مرکز دانش شبکه خبرگان صنعت فولاد

کاهش مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی؛ از زمان Tap-to-Tap تا شارژ گرم آهن اسفنجی

گزارش‌های فنی | علی ارجمندی اصل | ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

کاهش مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی فقط با افزایش توان ترانس یا کاهش عدد کیلووات‌ساعت بر تن محقق نمی‌شود. کیفیت آهن اسفنجی، دمای شارژ، نرخ تغذیه، متالیزاسیون، کربن، سرباره پفکی، زمان‌های Power-on و Power-off و دمای تخلیه همگی بر عملکرد واقعی کوره اثر دارند. این گزارش فنی مجموعه شاخص‌ها و اقدامات عملی لازم برای بهینه‌سازی EAFهای مبتنی بر DRI را بررسی می‌کند.



مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده هزینه، ظرفیت تولید و پایداری فولادسازی است. بااین‌حال، تمرکز صرف بر عدد مصرف برق ویژه می‌تواند تصویری ناقص از عملکرد کوره ایجاد کند.

ممکن است مصرف برق یک ذوب کاهش یابد، اما در مقابل مصرف اکسیژن، گاز طبیعی، کربن تزریقی، الکترود، نسوز یا زمان تولید افزایش پیدا کند. همچنین ممکن است با کاهش بیش‌ازحد دمای تخلیه یا تغییر نامناسب سرباره، هزینه به واحد پالایش ثانویه منتقل شود.

بنابراین هدف واقعی نباید فقط کمینه‌کردن کیلووات‌ساعت بر تن باشد. هدف، تولید فولاد مذاب با ترکیب شیمیایی و دمای مناسب، در کوتاه‌ترین سیکل پایدار و با کمترین مجموع مصرف انرژی، مواد و استهلاک تجهیزات است.

مصرف برق ویژه تنها بخشی از تراز انرژی است

انرژی ورودی کوره قوس می‌تواند از برق، مشعل‌های گاز طبیعی، واکنش‌های اکسیداسیون کربن و عناصر موجود در شارژ و گرمای محسوس مواد ورودی تأمین شود.

در مقابل، انرژی از مسیرهایی مانند گازهای خروجی، آب خنک‌کاری، سرباره، بازشدن سقف، بدنه کوره، مواد تخلیه‌شده و تأخیرهای عملیاتی از دست می‌رود. به همین دلیل کاهش مصرف برق بدون بررسی سایر ورودی‌ها و خروجی‌ها الزاماً به معنای کاهش کل انرژی نیست.

جزء تراز انرژی	نمونه	اثر بر عملکرد
انرژی الکتریکی	قوس الکتریکی و ترانس کوره	منبع اصلی ذوب و فوق‌گرمایش
انرژی شیمیایی	اکسیداسیون کربن، آهن و عناصر شارژ	تولید حرارت و تشکیل CO
گرمای محسوس شارژ	آهن اسفنجی گرم یا قراضه پیش‌گرم	کاهش انرژی لازم برای رسیدن به دمای ذوب
اتلاف گاز خروجی	گاز داغ و احتراق ناقص CO	خروج انرژی از کوره
اتلاف خنک‌کاری	پنل‌ها، سقف و مجاری آب‌گرد	حفاظت تجهیز همراه با دفع حرارت
اتلاف زمانی	توقف تغذیه، نمونه‌گیری، انتظار جرثقیل	افزایش Tap-to-Tap و اتلاف گرمای حمام

زمان Tap-to-Tap چگونه تشکیل می‌شود؟

Tap-to-Tap فاصله زمانی میان تخلیه دو ذوب متوالی است. این شاخص شامل دوره‌ای است که برق برقرار است و همچنین زمان‌هایی که کوره بدون توان الکتریکی منتظر عملیات جانبی می‌ماند.

Power-on Time

مدتی است که توان الکتریکی به کوره اعمال می‌شود. کیفیت کنترل الکترود، پایداری قوس، وضعیت سرباره، پروفایل توان و سرعت ذوب مواد بر این زمان اثر می‌گذارند.

