Archive of SID

METALLURGICAL ENGINEERING
The Journal of Iranian Metallurgical and Materials Engineering Society

Winter 2019, Volume 21, number 4

Research Paper

Investigation of the effect of pelletizing parameters on physical and mechanical properties of pellets prepared from Kahnouj ilmenite concentrate

Morteza Fallahi[1], *Mansour Soltanieh[2], Mandana Adeli[3], Mehdi Farhani[4], Karl Heinz Spitzer[5]

1- MSc of Extractive Metallurgy, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Centre of Excellence for High Strength Alloys Technology, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3- Assistant Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
4- PhD. School of Metallurgy and Materials Engineering, Technische Universität Clausthal, Germany.
5- Professor,School of Metallurgy and Materials Engineering, Technische Universität Clausthal, Germany.

Citation: Fallahi M, Soltanieh M, Adeli M, Farhani M, Spitzer K. H. Investigation of the effect of pelletizing parameters on physical and mechanical properties of pellets prepared from Kahnouj ilmenite concentrate. Metallurgical Engineering 2019: 21(4): 264-274 http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.94712.1212

doi : http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.94712.1212

ABSTRACT

Ilmenite can be upgraded through pre-reduction of pellets of ilmenite with the aim of reduction of iron oxides to metallic iron, and subsequent smelting of the pellets to obtain a high-titania slag. In this research, the effect of parameters such as rotation speed and rotation angle in a disk-pelletizer as well as the amounts of moisture and binder in the pellets on the pelletization process was studied. The optimum conditions to obtain pellets with required physical and mechanical properties were determined. 1-5% bentonite and a mixture of bentonite-Fundo cement were used as binder. Drop number and crushing strength standard tests were conducted on green and dry pellets. A slope of 40°, rotation speed of 30 rpm and pelletizing time of 60min yielded the highest pelletizing efficiency for the disk-pelletizer. The optimum amount of moisture was determined to be 9wt%. It was found out that an increase in the percentage of bentonite showed increasing-decreasing effect on strength and drop number, the optimum amount of bentonite addition being 3-4wt%. The use of mixtures of Fundo-bentonite in the pellets had an increasing effect on strength, but athigher temperatures the strength of pellets containing mixtures of Fundo-bentonite showed a decrease in comparison with that of the pellets containing only bentonite.

Keywords: Pelleting, Ilmenite, Fracture Strength, Bentonite.

* ***Corresponding Author*:**
Mansour Soltanieh, PhD
Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Centre of Excellence for High Strength Alloys Technology, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Tel: +98 (9123274023)
E-mail: Mansour_soltanieh@iust.ac.ir

www.SID.ir

بررسی تأثیر پارامترهای گندله‌سازی بر خواص فیزیکی و مکانیکی گندله تهیه‌شده از کنسانتره ایلمنیت کهنوج

مرتضی فلاحی[۱]، *منصور سلطانیه[۲]، ماندانا عادلی[۳]، مهدی فرهانی[۴]، کارل-هاینتس اشپیتزر[۵]

۱- کارشناسی ارشد، متالورژی استخراجی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، قطب علمی فناوری آلیاژهای با استحکام بالا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۴- دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی کلاوستهال، آلمان.
۵- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی کلاوستهال، آلمان.

چکیده

در فرآیند سرباره‌سازی، پرعیارسازی ایلمنیت از طریق پیش‌احیای گندله‌های ساخته شده از کنسانتره ایلمنیت به‌منظور احیاء اکسیدهای آهن به آهن فلزی، و سپس ذوب گندله‌ها جهت حصول به سرباره‌ای غنی از تیتانیا انجام می‌شود. در پژوهش حاضر پارامترهای مؤثر مرحله گندله‌سازی ازجمله سرعت و زاویه چرخش گندله‌ساز دیسکی، میزان رطوبت و نوع و ترکیب چسب مورد استفاده بررسی شده و شرایط بهینه جهت تهیه گندله‌هایی با ویژگی‌های ابعادی و خواص مکانیکی مورد نظر تعیین شد. ۵-۱% وزنی بنتونیت و نیز مخلوطی از بنتونیت و سیمان آلومینوکلسیایی (فوندو) به‌عنوان چسب مورد استفاده قرار گرفت. آزمون‌های عدد سقوط و استحکام شکست بر روی گندله‌های خام و خشک انجام شد. زاویه‌ی چرخش ۴۰ درجه نسبت به افق و سرعت چرخش ۳۰ rpm و زمان گندله‌سازی ۶۰ دقیقه بهترین بازده گندله‌سازی را به‌دست دادند. میزان بهینه رطوبت در حدود ۹% تعیین شد. افزایش بنتونیت در گندله روند افزایشی-کاهشی را برای استحکام و عدد سقوط نشان داد و بیشترین مقدار برای ۴-۳% بنتونیت به دست آمد. استفاده از مخلوط فوندو – بنتونیت در گندله روند صعودی را برای استحکام نشان داد اما برای دماهای بالا نسبت به گندله حاوی بنتونیت، استحکام کمتری بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: گندله‌سازی، ایلمنیت، استحکام شکست، بنتونیت.

۱. مقدمه

تیتانیم از نظر فراوانی نهمین عنصر موجود در پوسته زمین بوده و عمدتاً به‌صورت مینرال‌های روتیل (TiO_2)، ایلمنیت ($FeTiO_3$) و اسفین ($CaTiSiO_5$) در طبیعت یافت می‌شود. در ابتدا روتیل به‌عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین کانی به‌منظور استخراج دی‌اکسید تیتانیم و تولید فلز تیتانیم مطرح بود اما با کم شدن ذخایر جهانی این کانی و متعاقباً افزایش قیمت آن، توجه به سمت کانی‌های فراوان‌تر و ارزان‌تر ازجمله ایلمنیت معطوف گشته است[۱-۳] . به‌عنوان یک فلز، تیتانیم به‌دلیل مقاومت بسیار خوب به خوردگی و نسبت استحکام به وزن بالا در صنعت بسیار مورد توجه است، ولیکن بخش عمده مصرف تیتانیم در جهان به‌صورت اکسید تیتانیم است که دارای خواص نوری عالی بوده و به‌عنوان رنگ‌دانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیندهای متفاوتی در صنعت به‌منظور استخراج دی‌اکسید تیتانیم و یا فراهم آوردن ماده اولیه برای استخراج تیتانیم به کار گرفته می‌شود.به‌طور مثال به‌عنوان ماده اولیه تولید تیتانیم صنعتی می‌توان از سرباره تیتانیا، سرباره تیتانیای پر عیار شده (UGS[۱]) و روتیل مصنوعی (SR[۲]) استفاده کرد[۴].

