



جلسه چهارم
مرحله اگلموراسیون کنساتره آهن – کلوخه سازی



کلوخه سازی

- فرآیند کلوخه سازی به طور کلی عبارت است از حرارت دادن مخلوطی از پودرهای مختلف به منظور بدست آوردن کلوخه هایی با استحکام بالا جهت استفاده در کوره بلند.
- مخلوط مورد نظر تشکیل شده است از خاکه های ریز و مرطوب آهن، برخی مواد مورد نیاز مثل کربناتها بصورت دانه ریز، و سوخت جامد که معمولا پودر کک است.
- مخلوط پودرها روی صفحه متخلخل قرار می گیرد. سپس دمای سطح بالای مخلوط به کمک مشعل افزایش می یابد و هوا از میان صفحه متخلخل به پایین مکیده می شود. زمان مرحله اشتعال معمولا بسیار کوتاه است.
- بدلیل بوجود آمدن یک لایه نازک مشتعل در بالای مخلوط، عبور هوا از میان آن و وجود کک، عمل اشتعال ادامه می یابد.
- جبهه مشتعل از میان بستر بطرف پایین حرکت می کند و حداکثر دمای هر لایه در حین اشتعال به حدود ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد می رسد.



- قبل از اینکه هر لایه مشتعل شود دمای آن توسط گازهای گرم حاصل از اشتعال لایه های بالاتر افزایش می یابد پس این گازها عمل پیشگرم کردن شارژ انجام می دهد.
- در عمل قسمت اعظم انرژی گرمایی حاصل از اشتعال، جذب لایه های پایین تر شارژ می شد که گاز از بین آنها عبور می کند. بر اثر پیشگرم شدن رطوبت و مواد فرار موجود در شارژ خارج می شوند و کربناتها تکلیس می شوند.
- در اشتعال بر اثر دمای بالا بین دانه ها و ذرات شارژ پیوند بوجود می آید و در نتیجه توده آگلومره شده ای با استحکام بالا بدست می آید.
- هنگامی که جبهه اشتعال به پایین مخلوط برسد عمل کلوخه سازی خاتمه می یابد.
- توده کلوخه بدست آمده از محفظه بیرون آورده می شود و به مقدار کمی مورد خردایش قرار می گیرد.
- سپس کلوخه ها دانه بندی می شوند. دانه های درشت تر خنک شده جهت استفاده به کوره بلند فرستاده می شوند. دانه های ریز به محفظه کلوخه سازی بازگردانده می شود.



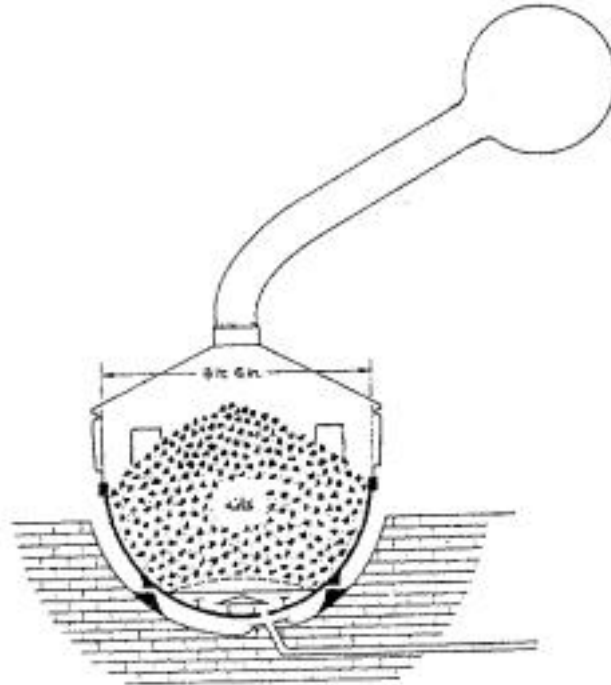
دستگاه های کلوخه سازی

- مهمترین دستگاه های کلوخه سازی که برای اگلموراسیون بار کوره بلند استفاده می شود عبارتند از:
- دستگاه **Huntington – Heberlein** (اولین دستگاه کلوخه سازی)
- دستگاه گرینوالد
- دستگاه آی بی (AIB)
- روش دوایت لویت



