/%					弹筒发热量
	A_d	V_d	FC_d	C_d	H_d	O_d	N_d	S_d	MJ/kg
1	4.73	35.11	60.16	69.89	4.89	19.88	0.81	0.33	25.05
2	4.91	34.79	60.30	69.49	5.01	19.90	0.87	0.33	25.07
3	8.99	8.32	82.69	85.26	3.40	0.40	1.08	1.09	30.65
4	12.24	7.33	80.43	82.05	3.09	0.62	1.14	1.11	29.08
5	10.86	7.65	81.49	76.54	2.95	7.70	1.06	1.07	27.28
6	8.81	18.35	72.84	77.70	4.04	8.27	1.00	0.72	27.93
7	8.77	21.88	69.35	77.08	3.72	9.20	0.92	0.70	27.23
8	9.81	22.79	67.40	75.99	3.81	9.34	0.92	0.70	26.93
9	9.21	21.34	69.45	76.81	3.60	9.27	0.92	0.73	26.99

由表1可知,9种煤样在工业组成、元素组成及发热量上差异明显。煤样1和煤样2为典型的高挥发分烟煤(V_d≈35%),氧含量(质量分数,以下同)较高,有利于着火和燃烧反应推进,但起其固定碳含

量较低(FC_d≈60%),弹筒发热量在样品中分别为25.05 MJ/kg和25.07 MJ/kg,处于较低水平,同时灰分低于5%,入炉灰负荷较小。煤样3~煤样5为低挥发分无烟煤,固定碳含量高(FC_d>80%),特别是煤样3弹筒发热量高达30.65 MJ/kg,可作为主要热量来源;煤样4次之,但灰分最高。煤样5虽然固定碳含量较高,但弹筒发热量相对较低。煤样6的挥发分和固定碳介于烟煤与典型无烟煤之间,可作为调节煤种。煤样7~煤样9为喷吹混煤,其挥发分、固定碳、灰分和弹筒发热量均较为接近,表现出配煤后成分稳定、指标居中的特点,有利于在燃烧性、热值贡献和入炉灰负荷之间取得平衡。

各煤样灰成分特点决定高炉造渣制度与排碱策略,煤样灰成分分析(质量分数)见表2。

表2 煤样灰成分分析(质量分数)

Table 2 Ash Composition Analysis of Coal Samples (Mass Fraction) %

煤样	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	SO_3	K_2O	TiO_2	MgO	MnO	其他
1	38.15	14.16	19.28	7.36	13.90	0.55	0.95	3.10	0.16	2.39
2	38.18	16.12	17.56	7.24	14.40	0.50	0.87	2.75	0.14	2.24
3	48.10	34.47	2.47	8.30	0.70	2.43	1.42	0.84	0.03	1.24
4	48.87	39.73	2.24	3.01	0.36	0.58	1.55	0.21	0.01	3.44
5	47.55	38.72	2.87	3.82	0.50	0.78	1.61	0.30	0.02	3.83
6	41.86	24.02	12.10	5.73	9.11	0.63	1.57	1.76	0.10	3.12
7	45.49	28.83	8.71	6.02	4.53	1.18	1.32	1.38	0.11	2.43
8	44.49	27.79	9.58	6.06	5.86	1.18	1.32	1.15	0.12	2.45
9	43.76	28.80	9.22	6.02	5.67	1.18	1.30	1.50	0.11	2.44

由表2可知,各煤样灰成分差异显著,直接影响造渣制度和排碱控制。煤样1和煤样2属于高钙、高硫酸盐灰型,CaO含量分别为19.28%和17.56%,SO_3含量约14%,而(SiO_2+Al_2O_3)含量相对较低,说明其灰分碱性较强,具有一定助熔作用。煤样3~煤样5则表现为典型高硅铝低钙酸性灰,(SiO_2+Al_2O_3)含量分别为82.57%、88.60%和86.27%,CaO均低于3%,单独大量喷吹时会增加炉渣黏度和造渣调控压力。其中,煤样3的K_2O含量高达2.43%,明显高于其他煤样,需关注碱金属循环富集风险。煤样6灰成分介于两类之间,CaO为12.10%,具一定缓冲作用。煤样7~煤样9中的SiO_2、Al_2O_3、CaO和SO_3含量较为接近,表明配煤后灰成分波动减小,有利于稳定高炉渣系和喷吹操作。