در برخی فرآیندها نظیر سرباره‌سازی که در آن هدف رسیدن به سرباره‌ای غنی از اکسید تیتانیم و جدا کردن آهن به‌صورت فاز فلزی است، پرعیارسازی کنسانتره ایلمنیت شامل دو مرحله است. ابتدا کنسانتره به‌صورت گندله درآمده و مرحله احیای مقدماتی یا پیش‌احیا در حالت جامد روی آن انجام می‌شود. سپس گندله‌ها در کوره قوس الکتریکی تحت گدازش قرار می‌گیرند. در ساخت گندله درگندله‌سازها

1. upgraded slag
2. Synthetic rutile

* نویسنده مسئول:
دکتر منصور سلطانیه
نشانی: تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد ، قطب علمی فناوری آلیاژهای با استحکام بالا.
تلفن: (۹۱۲۳۲۷۴۰۲۳) ۹۸+
پست الکترونیکی: Mansour_soltanieh@iust.ac.ir

www.SID.ir

جدول ۱. آنالیز شیمیایی کنسانتره ایلمنیت

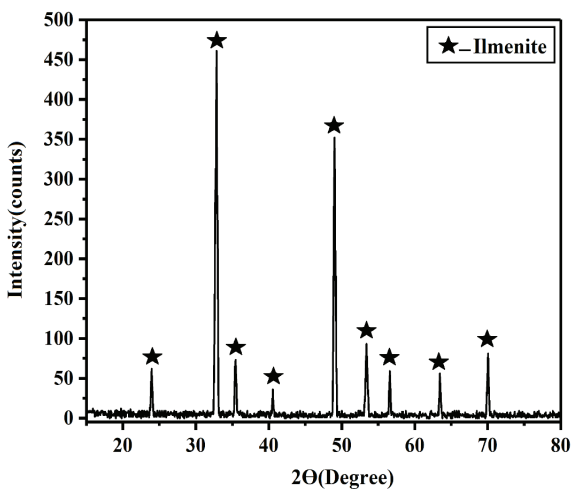
ترکیب	TiO_2	Fe(total)	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MnO	MgO	عناصر دیگر
درصد وزنی	۴۳/۶۱	۳۲/۶۱	۳/۲۸	۲/۹	۲/۹۴	۱/۵۵	۲/۵۱	۰/۹۷

جدول ۲. آنالیز شیمیایی چسب بنتونیت

ترکیب	P_2O_5	LOI	MnO	S	CaO	K_2O	Na_2O	TiO_2	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
درصد وزنی	۰/۲۲	۱۲/۵۲	۰/۳۱	۰/۳۸	۱/۳۲	۰/۳۰	۲/۹۵	۰/۵۱	۲/۹۸	۳/۵۳	۱۱/۹۶	۶۳/۲۰

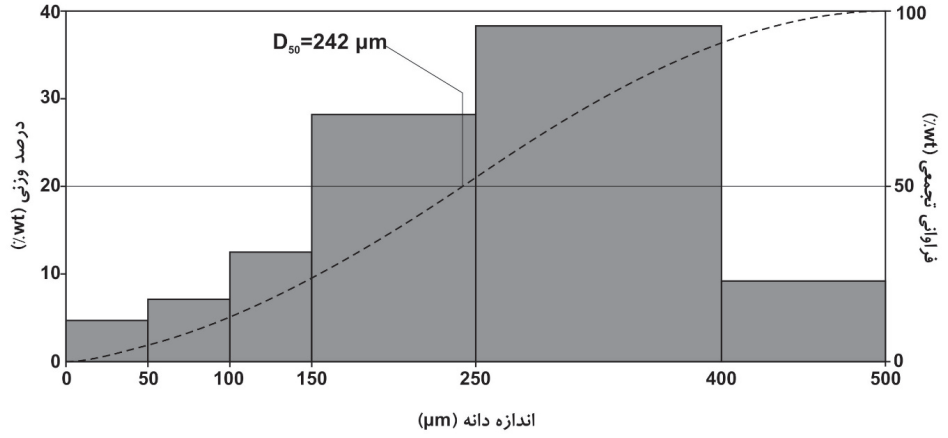
جدول ۳. آنالیز شیمیایی سیمان آلومینوکلسیایی (فوندو)

ترکیب	CaO	TiO_2	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
درصد وزنی	۳۷-۳۹	۴>	۱>	۱۵-۱۸	۳۷-۴۰	۴-۵



شکل ۱. الگوی پراش اشعه ایکس کنسانتره ایلمنیت.

عواملی ازجمله زاویه چرخش دیسک، سرعت چرخش دیسک و درام، محل و سرعت افزودن چسب، آب و مواد اولیه، درصد رطوبت گندله، مقدار، نوع و ویژگی‌های چسب افزودنی دخیل هستند. متداول‌ترین چسبی که در فرآیند گندله‌سازی سنگ‌آهن و ایلمنیت استفاده می‌شود، بنتونیت است [۵], [۶]. احیای کربوترمی ایلمنیت نیاز به دماهای بالا دارد که این فرآیند سبب تولید چدن و سرباره‌ی غنی از تیتانیا می‌شود. چدن تولیدشده می‌تواند به‌منظور ذوب و سرباره برای استحصال دی‌اکسیدتیتانیم مورداستفاده قرار گیرد، ازاین‌رو خواص گندله‌های ایلمنیت و احیای کربوترمی جامد–جامد این گندله‌ها به‌منظور احیای اکسید آهن ایلمنیت به آهن فلزی برای استفاده در فرآیند سرباره‌سازی دارای اهمیت بالایی است[۷]–[۹]. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است احیای گندله حاوی عامل احیایی در دماهای زیر ۱۰۰۰ °C قابل توجه نیست و با افزایش دما و زمان میزان احیای اکسید آهن



شکل ۲. نمودار توزیع اندازه دانه و فراوانی تجمعی برای کنسانتره ایلمنیت مورد استفاده

www.SID.ir

جدول ۴. نتایج آنالیز سرندی برای بنتونیت و سیمان فوندو

	بنتونیت				سیمان فوندو	
اندازه دانه (µm)	-۵۰+۲۰	-۱۰۰+۵۰	+۲۰۰	-۵۰+۲۰	-۱۰۰+۵۰	+۲۰۰
درصد وزنی	۱۲/۶	۷۴/۵	۱۲/۹	۲۳/۱	۶۵/۸	۱۱/۱

به آهن فلزی افزایش یافته و در دماهای بالای ۱۲۰۰ °C، TiO_2 به اکسیدهای پایین‌تر احیا می‌شود[۱۰]-[۱۳].

پژوهش‌های فراوانی پیرامون بررسی مکانیزم اتصال و نحوه اثرگذاری چسب بر روی خواص فیزیکی گندله اکسید آهن انجام شده است که می‌توان به پژوهش‌های ایسل و همکارانش [۵]، کاواترا و همکارانش [۱۴]، سیورکایا و همکارانش [۱۵]، [۱۶]، فورسمو و همکارانش [۶]، [۱۷]، اشاره کرد که بیشتر پیرامون اثر بنتونیت و چسب‌های دیگر بر روی خواص فیزیکی این گندله‌ها بوده است. پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون گندله ایلمنیت به‌منظور بررسی خواص فیزیکی و احیاپذیری آن بسیار محدود است.به‌عنوان بارزترین آن‌ها می‌توان به پژوهش الحسینی [۱۸] که خواص فیزیکی و شیمیایی ایلمنیت ساخته شده به‌صورت بریکت را بررسی کرده اشاره کرد.الحسینی و همکارانش همچنین در پژوهشی دیگر [۱۹] سینتیک احیای گندله ایلمنیت در بازه دمای ۸۰۰ °C تا ۱۱۵۰ °C را بررسی کردند.

با توجه به وجود ذخایر قابل توجه ایلمنیت در کشور، ضرورت پژوهشی که گندله‌سازی ایلمنیت به‌عنوان یکی از ملزومات احیاء حالت جامد را بررسی کرده و شرایط دستیابی به بهترین بازدهی فرآیند گندله‌سازی را شناسایی کند احساس می‌شود. با رسیدن به گندله‌هایی با شرایط فیزیکی و مکانیکی مطلوب، در مرحله بعد می‌توان احیاپذیری چنین گندله‌هایی و شرایط رسیدن به حداکثر فلزی شدن را مورد بررسی قرار داد.