دستگاه Huntigton – Heberein

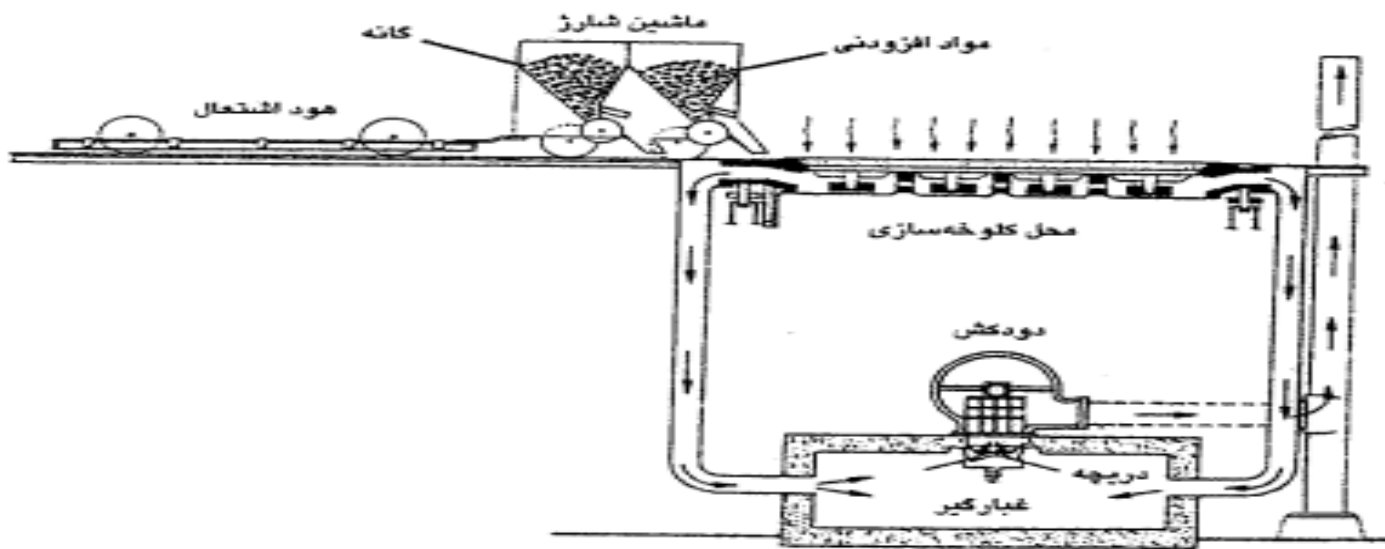
اولین دستگاه کلوخه‌سازی که در سالهای ۱۸۹۰ برای تشویه و تف‌جوشی کردن کانی‌های غیر آهنی مورد استفاده قرار گرفت دارای ساختمانی مانند شکل زیر بود. در این دستگاه مواد بر روی بستری از ذغال گذاخته بارگیری می‌شد و از زیر هوا دمیده می‌شد.



نمایی از اولین دستگاه کلوخه‌سازی که برای تشویه و کلوخه‌سازی کانه‌های غیر آهنی استفاده می‌شد

دستگاه گرینوالث

این روش که اصول آن در شکل زیر نشان داده شده است پرمصرف‌ترین فرآیند در نوع خود بوده است و برای ظرفیت‌های کم در حالت تک‌باره‌ای سالها استفاده شده است. ماشین گرینوالث همانطور که در شکل زیر دیده می‌شود از تعدادی واگن با کف مشبک تشکیل شده است که می‌توانند حول محور افقی دوران کرده و محتویات خود را تخلیه نمایند. واگنها از زیر به یک سیستم مکش هوا متصل است و از بالا تأسیسات ورود مواد می‌توانند ضمن عبور از روی واگنها آنها را از مواد اولیه پر کرده و سپس محترق نمایند. ادامه عمل توسط مکش هوا از پائین انجام می‌گیرد. چون نمی‌توان واگنها را بزرگتر ساخت معمولاً در یک واحد چهار واگن توسط یک سیستم ورود مواد و احتراق کار می‌کنند.