煤样可磨性指数(HGI)分析见表3。由表3可知,各煤样HGI值分布在54~80,可磨性差异较明显。煤样1和煤样2的HGI分别为68和70,可磨性较好,有利于降低制粉能耗。煤样3~煤样5的HGI仅为54~57,表明煤质较硬,研磨难度较大,会增加磨煤电耗和设备负荷。煤样6的HGI为61,处于中等水平。煤样7~煤样9为研磨后单煤配置形成的混煤,HGI设定为80。

表3 煤样可磨性指数(HGI)分析

Table 3 Analysis of HGI of Coal Samples

煤样	HGI	煤样	HGI	煤样	HGI
1	68	4	55	7	80
2	70	5	54	8	80
3	57	6	61	9	80

1.2 等效热值模型建立

1.2.1 模型构建的理论基础与热化学框架

基于Hess定律与冶金热化学原理,构建煤粉等效热值(Q_e)计算模型。该模型将煤粉视为独立热力学系统,以其在风口回旋区及炉缸的实际净热贡献为评价基准[27-29]。计算边界条件设定如下:

(1)基准态与终态:基准态为炉缸特征温度298.15 K,终态为炉缸特征温度1 773 K;

(2)反应设定:C反应生成为CO,H反应生成为H_2,S最终生成CaS进入炉渣;

(3)气体利用率:设定CO利用率η_{CO}=50%,H_2利用率η_{H_2}=40%;

(4)造渣制度:针对鞍钢高炉渣系,设定终渣二元碱度R=1.20,镁铝比0.48。

基于上述边界,等效热值Q_e的核心控制方程

可表述为:

$$Q_e = Q_{total}\times\lambda - Q_{doc} - Q_{H_2O} - Q_{slag} - Q_S \quad (1)$$

式中,Q_e为煤粉的等效热值,kJ/kg;Q_{total}为煤粉的空气干燥基总发热量,kJ/kg;λ为高炉喷吹煤粉的CO利用率或H_2利用率,%;Q_{doc}为煤粉有机质分解热(吸热),kJ/kg;Q_{H_2O}为水分气化及水煤气反应耗热,kJ/kg;Q_{slag}为灰分升温、相变及造渣耗热,kJ/kg;Q_S为脱硫反应耗热,kJ/kg。

1.2.2 净发热量与理论总热量

针对中国煤种灰分与氧含量特性,采用修正的Liu-Ju经验公式[30-31]计算煤粉净发热量Q_{net}:

$$Q_{net} = 339\omega(C)_{ad} + 1\,031\omega(H)_{ad} - 109\left[\omega(O)_{ad} - \omega(S)_{ad}\right] - 25.1\omega(M)_{ad} \quad (2)$$

式中,Q_{net}为煤的净发热量,kJ/kg;$\omega(C)_{ad}$、$\omega(H)_{ad}$、$\omega(O)_{ad}$、$\omega(S)_{ad}$为空气干燥基煤中的C、H、O、S含量,%;$\omega(M)_{ad}$为空气干燥基煤中的内部水含量,%。

煤粉元素完全燃烧释放的理论总热量Q_{total}依据元素守恒计算[32]:

$$Q_{total} = Q_C + Q_{CO} + Q_{H_2} = \left[\frac{10\omega(C)_{ad}}{12} - \frac{10\omega(O)_{ad}}{16}\right]\times 408.8 + \frac{10\omega(O)_{ad}}{16}\times 283.4 + 5\omega(H)_{ad}\times 242.0 \quad (3)$$

式中,Q_C为煤粉中C元素完全燃烧释放的热量,kJ/kg;Q_{CO}为煤粉中C元素不完全燃烧生成CO所释放的热量,kJ/kg;Q_{H_2}为煤粉中H元素燃烧释放的热量,kJ/kg。

