

بسمه تعالی



متالورژی پودر

دکتر لیلا چیت ساز خویی

گروه مهندسی مواد

نیمسال دوم ۱۴۰۳-۱۴۰۴



سرفصلها

- مقدمه
- روشهای تولید پودر فلزات
- خواص پودر فلزات
- شکل دهی پودر
- تف جوشی یا سینترینگ
- عملیات نهایی

مقدمه

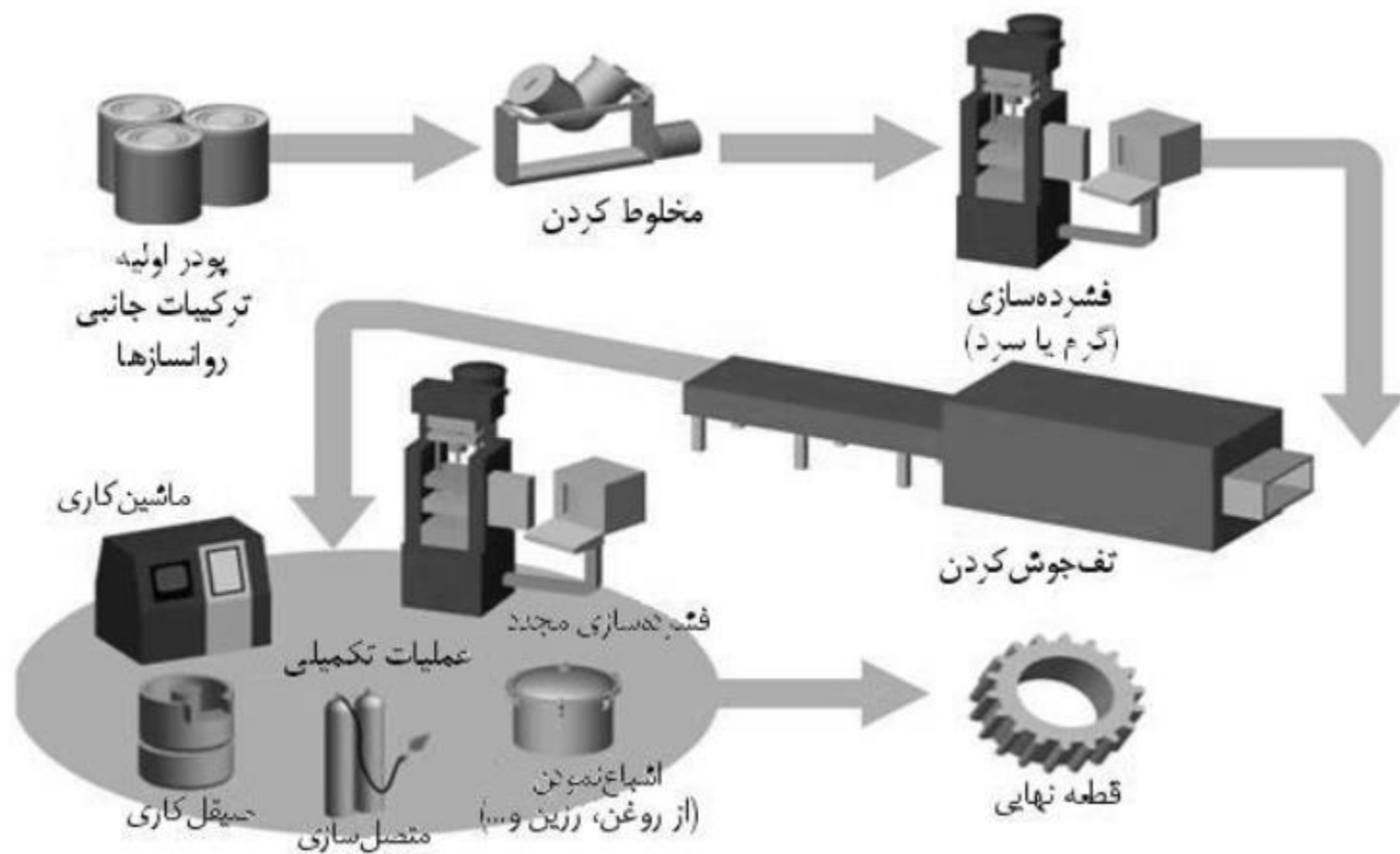
فصل اول



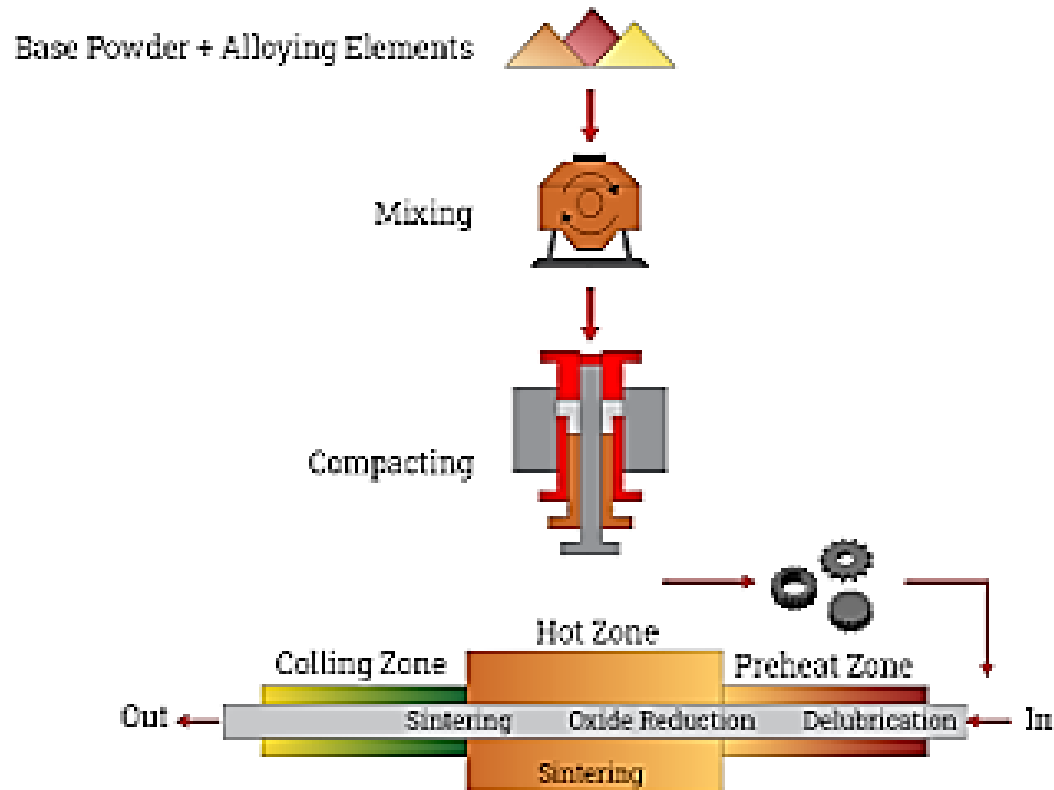
مقدمه

- **متالورژی پودر** یکی از روشهای شکل دهی و تولید مواد فلزی یا سرامیکی است.
- بطور کلی مواد اولیه به شکل پودری بوده و پس از مخلوط شدن در یک قالب فشرده شده و شکل قالب را به خود می گیرد
- در ادامه در درجه حرارتی کمتر از نقطه ذوب مواد اولیه، حرارت داده شده و به اصطلاح سینتر شده و ذرات پودر به هم چسبیده و قطعه مستحکم تولید می شود.
- در ادامه بسته به نوع قطعه و کاربرد آن عملیات نهایی بر روی قطعه سینتر شده انجام می گیرد.