Power-off Time

شامل زمان شارژ، نمونه‌گیری، اندازه‌گیری دما، تخلیه سرباره، تعمیرات کوتاه، انتظار مواد، تأخیر جرثقیل، آماده‌سازی پاتیل و سایر توقف‌های فرایندی است.

کاهش Power-on Time بدون کنترل Power-off Time ممکن است تأثیر محدودی بر تولید سالانه داشته باشد. در بسیاری از واحدها، فرصت‌های کم‌هزینه‌تر در حذف تأخیرهای میان ذوب‌ها قرار دارند.

برای تحلیل Tap-to-Tap چه داده‌ای لازم است؟

- زمان تخلیه ذوب قبلی؛
- شروع و پایان شارژ مواد؛
- زمان پایین‌آمدن الکترودها؛
- زمان‌های قطع و وصل توان؛
- آغاز و پایان تغذیه DRI؛
- زمان نمونه‌گیری و دریافت نتیجه آزمایشگاه؛
- زمان اندازه‌گیری دما؛
- زمان تخلیه سرباره؛
- آغاز و پایان Tapping؛
- علت هر تأخیر بیشتر از حد تعیین‌شده.

ثبت یک زمان کلی برای ذوب کافی نیست. هر دقیقه باید به یک وضعیت عملیاتی یا علت توقف منتسب شود تا بتوان اقدام اصلاحی تعریف کرد.

SteelExperts.ir

کیفیت آهن اسفنجی چگونه مصرف انرژی را تغییر می‌دهد؟

در کوره‌های مبتنی بر DRI، مشخصات آهن اسفنجی یکی از مهم‌ترین متغیرهای تراز انرژی و سرباره است. دو محموله با وزن برابر ممکن است به دلیل تفاوت متالیزاسیون، کربن، گانگ، رطوبت و دمای ورودی رفتار کاملاً متفاوتی داشته باشند.

درجه متالیزاسیون

کاهش متالیزاسیون به معنای ورود مقدار بیشتری اکسید آهن به کوره است. احیای این اکسید به انرژی و کربن نیاز دارد و می‌تواند مقدار FeO سرباره و تلفات آهن را افزایش دهد.

کربن آهن اسفنجی

کربن DRI می‌تواند در واکنش با اکسیژن و FeO انرژی شیمیایی ایجاد کند و به تشکیل سرباره پفکی کمک نماید. بااین‌حال، مقدار نامناسب کربن ممکن است نیاز به دمش بیشتر، زمان پالایش طولانی‌تر یا نوسان در نقطه پایان ایجاد کند.

گانگ و ترکیبات غیرفلزی

سیلیس، آلومینا و سایر اجزای غیرفلزی حجم سرباره را افزایش می‌دهند. سرباره بیشتر به آهک، انرژی و زمان بیشتری برای ذوب و تنظیم نیاز دارد و مقدار فولاد همراه سرباره را نیز افزایش می‌دهد.

نرمه و رطوبت

نرمه زیاد می‌تواند توسط سیستم مکش حمل شود، واکنش‌پذیری موضعی را افزایش دهد یا در سامانه تغذیه اختلال ایجاد کند. رطوبت نیز علاوه بر مصرف انرژی برای تبخیر، یک خطر جدی ایمنی محسوب می‌شود.

SteelExperts.ir

مشخصه DRI	در صورت نامناسب‌بودن	پیامد محتمل
متالیزاسیون	افزایش آهن اکسیدی	مصرف کربن و انرژی و افزایش FeO
کربن	عدم تطابق با اکسیژن و سرباره	نوسان انرژی شیمیایی و نقطه پایان
گانگ	افزایش SiO و Al O	افزایش سرباره و مصرف آهک
دما	ورود DRI سرد	افزایش انرژی لازم برای ذوب
نرمه	اتلاف و تغذیه ناپایدار	کاهش Yield و افزایش غبار
رطوبت	تبخیر و واکنش ناگهانی	اتلاف انرژی و خطر ایمنی

شارژ گرم آهن اسفنجی چه مزیتی دارد؟

آهن اسفنجی در خروجی واحد احیا دارای گرمای محسوس قابل توجهی است. اگر DRI ابتدا سرد و سپس دوباره در EAF گرم شود، بخشی از این انرژی از دست می‌رود.