1.2.3 有机质分解热

煤粉在高炉风口的快速热解为强吸热过程。基于热化学循环原理,分解热等于元素单质理论燃烧热与煤实际净发热量之差:

$$Q_{doc} = Q_{total} - Q_{net} \quad (4)$$

1.2.4 水分气化与水煤气反应耗热

水分耗热包含物理显热、潜热及高温区水煤气反应吸热。考虑高炉内非理想气体状态及碳活度修正[33],取反应焓为124.5 kJ/mol:

$$Q_{H_2O} = \frac{10\times\omega(M)_{ad}}{18}\times 124.5 \quad (5)$$

1.2.5 灰分造渣耗热

造渣耗热是区分煤种经济性的关键。为量化酸性灰需配加助熔剂带来的额外热负荷,引入等效灰分($A_{As,d}$)概念[24],即维持炉渣碱度平衡所需的氧化物等效总量。结合根据FactSage热力学模拟及国内外文献数据,取单位炉渣综合耗热系数为1 937 kJ/kg:

$$Q_{slag} = \frac{\omega(A_{As,d})}{100}\times 1\,937 \quad (6)$$

$$\omega(CaO)_{Eq,coal} = R_2\times\omega(SiO_2)_{coal} \quad (7)$$

$$\omega(MgO)_{Eq,coal} = \beta\times\omega(Al_2O_3)_{coal} \quad (8)$$

$$\omega(A_{As,d}) = \omega(A_d)\times\left\{1 + \left[\omega(CaO)_{Eq,coal} + \omega(MgO)_{coal}\right] - \omega(MgO)_{coal} - \omega(CaO)_{coal} - \omega(Fe_2O_3)_{coal}\right\} \quad (9)$$

式中,$\omega(CaO)_{Eq,coal}$和$\omega(MgO)_{Eq,coal}$为灰分中CaO和MgO的等效质量分数,%;R_2为高炉渣的碱度;β为炉渣的镁铝比;$\omega(A_{Ad})$为煤粉中灰分的质量分数,%;$\omega(SiO_2)_{coal}$、$\omega(Al_2O_3)_{coal}$、$\omega(MgO)_{coal}$、$\omega(CaO)_{coal}$和$\omega(Fe_2O_3)_{coal}$分别为煤粉灰分中SiO_2、Al_2O_3、MgO、CaO和Fe_2O_3的含量,%。

1.2.6 脱硫反应耗热

基于渣-铁界面脱硫反应$FeS+CaO=CaS+Fe+\frac{1}{2}O_2$,每脱除1 kg硫耗热约6 622 kJ[34]:

$$Q_S = \frac{6\,222\times\omega(S)_{ad}}{100} \quad (10)$$

1.3 基于等效热值的性价比评价指数

为实现技术指标与经济指标的耦合分析,构建性价比指数(k值),其物理意义为单位资金投入所获得的有效冶金热能:

$$k = \frac{Q_e}{P_{ic}} \quad (11)$$

式中,P_{ic}为综合喷吹成本,元/t,由空气干燥基煤价(P_d)、研磨成本(P_m)及输送成本(P_t)构成[35]。计算公式如下:

$$P_{ic} = P_d + P_m + P_t = \frac{P_i}{100 - \omega(M)_f} + \left(\frac{G_s - G_r}{G_s}\times E_c\times P_e + E_c\times P_e\right) + \left(\frac{F_s - F_r}{F_s}\times V_{gas}\times P_{gas} + V_{gas}\times P_{gas}\right) \quad (12)$$

式中,P_i为原煤合同价,元/t;$\omega(M)_f$为合同含水率,%;G_s为标准哈氏可磨性指数,取平顶山煤HGI=80;G_r为实测值;E_c为标准磨煤电耗,设定为21.12 (kW·h)/t;E_e为磨煤电耗附加系数;