با توجه به اینکه گندله‌های مورد استفاده در فرآیند احیا و سرباره‌سازی در معرض سایش و فرسایش بوده و بایستی شرایط خاصی را از نظر ابعاد، استحکام و ویژگی‌های مکانیکی دارا باشند، هدف از پژوهش حاضر ساخت گندله‌هایی از کنسانتره ایلمنیت با خواص فیزیکی مطلوب به‌منظور استفاده در فرایند پیش‌احیا و سرباره‌سازی است. دستیابی به چنین خواصی با تنظیم شرایط گندله‌سازی در دستگاه گندله‌ساز دیسکی و با استفاده از دو نوع چسب بنتونیت و سیمان آلومینوکلسیایی مورد بررسی قرار گرفته است. خواص مکانیکی این گندله‌ها توسط آزمون‌های استاندارد سنجش خواص مکانیکی بررسی و گزارش شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

مشخصات مواد اولیه و کنسانتره مورد استفاده‌شده

الف) ایلمنیت: در این پروژه از کنسانتره ایلمنیت کهنوج ایران به‌عنوان ماده اصلی برای گندله‌سازی استفاده شد. این کنسانتره دارای آنالیز شیمیایی مطابق با جدول (۱) است. الگوی پراش اشعه ایکس برای تعیین آنالیز فازی کنسانتره‌ی ایلمنیت در شکل (۱) آورده شده است. آنالیز سرندی برای تعیین توزیع اندازه دانه‌ی کنسانتره با استفاده از الک‌های آزمایشگاهی (با استاندارد ASTM) انجام شد و در شکل (۲) نشان داده شده است. به‌منظور اتصال ذرات کنسانتره و تشکیل گندله از دو چسب بنتونیت و سیمان آلومینوکلسیایی (با نام تجاری Fundo–IRC40) استفاده شد. آنالیز شیمیایی چسب بنتونیت و سیمان فوندو به ترتیب در جدول (۲) و (۳)، همچنین توزیع اندازه ذرات بنتونیت و سیمان فوندو در جدول (۴) با روش آنالیز سرندی نشان داده شده است.

آزمایش‌های اولیه

ساخت گندله در دستگاه گندله‌ساز دیسکی آزمایشگاهی(شکل (۳)) با قطر دیسک دوار ۵۰ cm و ارتفاع نوار دور دیسک ۱۰ cm که دارای امکان تغییر سرعت و زاویه چرخش بود انجام گرفت. برای یافتن سرعت، زاویه و مدت‌زمان چرخش بهینه‌ی دستگاه، ابتدا ۱۲۰ g کنسانتره ایلمنیت با ۵ g بنتونیت مخلوط شده و داخل دستگاه ریخته و به مدت ۵ دقیقه باهم مخلوط شدند. سپس مقداری آب در بازه‌های زمانی مشخص پاشش شد تا گندله‌ها تشکیل شوند، زمان چرخش اولیه برای یافتن سرعت و زاویه چرخش بهینه ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از اتمام آزمایش، گندله‌هایی که در ابعاد <۵ mm بودند، جمع‌آوری‌شده و اندازه‌گیری وزن گندله‌ها در حالت تر و خشک صورت گرفت. شرایط آزمایش اولیه برای به دست آوردن شرایط بهینه‌ی دستگاه گندله‌سازی در جدول (۵) آورده شده است.

طبق نتایج به‌دست‌آمده در شرایط مختلف، بازده دستگاه طبق رابطه (۱) محاسبه‌شده و شرایط بهینه برای زاویه و سرعت چرخش مشخص شد که (P_p) درصد بازدهی دستگاه گندله‌ساز، (W_1) وزن گندله‌های خشک برحسب گرم و (W_2) وزن مواد ورودی به دستگاه گندله‌ساز برحسب گرم است.

معادله ۱.

$$P_p = \frac{W_1}{W_2} \times 100$$

به‌منظور یافتن زمان بهینه طبق شرایط مندرج در جدول(۶)، زمان بهینه برای ساخت گندله در سرعت و زاویه چرخش بهینه بدست آمد.

www.SID.ir

شکل ۳. شکل نمایی از دستگاه گندله ساز مورد استفاده‌شده

جدول ۵. شرایط آزمایش برای به دست آوردن سرعت و زاویه چرخش بهینه دستگاه

سرعت‌های چرخش (rpm)	زاویه‌های چرخش صفحه دوار نسبت به افق (°)
۴۵ – ۴۰ – ۳۵ – ۳۰ – ۲۵ – ۲۰ – ۱۵	۴۵ – ۴۰ – ۳۰

پس از انتخاب شرایط بهینه برای دستگاه گندله‌سازی، ساخت گندله در شرایط مناسب با دو نوع چسب بنتونیت و مخلوط آن با سیمان آلومینوکلسیایی(فوندو) با درصدهای مختلف با میزان رطوبت ثابت و مشخص انجام شد.

خشک‌کردن گندله‌ها در خشک‌کن (آون) به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ °C انجام گرفت. برای محاسبه درصد رطوبت گندله از رابطه(۲) استفاده شده است.

معادله ۲.

$$\text{درصد رطوبت} = \frac{\text{وزن گندله تر} - \text{وزن گندله خشک}}{\text{وزن گندله تر}} \times 100$$

آزمون‌های انجام شده

الف) عدد سقوط: برای انجام این آزمون ۱۰ عدد گندله با اندازه و ترکیب یکسان انتخاب‌شده و هر کدام از فاصله ۴۶ سانتی‌متری رها می‌شود تا گندله‌ها بر روی یک صفحه فولادی ضخیم (۱ cm) سقوط کند. تعداد دفعاتی که یک گندله بدون ترک یا آسیب تحمل می‌کند به‌عنوان عدد سقوط برای گندله معرفی می‌شود[۵]. نتایج حاصله در بخش بعد ارائه‌شده و پراکندگی و خطای نتایج، با توجه به کمترین و بیشترین مقدار از میانگین در تمامی گزارش‌ها آورده شده است.

ب) استحکام شکست: استحکام گندله‌های ساخته‌شده در سه حالت خام، خشک و بعد از احیا طبق استاندارد ASTM E279 با استفاده از دستگاه فشار تک‌محوره ۵ تن ساخت شرکت سنتام موردبررسی قرارگرفته[۲۱]، بدین‌صورت که میانگین استحکام شکست ۵ عدد گندله به‌عنوان عدد نهایی برای استحکام گندله معرفی‌شده است.

ج) استحکام شکست در دماهای بالا: برای بررسی این آزمون ۱۰ عدد گندله در اندازه و ترکیب یکسان را بدون عامل احیایی به مدت ۲۰ دقیقه در دماهای ۹۰۰،۳۰۰،۵۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده، سپس گندله‌ها خارج‌شده و در دمای محیط قرار داده شد، تا میانگینی از استحکام شکست گندله با درصد چسب مختلف در دماهای بالا بدست بیاید ازاین‌رو میانگین استحکام شکست گندله‌های سالم به‌عنوان استحکام گندله در دمای بالا معرفی‌شده است.