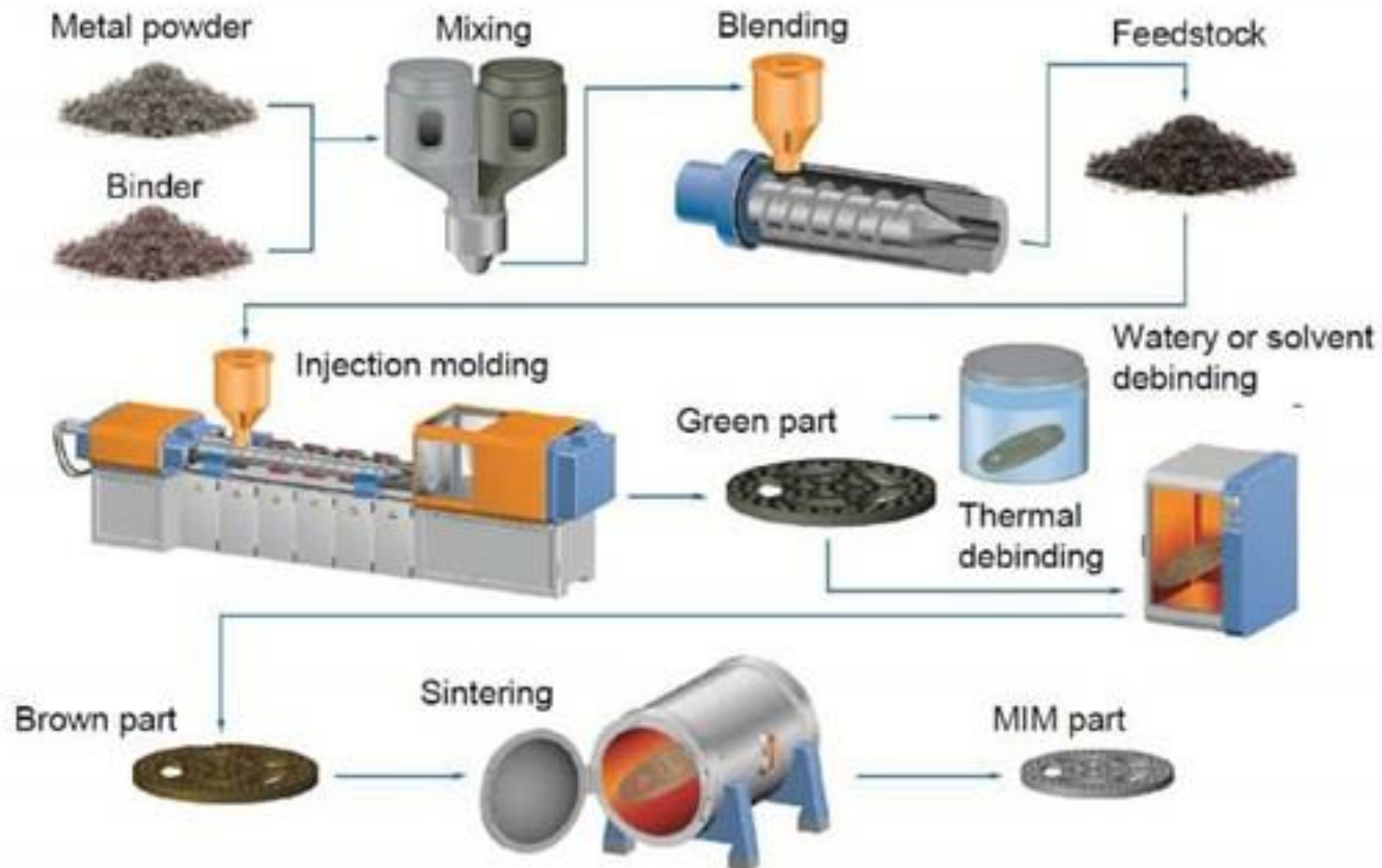
مقدمه



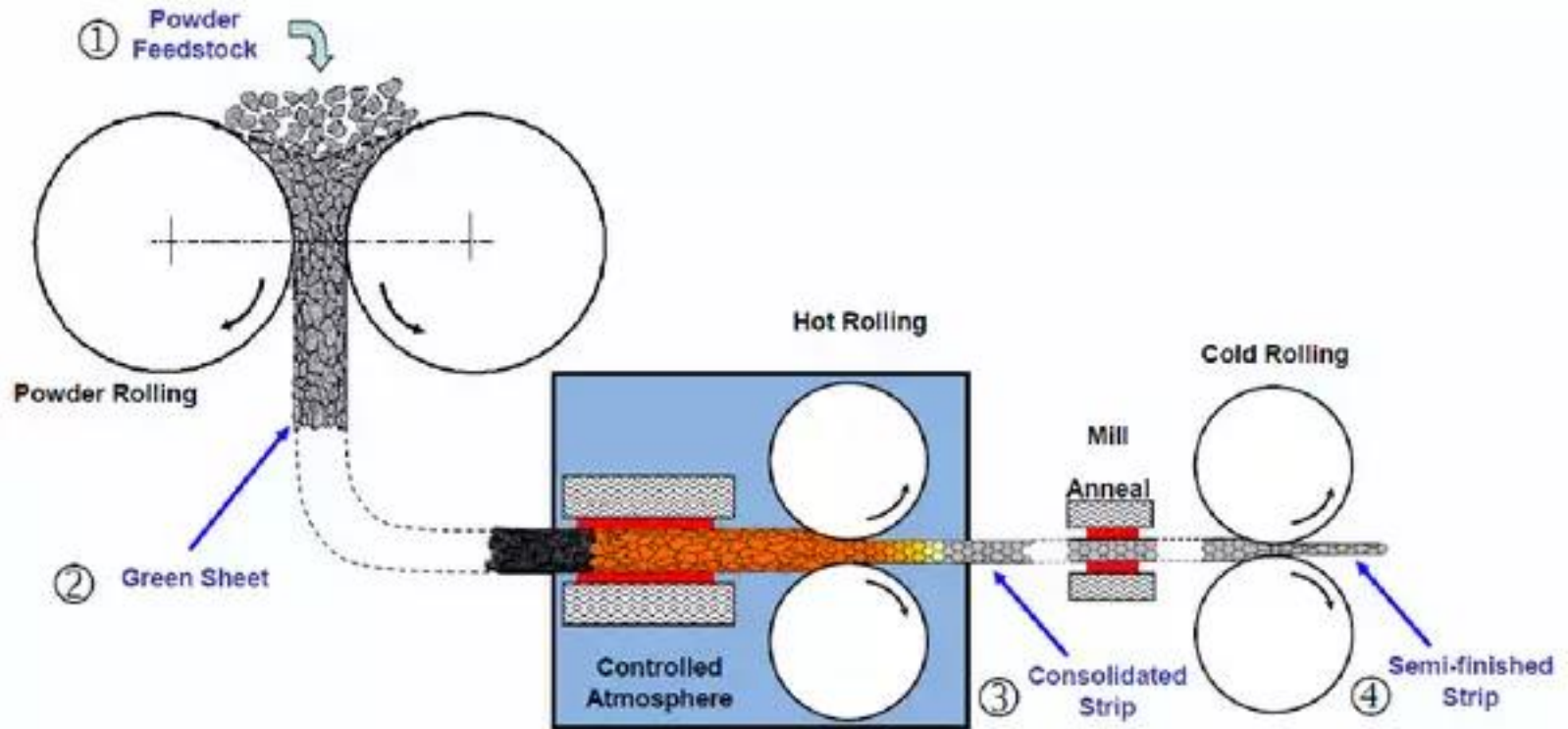
Conventional Powder Metallurgy Process



Metal injection molding

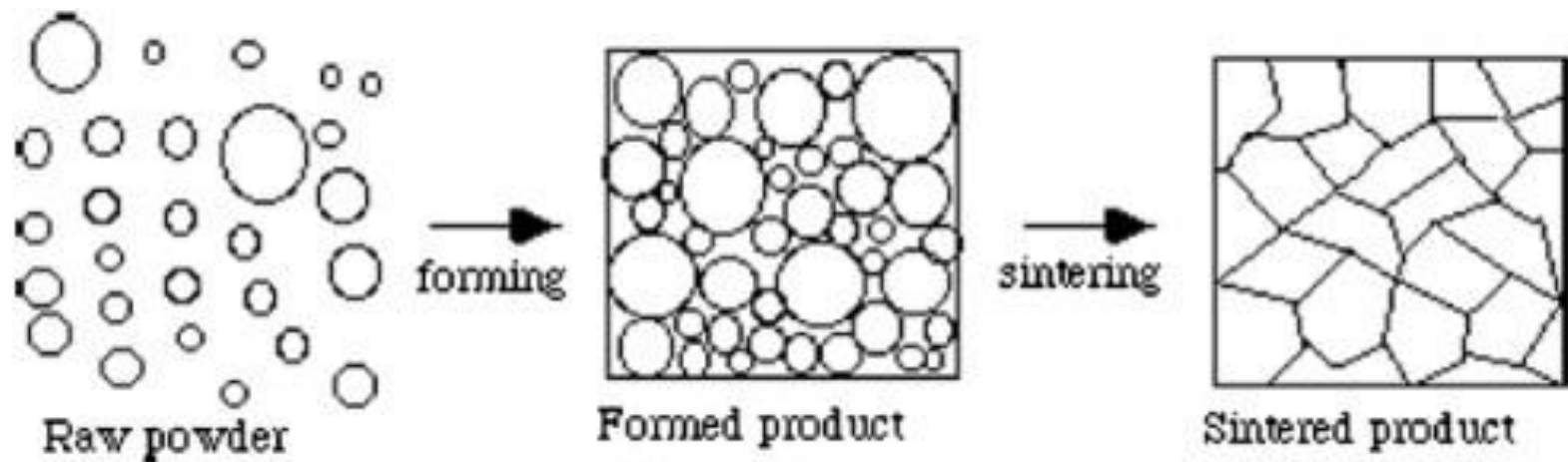


مقدمه



مقدمه

مراحل تبدیل پودر به قطعه جامد

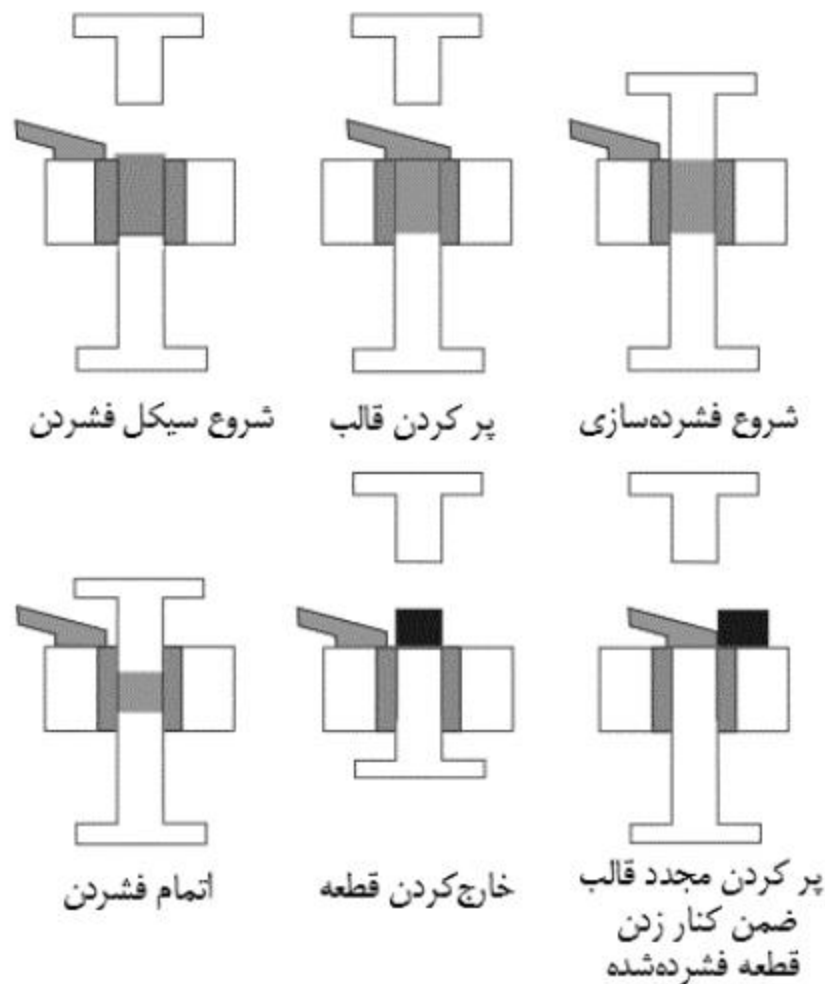
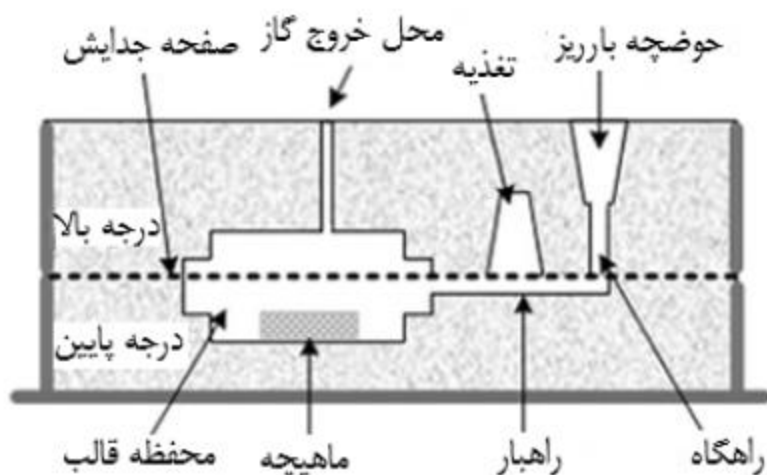




مزایای متالورژی پودر

- در مقایسه با فرآیند ریخته‌گری، چون در زیر دمای ذوب مواد اولیه انجام می‌گیرد بنابراین به درجه حرارت بالا و تجهیزات دما بالا نیاز نیست
- همچنین آلودگی محیطی در مقایسه با ریخته‌گری کمتر است
- قابلیت اتوماسیون و تولید انبوه قطعات با شکل نهایی نسبت به ریخته‌گری دارد بنابراین اقتصادی‌تر است.
- در روش متالورژی پودر مقدار ماده اولیه کمتری در مقایسه با ریخته‌گری مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا ماده اولیه صرفاً برای ساخت قطعه استفاده شده و در راهگاه و تغذیه و ... تلف نمی‌شود.

مزایای متالورژی پودر





کاربردهای متالورژی پودر

1. مواد دیرگداز

مواد سرامیکی یا فلزات دما بالا مثل تنگستن یا مولیبدن

از اولین کاربردهای متالورژی پودر تولید می‌توان به تولید **قطعات پلاتینی** اشاره کرد.

بعدها **سیم‌های تنگستنی** مورد استفاده در لامپها به روش متالورژی پودر تهیه شد.



کاربردهای متالورژی پودر

2. ساخت قطعات متخلخل

فیلترهای متخلخل یا یاتاقانهای خودروانکار





کاربردهای متالورژی پودر

3. ساخت قطعات کوچک و ظریف

مانند چرخدنده ساعت که بسیار ظریف بوده و نیازمند دقت ابعاد و صافی سطح بالایی هستند و ماشینکاری این قطعات به سختی انجام می‌گیرد.

4. ساخت قطعات همگن و بدون جدایش فازی

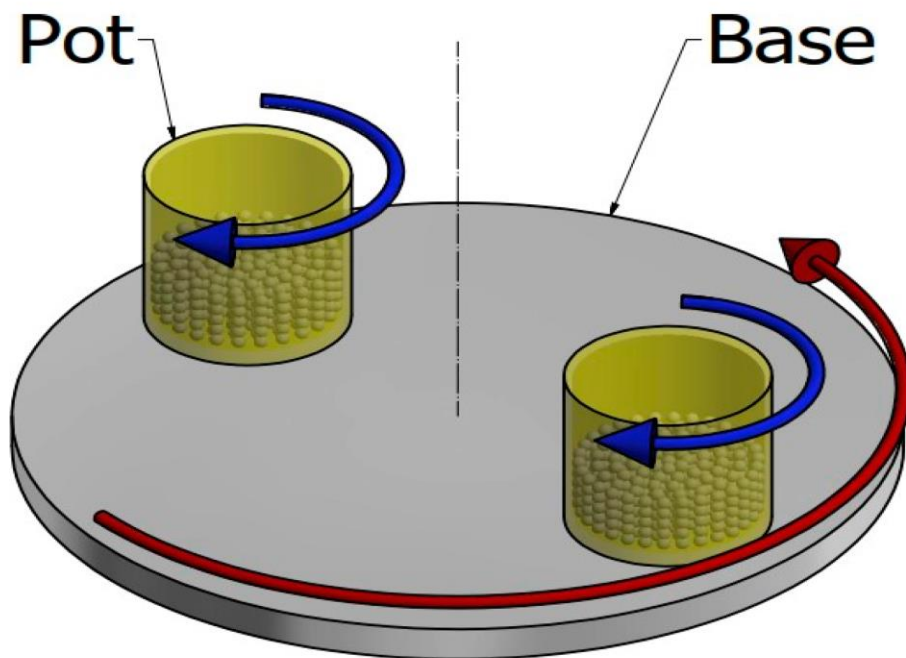
مانند روش ریخته‌گری جدایش ماکرو در قطعات متالورژی پودر وجود نداشته و ممکن است به دلیل استفاده از پودرها جدایش میکرو داشته باشیم که با کنترل فرآیند سینترینگ یا مخلوط کردن پودرهای اولیه این جدایش را نیز می‌توان از بین برد.



کاربردهای متالورژی پودر

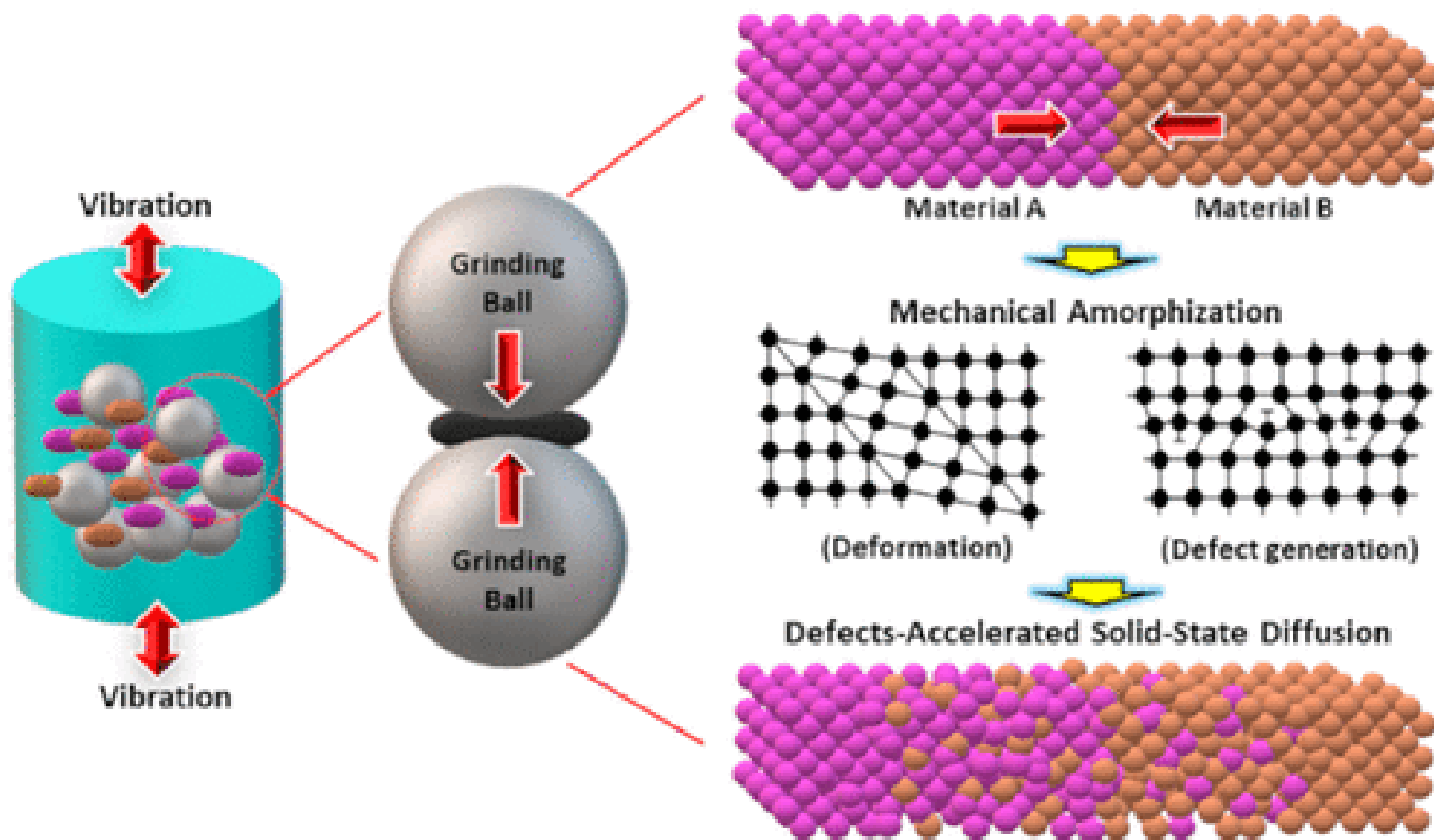
5. ساخت آلیاژهای فلزی

می توان پودر فلزات اولیه را با نسبت معین مخلوط کرده و با آلیاژسازی مکانیکی، قطعه آلیاژی تولید کرد



کاربردهای متالورژی پودر

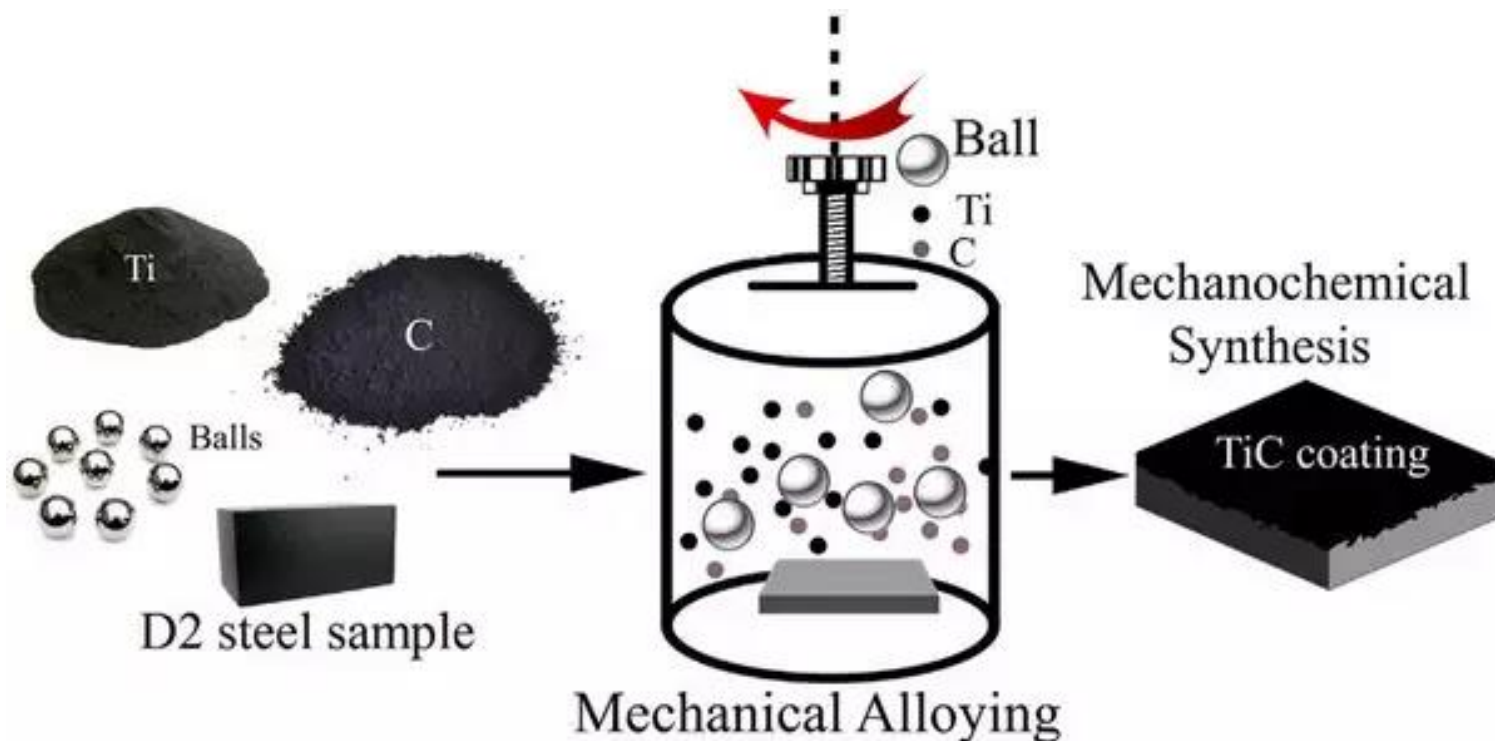
5. ساخت آلیاژهای فلزی



کاربردهای متالورژی پودر

5. ساخت آلیاژهای فلزی

تولید پوشش کامپوزیتی بر روی زمینه فلزی توسط آلیاژسازی مکانیکی



کاربردهای متالورژی پودر

6. ساخت قطعات کامپوزیتی از فلز و سرامیک

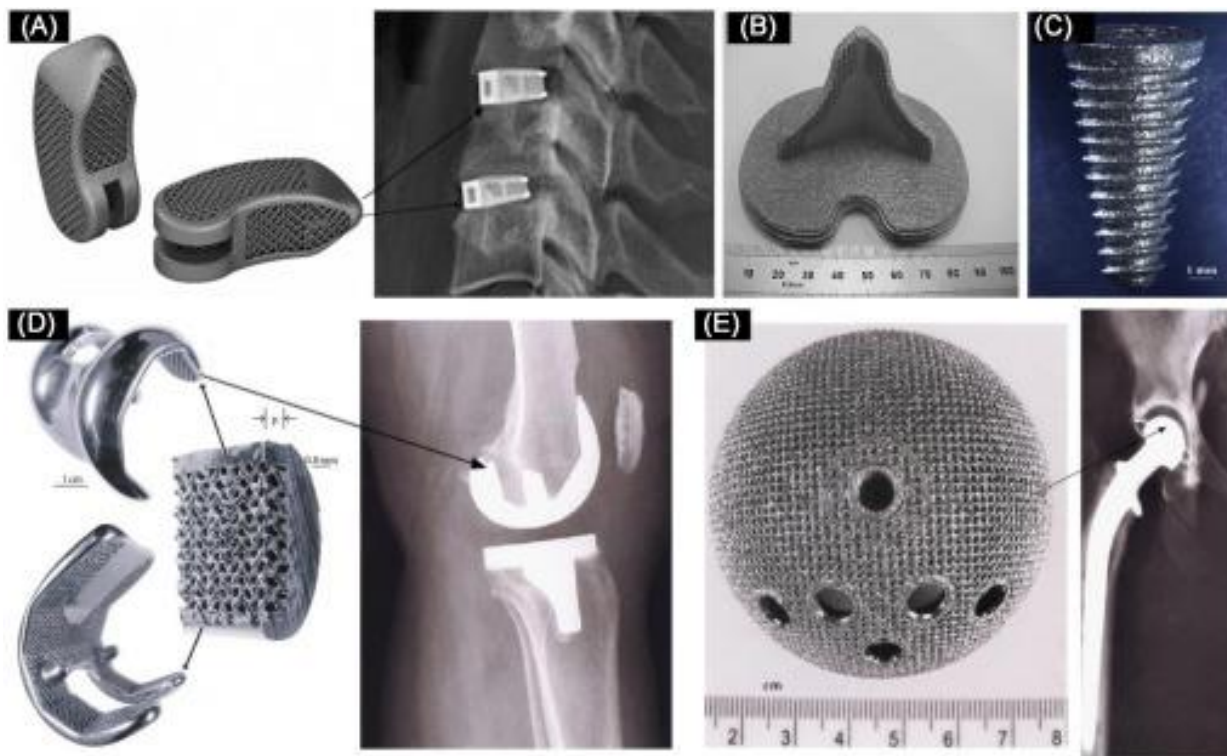
مانند سرامت‌ها که موادی مرکب زمینه سرامیکی هستند که به دلیل حضور فاز دوم فلزی، افزون بر خواص و مزایای یک سرامیک، دارای چقرمگی و مقاومت به شوک حرارتی نیز می‌باشند.