P_e为工业电价，0.55元/(kW·h)；F_s为标准流动性指数，取值80；F_r为实测值；V_{gas}为载气消耗量，设定为25 m^3/t；P_{gas}为载气单价，0.1元/m^3。该评价体系通过引入Q_e替代传统发热量，并量化HGI与流动性对加工成本的影响，能够识别出低热值但低灰易磨的高效能煤种。煤价性价比计算条件见表4。

表4 煤价性价比计算条件

Table 4 Caculation Condition for Cost-effectiveness of Coal Samples

煤样	含水率/%	原煤合同价/(元/t)	流动性指数
1	11.23	766	71.00
2	10.56	760	71.00
3	2.38	1 009	70.50
4	2.12	970	73.00
5	3.13	979	73.00
6	6.15	987	71.50
7	1.50	935	70.50
8	1.50	942	69.00
9	1.50	939	68.00

2 计算结果与分析

2.1 煤粉等效热值对比分析

煤样弹筒发热量、总放热量和等效热值对比见图1。

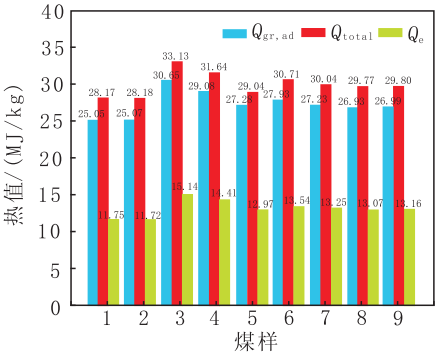


图1 煤样弹筒发热量、总放热量和等效热值对比

Fig. 1 Comparison of $Q_{gr,ad}$, Q_{total} and Q_e of Coal Samples

由图1可知，各煤种的弹筒发热量($Q_{gr,ad}$)与总放热量(Q_{total})及等效热值(Q_e)呈现显著差异。尽管各煤种的理论总放热量普遍较高，但经炉内多相流体动力学与热化学环境修正后，其Q_e发生剧烈衰减，仅为Q_{total}的45%~50%。这种高达15~17 MJ/kg的热量损耗，本质上量化了高炉非完全氧化气氛(CO与H_2利用率限制)以及有机质裂解、水分气化等吸热反应对煤粉化学能的显著抵消作用。

进一步横向对比发现，煤种特性对有效热贡献具有决定性影响：

(1) 无烟煤：以煤样3为代表、固定碳含量为82.69%的优质无烟煤，凭借其高固定碳含量，Q_e在煤样中最高，为15.14 MJ/kg，但部分高灰无烟煤(如煤样4)因造渣热支出巨大，其优势被大幅削弱；

(2) 烟煤：高挥发分烟煤(如煤样1和煤样2)虽然基础热值较低，但与其他煤样热值差异不大，这是由于其$A_{As,d}$极低，大幅降低了灰分升温与造渣过程的热支出，形成了一种以质补热的补偿机制；

(3) 混煤：喷吹用混煤(煤样7~煤样9)的Q_e稳定在13.0~13.3 MJ/kg。相较于单种煤，混煤通过调节挥发分和灰分的配比，在热值贡献上表现出更强的抗波动性，起到了平衡炉缸热状态的缓冲作用。

2.2 影响等效热值的关键因素解析

为了探究造成有效热值衰减的原因，进一步量化了有机质分解(Q_{doc})、水分气化(Q_{H_2O})、造渣(Q_{slag})及脱硫(Q_S)等过程的热支出效应。此处需要说明的是，煤粉在经过中速磨烘干和研磨时，外部水分含量控制在较低水平，在计算过程中默认所有煤粉的水分含量均为1.5%。