۳. نتایج و بحث

تأثیر سرعت چرخش و زاویه دیسک بر بازده گندله‌سازی

در صورت ثابت بودن بار تغذیه‌شده، رابطه تجربی زیر سرعت بحرانی دستگاه گندله‌ساز دیسکی را به‌صورت تابعی از زاویه دیسک نسبت به افق و قطر دیسک بیان می‌کند. سرعت بحرانی سرعتی است که در آن گندله‌ها بجای غلتیدن، تحت نیروی گریز از مرکز به داخل دیواره دیسک می‌چسبند [۲۲].

معادله ۳.

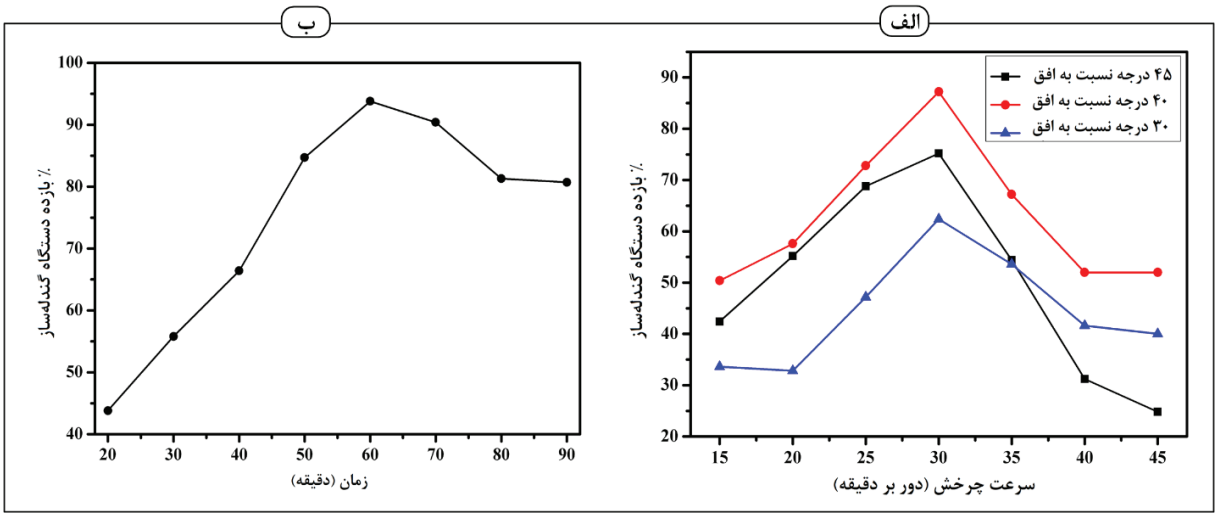
$$\eta_c = 42.3\left|\sin(\beta_d / D_d)\right|^{\frac{1}{2}}$$

در رابطه فوق η_c سرعت بحرانی برحسب rpm، β_d زاویه دیسک نسبت به افق، و D_d قطر دیسک برحسب متر است. دستگاه‌های گندله‌ساز دیسکی معمولاً در سرعتی معادل با ۰/۶-۰/۷ برابر سرعت بحرانی کار می‌کنند. در تحقیق حاضر اثر سرعت چرخش دیسک در محدوده ۴۵-۱۵ rpm و تغییر زاویه نسبت به افق (۳۰°، ۴۰° و ۴۵°) بر راندمان دستگاه

جدول ۶. شرایط آزمایش برای تعیین زمان مناسب برای گندله‌سازی در زاویه و سرعت چرخش بهینه

سرعت چرخش (rpm)	زاویه چرخش نسبت به افق (º)	زمان گندله‌سازی (دقیقه)
۳۰	۴۰	۹۰ – ۸۰ – ۷۰ – ۶۰ – ۵۰ – ۴۰ – ۳۰ – ۲۰

www.SID.ir



شکل ۴. نتایج بازده دستگاه گندله‌ساز، الف) در سرعت و زاویه‌های چرخش مختلف (زمان ۳۰ دقیقه)، ب) در زمان‌های مختلف (سرعت ۳۰ rpm و ۴۰ درجه نسبت به افق)

گندله‌ساز بررسی شد تا شرایط بهینه کار دستگاه به‌دست آید. نتایج این بررسی و همچنین اثر زمان گندله‌سازی بر راندمان با ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرها در شکل (۴) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در سرعت چرخش ۳۰ دور بر دقیقه و زاویه ۴۰ درجه نسبت به افق، بهترین نتایج به‌دست آمده و بازده دستگاه بالای ۸۵% و اندازه گندله‌های حاصله در بازه‌ی ۵-۲۵ mm است. با افزایش و کاهش سرعت چرخش، میزان سرعت نسبت به‌سرعت بحرانی بسیار کمتر یا بیشتر شده منجر به اشکال در تولید گندله‌های با ابعاد مناسب می‌شود. همچنین بهترین مدت‌زمان برای گندله‌سازی ۶۰ دقیقه است، در زمان‌های کمتر (کمتر از ۳۰ دقیقه) معمولاً جوانه‌زنی گندله صورت گرفته اما فرصت کافی برای رشد گندله و رسیدن آن به ابعاد مورد نظر وجود ندارد. به‌نظر می‌رسد که در زمان‌های بیش از ۶۰ دقیقه آب درون ساختار گندله‌ها تا حدودی خارج‌شده و گندله‌ها دچار شکست می‌شوند.