نمایی از دستگاه کلوخه‌سازی به روش گرینوالث

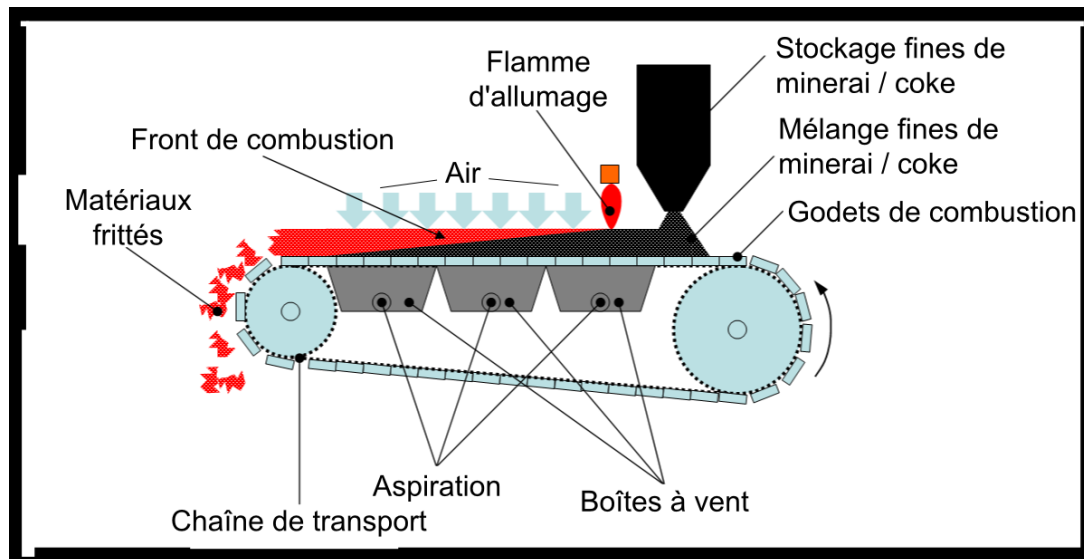
دستگاه آی بی (AIB)

این روش شیه روش گرینوالد است با این تفاوت که در اینجا سیستم ورود بار ثابت می باشد و واگنها در طول یک ریل حرکت می کنند و بترتیب ابتدا در موقعیت شارژ سپس در موقعیت های احتراق، مکش و تخلیه قرار می گیرند. پس از تخلیه واگنها به وضعیت ابتدایی برمی گردند و فرآیند ادامه پیدا می کند.



روش دوايت لویت

نمایی از این دستگاه را نشان می‌دهد. روش دوايت لویت مهمترین روش کلوخه‌سازی است و در حال حاضر تقریباً تمامی کلوخه تولیدی در کارخانه ذوب آهن با این روش انجام می‌شود. وجه مشخصه این روش یک خط یا زنجیر متحرک است که از تعدادی محفظه لبه‌دار با کف مشبک تشکیل شده است. این محفظه‌های بهم‌پیوسته در حال گردش بطور مداوم از زیر محفظه‌های بارگیری، احتراق و مکش می‌گذرند و در انتهای خط ضمن برگشت کلوخه‌ها را داخل آسیاب تخلیه می‌نماید. در این روش نیز اصول و مکانیزم کلوخه شدن مثل روش‌های قبل است.