灰成分主导的造渣耗热(Q_{slag})是区分煤种经济性的核心变量，煤样等效灰分和灰分值对比见图2。

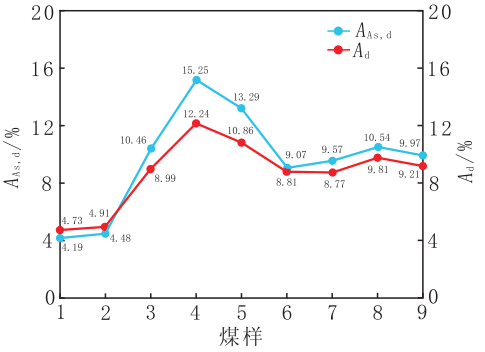


图2 煤样等效灰分和灰分值对比

Fig. 2 Comparison of $A_{As,d}$ and A_d of Coal Samples

由图2可知，煤样中灰成分呈现出显著的非线性特征，并且不同煤样的$A_{As,d}$与其工业分析A_d存在正负偏差分化。煤样1和煤样2表现为显著的负偏差，其原因是由于灰成分中CaO含量高达18%，属于典型的高钙自熔性灰。在炉内，这部分

灰分本身起到了熔剂作用，降低了外部石灰石的配加需求，使其造渣耗热控制在极低水平。而煤样4等无烟煤呈现剧烈的正偏差，其$A_{As,d}$为15.25%，远高于实测A_d值12.24%，这是因其典型的酸性灰特征($SiO_2+Al_2O_3$>86%)所导致的，为维持终渣碱度(R=1.20)必须配加大量碱性熔剂。这种以灰造渣、以渣带热的级联效应导致其Q_{slag}高达295.35 kJ/kg，约为优质烟煤的3.6倍。值得注意的是，煤样7~煤样9作为喷吹用混煤，其Q_{slag}稳定在185~205 kJ/kg。这表明通过合理的配煤(混合高钙烟煤与酸性无烟煤)，有效稀释了酸性灰的负面影响，起到了平抑造渣热支出的缓冲作用。因此在评估喷吹煤价值时，必须引入考虑到灰成分化学行为的$A_{As,d}$指标，而非单纯依据A_d总量。

煤样等效热值计算过程中热支出项和热收入项对比见表5。由表5可知，有机质分解热(Q_{doc})体现了煤阶差异对风口热状态的瞬时制约。高挥发分烟煤(煤样1和煤样2)的Q_{doc}高达1 549.98 kJ/kg，约为无烟煤的2.4倍。虽然这部分吸热在长流程中被视为化学能释放的前奏，但在风口<20 ms的极短停留时间内，它会迅速降低理论燃烧温度。此时，将混煤(煤样7~煤样9)的Q_{doc}控制在1 000 kJ/kg左右，能够在保持一定燃烧性的同时，避免了过大的风口吸热冲击。

表5 煤样等效热值计算过程中热支出项和热收入项对比

Table 5 Comparison of Heat Expenditure and Heat Revenue Items in the Q_e Calculation Process of Coal Samples　　kJ/kg

煤样	Q_{net}	Q_{total}	Q_{doc}	Q_{H_2O}	Q_{slag}	Q_S
1	26 618.02	28 168.00	1 549.98	103.75	81.13	6.39
2	26 610.50	28 175.36	1 564.86	103.75	86.87	6.39
3	32 445.01	33 127.89	682.88	103.75	202.62	21.11
4	31 019.77	31 642.01	622.24	103.75	295.35	21.50
5	28 227.10	29 040.64	813.54	103.75	257.39	20.73
6	29 675.46	30 710.04	1 034.58	103.75	175.61	13.95
7	29 025.27	30 038.74	1 013.47	103.75	185.36	13.56
8	28 733.29	29 765.34	1 032.05	103.75	204.25	13.56
9	28 802.39	29 796.07	993.68	103.75	193.05	14.14

此外，脱硫反应耗热(Q_S)构成了隐性的“热量税”。高硫煤(煤样3和煤样4)因硫负荷较高，脱硫过程需消耗约21 kJ/kg的热量，是低硫煤消耗热量的3倍以上。

综上所述，高炉喷吹煤的真实热贡献是其基础燃烧放热(Q_{total})扣除造渣、热解及脱硫等过程耗热后的净值。其中，由灰成分决定的造渣耗热波动最大，而混煤通过不同煤种的互补搭配，在高分解热与高造渣热之间寻找到了平衡点，是优化配煤结构的首要控制策略。