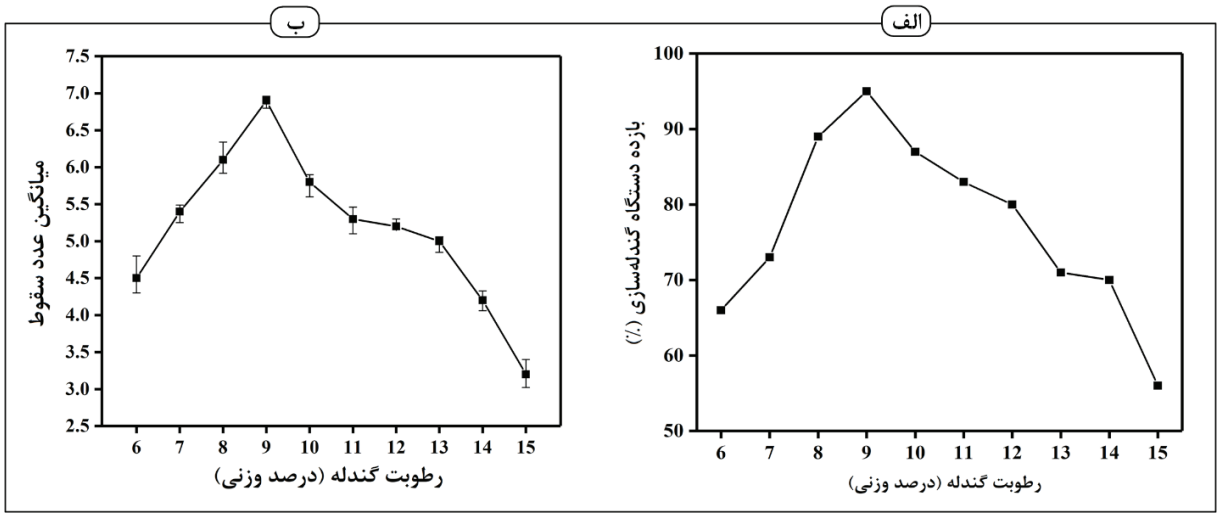
تأثیر رطوبت بر خواص فیزیکی گندله

میزان رطوبت در گندله‌سازی یکی از عوامل مهم در تولید و رشد گندله‌ها است، بدین‌صورت که نخست یک‌لایه نازک از آب در سطح ذرات ایجاد می‌شود که موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر و درنتیجه تشکیل و رشد گندله می‌شود. با پاشش آب روی سطح ذرات کنسانتره، سطح ذرات مرطوب شده و لایه‌ای از آب روی سطح ذرات تشکیل می‌شود. کشش سطحی آب موجب می‌شود که با تماس ذرات مرطوب با یکدیگر پل‌هایی از مایع بین آن‌ها تشکیل‌شده، ذرات به هم متصل شوند. اولین ذرات آگلومره به‌دلیل اثر توأم حرکت دستگاه گندله‌ساز و رطوبت افزوده شده تشکیل می‌شوند. پس از این مرحله، افزودن رطوبت موجب افزایش چگالی گندله‌ها می‌شود. اگر آب برای یک نوع گندله از حد معینی کمتر باشد، فیلم آب تشکیل شده بر سطح ذرات، ناقص بوده و برای پیوند ذرات به یکدیگر کافی نیست و درنتیجه جوانه‌زنی و رشد به‌صورت کامل و صحیح صورت نمی‌گیرد و با توجه به توزیع غیریکنواخت رطوبت، گندله از نظر خواص ضعیف عمل خواهد کرد. درصورتی‌که درصد رطوبت همراه با بار از میزان بهینه بیشتر باشد، باز هم ذرات بار پیوند لازم را با دیگر ذرات نخواهند داشت و نیز ابعاد گندله‌ها درشت‌تر شده با توجه به افزایش پلاستیسیته، گندله‌ها به‌آسانی دچار تغییرشکل خواهند شد. تشکیل جوانه‌ها فقط در میزانی بحرانی از رطوبت دارای سرعت مناسب خواهد بود، بنابراین بهینه‌سازی میزان آب مصرفی ضروری است[۲۱]. میزان دقیق درصد آب لازم برای تولید گندله، تجربی بوده و با آزمایش تعیین می‌شود. نتایج مربوط به بهینه‌سازی رطوبت گندله در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۴) – الف مشخص است با افزایش درصد رطوبت گندله میزان بازده دستگاه گندله‌سازی روند افزایشی-کاهشی دارد. برای گندله‌هایی که میزان آب مصرفی بیشتر شود، ازآنجاکه گندله تشکیل نشده و یا گندله‌های تشکیل شده به‌دلیل قابلیت بالای تغییر شکل به‌صورت گل درمی‌آیند، بازده دستگاه پایین آمده است. در رطوبت‌های کمتر، جوانه‌زنی برای گندله‌های اولیه تشکیل شده ولی برای ادامه فرآیند و ساخت کامل گندله در ابعاد مناسب، رطوبت کمتر باعث عدم تشکیل مناسب گندله می‌شود. نتایج آزمون عدد سقوط برای گندله‌های خام (با درصد رطوبت مختلف) در شکل (۵)- ب نشان داده شده است. بنابراین مقدار بهینه رطوبت برای گندله‌ها از نظر بازده دستگاه و همچنین از نظر استحکام، برای کنسانتره موضوع این تحقیق مقدار ۹ درصد وزنی است.

تأثیر چسب بنتونیت بر خواص فیزیکی گندله

نتایج حاصل از آزمون عدد سقوط برای درصدهای مختلف

www.SID.ir



شکل ۵. نتایج بازده دستگاه گندله‌ساز و آزمون عدد سقوط، الف) بازده دستگاه در رطوبت‌های مختلف (۶۰ min ، ۳۰ rpm، ۴۰ º)، ب) آزمون عدد سقوط برای گندله‌های خام در رطوبت‌های مختلف (۲ درصد چسب بنتونیت)

چسب بنتونیت به‌طور هم‌زمان در رطوبت‌های مختلف، در شکل (۶) – الف آورده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش چسب مصرفی در گندله، میانگین عدد سقوط برای گندله‌های ساخته‌شده روند افزایشی-کاهشی دارد و مشاهده می‌شود که برای ۳ الی ۴ درصد چسب بنتونیت بیشترین مقدار عدد سقوط برای درصدهای مختلفی از رطوبت به‌دست‌آمده است که صحت نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۵) – ب را نیز تائید می‌کند. نتایج عدد سقوط برای گندله‌های خشک‌شده با درصد رطوبت اولیه ۹ درصد وزنی در شکل (۶) – ب نشان داده شده است. برای گندله‌های خشک‌شده نیز ۳٫۵ درصد وزنی چسب بنتونیت دارای بیشترین مقدار عدد سقوط است.