در شارژ گرم، HDRI با استفاده از سامانه انتقال عایق‌شده یا اتصال مستقیم میان واحد احیا و فولادسازی، در دمای بالا به کوره منتقل می‌شود. این گرمای محسوس بخشی از انرژی لازم برای رساندن مواد به دمای ذوب را تأمین می‌کند.

بر اساس اطلاعات منتشرشده توسط MIDREX، افزایش هر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در دمای شارژ DRI می‌تواند تقریباً ۲۰ کیلووات‌ساعت بر تن فولاد مذاب از مصرف برق کم کند. شارژ در دمای بیش از ۶۰۰ درجه می‌تواند در شرایط مناسب صرفه‌جویی قابل توجهی ایجاد کند.

این مقادیر تضمین عملکرد همه کارخانه‌ها نیستند. درصد DRI در شارژ، متالیزاسیون، کربن، دمای واقعی هنگام ورود، فاصله حمل، میزان افت حرارت و روش بهره‌برداری EAF نتیجه نهایی را تعیین می‌کنند.

مزایای احتمالی HDRI

- کاهش مصرف برق ویژه؛
- کاهش Power-on Time؛
- کاهش زمان Tap-to-Tap؛
- افزایش تعداد ذوب روزانه؛

- کاهش مصرف الکترود در شرایط پایدار؛
- کاهش انرژی اتلاف‌شده در سردکردن و گرم‌کردن مجدد DRI.

چالش‌های شارژ گرم

- هماهنگی ظرفیت واحد احیا و فولادسازی؛
- مدیریت توقف یکی از دو واحد؛
- کنترل دمای HDRI در مسیر انتقال؛
- ایمنی انتقال و جلوگیری از اکسیداسیون؛
- پایداری نرخ تغذیه؛
- نیاز به مسیر جایگزین برای تولید یا ذخیره CDRI؛
- کنترل فشار، غبار و آب‌بندی تجهیزات.

نرخ تغذیه DRI باید با توان کوره هماهنگ باشد

تغذیه پیوسته DRI زمانی مؤثر است که نرخ ورود مواد با توان الکتریکی، سطح حمام، وضعیت سرباره و ظرفیت ذوب هماهنگ باشد.

اگر نرخ تغذیه بیش از ظرفیت ذوب باشد، توده سرد یا نیمه‌ذوب‌شده ایجاد می‌شود، دمای حمام افت می‌کند و زمان کوره افزایش می‌یابد. نرخ بسیار پایین نیز توان ترانس و ظرفیت تولید را به‌طور کامل استفاده نمی‌کند.

در یک کنترل پیشرفته، نرخ تغذیه می‌تواند بر اساس توان فعال، امپدانس، دمای تخمینی حمام، کیفیت DRI، اکسیژن، وضعیت سرباره و مدل انرژی ذوب تنظیم شود.

سرباره پفکی؛ پوششی برای انتقال بهتر انرژی

سرباره پفکی مناسب قوس را می‌پوشاند و انتقال انرژی به حمام را بهبود می‌دهد. پوشیده‌شدن قوس می‌تواند تابش مستقیم به دیواره‌ها و پنل‌های آب‌گرد را کاهش داده و پایداری الکتریکی کوره را افزایش دهد.

این سرباره با تولید و به‌دام‌افتادن حباب‌های CO شکل می‌گیرد. واکنش میان کربن تزریقی و FeO یکی از

سازوکارهای اصلی تولید CO است.