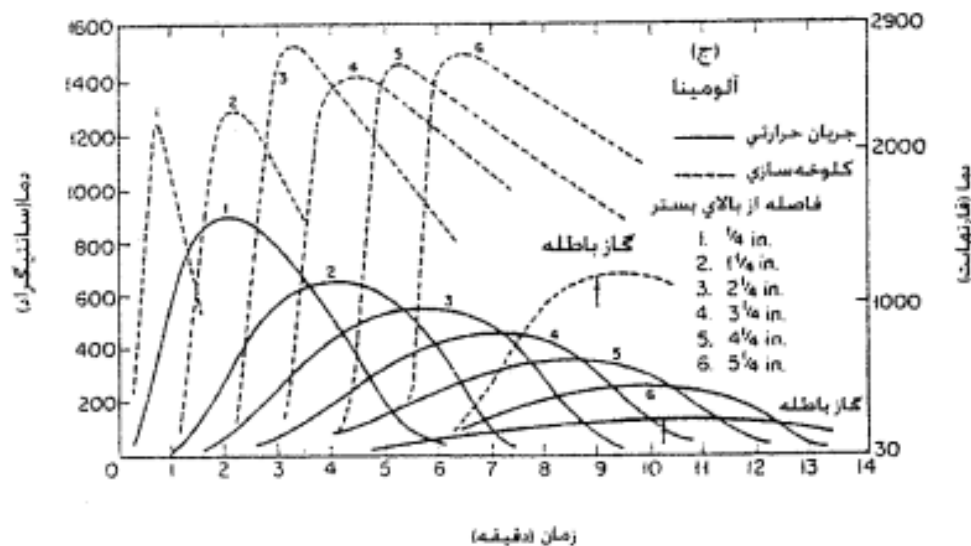
پروفیل دما در کلوخه سازی

- همان طور که ذکر شد می توان فرض کرد بستر شارژ بصورت جبهه های متوالی مشتعل می شود . پروسه کلوخه شدن برای هر لایه شامل پیشگرم شدن، اشتعال و خنک شدن است



- در نتیجه پروفیل دمایی مانند شکل زیر به دست می آید. خطوط بریده مربوط به آزمایشهایی هستند که در آنها بستر کلوخه از دانه های آلومینا سیلیکاتی، رطوبت و خاکه کک تشکیل شده بود. این خطوط شباهت زیادی به پروفیلی که در عمل بوجود می آید، دارند.

- خطوط کامل مربوط هستند به آزمایشهایی که در آنها بستر فاقد کک و رطوبت بود. به عبارت دیگر مقداری گرما توسط پروسه اشتعال به سطح بستر داده شد و سپس تغییرات دما در عمقهای مختلف بستر اندازه گیری شد.



- آزمایش‌ها انجام شده نشان می‌دهد جبهه اشتعال تقریباً با سرعت ثابتی حرکت می‌کند. این سرعت از طریق معادله زیر بدست می‌آید.

$$u_{hw} = \frac{h_g V}{h_x (1-f)}$$

u_{hw} سرعت گسترش موج حرارت (فوت در دقیقه)، h_g ظرفیت

حرارتی گاز $(\frac{BTU}{F \text{ ft}^3})$ ، h_x ظرفیت حرارتی جامد $(\frac{BTU}{F \text{ ft}^3})$ ، V حجم گاز مکیده شده در

واحد سطح بستر در واحد زمان $(\frac{\text{ft}^3}{\text{ft}^2 \cdot \text{min}})$ و f درصد تخلخل در واحد حجم بستر است.

BTU مقدار انرژی استفاده شده برای گرم کردن یک پوند آب و افزایش یک درجه فارنهایتی دمای آن است



نمونه‌ای از توازن حرارتی مواد خام کلوخه‌سازی که دارای آهک است

درصد عمومی مقدار حرارت	کیلوکالری / کیلوگرم کلوخه	نولید و مصرف حرارت
		محل تولید حرارت
۷۷	۲۷۶/۱۶	احتراق کربن تبدیل به CO _۲
۵/۷	۲۰/۲۴	احتراق کربن تبدیل به CO
۱۱/۲	۴۰/۰	روشن کردن
۰/۸	۳/۰۲	درجه حرارت هوای ورودی (۲۰°C)
۲/۷	۹/۸۱	گرمای مواد خام (۶۰°C)
۲/۶	۹/۴۰	بوجود آمدن الیومین با کلسیم و کلسیم سیلیکات
		محل مصرف حرارت
۲۶/۵	۹۴/۸۷	حرارت کلوخه آماده
۲۷/۸	۱۰۰/۰۶	تبدیل اکسیدها
۱۶/۴	۵۸/۷۳	تبخیر رطوبت در مواد خام
۱۶/۴	۵۸/۷۳	تبدیل کربناتها در مواد خام
۵	۱۷/۹۰	خارج کردن حرارت از گاز
۸	۲۸/۷۵	سوخته‌های تلف شده دیگر
۱۰۰/۰	۳۵۸/۶۳	جمع