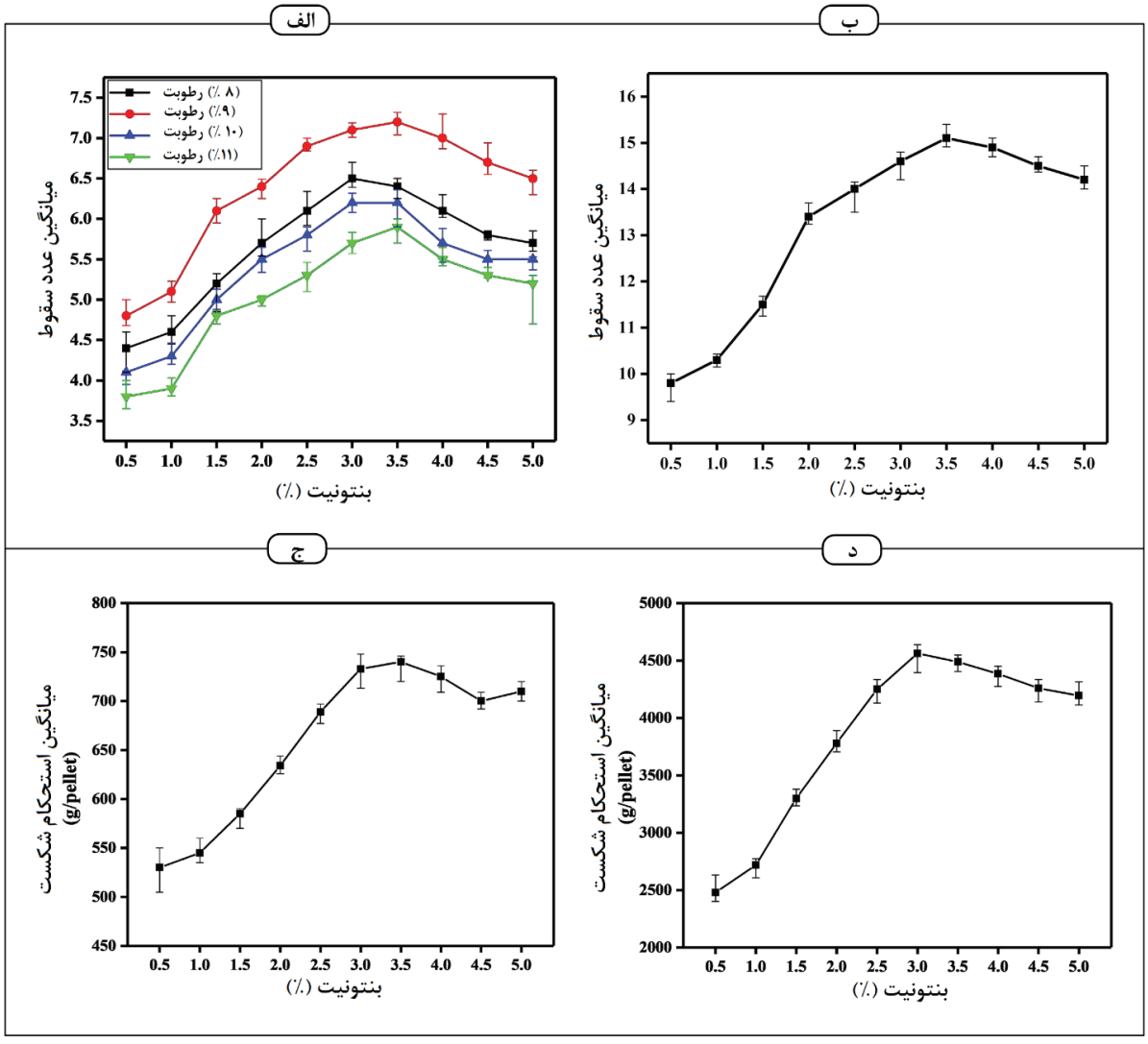
نتایج استحکام شکست گندله طبق استانداردهای ذکرشده برای گندله‌های خام و خشک به ترتیب در شکل (۶)- ج و (۶) – د نشان داده شده است که بیشترین مقدار استحکام مربوط به گندله‌های خشک برای ۳% چسب بنتونیت است ولی برای گندله‌های خام بیشترین استحکام شکست مربوط به ۳٫۵ درصد چسب بنتونیت و مقدار آن ۷۴۰ گرم بر هر گندله است. علت افزایش استحکام و عدد سقوط برای گندله‌های خام و خشک با افزایش چسب این است که استحکام گندله به توزیع ذرات بنتونیت و شکل بستر ایجادشده بستگی دارد. با افزایش بنتونیت در بار گندله، استحکام گندله تر و خشک افزایش می‌یابد و ازآنجایی‌که مقاومت گندله‌ها در برابر سقوط آزاد و استحکام شکست به میزان استحکام اتصال و پیوند آن‌ها بستگی دارد به این ترتیب عدد سقوط و استحکام شکست افزایش می‌یابد. بنتونیت با جذب آب و رطوبت در ساختار مولکولی خود، آب لازم را برای تجمع ذرات بار کاهش می‌دهد و باعث رشد جوانه‌ها و گلوله‌های اولیه می‌شود. تحقیقات بسیار بر روی نحوه عملکرد بنتونیت به‌عنوان چسب، تأثیر آن را در کنار هم نگه‌داشتن ذرات با تشکیل ژل‌هایی سخت شده که بین ذرات پل می‌زنند و افزایش نیروهای واندروالسی بین ذرات نشان داده است[۵]، [۶]، [۱۸]، [۲۳]. روند افزایشی – کاهشی استحکام و عدد سقوط به این دلیل است که با افزایش درصد بنتونیت از یک مقدار بهینه، چسبندگی در حضور بنتونیت اضافی زیاد می‌شود و تولید گندله با مشکل مواجه می‌شود و در حقیقت گندله‌ها با مقدار زیاد بنتونیت به‌صورت همگن تولید نمی‌شوند و در حین گندله‌سازی میکروگندله‌ها و جوانه‌های اولیه به یکدیگر می‌پیوندند و تولید گندله‌هایی با سطحی نامنظم و ناصاف می‌کنند.

نتایج استحکام گندله ساخته‌شده با چسب بنتونیت (درصدهای ۱، ۳ و ۵ درصد) در دماهای مختلف در شکل (۶) نشان داده‌شده است. با افزایش دما، استحکام گندله افزایش می‌یابد. تأثیر افزایش چسب بنتونیت مصرفی در دماهای بالا نسبت به دماهای پایین قابل‌توجه است. در هنگام پخت و احیا، برای تولید گندله‌هایی با استحکام بالا یون‌های سدیم و کلسیم موجود در بنتونیت، به‌عنوان مواد روان‌ساز عمل کرده و با پایین آوردن نقطه ذوب برخی از مواد معدنی موجود در گندله، موجب ذوب آن‌ها در دمای پایین و افزایش استحکام گندله‌ها حتی در مرحله پیشگرم می‌شوند. این فرآیند موجب کاهش شکست و تلفات گندله‌ها در هنگام حمل آن‌ها به مرحله نهایی پخت می‌شود[۱۸].

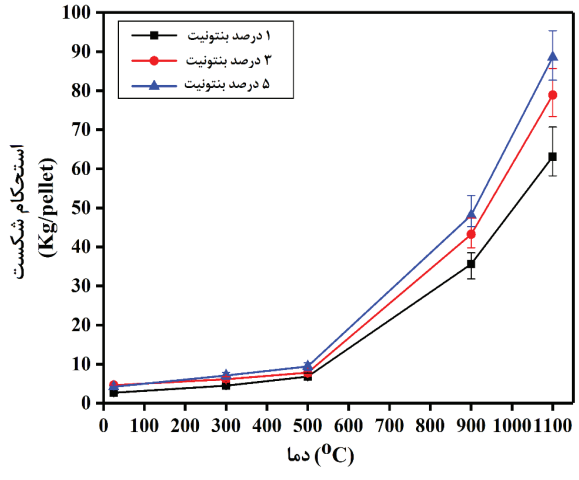
تأثیر سیمان فوندو بر خواص فیزیکی گندله

نتایج آزمون عدد سقوط و استحکام شکست برای گندله‌هایی با مخلوط بنتونیت و سیمان فوندو برای دو حالت خام و خشک در شکل (۸) ارائه شده است. تأثیر افزودن بنتونیت به درصد مشخصی از سیمان فوندو روند افزایشی و صعودی را نشان می‌دهد.با توجه به نتایج شکل (۸) می‌توان گفت که