کاربردهای متالورژی پودر

7. ساخت ایمپلنت‌های زیست سازگار

قطعات متالورژی پودر به دلیل ساختار متخلخل خود زیست فعالی سطح ایمپلنت را افزایش می‌دهند.



روش‌های تولید پودر

فصل دوم



روشهای تولید پودر

روش تولید پودر بر اندازه، شکل، ریزساختار، ترکیب شیمیایی و هزینه‌های تولید پودر تاثیر می‌گذارد.

به طور کلی روشهای تولید پودر فلزات به سه دسته کلی زیر تقسیم بندی می‌شوند:

1. مکانیکی

2. فیزیکی

3. شیمیایی



روش‌های مکانیکی

با استفاده از نیروهای مکانیکی مانند ضربه، برش، سایش و تراکم، پودر فلزات تهیه می‌شود.

پودر فلزات تولید شده اغلب **شکل نامنظم** داشته و **توزیع اندازه گسترده** دارند.

به سه روش عمده زیر انجام می‌گیرد:

1. ماشین کاری (براده برداری)

2. آسیا کاری

3. فرآیند ضربه‌ای



روش‌های مکانیکی

1. ماشین کاری (براده برداری)

- قطعه از جنس فلز مورد نظر را ماشینکاری کرده و براده‌های حاصل را جمع آوری کرده و به عنوان پودر فلزی استفاده می‌کنند.
- پودر حاصل درشت بوده و اندازه و شکل نامنظمی خواهد داشت.
- برای فلزات ترد کاربرد دارد زیرا براده حاصل از فلز نرم بصورت نواری و خیلی بزرگ تشکیل خواهد شد.
- تناژ تولید پایین است.
- در بسیاری از موارد پودر حاصله نیازمند عملیات ثانویه مانند آسیاکاری است.



روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

- رایج‌ترین روش مکانیکی تولید پودر فلزات بوده و اغلب به عنوان روش تکمیلی برای دیگر روشها نیز استفاده می‌شود.
- با استفاده از دستگاه‌های آسیاکاری مکانیکی می‌توان علاوه بر ریز کردن ذرات یک ماده فرآیند آلیاژسازی مکانیکی را نیز بر روی آن‌ها انجام داد.
- در صورتی که این فرآیند در محیط گازی انجام شود آسیاکاری نامیده شده و در صورتی که محیط خردایش ذرات محیط مایع باشد این فرآیند را آسیابکاری مکانیکی می‌نامند.



روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

انواع آسیاهای مورد استفاده عبارتند از:

- گلوله‌ای چرخشی یا سیاره‌ای
- گلوله لرزشی
- گلوله سایشی
- آسیای افقی میله‌ای یا گلوله‌ای



روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا افقی گلوله‌ای:

این نوع آسیا کم انرژی بوده و برای خردایش حجم زیادی از پودر (تا بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم)، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

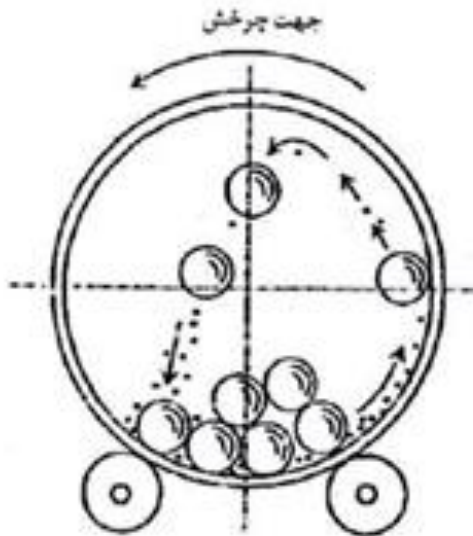
از محفظه استوانه‌ای از جنس فولاد تشکیل شده که حول محور افقی می‌چرخد و داخل این استوانه گلوله‌های فولادی قرار گرفته‌اند.

با چرخش محفظه آسیا حول محور افقی، گلوله‌ها به مواد ورودی به محفظه آسیا برخورد کرده و موجب خردایش مواد می‌شوند.

روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا افقی گلوله‌ای:





روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا افقی گلوله‌ای:

میزان خردایش ذرات به قطر محفظه آسیا، سرعت چرخش، اندازه گلوله‌ها و اندازه ذرات اولیه بستگی دارد.

از آنجایی که این آسیاها در دسته پرانرژی قرار نمی‌گیرند، لذا اندازه ذرات نهایی بزرگتر اما ذرات بدست آمده دارای همگنی و یکنواختی بیشتری هستند.

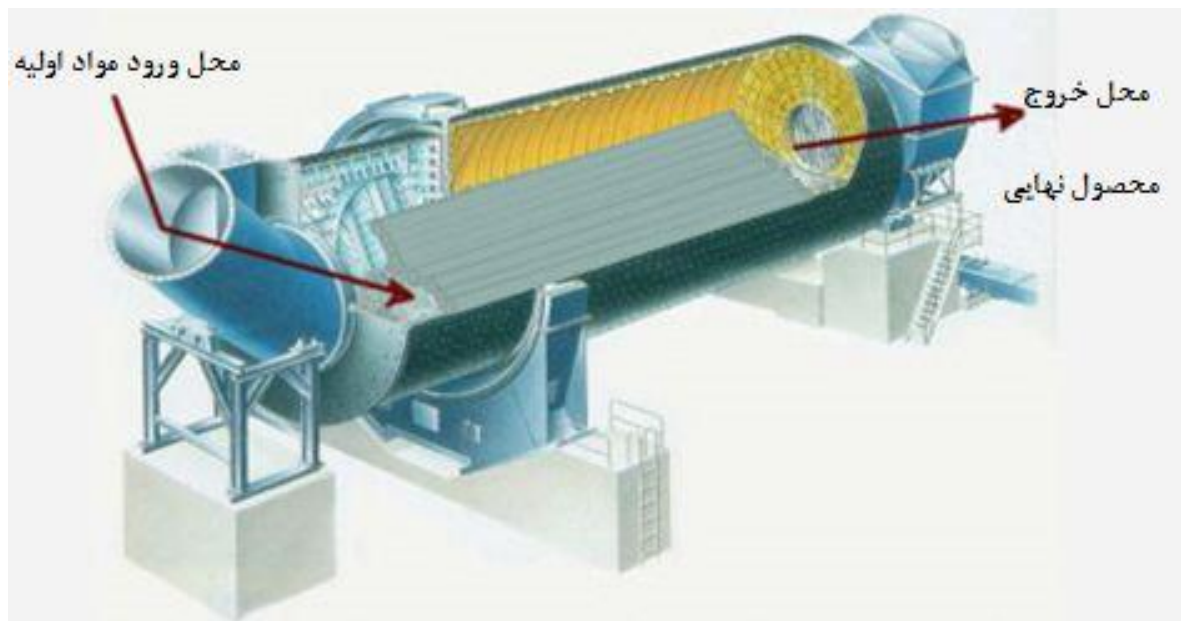


روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا افقی میله‌ای:

در این آسیا به جای استفاده از گلوله از میله‌های فولادی استفاده می‌شود. در نتیجه مقدار آلودگی پودر نهایی در اثر برخورد با میله‌ها و بدنه محفظه در مقایسه با آسیاهای گلوله‌ای افقی کاهش می‌یابد.





روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا گلوله سایشی:

این آسیا از یک محفظه عمودی یا افقی تشکیل شده است که یک اهرم دارای چندین تیغه در مرکز آن قرار گرفته و در حال چرخش است.

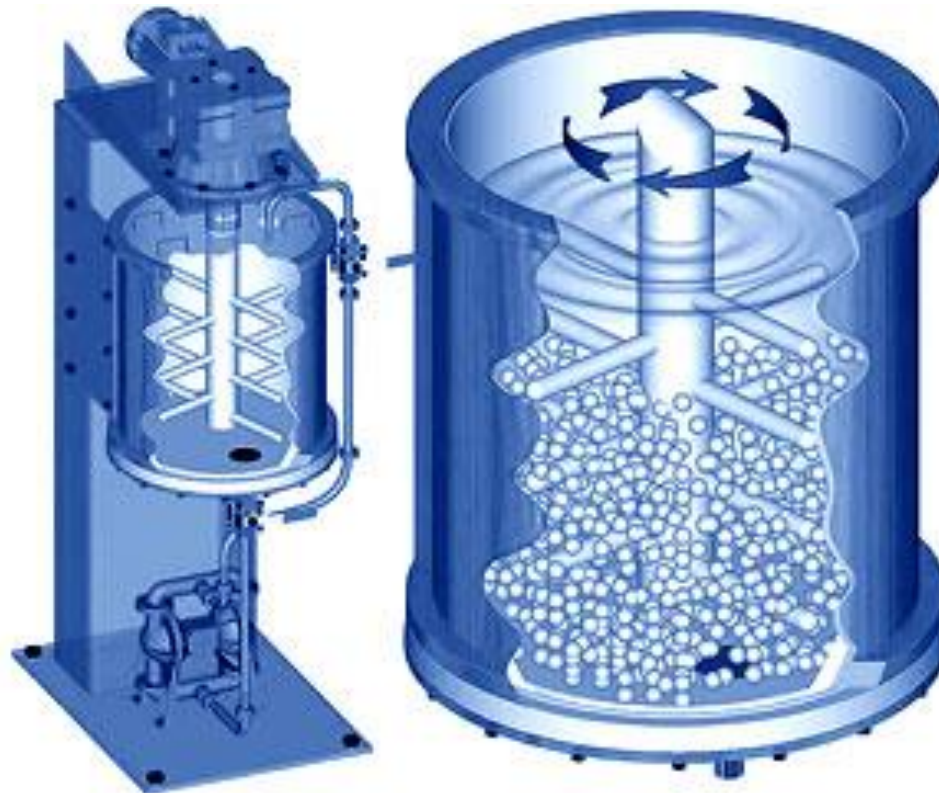
انتقال انرژی از طریق تیغه‌های متصل به اهرم مرکزی به گلوله‌های موجود در محفظه آسیا صورت گرفته و در اثر سایش گلوله‌ها با مواد ورودی به محفظه آسیا، ذرات خرد شده و ریز می‌شوند.



روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا گلوله سایشی:





روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا گلوله سایشی:

جنس بدنه و گلوله‌ها معمولاً فولاد ضد زنگ است. با این وجود برای کاهش آلودگی‌های ناشی از خردایش گلوله‌ها و بدنه محفظه آسیا، جنس محفظه می‌تواند کاربید سیلیسیم، نیتريد سیلیسیم، آلومینا و یا زیرکونیا باشد.

حجم این آسیاب بین ۰/۵ تا ۴۰ کیلوگرم است و در دسته آسیاهای کم انرژی قرار می‌گیرد.



روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا گلوله لرزشی:

این آسیاها از یک محفظه خردایش بسیار کوچک استفاده می‌کنند و مقدار پودر قابل خردایش در آنها به چند گرم محدود می‌شود.

در این آسیابها محفظه با حرکت نوسانی در سه جهت فضایی سبب برخوردهای شدید بین گلوله‌های موجود در محفظه و ذرات پودر می‌شود و در کمترین زمان ممکن بیشتری خردایش ذرات پودر اتفاق می‌افتد.

بیشترین فرکانس نوسان گلوله‌ها در بین تمامی آسیاها به این آسیا تعلق دارد.



روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا گلوله سیاره‌ای:

در این آسیا ۲ یا ۴ کاپ بر روی یک صفحه دوار قرار می‌گیرد و با چرخش این صفحه دوار، کاپ‌ها در جهت مخالف این صفحه دوار می‌چرخند.

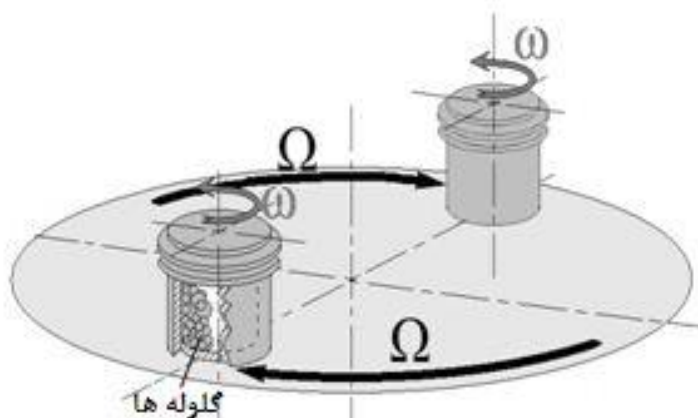
با چرخش کاپ‌ها، گلوله‌های موجود در آن‌ها به مواد اولیه موجود در کاپ برخورد کرده و فرآیند خردایش ذرات اتفاق می‌افتد.

از این آسیاها بیشتر جهت مصارف آزمایشگاهی و تحقیقاتی استفاده می‌شود. حجم این آسیاها کم بوده (معمولا چند ده گرم) و در دسته آسیاهای پرانرژی قرار می‌گیرند.

روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا گلوله سیاره‌ای:





روش‌های مکانیکی

2. آسیا کاری

آسیا گلوله سیاره‌ای:

- با ورود گاز ارگون به محفظه کاپ، می‌توان از اکسید شدن پودر جلوگیری کرد
- جنس محفظه کاپ و گلوله‌ها معمولاً از فولاد زنگ نزن ضد سایش یا چدن سفید آلیاژی است اما در صورت نیاز می‌توان از کاپ‌ها و گلوله‌های آلومینا، کاربید سیلیسیم، نیتريد سیلیسیم، زیرکونیا یا کاربید تنگستن نیز استفاده کرد.
- آلودگی آهن مشکل عمده است و قابل اجتناب هم نیست.



روش‌های مکانیکی

عوامل موثر بر آسیاکاری

1. نسبت گلوله به پودر:

اغلب نسبت وزنی گلوله به پودر را ۱۰ تا ۵۰ می‌گیرند.

هرچه نسبت گلوله به پودر بیشتر باشد انرژی اعمالی به مواد پودری بیشتر خواهد بود.

$\frac{1}{2}$ تا $\frac{2}{3}$ محفظه از مواد و گلوله پر شده و $\frac{1}{3}$ فضا برای حرکت گلوله‌ها باید باقی بماند.

بهتر است از سایزهای مختلف گلوله استفاده شود. اگر تمامی گلوله‌ها یک سایز باشند مواد بین فضای خالی بین گلوله‌ها قرار گرفته و خرد نمی‌شوند. عموماً از سه سایز بزرگ، متوسط و کوچک استفاده می‌شود.



روش‌های مکانیکی

عوامل موثر بر آسیاکاری

2. زمان:

➤ در مراحل ابتدایی در اثر جوش سرد ذرات به هم چسبیده و اندازه پودر افزایش می‌یابد.

➤ با گذشت زمان و برخورد گلوله به پودرها کارسختی ایجاد شده و پودر ترد می‌شود. در نتیجه ضربه گلوله‌ها باعث شکست ذرات شده و اندازه کاهش می‌یابد.

➤ در ادامه پدیده جوش سرد و شکست به تعادل رسیده و اندازه ذرات تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

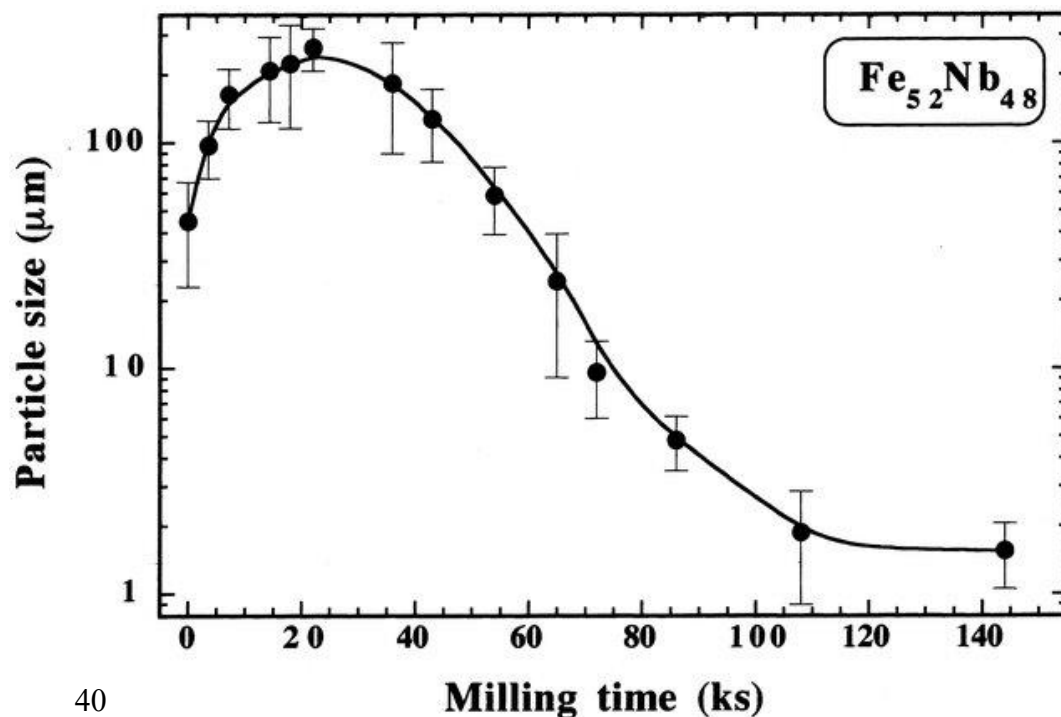


روش‌های مکانیکی

عوامل موثر بر آسیاکاری

2. زمان:

در آلیاژسازی مکانیکی، زمان فاکتور مهمی است ولی در آسیاکاری نه!