سرباره کم‌ارتفاع

می‌تواند باعث آشکارماندن قوس، افزایش اتلاف حرارتی، ناپایداری الکتریکی و افزایش سایش نسوز و پنل‌ها شود.

سرباره بیش‌ازحد

می‌تواند موجب سرریز، اتلاف فلز، افزایش مصرف مواد، اختلال در عملیات درب سرباره و دشواری کنترل فرایند شود.

هدف، ایجاد سرباره‌ای پایدار با ترکیب، ویسکوزیته و میزان گاز مناسب است؛ نه صرفاً تزریق بیشتر کربن یا آهک.

اکسیژن و کربن؛ انرژی رایگان نیستند

دمش اکسیژن و تزریق کربن می‌توانند انرژی شیمیایی تولید کنند و مصرف برق را کاهش دهند. اما استفاده بیش‌ازحد یا ناهماهنگ آن‌ها می‌تواند Yield فلزی را کاهش دهد و مصرف مواد را بالا ببرد.

- اکسیژن کمتر از نیاز ممکن است زمان پالایش را افزایش دهد؛
- اکسیژن بیش‌ازحد می‌تواند آهن بیشتری را به سرباره منتقل کند؛
- کربن ناکافی ممکن است سرباره پفکی را ناپایدار کند؛
- کربن بیش‌ازحد می‌تواند هزینه، غبار و زمان نقطه پایان را افزایش دهد؛
- عدم تناسب اکسیژن و کربن موجب احتراق ناقص یا FeO بالا می‌شود.

سامانه‌های کنترلی جدید تلاش می‌کنند اکسیژن، کربن، آهک، توان الکتریکی و نرخ تغذیه DRI را بر اساس وضعیت لحظه‌ای حمام و سرباره هماهنگ کنند.

کنترل الکترود و پروفایل توان

انتقال مؤثر برق به کوره به تنظیم مناسب موقعیت الکترودها، طول قوس، امپدانس و پروفایل توان وابسته

است. شکست الکترود، نوسان شدید جریان و قوس ناپایدار علاوه بر افزایش هزینه، زمان ذوب را نیز طولانی می‌کنند.

در ابتدای ذوب یا هنگام وجود مواد جامد، معمولاً محدودیت‌های متفاوتی نسبت به مرحله حمام تخت وجود دارد. پروفایل توان باید با مرحله فرایند، نوع شارژ و وضعیت سرباره هماهنگ باشد.

در یک نمونه صنعتی منتشرشده در سال ۲۰۲۵، ارتقای سیستم کنترل الکترود و مشعل‌های کوره ۶۰ تنی Baku Steel به کاهش چهار دقیقه‌ای Power-on Time و کاهش مصرف انرژی و الکترود منجر شد. این نتیجه نشان می‌دهد بهینه‌سازی کنترل می‌تواند بدون تغییر کامل کوره نیز اثر ملموسی داشته باشد.

دمای Tapping را بیش از نیاز بالا نبرید

هر درجه فوق‌گرمایش اضافی نیازمند انرژی است. اگر دمای تخلیه به دلیل عدم اطمینان در زمان حمل پاتیل، تأخیر جرثقیل یا عملکرد LF بیش از حد بالا انتخاب شود، EAF هزینه ناهماهنگی واحدهای پایین‌دست را پرداخت می‌کند.

دمای هدف باید بر اساس افت حرارتی واقعی مسیر، زمان انتقال، شرایط پاتیل، نیاز واحد پالایش ثانویه و گرید فولاد تعیین شود. استفاده از یک دمای ثابت برای همه شرایط می‌تواند موجب مصرف اضافی یا کمبود دما شود.

هم‌زدن مناسب حمام نیز می‌تواند اختلاف دمای موضعی را کاهش دهد و نیاز به حاشیه اطمینان بیش‌ازحد را کم کند.

Yield فلزی را کنار انرژی پایش کنید

کاهش مصرف برق به قیمت افزایش آهن موجود در سرباره، افزایش غبار یا باقی‌ماندن فلز در کوره، بهینه‌سازی واقعی نیست.