www.SID.ir



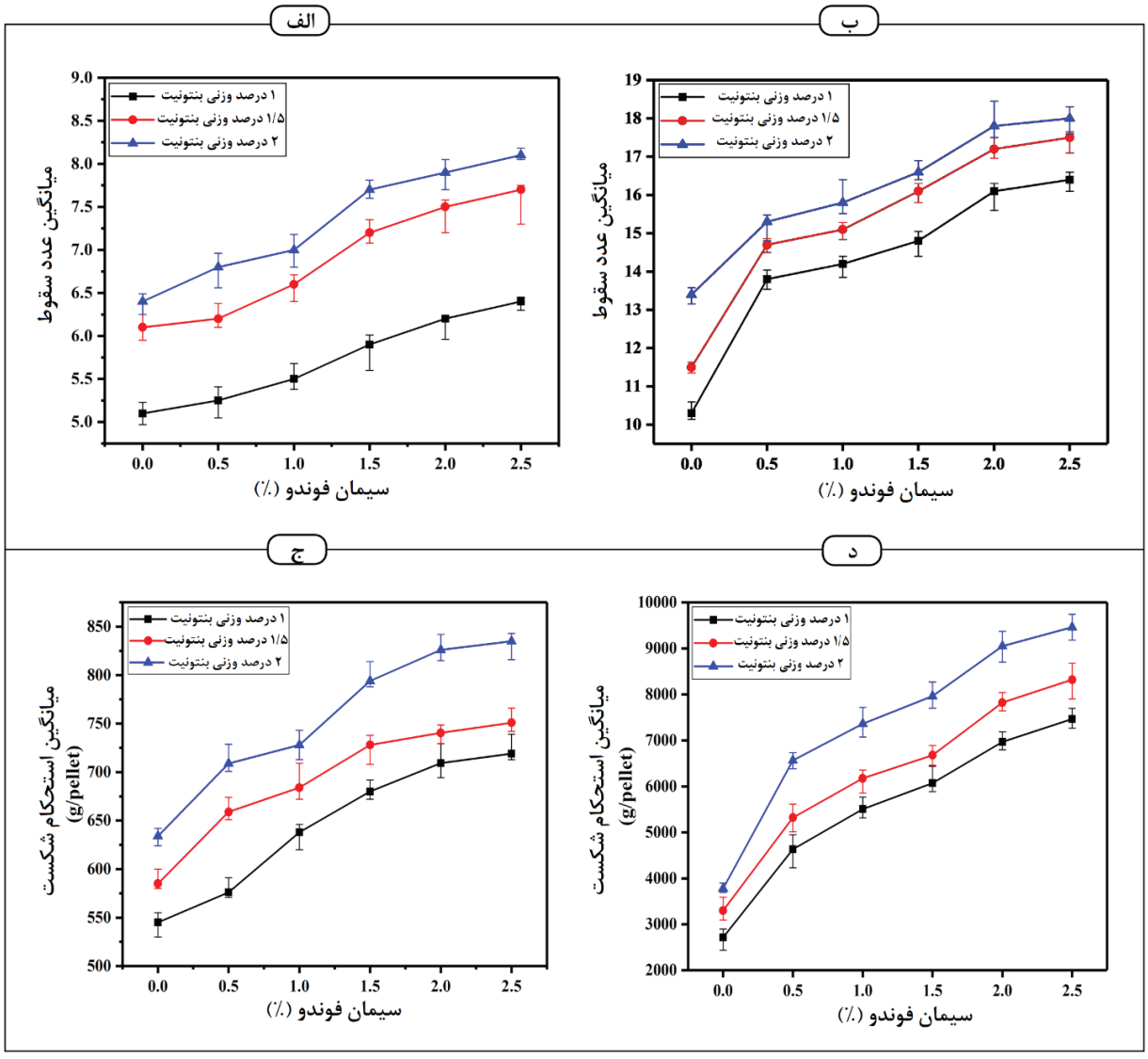
شکل ۶. نتایج میانگین عدد سقوط و استحکام شکست برای گندله‌هایی با درصد مختلف بنتونیت و ابعاد mm ۱۲-۹، الف) میانگین عدد سقوط برای گندله‌هایی با درصد رطوبت مختلف، ب) میانگین عدد سقوط برای گندله‌های خشک با رطوبت اولیه ۹%، ج) میانگین استحکام شکست برای گندله‌های تر با ۹% رطوبت اولیه، د) میانگین استحکام شکست برای گندله‌های خشک با ۹% رطوبت اولیه



شکل ۷. نتایج استحکام شکست گندله‌هایی با درصدهای مختلف بنتونیت و ابعاد mm ۱۲-۹ در دماهای مختلف

در حالت خام، استحکام بیشتر تحت تأثیر پیوند هیدرولیکی بین ذرات کنسانتره است. سیمان با ذرات کنسانتره، باعث تشکیل فیلمی از این ترکیبات شده و اضافه کردن آب باعث تشکیل بلورهای آبدار گشته و ذرات به‌صورت کاملاً مقاوم در کنار هم قرار می‌گیرند؛ بنابراین افزودن سیمان فوندو در یک درصد مشخص از بنتونیت با ذرات کنسانتره ایلمنیت سبب به وجود آمدن یک‌لایه نازک از این ترکیبات شده و افزودن آب باعث تشکیل بلورهای آبدار می‌شود که درنهایت استحکام را افزایش می‌دهد، سپس با خشک شدن نمونه‌ها پیوند هیدرولیکی بین ذرات جای خود را به پیوند شیمیایی قوی‌تر می‌دهد. به همین دلیل استحکام و عدد سقوط خشک در مقایسه با استحکام خام افزایش مطلوب و قابل‌توجهی را نشان می‌دهد[۵].

www.SID.ir



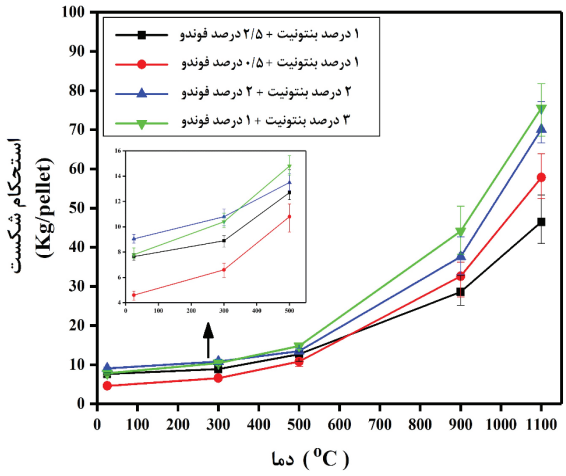
شکل ۸. نتایج میانگین عدد سقوط و استحکام شکست برای گندله‌هایی با مخلوط بنتونیت - فوندو و ابعاد mm ۱۲-۹ و رطوبت ۹%، الف) میانگین عدد سقوط برای گندله‌های خام (۱۰ بار تکرار)، ب) میانگین عدد سقوط برای گندله‌های خشک (۱۰ بار تکرار)، ج) میانگین استحکام شکست برای گندله‌های تر (۵ بار تکرار)، د) میانگین استحکام شکست برای گندله‌های خشک (۵ بار تکرار).

نتایج استحکام شکست در دماهای مختلف برای گندله‌های ساخته‌شده با مخلوطی از بنتونیت و سیمان فوندو در شکل (۹) نشان داده‌شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده مشخص است که در دماهای بالا، گندله‌هایی که دارای سیمان بیشتری هستند از استحکام کمتری نسبت به گندله‌هایی که چسب بنتونیت بیشتری دارند، برخوردار هستند. علاوه بر این می‌توان تأثیر مثبت افزایش استحکام در دماهای بالا با افزایش مصرف بنتونیت را متوجه شد، چراکه استحکام شکست در دماهای بالا برای گندله ساخته‌شده با ۲% بنتونیت + ۲% فوندو به‌مراتب کمتر از گندله‌ی ساخته‌شده با ۳% بنتونیت + ۱% فوندو است درحالی‌که همین گندله در دمای محیط نتیجه عکس را نشان داده و افزایش سیمان فوندو در گندله، سبب افزایش استحکام شکست گندله می‌شود، به‌طور مثال برای گندله‌هایی که با ۱ درصد چسب بنتونیت ساخته‌شده‌اند، گندله‌ایی که درصد بیشتری از سیمان را دارا است استحکام شکست بیشتری در دماهای پایین دارد درحالی‌که با افزایش دما افزودن بیشتر سیمان تأثیر منفی دارد و عامل افزایش استحکام افزودن چسب بنتونیت است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر ساخت گندله‌هایی از کنسانتره ایلمنیت کهنوج توسط دستگاه گندله‌ساز دیسکی آزمایشگاهی مورد بررسی قرارگرفته ضمن تعیین شرایط کار دستگاه برای رسیدن به بیشترین بازیابی، تأثیر میزان رطوبت افزوده شده و همچنین استفاده از بنتونیت و مخلوط بنتونیت – سیمان

www.SID.ir



شکل ۹. نتایج استحکام شکست برای گندله‌هایی با درصدهای مختلف از مخلوط بنتونیت و سیمان فوندو در دماهای مختلف (۹% رطوبت، ابعاد گندله ۱۲-۹ mm)

فوندو به‌عنوان چسب بر استحکام دمای محیط و دمای بالای گندله‌ها طبق آزمون‌های استاندارد بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که:

۱- در دستگاه گندله‌ساز دیسکی آزمایشگاهی مورد استفاده با قطر دیسک ۵۰ cm و ارتفاع نوار ۱۰ cm، زاویه‌ی چرخش ۴۰ درجه نسبت به افق، سرعت چرخش ۳۰ rpm و زمان گندله‌سازی ۶۰ دقیقه بهترین بازده پلت‌سازی (۸۵%) را به‌دست دادند.