2.3 基于性价比指数(k值)的经济性评价

通过引入综合喷吹成本(P_{ic})，构建了热力-经济联合视角的性价比评价体系，煤样综合喷吹成本和性价比指数对比如图3所示。

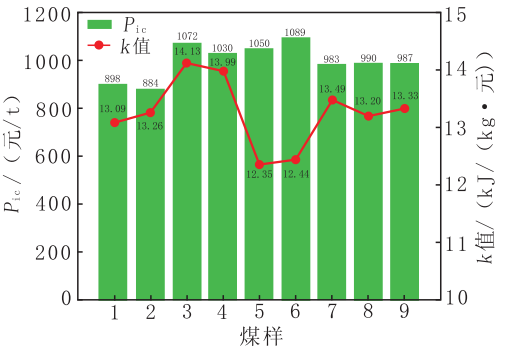


图3 煤样综合喷吹成本和性价比指数对比

Fig. 3 Comparison of P_{ic} and k of Coal Samples

由图3可知，煤样综合喷吹成本与性价比指数(k值)并不呈简单负相关关系，说明煤粉经济性受等效热值、灰成分造渣耗热、可磨性及采购价格共同控制。煤样1和煤样2为高挥发分烟煤，综合成本分别为898元/t和884元/t，在所有煤样中最低；其k值

分别为13.09 kJ/(kg·元)和13.26 kJ/(kg·元),虽低于煤样3和煤样4,但仍表现出较好的经济适用性。这主要得益于其低灰分和高钙自熔性灰特征,使等效灰分$A_{As,d}$明显低于实测灰分A_d,造渣耗热约为81~87 kJ/kg,同时较高HGI有助于降低制粉成本。

煤样3和煤样4虽综合成本较高,分别为1 072元/t和1 030元/t,但因固定碳含量高、Q_e水平较高,其k值达到14.13 kJ/(kg·元)和13.99 kJ/(kg·元),说明部分优质无烟煤仍具有较高单位成本热贡献。相比之下,煤样5和煤样6的成本处于较高水平,而k值仅为12.35 kJ/(kg·元)和12.44 kJ/(kg·元),表明高灰、高硅铝酸性灰及较差可磨性会显著削弱高价煤的使用价值。

煤样7~煤样9作为现场混煤,综合成本稳定在983~990元/t,k值为13.20~13.49 kJ/(kg·元),体现出较好的成本与煤质稳定性。

综上,配煤优化不应单纯追求高热值或低单价,而应以k值为核心,优先提高低灰、易磨、低造渣耗热煤种比例,同时控制高灰高硬煤的使用量,以实现炉缸热状态稳定与喷煤降本的协同优化。

3 结论

(1)基于Hess定律与冶金热力学原理,构建了适用于鞍钢高炉工况的煤粉等效热值(Q_e)计算模型。该模型量化了有机质裂解、水分气化及脱硫反应等过程的热支出,揭示了受还原性气氛及吸热反应制约,煤粉在高炉内的实际有效热贡献仅为理论总放热量的45%~50%。

(2)阐明了灰成分对造渣耗热的非线性影响机制。高硅铝酸性灰煤种因需配加大量熔剂维持渣系平衡,导致其造渣热支出约为低灰煤的3.6倍,显著削弱了高灰煤的入炉有效热值。

(3)构建了基于Q_e的煤种性价比评价指数(k值),实现了煤粉有效热贡献与综合喷吹成本的耦合评价。结果表明,高挥发分烟煤虽基础热值较低,但凭借低灰分、较好可磨性和低造渣耗热等优势,仍表现出较好的经济适用性;部分高固定碳无烟煤虽具有较高等效热值,但其经济性易受采购成本、研磨能耗及灰分造渣热支出的制约。该评价体系表明,煤粉使用价值不能仅由基础热值判断,而应综合考虑有效热贡献、灰成分行为和加工成本,可为钢铁企业开展基于使用价值的配煤优化与降本增效提供理论依据。