برای نمونه، دمش زیاد اکسیژن ممکن است زمان و برق را کاهش دهد، اما FeO سرباره و تلفات آهن را افزایش دهد. هزینه آهن ازدست‌رفته ممکن است از صرفه‌جویی برق بیشتر باشد.

به همین دلیل، شاخص‌های انرژی باید همراه با Yield، آهن سرباره، مقدار سرباره، مصرف آهک، کربن، اکسیژن، الکترود و نسوز بررسی شوند.

داشبورد عملیاتی کوره چه شاخص‌هایی داشته باشد؟

حوزه	شاخص	واحد پیشنهادی
زمان	Tap-to-Tap	دقیقه بر ذوب
زمان	Power-on Time	دقیقه بر ذوب
زمان	Power-off Time و علت توقف	دقیقه بر ذوب
انرژی	مصرف برق ویژه	kWh/t liquid steel
مواد	مصرف DRI، قراضه، آهک و کربن	kg/t liquid steel
گازها	مصرف اکسیژن و گاز طبیعی	Nm³/t liquid steel
DRI	متالیزاسیون، کربن، گانگ و دمای شارژ	درصد و درجه سانتی‌گراد
سرباره	وزن سرباره و FeO	kg/t و درصد
بهره‌وری	Yield فلزی	درصد
تجهیزات	مصرف الکترود و نسوز	kg/t
کیفیت	دمای تخلیه و انحراف نقطه پایان	درجه سانتی‌گراد
تولید	ذوب سالم در روز	Heat/day

داده‌ها را بر اساس شرایط مشابه مقایسه کنید

مقایسه میانگین همه ذوب‌ها ممکن است نتیجه نادرست ایجاد کند. مصرف انرژی باید برای گروه‌های مشابه مقایسه شود:

- گرید فولاد مشابه؛
- درصد DRI و قراضه مشابه؛
- دمای شارژ مشابه؛
- متالیزاسیون و کربن نزدیک؛
- وزن تخلیه مشابه؛
- شرایط ترانس و الکترود مشابه؛

SteelExperts.ir

- میزان توقف‌های خارج از فرایند مشابه.

کاهش مصرف ناشی از تغییر ترکیب شارژ نباید به اشتباه به یک تغییر نرم‌افزاری یا عملکرد اپراتور نسبت داده شود.

یک برنامه عملی برای کاهش مصرف انرژی

مرحله اول: ایجاد خط مبنا

حداقل چند ماه داده ذوب جمع‌آوری و بر اساس گرید، ترکیب شارژ، دمای DRI و وضعیت بهره‌برداری گروه‌بندی شود. داده‌های غیرعادی و توقف‌های خارج از کنترل فرایند جدا شوند.

مرحله دوم: تحلیل دقیقه‌های ازدست‌رفته

Power-off Time به دلایل مشخص تقسیم شود. انتظار پاتیل، جرثقیل، آزمایشگاه، مواد، تعمیرات و اپراتور باید جداگانه اندازه‌گیری شوند.

مرحله سوم: ارتباط کیفیت DRI با عملکرد EAF

اثر متالیزاسیون، کربن، گانگ، نرمه و دمای DRI بر برق، سرباره، Yield و Tap-to-Tap تحلیل شود. گزارش میانگین ماهانه DRI برای این کار کافی نیست و داده هر محموله یا هر بازه تولید موردنیاز است.

مرحله چهارم: بهینه‌سازی نرخ تغذیه

نرخ تغذیه با توان، وضعیت حمام و واکنش‌های شیمیایی هماهنگ شود. تغییرات ابتدا در محدوده کنترل‌شده و روی گروهی از ذوب‌های مشابه آزمایش شوند.

مرحله پنجم: کنترل سرباره و انرژی شیمیایی

اکسیژن، کربن و آهک به‌عنوان یک سیستم واحد بررسی شوند. هدف، سرباره پایدار، FeO کنترل‌شده و بیشترین بازیابی آهن است.