بررسی فعل و انفعالات شیمیایی در کلوخه سازی

الف) تجزیه هیدراتها و تبخیر رطوبت اضافی

ب) تجزیه کربناتها

ج) تجزیه اکسید فلزات و فعل و انفعالات اکسیداسیون و احیاء

د) حذف عناصر زائد یا مضر



تجزیه هیدراتها و تبخیر رطوبت

رطوبت در مواد خام به دو صورت زیر وجود دارد:

۱- بصورت بخار آب یا رطوبت آزاد سطحی

۲- بصورت آب تبلور

رطوبت آزاد سطحی در دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد بسرعت تبخیر می شود. لذا این نوع رطوبت در ناحیه پیشگرم از بار خارج می شود. لازم به یادآوری است که بیش از ۹۰ درصد از رطوبت موجود در مواد اولیه کلوخه از نوع اول است. بخش کوچکی از رطوبت که بصورت آب تبلور در بار موجود است، در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد خارج می شود.



تجزیه کربناتها

- در فرآیند کلوخه سازی با توجه به دما و دانه بندی سنگ آهک دو حالت ممکن است رخ دهد:

۱- تجزیه سنگ آهک که در ناحیه پیشگرم آغاز شده است در منطقه احتراق کامل شود.

۲- تجزیه کربنات کلسیم در ناحیه احتراق کامل نشده و در ناحیه کلوخه سازی تکمیل شود و یا احتمالاً قسمتی از آن تجزیه نشده باقی بماند.

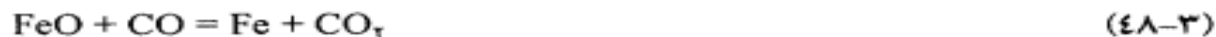
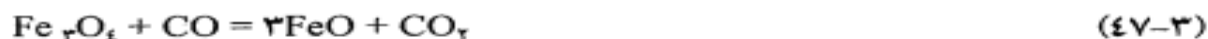
در حالت اول، CaO حاصل از تجزیه در ناحیه احتراق (که مواد در آستانه ذوب شدن قرار دارند و دمای لازم برای واکنش های شیمیایی بین مواد تأمین شده است) با مواد دیگر واکنش داده و ترکیباتی مانند سیلیکات یا فریت کلسیم تشکیل می شود. در حالت دوم قسمتی از سنگ آهک که در ناحیه بعد از جبهه احتراق تجزیه شده است، امکان واکنش با مواد دیگر را پیدا نمی کند و بصورت دانه های سفید رنگ CaO در کلوخه باقی می ماند. این دانه ها بعداً با رطوبت هوا ترکیب شده (آب دار شدن آهک پخته شده) و افزایش حجم می دهد و در نتیجه منجر به خرد شدن کلوخه می شود. بنابراین باید تلاش کرد که تمامی کربنات کلسیم در ناحیه احتراق تجزیه شوند. بعبارت دیگر سرعت تجزیه کربنات کلسیم را باید حتی الامکان افزایش داد. این کار فقط با استفاده از سنگ آهک دانه ریز امکان پذیر است. به همین دلیل است که اندازه دانه های سنگ آهک در بار کلوخه باید کمتر از ۳ میلیمتر باشد.



تجزیه اکسید فلزات و فعل و انفعالات اکسیداسیون و احیا

تجزیه اکسید فلزات موجود در بار کلوخه‌سازی در اثر حرارت زمانی رخ می‌دهد که فشار جزیی اکسیژن اکسید از فشار جزیی اکسیژن محیط بیشتر باشد (یعنی بیش از ۰/۲ اتمسفر). ارتباط چنین فشاری برای اکسیدهای مختلف با دما در جدول (۲۱-۳) آمده است.