روش‌های مکانیکی

عوامل موثر بر آسیاکاری

3. سرعت چرخش:

➤ افزایش سرعت ← افزایش انرژی ← خردایش بیشتر ← زمان کمتر

اما از یک حدی به بعد نیروی گریز از مرکز غلبه کرده و گلوله به دیواره می‌چسبد و همراه آن حرکت می‌کند و نمی‌تواند در داخل محفظه باعث خردایش ذرات شود.

➤ کاهش سرعت ← کاهش انرژی ← خردایش کمتر ← زمان بیشتر

در سرعت کم گلوله‌ها می‌غلطند و انرژی بالایی تولید نمی‌کنند.



روش‌های مکانیکی

عوامل موثر بر آسیاکاری

4. اتمسفر محفظه:

محفظه‌ها دارای شیرهای ورودی و خروجی گاز بوده و توسط آنها می‌توان اتمسفر محفظه را کنترل کرد.

جهت جلوگیری از اکسیداسیون داخل کاپها گاز خنثی مثل آرگون یا نیتروژن به محفظه دمیده می‌شود.

در مواردی که هدف تشکیل ترکیبات خاص مانند هیدرید یا نیتريد باشد، محفظه را با اتمسفر مورد نظر پر می‌کنند.



روش‌های مکانیکی

عوامل موثر بر آسیاکاری

5. دما:

با گذشت زمان، در اثر اصطکاک و ضربه و انجام واکنش شیمیایی، دمای داخل کاپ افزایش می‌یابد.

➤ افزایش دما باعث انجام واکنش جانبی ناخواسته و در شرایطی که از مواد فعال مثل آلومینیوم یا منیزیم استفاده شود، باعث انفجار می‌شود.

➤ همچنین افزایش دما باعث سینترینگ و آگلومره شدن ذرات می‌شود.

بنابراین باید دمای محفظه کاهش یافته و کنترل شود.



روش‌های مکانیکی

عوامل موثر بر آسیاکاری

5. دما:

برای کنترل دما می‌توان در طول زمان آسیاکاری، مدتی را برای **استراحت** در نظر گرفت.

به طوریکه به ازای هر ۲ تا ۵ ساعت کار آسیا، مدت زمان ۳۰ دقیقه استراحت برای آن در نظر گرفت.

در این صورت هم مانع استهلاک و خرابی دستگاه می‌شویم و هم از افزایش بیش از حد دما جلوگیری می‌کنیم.



روش‌های مکانیکی

عوامل موثر بر آسیاکاری

6. عامل کنترل کننده فرآیند (Process Control Agent):

جهت آگلومره شدن ذرات حین آسیکاری از PCA استفاده می‌شود.

ترکیبات آلی مانند استئاریک اسید یا اتانول است که به سطح ذرات چسبیده و مانع چسبیدن چسبیدن ذرات به یکدیگر می‌شود.

پس از اتمام آسیاکاری، با اعمال حرارت تبخیر یا تجزیه شده و از ترکیب پودر جدا می‌شود.

مانند روان کننده عمل کرده و اصطکاک را کاهش می‌دهد. بنابراین در حضور PCA باید انرژی را از طریق افزایش زمان یا سرعت افزایش داد.



روش‌های مکانیکی

مشکلات آسیاکاری

1. ایجاد منطقه مرده در محفظه
2. هدر رفتن انرژی
3. پودر تولیدی دچار کارسختی شده و باید آنیل و تنش زدایی گردد.
4. پودر نامنظم است و قابلیت انباشت پایینی دارد.
5. آلودگی ناشی از آهن



روش‌های مکانیکی

مشکلات آسیاکاری

راه حل از بین بردن منطقه مرده در محفظه:

- ساخت کاپ با بخش انتهایی منحنی و بدون گوشه
- اضافه کردن ترکیبات PCA به پودر
- در زمان استراحت می‌توان پودری که به دیواره چسبیده است را تراشید و مجدداً به محفظه برگرداند.



روش‌های مکانیکی

۳. روش ایجاد ضربه برای تولید پودر

- پودرهای درشت فلزی را توسط جریان گاز سرد شتاب داده و در داخل یک محفظه دارای دیواره، به دیواره کوبیده شده و متلاشی شده و می‌شکنند.
- در مکانیزم دیگر از دو نازل جداگانه مواد حرکت کرده و با سرعت به هم برخورد می‌کنند و خرد می‌شوند.
- مکانیزم دوم بهتر است زیرا آلودگی دیواره در اثر برخورد پودر با آن وارد پودر نمی‌شود.



روش‌های فیزیکی

تمامی فلزات را به این علت که قابلیت ذوب شدن دارند می‌توان از این روش تهیه کرد.

روشهای فیزیکی تهیه پودر

- ۱- روش اتمایزینگ (افشانش)
- ۲- روش گریز از مرکز (دیسک چرخان)
- ۳- روش اتمایزینگ در خلأ
- ۴- روش استفاده از امواج مافوق صوت
- ۵- روش استفاده از محیط پلاسما



روش‌های فیزیکی

1. اتمیزاسیون

در این روش مذاب فلزی از یک نازل باریک خارج شده و یک سیال گازی یا آبی با سرعت بالا به باریکه مذاب برخورد می‌کند.

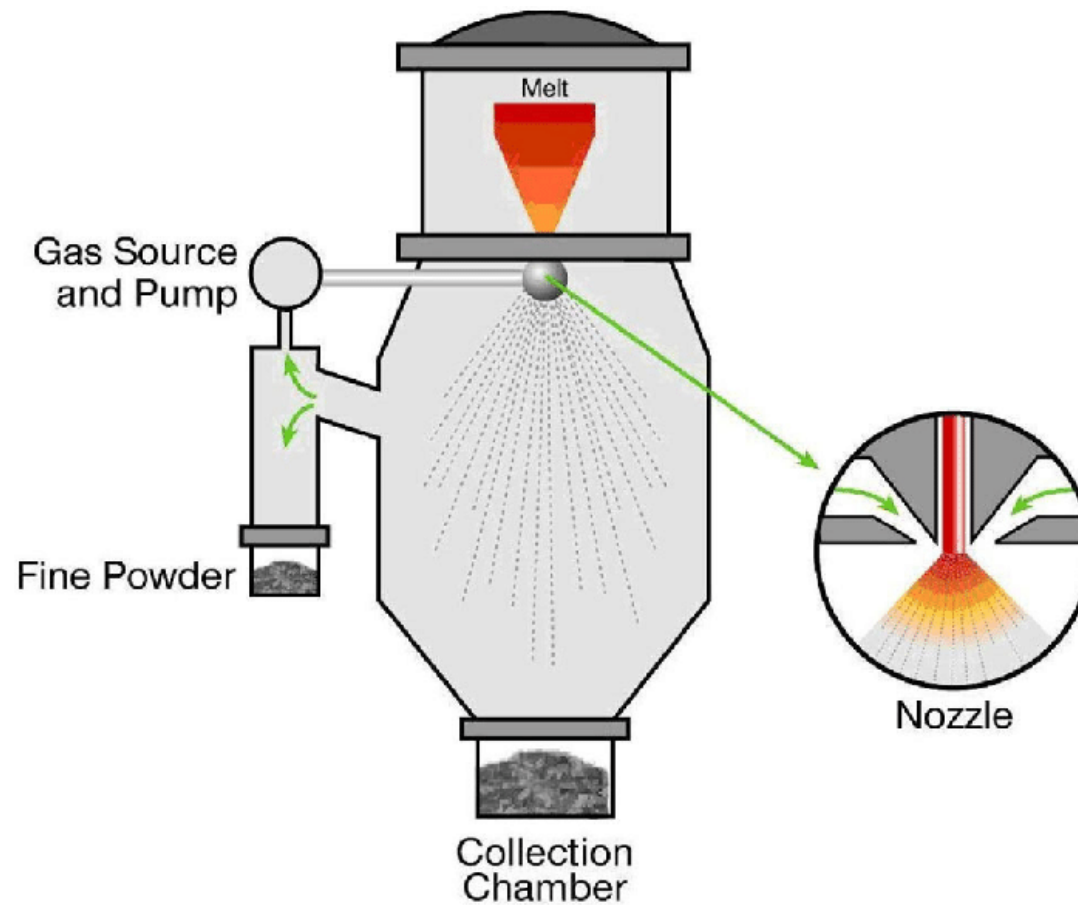
مذاب به صورت قطراتی اسپری شده و به صورت پودر فلزی منجمد می‌شود.

تجهیزات اصلی فرآیند اتمایزینگ از یک کوره و برج یا محفظه خنک کننده تشکیل می‌شود.

ذرات پودری تولید شده توسط این روش زیر ۲۰۰ میکرون هستند.

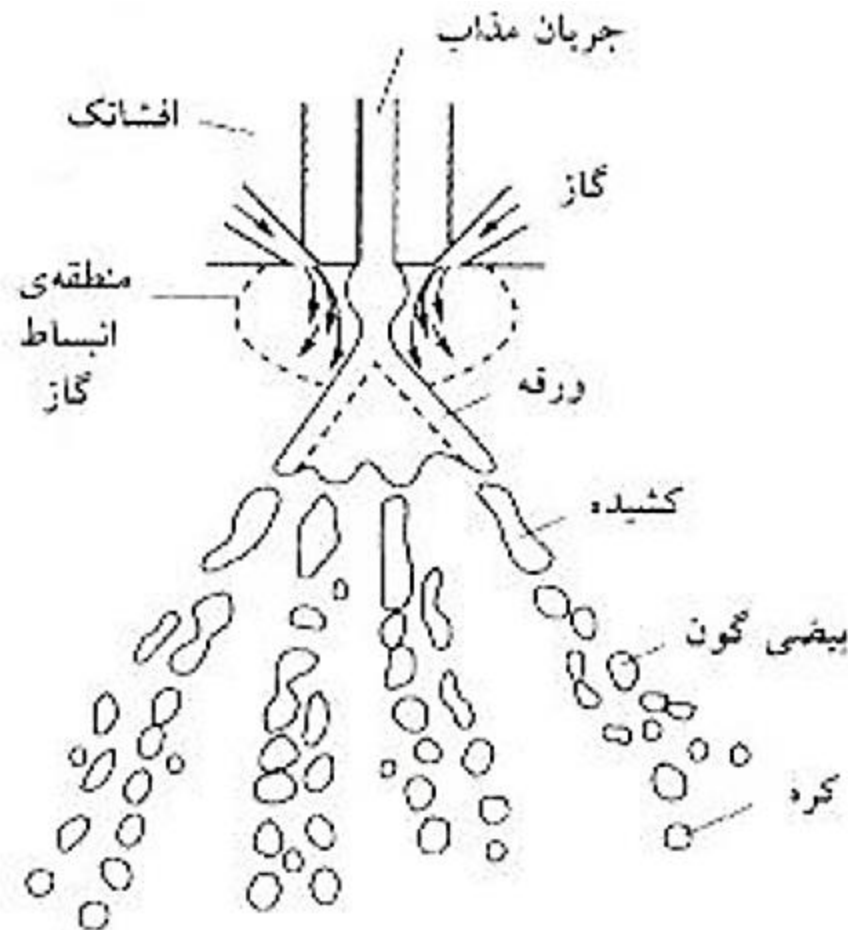
روش‌های فیزیکی

1. اتمیزاسیون گازی



روش‌های فیزیکی

1. اتمیزاسیون گازی



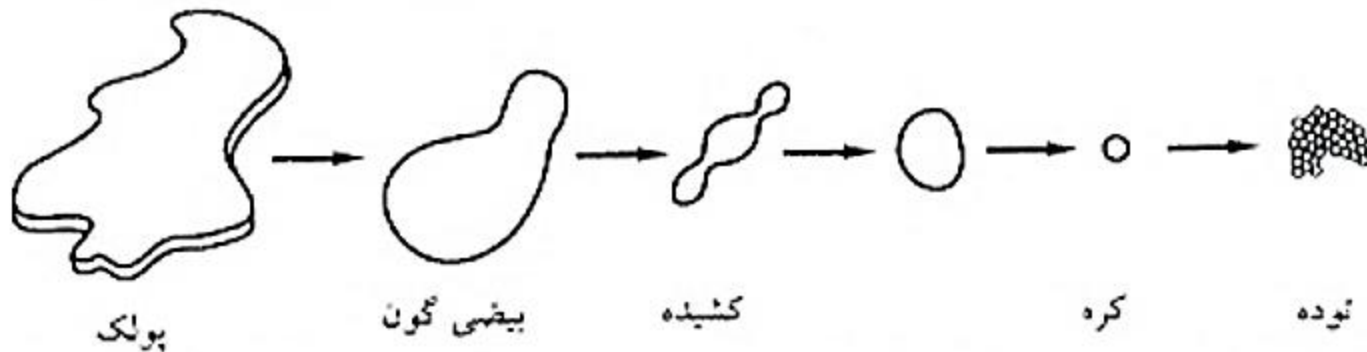


روش‌های فیزیکی

1. اتمیزاسیون گازی

هرچه فوق گداز بیشتر زمان کافی برای انجماد وجود داشته و ذرات پودری به سمت کروی شدن پیش می‌روند.

بسته به میزان فوق گداز مذاب ذرات پودری می‌توانند به شکلهای مختلف دربیایند.