مرحله ششم: کاهش دمای اطمینان اضافی

افت دمای واقعی از EAF تا LF اندازه‌گیری و دمای هدف برای شرایط مختلف بازتعریف شود. این اقدام باید با هماهنگی فولادسازی، حمل پاتیل و پالایش ثانویه انجام شود.

مرحله هفتم: ارزیابی شارژ گرم

تراز انرژی، فاصله واحد احیا تا EAF، افت دما، ظرفیت بافر، ایمنی و هماهنگی توقف‌ها بررسی شود. صرفه‌جویی نظری بدون قابلیت بهره‌برداری پایدار مبنای کافی برای سرمایه‌گذاری نیست.

مرحله هشتم: تثبیت بهترین عملکرد

پارامترهای ذوب‌های موفق به دستورالعمل استاندارد تبدیل شوند. نتیجه باید در شیفت‌های مختلف و توسط اپراتورهای مختلف قابل تکرار باشد.

اشتباه‌های رایج در پروژه‌های کاهش انرژی

- تمرکز فقط بر مصرف برق و نادیده‌گرفتن انرژی شیمیایی؛
- مقایسه ذوب‌های دارای گرید و شارژ متفاوت؛
- کاهش برق با افزایش نامتناسب اکسیژن و کربن؛
- نادیده‌گرفتن Yield فلزی و آهن سرباره؛
- افزایش توان بدون اصلاح نرخ تغذیه و سرباره؛
- ثبت‌نکردن دلایل واقعی Power-off Time؛
- استفاده از میانگین ماهانه به‌جای داده هر Heat؛
- اعمال تغییر هم‌زمان روی چند متغیر و ناممکن‌شدن تحلیل نتیجه؛
- تکیه بر یک رکورد کوتاه‌مدت به‌جای عملکرد پایدار؛
- بی‌توجهی به نقش واحد احیا، LF و ریخته‌گری در عملکرد EAF.

SteelExperts.ir

جمع‌بندی

کاهش مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی حاصل یک اقدام منفرد نیست. زمان Tap-to-Tap، کیفیت و دمای DRI، پایداری تغذیه، سرباره پفکی، انرژی شیمیایی، کنترل الکترود، Yield فلزی و هماهنگی با واحدهای پایین‌دست باید هم‌زمان مدیریت شوند.

شارژ گرم آهن اسفنجی یکی از مؤثرترین فرصت‌ها برای کارخانه‌های یکپارچه DRI-EAF است، اما ارزش آن فقط زمانی محقق می‌شود که انتقال گرم، نرخ تغذیه، وضعیت سرباره و برنامه تولید پایدار باشند.

بهترین شاخص موفقیت نیز پایین‌ترین عدد برق در یک ذوب نیست؛ بلکه کمترین هزینه و انرژی کل برای تولید فولاد مذاب قابل قبول، با Yield بالا، زمان سیکل کوتاه و قابلیت تکرار در همه شیفت‌هاست.

منابع اصلی مقاله

این گزارش ترجمه مستقیم یک منبع واحد نیست و بر پایه تحلیل و بازنویسی منابع صنعتی و پژوهشی زیر تهیه شده است:

- Energy Use in the Steel Industry – انجمن جهانی فولاد
- ویژگی‌ها و مزایای شارژ گرم DRI – شرکت MIDREX
- نتایج عملیاتی انتقال و شارژ گرم DRI – شرکت MIDREX
- نتایج ارتقای کوره قوس Baku Steel در سال ۲۰۲۵ – Primetals Technologies
- کنترل پویای EAF مبتنی بر DRI – شرکت Tenova
- تحلیل انرژی EAF با استفاده از آهن اسفنجی هیدروژنی – Process Safety and Environmental Protection

---

نسخه آنلاین مقاله: https://landing.steelexperts.ir/2026/07/27/eaf-energy-efficiency-tap-to-tap-hot-dri/