جدول (۲۱-۳) نشان می‌دهد که از میان اکسیدهای گوناگون، تنها هماتیت، پیرولوزیت^۱ (MnO_۲) و براونیت^۲ (Mn_۲O_۳) امکان تجزیه شدن در جریان آگلومراسیون را پیدا می‌کنند. بسته به مقدار کک مصرف شده در نواحی احیایی بستر کلوخه‌سازی (نواحی تحتانی)، پتانسیل یا فشار جزیی اکسیژن بعثت وجود گاز CO بسیار کم بوده در نتیجه واکنشهای (۳-۴۶) تا (۳-۴۹) می‌تواند رخ دهد:



جدول ۲۱-۳: دمای تجزیه اکسیدهای فلزی مختلف در فشار بیش از ۰/۲ اتمسفر (دما بر حسب درجه سانتیگراد) [۱۵،۷،۳]

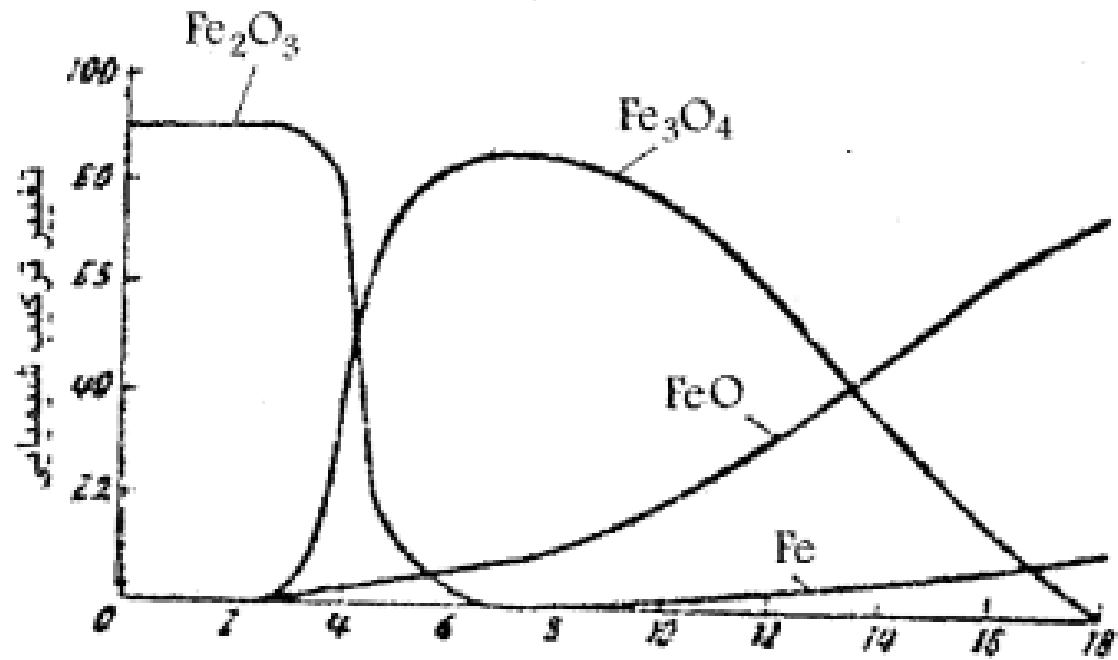
دما (سانتیگراد)	اکسید فلزی
۴۶۰	MnO _۲
۹۴۰	Mn _۲ O _۳
۱۳۸۳	Fe _۲ O _۳
۲۱۰۰	Fe _۳ O _۴
۳۴۹۰	FeO



واکنش (۳-۴۶) ممکن است در دمای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد انجام شود. پس این واکنش در ناحیه پیشگرم انجام می‌شود و چون در قسمت‌های سطحی PCO_2 بالاست، واکنش مزبور در قسمت‌های میانی یا پایین سطح کلوخه انجام می‌گیرد. واکنش (۳-۴۷) نیز در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سانتیگراد در صورت زیاد بودن مقدار گاز منواکسید کربن امکان‌پذیر است. ولی عملاً بعلت کم بودن درصد گاز CO در محیط کلوخه‌سازی، واکنش بالا، به مقدار کم در قسمت‌های پایینی کلوخه انجام می‌شود. احتمال انجام واکنش (۳-۴۸) بسیار کم است. اصولاً در پایان فرآیند کلوخه‌سازی قسمت‌های بالای کیک کلوخه از هماتیت و قسمت‌های پایین عمدتاً از مگنتیت تشکیل شده است.