روش‌های فیزیکی

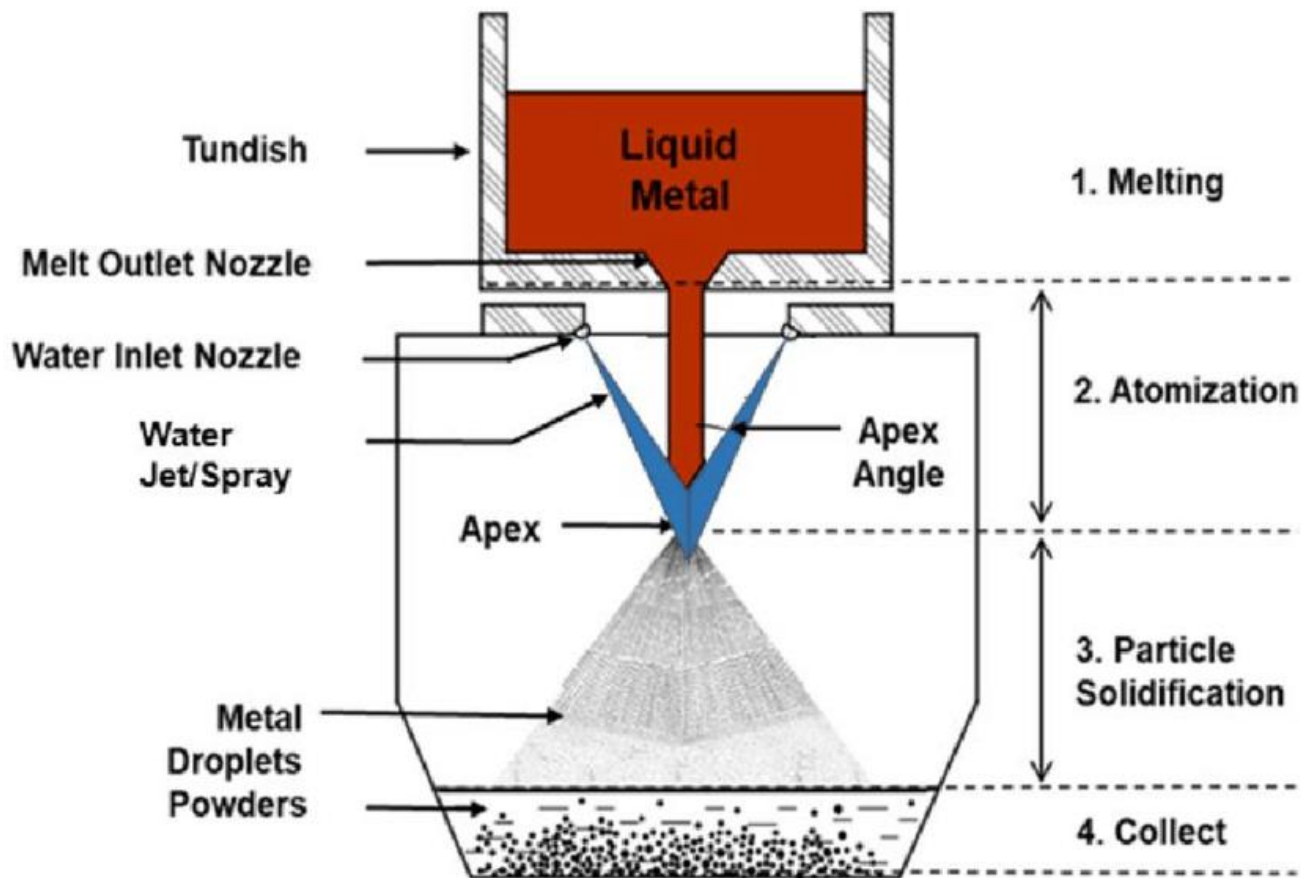
1. اتمیزاسیون گازی

عوامل موثر بر اندازه ذرات پودری

- سرعت سیال
- سیالیت مذاب
- فوق گداز مذاب

روش‌های فیزیکی

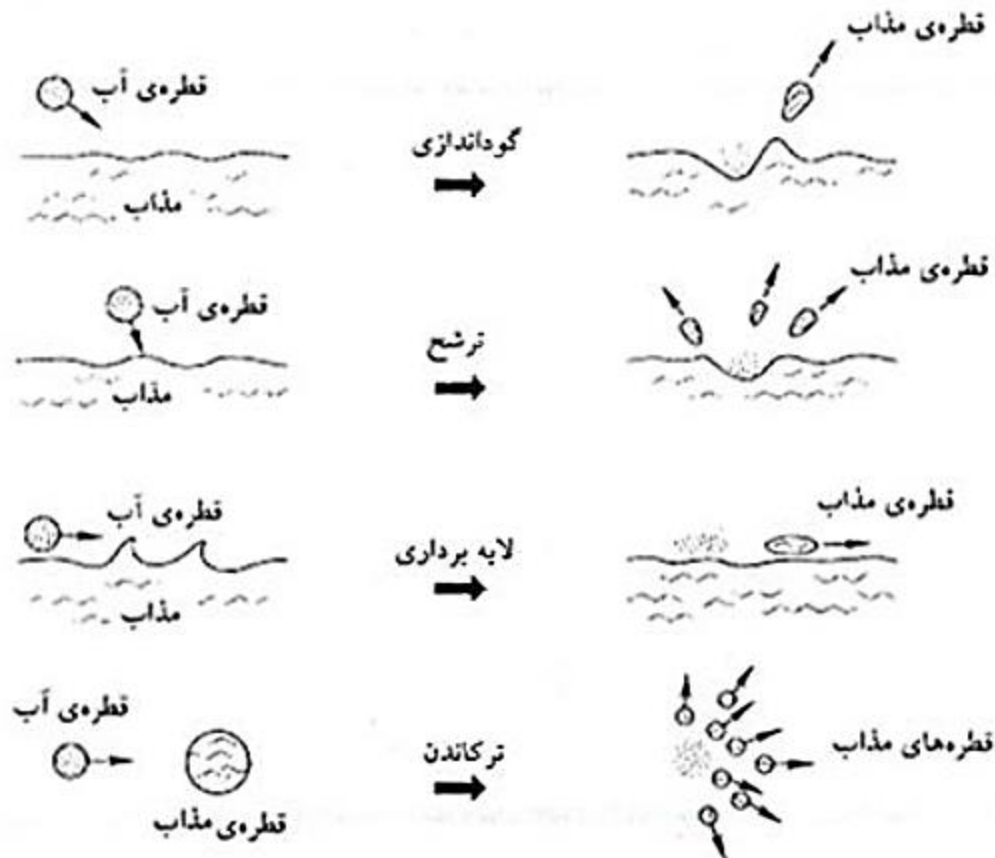
1. اتمیزاسیون آبی



روش‌های فیزیکی

1. اتمیزاسیون آبی

در اثر برخورد آب با مذاب فلزی چهار حالت زیر ممکن است رخ دهد





روش‌های فیزیکی

مقایسه اتمیزاسیون آبی و گازی

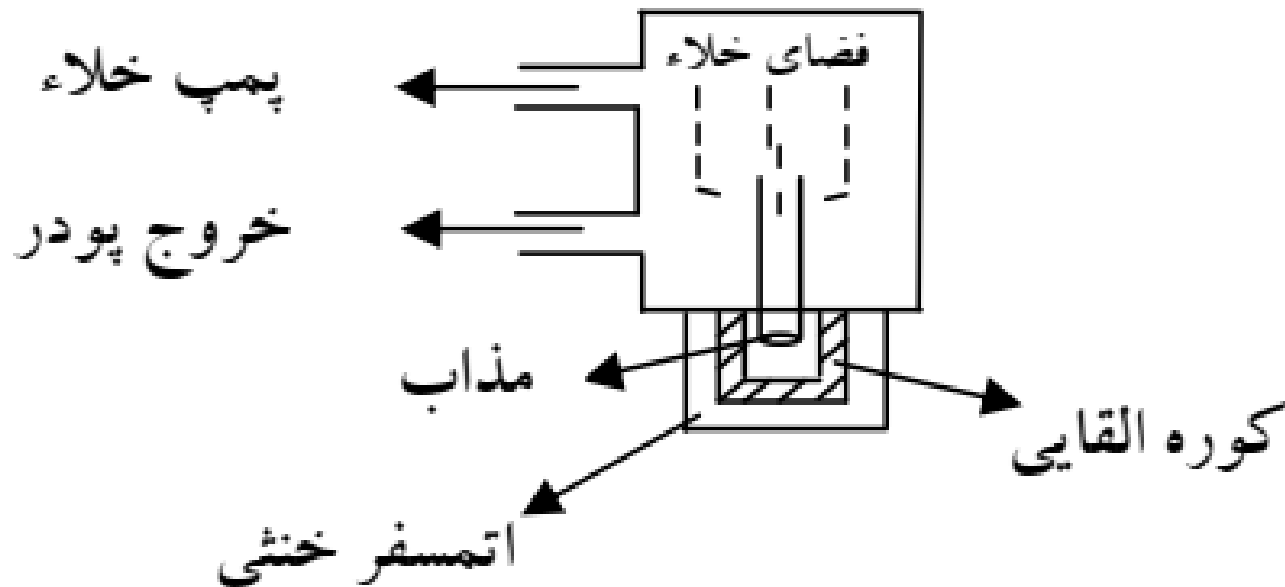
1. آلودگی و اکسیداسیون سطحی در آبی بیشتر است
2. شکل ذرات پودری در گازی کروی بوده و در آبی نامنظم و سوزنی هستند چون در اتمیزاسیون آبی سریعتر سرد می‌شوند.
3. به دلیل سرعت بالای سرمایش در اتمیزاسیون آبی، پودرها ریزتر و تعداد آنها بیشتر خواهد بود.
4. ارتفاع برج خنک کننده گازی بیشتر از آبی است.



روش‌های فیزیکی

روش اتمایزینگ تحت خلاء

در این روش با ایجاد اختلاف فشار در برج خنک کننده و بوته مذاب، مذاب به داخل محفظه خلاء (کم فشار) کشیده شده و به اطراف پراکنده شده و به پودر تبدیل شود.





روش‌های فیزیکی

روش اتمایزینگ تحت خلاء

مزایا

1. به دلیل عدم تماس با سیال، آلودگی به شدت کاهش یافته و پودرهای خالص‌تری تولید می‌شود.
2. نیازمند تجهیزات نگهدارنده مذاب نبوده و مذاب مستقیماً از کوره به سمت محفظه خلاء کشیده می‌شود.
3. حرکت به سمت بالا سرعت سرمایش را دو برابر می‌کند.
4. نیازمند تجهیزات اضافی برای خنک کردن پودر نیست.



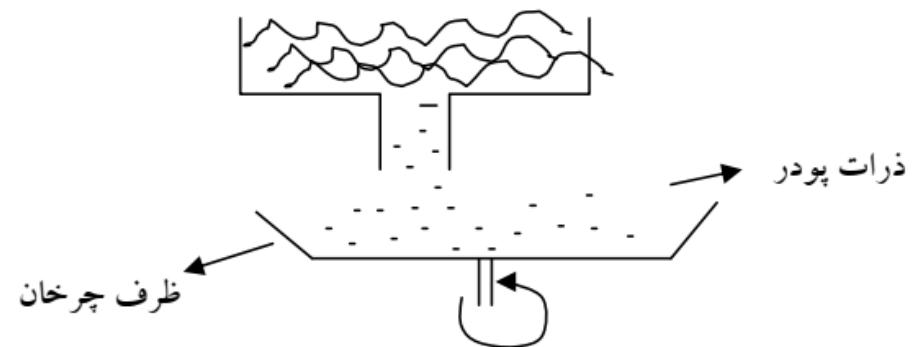
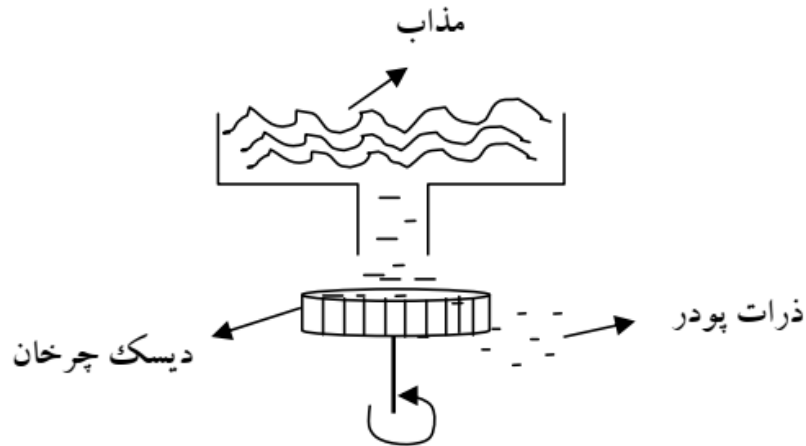
روش‌های فیزیکی

روش گریز از مرکز

در این روش نیرو باعث پرتاب مذاب و تشکیل ذرات جامد پودری می‌شود.

به روشهای مختلف مانند استفاده از دیسک چرخان، ظرف چرخان و الکتروود چرخان

تقسیم‌بندی می‌شود.

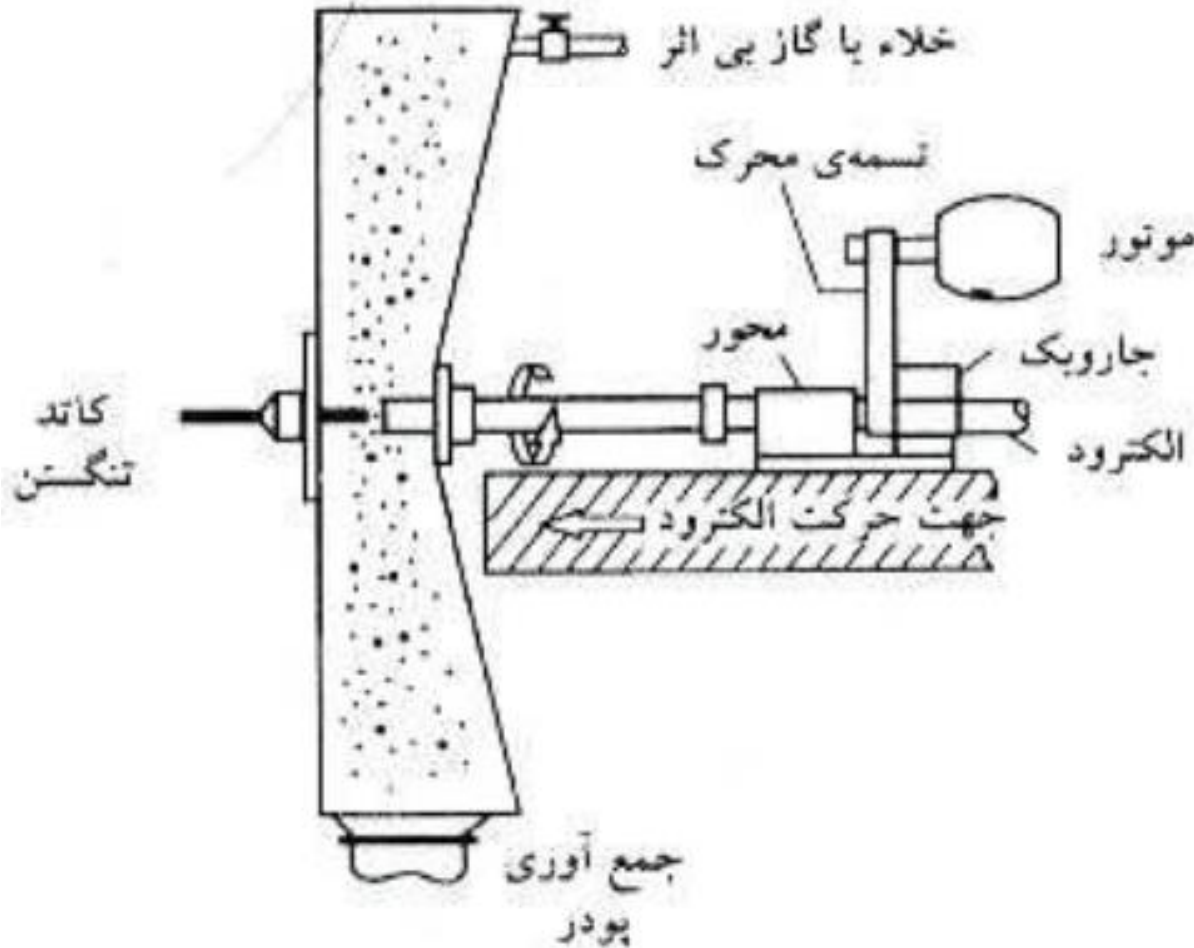




روش‌های فیزیکی

روش گریز از مرکز

الکترو د چرخان





روش‌های فیزیکی

روش الکترو د چرخان

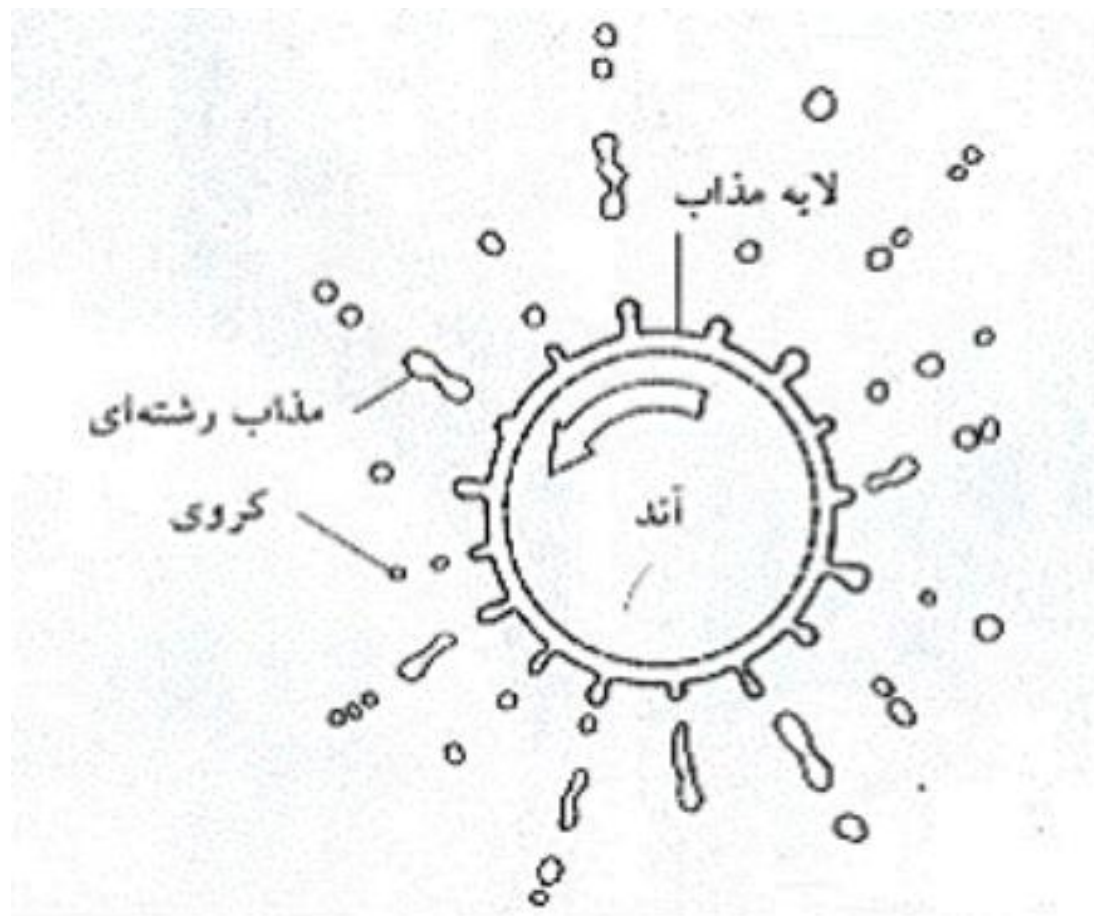
فلزی که می‌خواهیم پودر آن تهیه شود به صورت الکترو مصرفی تولید شده و در مقابل یک الکترو کمی تنگستنی قرار می‌گیرد.

قوس الکتریکی بین دو الکترو تشکیل شده و همزمان الکترو مصرفی با سرعت بسیار بالایی (۵۰۰۰۰ دور بر دقیقه) می‌چرخد.

در اثر تشکیل قوس الکتریکی بین دو الکترو، سطح الکترو مصرفی ذوب شده و به دلیل چرخش سریع آن در اثر نیروی گریز از مرکز به اطراف پخش شده و به شکل ذرات پودری منجمد می‌شود.

روش‌های فیزیکی

روش الکتروود چرخان





روش‌های فیزیکی

روش الکتروود چرخان

از جمله مزایای روش الکتروود چرخان می‌توان ب‌موارد زیر اشاره نمود:

- تمیزی پودر تولیدی
- کروی بودن دانه‌ها و در نتیجه بالابودن چگال انباشت و سیالیت پودر
- یکنواختی اندازه دانه‌ها
- عدم آلودگی از بوته ذوب



روش‌های فیزیکی

روش الکتروود چرخان

همچنین از جمله معایب آن نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- پایین بودن آهنگ تولید
- بالا بودن قیمت و هزینه‌های تولید
- بزرگ بودن اندازه دانه‌ها



روش‌های شیمیایی

روشهای شیمیایی تولید پودر فلزات بر پایه انجام یک واکنش شیمیایی بوده و برای اغلب فلزات کاربرد دارد.