参考文献

[1] 李海峰,郭铖乾,王新东,等. 高炉低碳炼铁技术路径分析及发展建议[J]. 钢铁,2024,59(9):56-70,101.
[2] 高鹏,赵丹宁,王平,等. 马钢4000m³高炉喷吹煤粉燃烧性能研究与应用[J]. 钢铁,2018,53(12):10-17,43.
[3] 刘征建,王家保,张建良,等. 高炉能耗现状及降耗技术展望[J]. 钢铁研究学报,2023,35(1):1-10.
[4] 颉建新,张福明. 钢铁制造流程智能制造与智能设计[J]. 中国冶金,2019,29(2):1-6.
[5] 任萌萌,任磊,邹冲,等. 高炉喷吹煤粉配加兰炭的回旋区燃烧数值模拟[J]. 钢铁研究学报,2024,36(4):435-444.
[6] 薛庆国,杨帆,张欣欣,等. 氧气高炉的发展历程及其在北京科技大学的研究进展[J]. 工程科学学报,2021,43(12):1579-1591.
[7] 周圣智,周密,王文鹏,等. COG喷吹量对高炉冶炼过程影响数值模拟[J]. 工程科学学报,2025,47(11):2203-2212.
[8] 宋阳,狄瞻霞,刘颖,等. 高炉死料柱状态及其对铁水流动的影响[J]. 钢铁,2019,54(3):23-28,34.
[9] 张成博,张丹丹,宋延成,等. 高炉炉缸铁水渗碳的数值模拟[J]. 钢铁研究学报,2025,37(10):1290-1298.
[10] 张二华,吴锽,万鹏,等. SiO_2还原对高炉风口前理论燃烧温度的影响[J]. 北京科技大学学报,2010,32(11):1406-1411.
[11] 王广伟,张雪婷,刘江斌,等. 高炉喷吹固体燃料物化结构与燃烧性能关系研究[J]. 鞍钢技术,2024(5):1-6.
[12] 刘文文,齐渊洪,李昊堃,等. 基于混料设计的高炉喷吹煤配煤结构优化研究及应用[J]. 中国冶金,2020,30(11):72-76,93.
[13] 徐润生,尉继勇,叶涟,等. 废塑料与高炉喷吹煤混合燃烧行为及其对理论燃烧温度的影响[J]. 钢铁研究学报,2024,36(1):44-54.
[14] 王洪磊,郭鑫,张亦凡,等. 煤质煤量全面在线检测技术发展现状及应用进展[J]. 煤炭科学技术,2024,52(2):219-237.
[15] 王海峰,宋小平,李佳. 采用燃料分析法计量化石燃料燃烧产生的碳排放量[J]. 计量科学与技术,2023,67(7):3-10.
[16] 邸传耕,王振飞,张建良,等. 神东烟煤水分对其高炉喷吹性能的影响[J]. 中国冶金,2020,30(1):26-31.
[17] 张仕洋,薛庆国,刘锦周,等. 氧气高炉回旋区内煤粉燃烧行为的数值模拟[J]. 工程科学学报,2015,37(5):638-647.
[18] 曾宇,姜喆,张建良,等. 大喷煤条件下鞍钢高炉喷吹煤粉的炉内利用率[J]. 中国冶金,2022,32(3):61-67.
[19] 徐润生,闫泳霖,张建良,等. 高比例烟煤喷吹对高炉冶炼过程的影响及调控措施[J]. 钢铁,2024,59(12):39-48.
[20] 雷家柳,赵栋楠,朱航宇,等. 基于IMCT理论的$CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-Na_2O$渣系的脱硫热力学模型[J]. 钢铁,2019,54(3):35-41.
[21] 刘成松,李京社,唐海燕,等. 高炉风口理论燃烧温度计算模型的改良[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(3):392-396.