شکل (۳-۴۰) منحنی تغییرات ترکیب شیمیایی کلوخه برحسب درصد کربن موجود در بار را نشان داده است. شکل نشان می‌دهد که با افزایش درصد کربن، درصد مگنتیت در کلوخه زیاد می‌شود و به بیشترین مقدار خود به ازاء ۸ درصد کربن می‌رسد. پس از آن بعلت احیاء مگنتیت به وستیت، درصد مگنتیت در کلوخه کم می‌شود.





شکل ۴-۳: تغییرات ترکیب شیمیایی بر حسب درصد مصرف کربن در پخت کلوخه [۳۴]

حذف عناصر مضر وزائد

همیشه در مواد اولیه کلوخه‌سازی عناصری از قبیل گوگرد، فسفر، آرسنیک، سرب و روی به مقدار کم ولی متفاوت یافت می‌شود. این عناصر هر یک به نحوی مضر می‌باشد و باید حتی‌الامکان سعی نمود قبل از ورود به کوره بلند حذف شوند. گوگرد همراه با سنگ معدن و کک وارد بار کلوخه‌سازی می‌شود که غالباً بصورت پیریت می‌باشد. با توجه به اینکه درصد مجاز گوگرد در کوره بلند کمتر از ۰/۰۷ درصد است، باید تلاش نمود آگلومره تولیدی بیش از ۰/۰۱ درصد گوگرد نداشته باشد. اصولاً در کلوخه‌سازی عمل خاصی برای حذف گوگرد انجام نمی‌شود و تنها گوگرد طبق واکنش (۳-۵۰) تشویه می‌شود:



این واکنش در ۵۰۰ درجه سانتیگراد آغاز شده و در منطقه احتراق کامل می‌شود. ممکن است واکنش بصورت زیر (واکنش ۳-۵۱) انجام شود:



به طور کلی حذف گوگرد بصورت SO_2 در محیط اکسیدی کلوخه‌سازی بهتر از محیط احیایی کوره بلند انجام می‌شود.



آرسنیک ممکن است بصورت آرسینو پیریت (FeAsS)، آرسنات آهن (FeAsO₄.H₂O) یا سولفید آرسنیک (AsS) در بار کلوخه سازی موجود باشد. وجود این عنصر در فولاد باعث کاهش خواص جوش پذیری می شود. مقدار آن در فولاد بایستی کمتر از ۰/۱۵ درصد باشد. در اتمسفر اکسید کننده در دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد، آرسنیک بصورت واکنش (۵۲-۳) اکسید می شود:



نقطه تبخیر اکسید آرسنیک ۴۶۵ درجه است.



سرب و روی ممکن است بصورت (ZnS) و (PbS) در سنگ معدن آهن وجود داشته باشد که هنگام کلوخه‌سازی در دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد تشویه و بصورت (PbO) و (ZnO) درمی‌آید. چنانچه شرایط مناسب برقرار باشد، به روی و سرب خالص احیاء می‌شوند. سرب و روی اگرچه در چدن حل نمی‌شوند و کیفیت چدن را خراب نمی‌کنند، ولی بر روی منافذ نسوزهای کوره بلند رسوب کرده و باعث خرابی آجرها می‌شوند. آزمایشهای دانشمندان آلمانی نشان داده است چنانچه مقدار سرب و روی در حد حذف شدن باشد می‌توان با اضافه کردن ۳-۲ درصد کلرید کلسیم (CaCl_2)، به میزان ۹۰ درصد سرب و ۷۰ درصد روی را از سنگ معدن حذف نمود [۲۴].