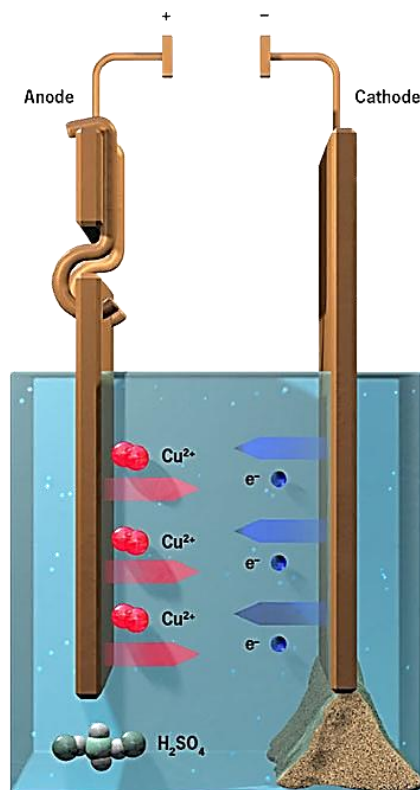
برخی از این روشها عبارتند از:

- فرآیندهای الکتروشیمیایی
- احیا در حالت جامد
- رسوب از محلول
- تجزیه حرارتی کربونیل‌های فلزی

روش‌های شیمیایی

فرآیندهای الکتروشیمیایی

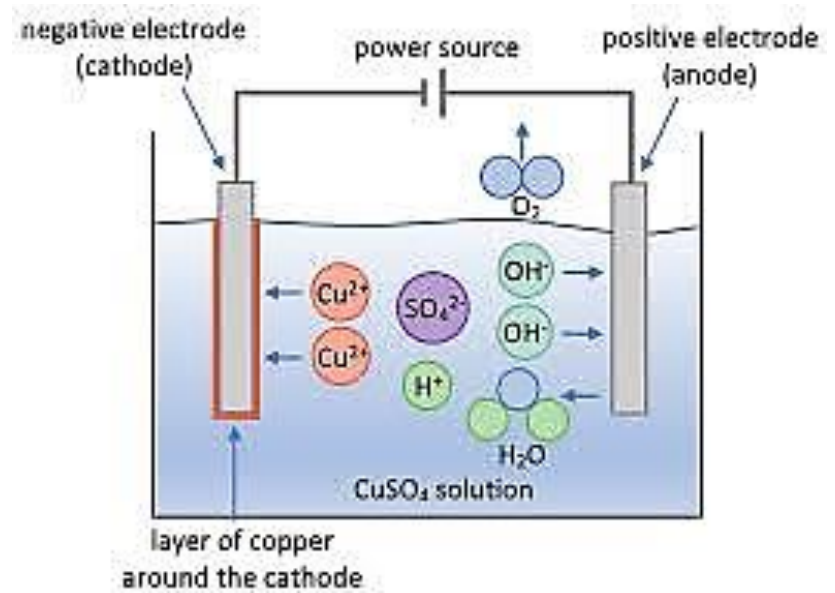
در این روش از سلولهای الکتروشیمیایی برای رسوب دادن فلز از الکتrolیت یا آند ناخالص بر روی کاتد خالص استفاده می‌شود.



Copper cathodes
Grade A (Cu > 99,9%)

$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$

$\text{Cu} \downarrow$
Dendritic
copper
powder





روش‌های شیمیایی

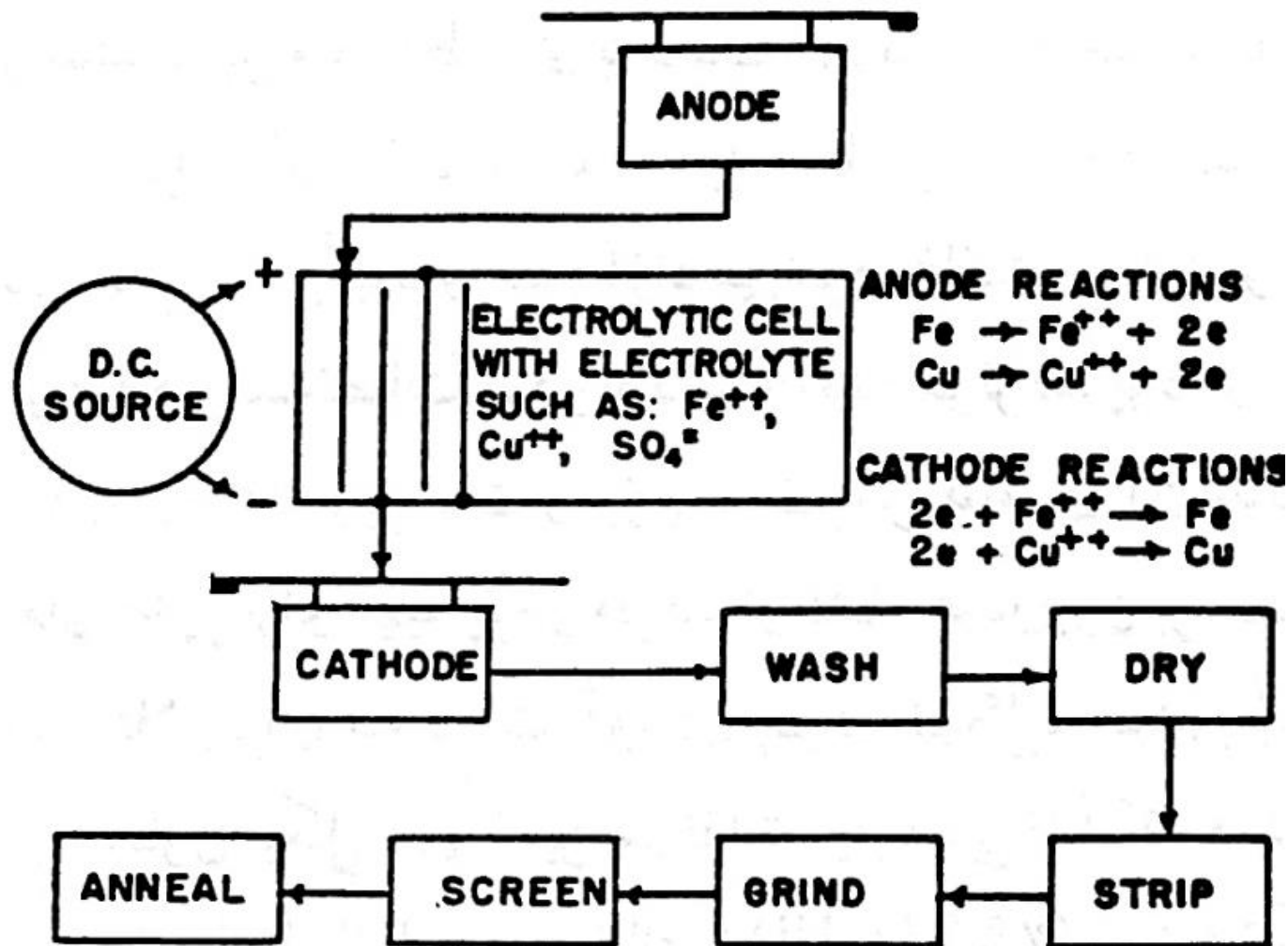
فرآیندهای الکتروشیمیایی

- پس از شستشوی کاتد، رسوب متخلخل از سطح کاتد خراشیده و جمع‌آوری می‌شود
- سپس شسته شده و خشک می‌گردد
- در آخر آسیا شده و اندازه ذرات کاهش می‌یابد.
- و در نهایت برای زدودن هرگونه تنش حاصل از آسیکاری، تحت عملیات آنیل قرار می‌گیرد.



روش‌های شیمیایی

فرآیندهای الکتروشیمیایی



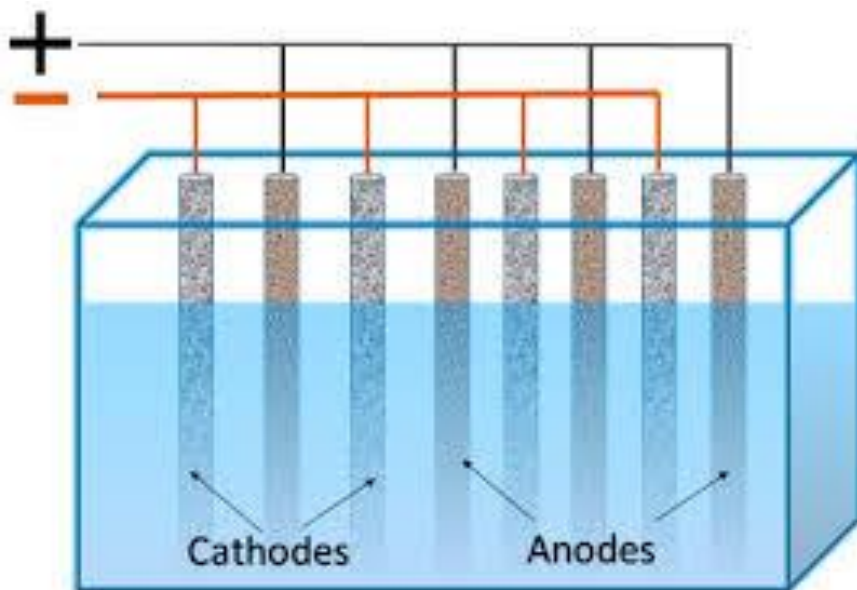


روش‌های شیمیایی

فرآیندهای الکتروشیمیایی

عوامل موثر بر راندمان و کیفیت پودر

۱. استفاده از صفحات آند و کاتد بصورت موازی و یک در میان در یک سلول الکتروشیمیایی و رسوب همزمان فلز بر روی چند کاتد باعث افزایش راندمان و صرفه‌جویی در وقت می‌شود.





روش‌های شیمیایی

فرآیندهای الکتروشیمیایی

عوامل موثر بر رانندگی و کیفیت پودر

۲. هرچه دمای فرایند بیشتر نیروی جنبشی ذرات افزایش یافته و سرعت فرآیند افزایش می‌یابد. ولی افزایش دما باعث انجام واکنشهای جانبی و تبخیر الکترولیت می‌شود بنابراین باید یک حد بهینه برای دما در نظر گرفت.

۳. غلظت پایین الکترولیت سبب حرکت و نفوذ راحت‌تر یونها شده و سرعت فرآیند افزایش می‌یابد.



روش‌های شیمیایی

فرآیندهای الکتروشیمیایی

عوامل موثر بر رانندگی و کیفیت پودر

۲. هرچه دمای فرایند بیشتر نیروی جنبشی ذرات افزایش یافته و سرعت فرآیند افزایش می‌یابد. ولی افزایش دما باعث انجام واکنشهای جانبی و تبخیر الکترولیت می‌شود بنابراین باید یک حد بهینه برای دما در نظر گرفت.

۳. غلظت پایین الکترولیت سبب حرکت و نفوذ راحت‌تر یونها شده و سرعت فرآیند افزایش می‌یابد.



روش‌های شیمیایی

فرآیندهای الکتروشیمیایی

معایب روش الکتروشیمیایی

- هزینه بر بودن به دلیل مصرف انرژی الکتریکی
- این روش فقط برای تولید پودر فلزات خالص کاربرد دارد
- پودر تولیدی باید مراحل شستشو، آسیاکاری و آنیل را نیز طی کند بنابراین مصرف هزینه بیشتری نیاز دارد.



روش‌های شیمیایی

احیاء در حالت جامد

اکسید فلزات در حالت جامد توسط عوامل احیا کننده، احیا شده و به فلز متخلخل تبدیل می‌شود.

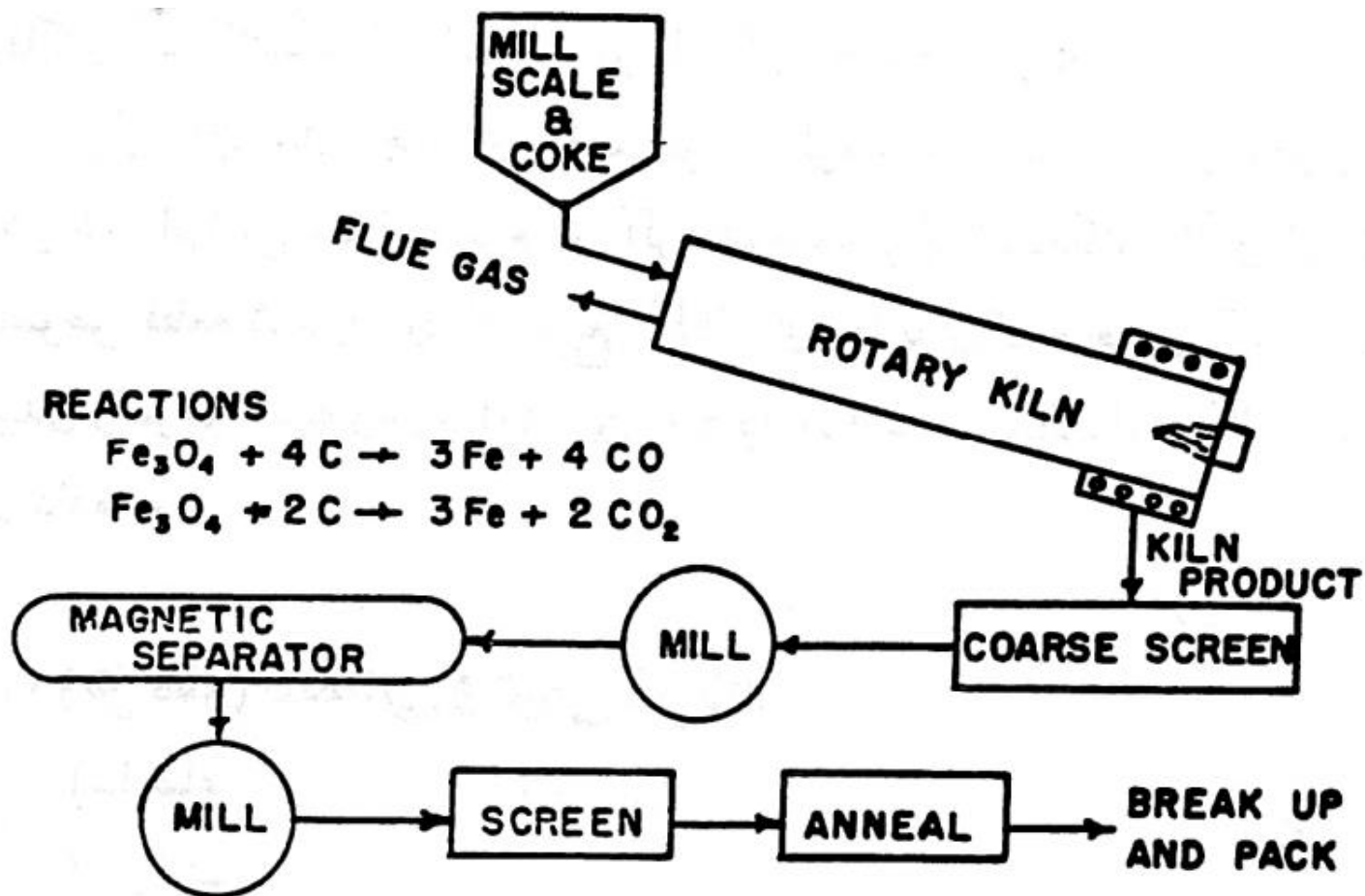
مهمترین مثال می‌توان به تولید آهن اسفنجی توسط احیا با کربن یا گاز CO اشاره کرد. در ادامه فلز حاصل چون متخلخل است به راحتی توسط آسیا کردن خرد شده و به ذرات پودری ریز تبدیل می‌شود.

در فرآیندهای احیا تا حد ممکن باید دما را پایین نگه داشت تا از آگلومره شدن ذرات جلوگیری شود.



روش‌های شیمیایی

احیاء در حالت جامد



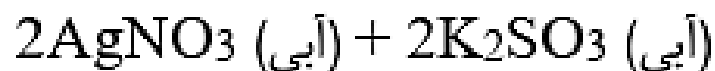


روش‌های شیمیایی

رسوب از محلول

اساس این روش بر تشکیل رسوب فلزات یا ترکیبهای فلزی از نمکهای محلول در آب مانند نیتراتها، کلریدها و سولفاتها است.

در این روش نمک مورد نظر در آب حل شده و سپس به کمک یک ترکیب ثانویه ته‌نشین می‌شود.



جامد ته‌نشین شده جمع‌آوری شده و با آسیاکاری به پودر تبدیل می‌شود.



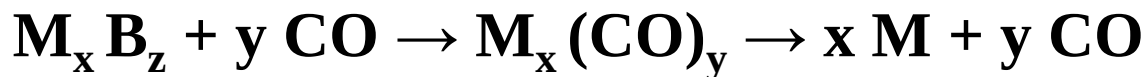
روش‌های شیمیایی

تجزیه حرارتی کربنیل‌های فلزی

کربنیل‌های فلزی ترکیباتی با نقطه ذوب پایین و فرارند که در مولکول آن‌ها، گروه‌های CO توسط کربن به اتم‌های فلز پیوند خورده‌اند.

اساس این روش سنتز کربنیل به صورت واکنش فلز خالص یا ترکیبات حاوی فلز با مونوکسید کربن در فشار بالا و دمای پایین است.

سپس کربنیل‌های فلزی تولید شده، در اثر حرارت به کربن مونوکسید و فلز تجزیه می‌شوند.

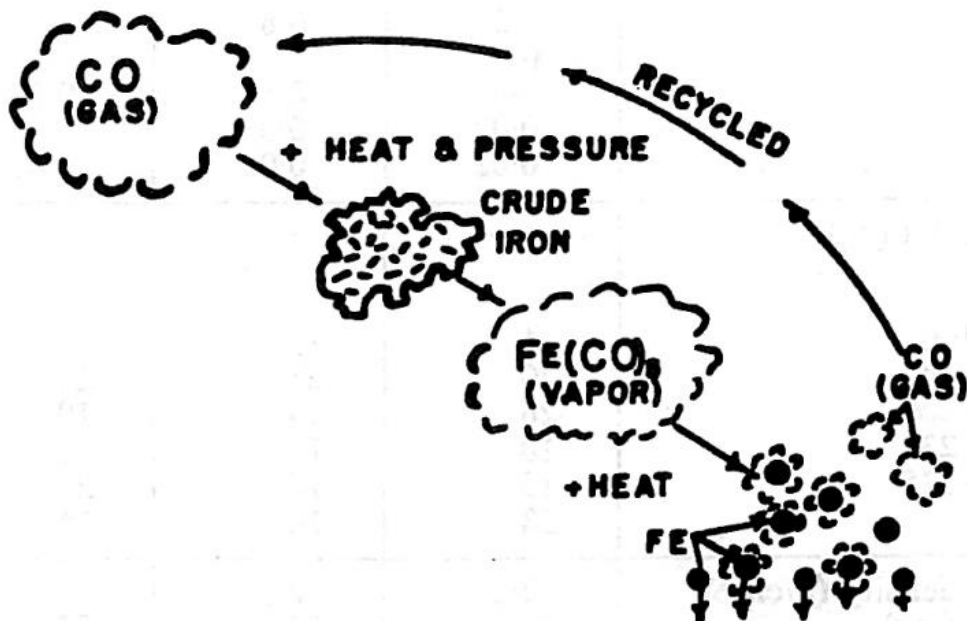




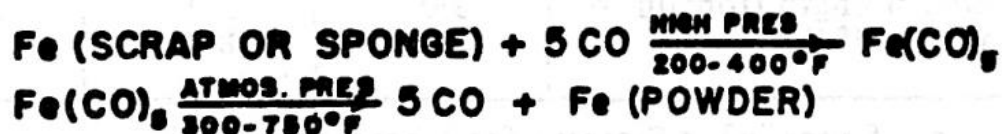
روش‌های شیمیایی

تجزیه حرارتی کربنیل‌های فلزی

تجزیه حرارتی کربونیل‌ها گرماگیر بوده و با افزایش دما و کاهش فشار، سرعت آن افزایش می‌یابد.