[22] 张建良，杨天钧，高征铠，等. 高炉喷煤过程煤粉分解热确定的新方法[J]. 北京科技大学学报，2001(4)：308-310.
[23] 籍杨梅，张琦，刘嘉龙，等. 钢铁生产过程焦化工序能耗剖析与节能途径[J]. 中国冶金，2024，34(8)：107-116.
[24] 王广伟，吴君毅，杨玉卓，等. 基于煤质特性分析的高炉喷吹煤粉性能评价[J]. 钢铁研究学报，2024，36(1)：22-32.
[25] 苏步新，张建良，国宏伟，等. 基于主成分分析的高炉喷吹煤优化配煤模型[J]. 重庆大学学报，2013，36(11)：51-57.
[26] 侯健，陈布新，白晨光，等. Al_2O_3对高炉渣性能和结构的影响及其应用[J]. 钢铁，2023，58(5)：39-50.
[27] 李杰，宋灿阳，李小静，等. 高炉喷吹煤粉燃烧性与反应性的研究与应用[J]. 中国冶金，2019，29(1)：8-13
[28] 任萌萌，刘雯雯，赵俊学，等. 高炉低碳喷吹条件下回旋区质能平衡分析[J]. 钢铁，2023，58(7)：36-45.
[29] 韦晶晶，卢光华，王会刚，等. 钢铁冶金企业铁水预脱硫及脱硫渣处理与利用研究进展[J]. 环境工程，2025，43(11)：142-151.
[30] 金维强. 电厂锅炉[M]. 北京：水利电力出版社，1995.
[31] 刘诗词，琚海霞. 计算燃煤地位发热量的经验公式[J]. 河南电力，2007(2)：2-4.
[32] XU R S，ZHANG J L，ZHUO H B，et al. A novel model for cost performance evaluation of pulverized coal injected into blast furnace based on effective calorific value[J]. Journal of Central South University，2015(22)：3990-3998.
[33] 吴胜利，余晓波，陈辉，等. 高炉理论燃烧温度的计算[J]. 北京科技大学学报，2008，30(12)：1432-1438.
[34] Malcolm W. Chase. NIST-JANAF Thermochemical Tables for the Bromine Oxides. Journal of Physical & Chemical Reference Data[J]. 1996，25 (4)：1069-1111.
[35] 李涛，苏步新，王广伟，等. 高炉喷吹煤粉优化选择[J]. 钢铁，2022，57(6)：22-31.

（编辑 白璐）
修回日期：2026-05-18

鞍钢蒂森克虏伯汽车钢低碳案例入选优秀实践 向全球推介

近日，“2025企业绿色低碳发展优秀实践案例”名单发布，鞍钢蒂森克虏伯汽车钢有限公司（TAGAL）“热镀锌汽车钢企业全链条低碳管理创新”案例成功入选，并作为最佳实践案例入编《2026企业绿色低碳发展优秀实践案例精选集（中英文）》，该案例还将作为中国绿色低碳发展实践标杆在第三十一届联合国气候变化大会上向全球推介。

近年来，TAGAL将绿色低碳发展确立为核心战略，依托鞍钢集团与蒂森克虏伯钢铁欧洲股份公司的技术优势，坚持“产品低碳+制造零碳”双轮驱动，系统推进全链条绿色低碳转型升级。推出TAGALeNovation®低碳排放钢品牌，构建涵盖ELC30、ELC50、ELC80三大系列的产品矩阵，减排比例可达30%至80%，成为国内首批实现低碳排放钢批量供应的汽车用钢企业；构建从传统火电转向以核电、风电为主的可再生能源体系，气候中和能源利用比例从2021年的10%跃升至2024年的100%；推行全方位系统化极致能效管理，通过高能效设备替代高耗能设备、工艺优化、非作业时段节能控制等举措实现能源利用效率的全面提升，2025年全年用电量较2022年降低510万kW·h；通过打造“基地联动+清洁运力”低碳物流模式大幅度缩短运距、提升物流效率，累计物流减碳4 790 t。

据了解，“2025企业绿色低碳发展优秀实践案例”名单由中国企业联合会、中国企业家协会联合发布，案例征集活动在工业和信息化部等有关部门的支持和指导下开展，共征集579项案例，305项案例经预审和有关专家的严格评定后入选，其中，30项案例作为最佳实践案例入编《2026企业绿色低碳发展优秀实践案例精选集（中英文）》。

—— 摘自“铁诺咨询网”（2026-05-28）