۲- میزان رطوبت بهینه برای گندله‌سازی (مقادیر ۵-۱% چسب بنتونیت) با توجه به شاخصه‌ی عدد سقوط، در حدود ۹% بدست آمد.

۳- افزایش مصرف چسب بنتونیت در گندله برای محدوده ۵-۱%، روند افزایشی-کاهشی را برای عدد سقوط و استحکام را نشان داد، بدین‌صورت که در ۴-۳% بنتونیت، بیشترین مقادیر عدد سقوط و استحکام برای گندله‌ی خام و خشک به‌دست‌آمد. رفتار بنتونیت بر استحکام در دماهای بالا، روند افزایشی را نشان داد.

۴- استفاده از چسب بنتونیت برای گندله‌سازی به‌منظور افزایش استحکام مناسب است اما تأثیر منفی روی مراحل بعدی فرآوری می‌گذارد. استفاده از سیمان آلومینوکلسیایی (فوندو) به‌عنوان چسب مصرفی (همراه بنتونیت) در گندله‌سازی، روند صعودی را برای استحکام در دمای محیط و عدد سقوط گندله‌ی خام و خشک نشان داد. در دماهای بالا افزودن سیمان فوندو به بنتونیت به علت تغییر فاز محصولات واکنش‌های اتصال سیمان، سبب کاهش استحکام شکست گندله، نسبت به حالت بنتونیت خالص می‌شود.

تقدیر و تشکر

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی انجام شده است.

www.SID.ir

References

[1] F.H.Froes, Titanium: physical metallurgy, processing, and applications, 1st Ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 2015.

[2] S. Parirenyatwa, L. Escudero-Castejon, S. Sanchez-Segado, Y. Hara, and A. Jha, "Comparative study of alkali roasting and leaching of chromite ores and titaniferous minerals" Hydrometallurgy, Vol. 165, pp. 213–226, Oct. 2016.

[3] W. Zhang, Z. Zhu, and C. Y. Cheng, "A literature review of titanium metallurgical processes" Hydrometallurgy, Vol. 108, no. 3–4, pp. 177–188, 2011.

[4] M. Guéguin, F. Cardarelli, "Chemistery and mineralogy of titania-rich upgraded titania slags" Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol. 7508, pp. 1-58, 2007.

[5] T. C. Eisele and S. K. Kawatra, "A review of binders in iron ore pelletization" Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review., Vol. 24, no. 1, pp. 1–90, 2003.

[6] S. P. E. Forsmo, A. J. Apelqvist, B. M. T. Björkman, and P. O. Samskog, "Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder" PowderTechnol., Vol. 169, no. 3, pp. 147–158, 2006.

[7] H. P. Gou, G. H. Zhang, and K. C. Chou, "Phase evolution during the carbothermic reduction process of ilmenite concentrate" Metall. Mater. Trans. B Process Metall.Mater. Process. Sci., Vol. 46, no. 1, pp. 48–56, 2014.

[8] A. Bhalla, C. S. Kucukkargoz, and R. H. Eric, "Solid-state reduction of an ilmenite concentrate with carbon" J. South. African Inst. Min. Metall., Vol. 117, no. 5, pp. 415–421, 2017.

[9] A. Mehdilo , M. Irannajad, "Iron removing from titanium slag for synthetic rutile production" Physicochemical Problems of Mineral Processing, Vol. 48, no. 2, pp. 425-439, 2012.

[10] M. Tripathy, S. Ranganathan, and S. P. Mehrotra, "Investigations on reduction of ilmenite ore with different sources of carbon" Trans. Institutions Min. Metall. Sect. C Miner. Process. Extr. Metall., Vol. 121, no. 3, pp. 147–155, 2012.

[11] H. J. Wouterlood, "The reduction of ilmenite with carbon" J. Chem. Technol. Biotechnol., Vol. 29, no. 10, pp. 603–618, 1979.

[12] S. Meissner, I. Kobayashi, Y. Tanigaki, and K.-H. Tacke, "Reduction and melting model of carbon composite ore pellets" Ironmak. Steelmak., Vol. 30, no. 2, pp. 170–176, 2003.

[13] Y. Wang and Z. Yuan, "Reductive kinetics of the reaction between a natural ilmenite and carbon" Int. J. Miner. Process., Vol. 81, no. 3, pp. 133–140, Dec. 2006.

[14] S. K. Kawatra, T.C. Eisele, K.A. Lewandowski, and J.A. Gurtler, "Novel binders and methods for agglomeration of ore" Technical Report, Michigan Technological University, Department of Chemical Engineering, 2007.

[15] O. Sivrikaya and A. I. Arol, "Pelletization of magnetite ore with colemanite added organic binders" Powder Technol., Vol. 210, no. 1, pp. 23–28, 2011.

[16] O. Sivrikaya and İ. Ali, "The bonding/strengthening mechanism of colemanite added organic binders in iron ore pelletization" International Journal of Mineral Processing,Vol. 111, pp. 90–100, 2012.

[17] S. P. E. Forsmo, P. O. Samskog, and B. M. T. Bjorkman, "A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness" Powder Technol., Vol. 181, no. 3, pp. 321–330, 2008.

[18] N. El Hussiny, "The physico-chemical properties of binderless briquetting of ilmenite concentrate 2-materials and experiments" Journal of Ore Dressing, Vol. 10, pp. 23-29, 2008.

[19] N. A. El-Hussiny and M. E. H. Shalabi, "Studying the pelletization of Rosseta ilmenite concentrate with coke breeze using molasses and reduction kinetics of produced pellets At 800-1150 °C" Sci. Sinter., Vol. 44, no. 1, pp. 113–126, 2012.

[20] R. Hung, X. W. Lv, C. G. Bai, Q. Y. Deng, and S. W. Ma, "Solid state and smelting reduction of Panzhihua ilmenite concentrate with coke" Can. Metall. Q., Vol. 51, no. 4, pp. 434–439, Oct. 2012.

[21] M. Oorsprong, "Iron ore pellets - determination of crushing strength" Vol. 134313, no. 4, pp. 10–12, 2007.

[22] S. P. Mehrotra, A. Pandey, and S. K. Singh, "Micropelletization of deep beneficiated low grade iron ore for its rational utilization", Project Report, Dept. of Materials Science and Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2012.

[23] P.C. Hayes. Process principles in minerals and materials production. Hayes Publishing CO, Queensland, Australia, 2003.

www.SID.ir