REACTIONS





تولید پودر آلیاژی

در هنگام تولید قطعات آلیاژی در متالورژی پودر می توان به دو طریق عمل کرد:

1. استفاده از پودر عناصر خالص با نسبت معین و مخلوط کردن آنها

2. استفاده از پودر آلیاژ با ترکیب مورد نظر

مزایا و معایب:

- تولید پودر آلیاژی نسبت به پودر خالص هزینه بر تر است.
- پودر آلیاژی یکنواختی و همگنی ساختار بهتری برای قطعه تولیدی دارد

مشخصات پودر

فصل سوم



مشخصات پودر

- هر ذره جامدی که ابعاد زیر ۱ میلی متر داشته باشد **پودر** نامیده می شود.
- اگر اندازه ذره پودر زیر ۱۰۰ نانومتر باشد به آن **نانوپودر** می گویند.
- ذرات پودری بسته به روش تولید می توانند ریزساختار میکرو یا نانو داشته باشند.
- ذرات پودری نانوساختار عموماً خواص بهبود یافته تری نسبت به میکروساختارها دارند.
- قطعات متالورژی پودری که با پودرهای میکروسایز نانوساختار تولید می شوند، دارای ریزساختار نانو خواهند بود و رفتار نانومواد را از خود نشان می دهند.
- برای مثال کاتالیزورهای نانوساختار یا جذب گاز توسط قانون سیورت و ...



مشخصات پودر

➤ به طور کلی در فرآیندهای متالورژی پودر، مشخصات پودر تولید شده به طور مستقیم فرآیندهای شکل‌دهی و سینترینگ قطعه و همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

➤ بنابراین برای دستیابی به یک قطعه با کیفیت و خواص مورد نیاز در ابتدا باید ویژگیهای پودر را به طور کامل بررسی کرد.



مشخصات پودر

۱- ترکیب شیمیایی پودر

در ابتدا باید ترکیب شیمیایی پودر بررسی شود. منظور از ترکیب شیمیایی

➤ نوع و درصد عناصر و ترکیبات تشکیل دهنده پودر (در پودرهای آلیاژی)

➤ درصد خلوص یا میزان و نوع ناخالصی‌های همراه پودر

توسط آنالیزهای شیمیایی مانند EDS، XRF و یا XRD می‌توان ترکیب شیمیایی و نوع و میزان ناخالصی همراه را تشخیص داد.



مشخصات پودر

۱- ترکیب شیمیایی پودر

بسته به روش تولید پودر، اغلب پودرهای فلزی حاوی ناخالصی‌های زیر هستند:

➤ ناخالصی‌های اکسیدی یا ترکیبات سرامیکی و آلی

➤ گازهای نیتروژن و اکسیژن و یا رطوبت جذب شده

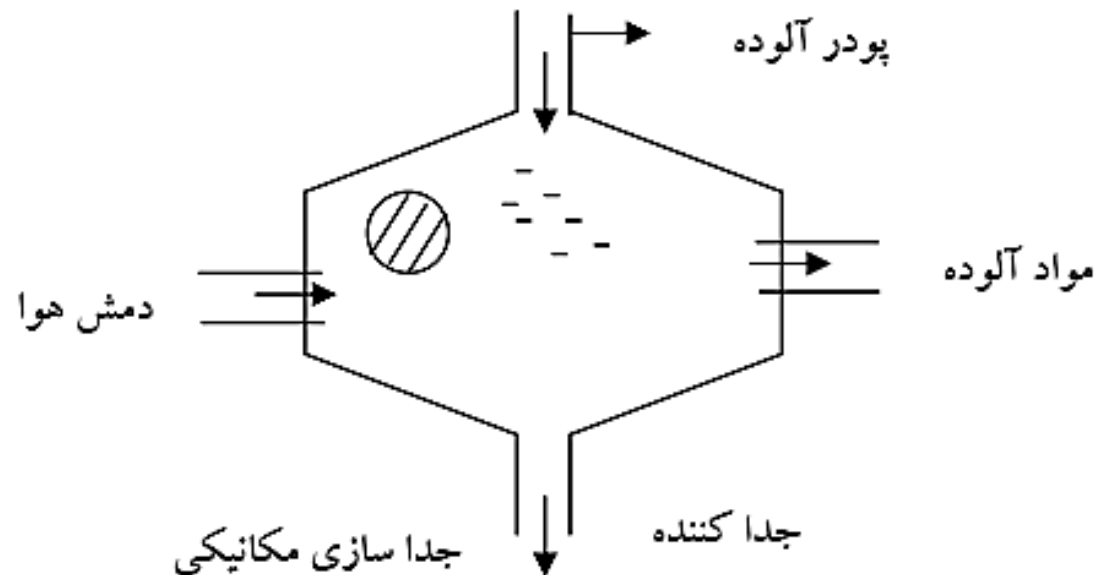
حضور این ترکیبات در پودر باعث تغییر خواص نهایی قطعه خواهد شد بنابراین باید تا حد ممکن این ترکیبات از پودر فلزی جدا شوند.



مشخصات پودر

۱- ترکیب شیمیایی پودر

یکی از روشهای جداسازی ذرات جامد سرامیکی، استفاده از تفاوت وزن ذرات فلزی و سرامیکی است.





مشخصات پودر

۱- ترکیب شیمیایی پودر

برای جداکردن بخارات یا گازهای جذب شده به پودر نیز از روشهای گاززدایی استاتیکی و دینامیکی در دماهای محیط یا دمای بالا استفاده می‌شود.

به این صورت که پودر فلزی را وارد یک مخزن تحت خلا می‌کنند و با گذشت زمان در اثر خلاء ایجاد شده گازهای جذب شده به پودر از پودرها جدا شده و از مخزن خارج می‌شوند.

در حالت دینامیکی، مخزن تحت ارتعاش یکنواختی قرار گرفته و حرکت پودرها باعث خروج راحتتر گاز جذب شده مخصوصا از لایه‌های زیرین می‌شود.



مشخصات پودر

۲- اندازه و شکل پودر

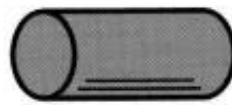
بسته به نوع روش تولید، پودر فلزی می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد.



Spherical



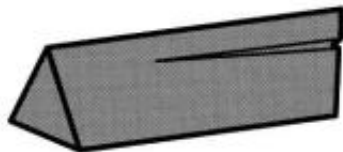
Rounded



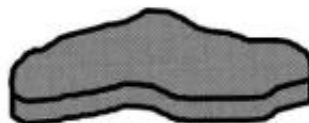
Cylindrical



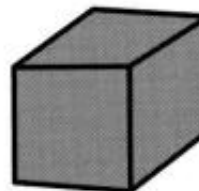
Spongey



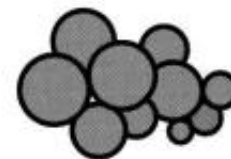
Acicular



Flakey



Cubic



Aggregated

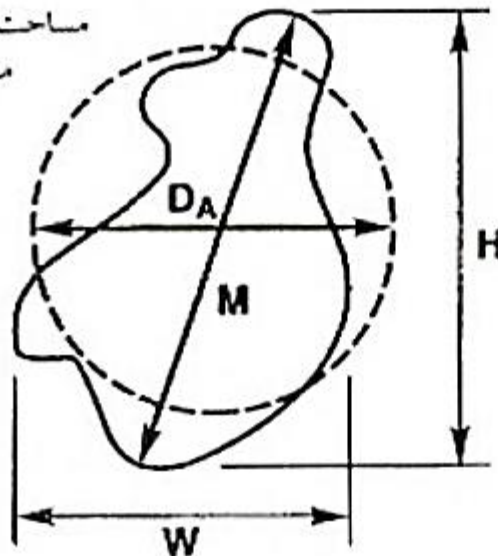
مشخصات پودر

۲- اندازه و شکل پودر

برای تعیین اندازه پودر روشهای مختلفی وجود دارد که معیار اندازه‌گیری در هر روش می‌تواند متفاوت از روش دیگر باشد.

منظور از معیار اندازه‌گیری بعدی از پودر است که به عنوان اندازه پودر در نظر گرفته می‌شود.

A = مساحت تصویر دانه پودر
 S = مساحت رویه پودر
 V = حجم دانه



معیارهای اندازه

H = تصویر ارتفاع
 W = تصویر پهنا
 M = بزرگ‌ترین وتر

قطر کره‌های معادل

$$D_A = (4A / \pi)^{1/2}$$

$$D_S = (S / \pi)^{1/2}$$

$$D_V = (6V / \pi)^{1/3}$$

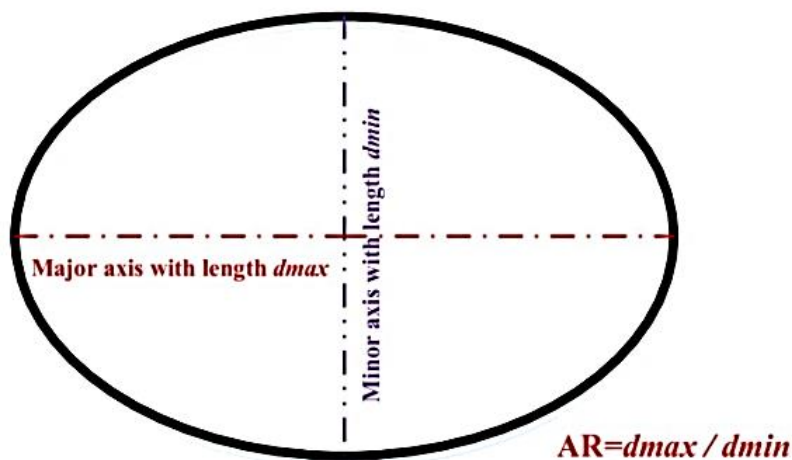


مشخصات پودر

۲- اندازه و شکل پودر

عموماً برای ذرات پودری پارامتری تحت عنوان Aspect Ratio را بررسی می‌کنند که نسبت بزرگترین بعد به کوچکترین بعد ذره است.

هرچه این عدد به ۱ نزدیکتر باشد شکل ذره به سمت کروی بودن





مشخصات پودر

۲- اندازه و شکل پودر

برای یک دانه مکعبی با هر کدام از طول های اندازه گیری شده به اندازه $1\mu m$ با استفاده از مساحت تصویر شده A مساحت رویه S و حجم V قطرهای کره معادل را محاسبه کنید:

$$A = 1\mu m \times 1\mu m = 1(\mu m)^2 \quad \Rightarrow \quad D_A = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{1/2} = 1.13\mu m$$

$$S = 6A = 6(\mu m)^2 \quad \Rightarrow \quad D_S = \left(\frac{S}{\pi} \right)^{1/2} = 1.38\mu m$$

$$V = 1\mu m \times 1\mu m \times 1\mu m = 1(\mu m)^3 \quad \Rightarrow \quad D_V = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} = 1.24\mu m$$



مشخصات پودر

۲- اندازه و شکل پودر

قطر کره هم سطح و نیز قطر کره هم حجم با دانه مکعبی به ضلع ۱/۵ میکرومتر چقدر است؟

$$\begin{aligned} A_{Cube} = a^2 = 2.25 \mu m^2 & \Rightarrow D_A = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{1/2} = \left(\frac{4 \times 2.25}{\pi} \right)^{1/2} = 1.69 \mu m \\ V = a^3 = (1.5)^3 = 3.375 \mu m^3 & \Rightarrow D_V = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} = \left(\frac{6 \times 3.375}{\pi} \right)^{1/3} = 1.86 \mu m \\ S = 6a^2 = 6 \times (1.5)^2 = 13.5 \mu m^2 & \Rightarrow D_S = \left(\frac{S}{\pi} \right)^{1/2} = \left(\frac{13.5}{\pi} \right)^{1/2} = 2.07 \mu m \end{aligned}$$



مشخصات پودر

۲- اندازه و شکل پودر

برای تعیین اندازه ذرات پودر روشهای مختلفی وجود دارد که عبارتند از:

➤ استفاده از تصاویر میکروسکوپی

➤ استفاده از سرندها

➤ روش پراکندن نور

➤ روش رسانایی الکتریکی

➤ روش بستن مسیر نور

➤ روش ته نشین سازی



مشخصات پودر

روش میکروسکوپی

بسته به بازه تغییرات ابعاد ذرات پودر، تصاویر میکروسکوپ نوری، SEM و یا TEM از پودر تهیه کرده و اندازه ذرات پودری و توزیع آن را با استفاده از نرم افزارهای آنالیز تصویر مشخص می کنند.

➤ روش آماده سازی نمونه پودری جهت تصویربرداری یکی از چالشهای اصلی در این روش است. باید تا حد امکان از تجمع و آگلومره شدن ذرات پودر حین آماده سازی جلوگیری کرد.

➤ همچنین تنها دو بعد از ذره قابل مشاهده و اندازه گیری است بنابراین باید معیار اندازه گیری پارامتری مانند D_A باشد که مستقل از جهت قرارگیری ذره است.



مشخصات پودر

روش الک کردن

الک کردن پودر یک روش معمولی و سریع تحلیل اندازه ذره است.

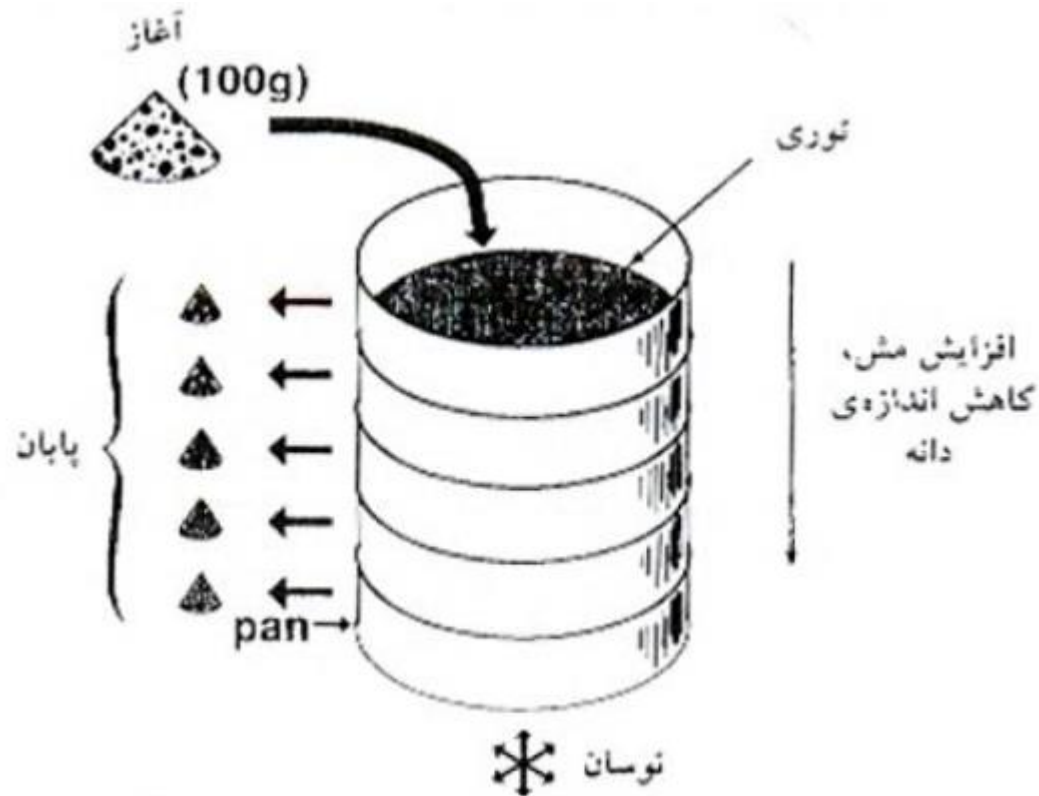
در این روش علاوه بر اندازه ذره می‌توانیم به توزیع اندازه ذره نیز دست پیدا کنیم.

چندین الک با مش‌های مختلف روی هم سوار شده و وزن مشخصی پودر روی الک بالا قرار می‌گیرد. مجموعه الک‌ها تحت لرزش قرار گرفته و پودرها براساس اندازه خود از الک‌ها عبور کرده و در نهایت وزن پودر جمع شده روی هر الک اندازه‌گیری می‌شود.

در نهایت می‌توان براساس کسر وزنی پودرها، نمودار توزیع اندازه ذرات را رسم کرد.