فسفر در سنگ معدن آهن بصورت آپاتیت یا ترکیبات دیگر موجود است. وجود فسفر در فولاد باعث شکنندگی فولاد در محدوده دمای ۳۰-۲۰ درجه سانتیگراد می‌شود که به آن شکنندگی سرد می‌گویند. بنابراین باید از بار کوره بلند حذف شود. متأسفانه فسفر در جریان عملیات کلوخه‌سازی حذف نمی‌شود.



متغیر های مهم فرآیند کلوخه سازی

- متغیر های مهم عبارتند از:
 - دما و زمان پخت
 - نفوذ پذیری بستر
 - مقدار و نوع کربناتهای موجود در بار
 - مقدار رطوبت بار



دما و زمان پخت

- کاهش دما باعث کاهش استحکام کلوخه می شود و افزایش دما ضمن آنکه باعث افزایش میزان سوخت می گردد می تواند منجر به ذوب شارژ شود.
- کاهش زمان باقی ماندن در دمای پخت باعث کاهش استحکام کلوخه می گردد. افزایش بیش از حد این زمان باعث کاهش نرخ تولید و افزایش مصرف انرژی می گردد.



نفوذ پذیری بستر

- کاهش بیش از حد نفوذپذیری باعث می شود اکسیژن مورد دسترس پروسه از مقدار استکیومتری کمتر شود در نتیجه سوخت پودر کک، تولید مقدار کمی گاز **CO** خواهد کرد. به عبارت دیگر گرمای بدست آمده کاهش می یابد و استحکام کم می شود. علاوه بر این گرم کردن لایه های پایین تر شارژ نیز که توسط گاز حاصل از سوخت کک صورت می گیرد بخوبی انجام نخواهد گرفت.
- اگر نفوذ پذیری بستر بیش از حد باشد عمل سوختن با سرعتی بیش از مقدار طراحی شده انجام خواهد گرفت. در نتیجه زمانی که شارژ در دمای بالا می ماند کاهش می یابد و کلوخه به استحکام مورد نظر نمی رسد.
- به طور کلی می توان نفوذ پذیری بستر را به کمک رابطه زیر حساب کرد.

$$P = \frac{F}{A} \left(\frac{h}{s} \right)^{0.6}$$

P = نفوذپذیری بستر

$\frac{F}{A}$ = دبی حجمی گاز خروجی به ازاء واحد سطح مقطع

h = عمق بستر در آغاز فرآیند

s = میزان مکش زیر بستر



مقدار و نوع کربناتهای موجود در بار

- کربناتها ممکن است برای کنترل ترکیب سرباره و بازیسیته اضافه شوند و یا در خاکه وجود داشته باشند. کربناتها همچنین می توانند باعث استحکام پیوندها در حین همجوشی شوند.
- تکلیس کربناتها یک عمل گرماگیر است و متضمن مصرف سوخت می باشد و می تواند سبب کاهش دما گردد.
- همچنین بر اثر تکلیس کربناتها مقدار بستر تخلخل افزایش می یابد و نفوذپذیری افزایش می یابد.



مقدار رطوبت در بار

- تبخیر آب عملی گرماگیر است و همچنین باعث افزایش تخلخل بستر می گردد. **رطوبت اضافه شده به شارژ باید میزان مناسب باشد تا بهترین نتیجه حاصل شود.**
- در آزمایشهای انجام گرفته مشاهده شده است که اگر ۵ درصد آب به خاکه اضافه شود سرعت رسیدن دمای هر لایه بستر از دمای اتاق به ۱۰۰ درجه سانتیگراد از بستر خشک کمتر است. این مشاهده بدلیل گرماگیر بودن تبخیر آب می باشد.
- اما سرعت رسیدن هر لایه از دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به دماهای بالاتر بیش از بستر خشک است. دلیل این پدیده عجیب هنوز مشخص نیست **ولی احتمالاً ممکن است تخلخل بستر در آن نقش داشته باشد.**