مشخصات پودر

روش الک کردن





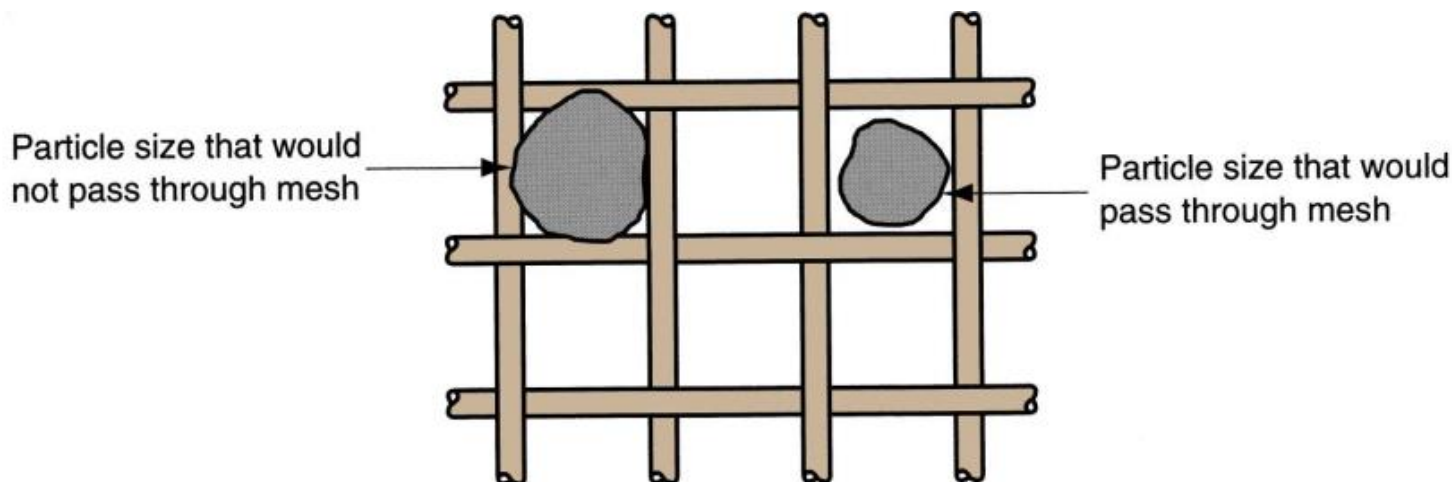
مشخصات پودر

روش الک کردن

Higher mesh count = smaller particle size

هر الک از سیم‌های متساوی الفاصله بافته شده تشکیل شده است که تشکیل یک سطح مشبک می‌دهد. منافذ تشکیل شده در الک بافته شده را **مش** می‌نامند. هرچه سیم‌ها از هم فاصله داشته و اندازه منفذ بزرگتر باشد تعداد منفذ کمتر خواهد بود.

بنابراین الک درشت دانه متناظر با مش ریز خواهد بود.





مشخصات پودر

روش الک کردن

شماره مِش			سوراخ نامی میکرون	شماره مِش			سوراخ نامی میکرون
Tyler	A.S.T.M.	B.S.		Tyler	A.S.T.M.	B.S.	
—	۲۵	—	۷۰۷	—	۸۰	—	۱۷۷
۲۴	—	۲۲	۷۰۱	۸۰	—	۸۵	۱۷۵
—	۳۰	—	۵۹۵	—	۱۰۰	—	۱۴۹
۲۸	—	۲۵	۵۸۹	۱۰۰	—	۱۰۰	۱۴۷
—	۳۵	—	۵۰۰	—	۱۲۰	—	۱۲۵
۳۲	—	۳۰	۴۹۵	۱۱۵	—	۱۲۰	۱۲۴
—	۴۰	—	۴۲۰	—	۱۴۰	—	۱۰۵
۳۵	—	۳۶	۴۱۷	۱۵۰	—	۱۵۰	۱۰۴
—	۴۵	—	۳۵۴	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۸۸
۴۲	—	۴۴	۳۵۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۷۴
—	۵۰	—	۲۹۷	—	۲۳۰	—	۶۳
۴۸	—	۵۲	۲۹۵	۲۵۰	—	۲۴۰	۶۱
—	۶۰	—	۲۵۰	—	۲۷۰	۳۰۰	۵۳
۶۰	—	۶۰	۲۴۶	۲۷۰	—	—	۵۲
—	۷۰	—	۲۱۰	۳۲۵	۳۲۵	۳۵۰	۴۴
۶۵	—	۷۲	۲۰۸	۴۰۰	۴۰۰	—	۳۷



مشخصات پودر

روش الک کردن

مشکلات این روش

- بسته شدن منافذها بر اثر گیر کردن ذرات پودری در آن
- پاره شدن یا آسیب فیزیکی به الکها
- طولانی شدن زمان لرزش باعث خورد شدن ذرات پودری درشت شده و کاهش زمان لرزش نیز امکان رسیدن ذرات ریز به انتهای مسیر را کاهش می دهد.
- برای ذرات پودر خیلی ریز کاربرد ندارد



مشخصات پودر

روش پراکندن نور

پودر فلزات را وارد سیالی کرده و محفظه را در مقابل پرتو نور یا لیزر قرار می‌دهند.

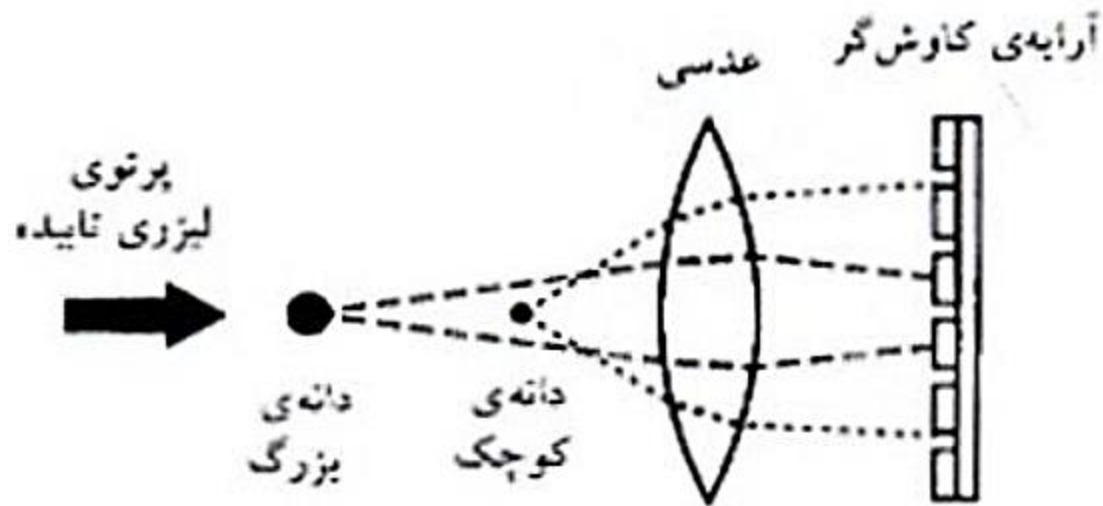
نور عبور کرده از سیال در اثر برخورد با ذرات پودری پراکنده شده و با ثبت زاویه تفرق یا شدت آن می‌توان اندازه ذرات را بدست آورد.

➤ زاویه تفرق متناسب با عکس قطر ذره است

➤ شدت نور پراکنده شده متناسب با مجذور قطر ذره است

مشخصات پودر

روش پراکندن نور





مشخصات پودر

روش پراکندن نور

- تشکیل آگلومره پودری باعث خطا در اندازه‌گیری می‌شود. می‌توان با ایجاد سوسپانسیون پایدار و یا استفاده از امواج اولتراسونیک میزان آگلومراسیون را کاهش داد.
- برای ذرات پودری بین ۱ تا ۲۰۰ میکرون مناسب است
- اندازه ذره باید حداقل دو برابر طول موج پرتو نور یا لیزر باشد.



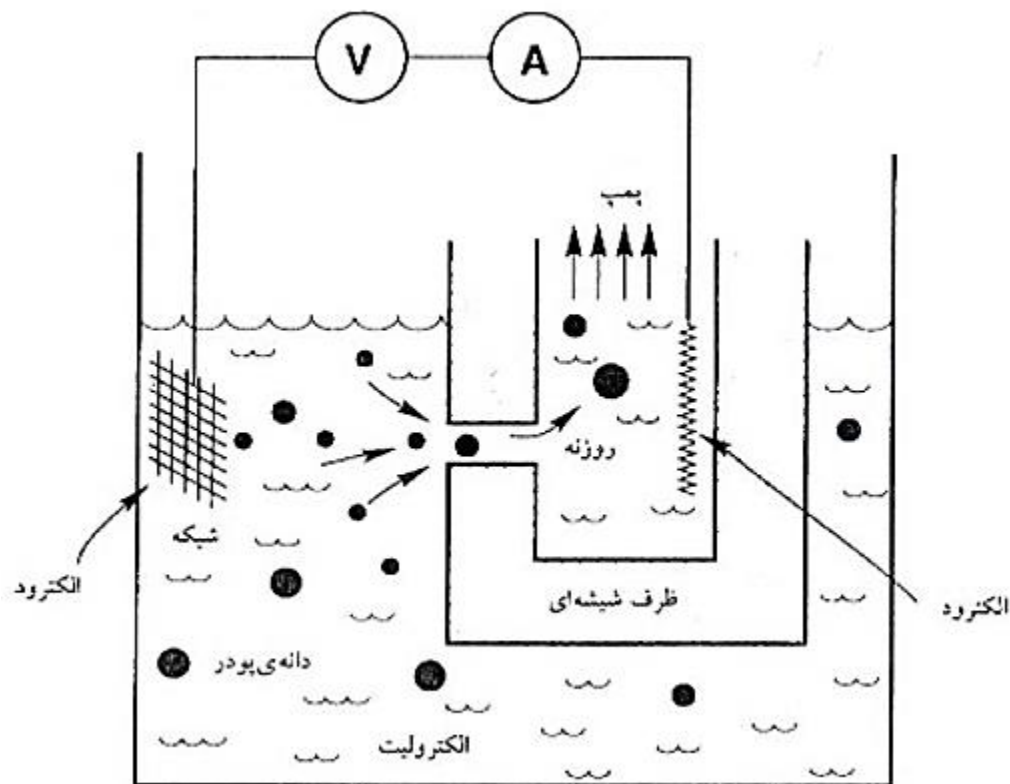
مشخصات پودر

روش رسانایی الکتریکی

اساس کار اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی یک سیال و ثبت تغییرات جریان با زمان است. سیالی حاوی ذرات پودری معلق را از بین روزنه‌ای با قطر مشخص عبور می‌دهند. در دو طرف این روزنه الکترودها تعبیه شده و هدایت الکتریکی بین این دو الکترودها در لحظه ثبت می‌گردد. با عبور ذره پودری از این روزنه هدایت الکتریکی سیال کاهش یافته و این کاهش متناسب با حجم ذره خواهد بود.

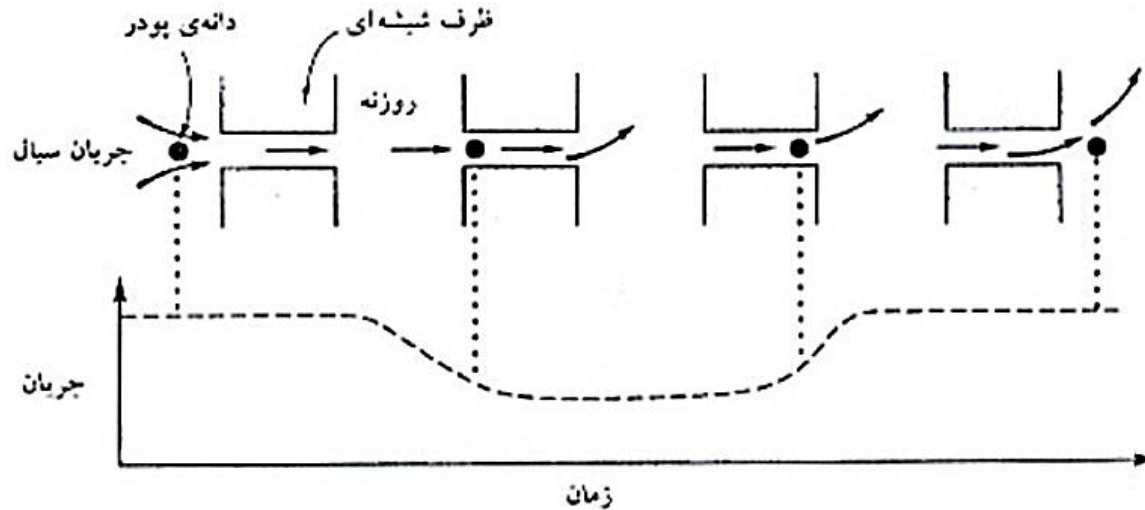
مشخصات پودر

روش رسانایی الکتریکی



مشخصات پودر

روش رسانایی الکتریکی





مشخصات پودر

روش رسانایی الکتریکی

- کوچکترین اندازه‌ای که می‌توان ثبت کرد برابر نیم میکرون است.
- چون قطر روزنه قابل تغییر است محدوده وسیعی از ذرات را می‌توان اندازه گرفت.
- یکی از مشکلات آن ته‌نشینی ذرات درشت در ظرف بیرونی است که با ایجاد سوسپانسیون و تنظیم سرعت پمپ قابل حل است.
- از طرفی چند ذره به طور همزمان می‌توانند از روزنه عبور کنند که با کاهش غلظت ذرات در سیال می‌توان برطرف کرد.



مشخصات پودر

روش بستن مسیر نور

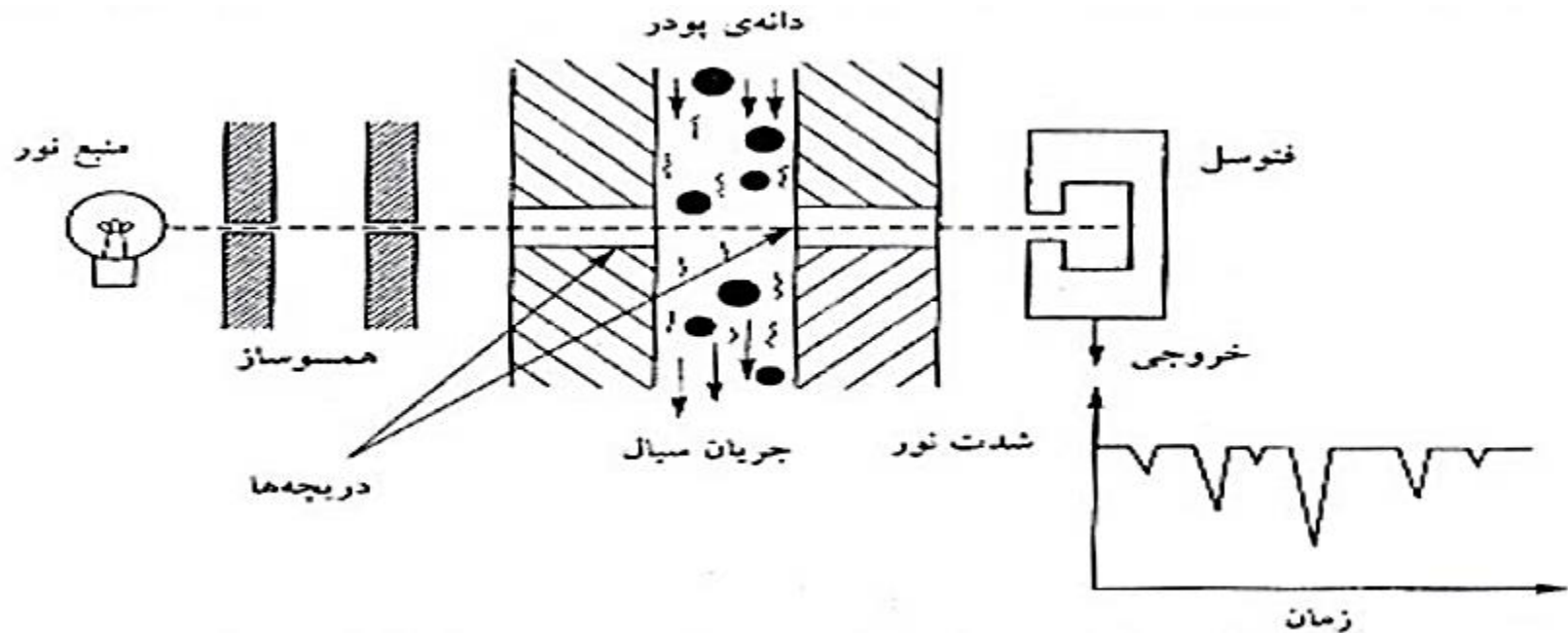
این روش بر مبنای اندازه‌گیری شدت نور عبوری از سیال حاوی ذرات پودری است.

پرتو نور را به سیال حاوی ذرات تابانده و میزان عبور نور را توسط آشکارساز ثبت می‌کنند.

در اثر عبور ذره پودری از مسیر عبور نور، شدت پرتو خروجی کاهش یافته و این کاهش شدت متناسب با اندازه ذره است.

مشخصات پودر

روش بستن مسیر نور





مشخصات پودر

روش بستن مسیر نور

برای جلوگیری از پراکنده شدن نور توسط ذره پودری از روزنه‌های باریک استفاده می‌کنند تا نور متمرکز شود.

در این روش نیز ممکن است همزمان چند ذره پودری از مسیر نور عبور کنند که با کاهش غلظت ذرات قابل کنترل است.



مشخصات پودر

۳- دانسیته ظاهری

دانسیته ظاهری پودر برای تعیین ابعاد قالب مورد نیاز قبل از فشردن و شکل‌دهی پودر، محاسبه می‌شود.

این دانسیته بیان می‌کند که وزن مشخصی از پودر بدون فشرده شدن چه فضایی را اشغال می‌کند.

برای محاسبه در یک ظرف با ابعاد و حجم مشخص، پودر مورد نظر را بدون فشردن ریخته و سطح آن را صاف می‌کنند. سپس پودر داخل محفظه را وزن کرده و به حجم محفظه تقسیم می‌کنند.



مشخصات پودر

۳- دانسیته ظاهری

عوامل موثر بر دانسیته ظاهری:

1. اندازه دانه: هرچه اندازه دانه کمتر، دانسیته ظاهری کمتر (اصطکاک بین دانه‌ای)
2. توزیع اندازه: توزیع پهن یا گسترده دانسیته ظاهری بیشتری دارد
3. شکل ذره: ذرات کروی بیشترین دانسیته را داشته و شکل دندریتی کمترین دانسیته را دارد.
4. تخلخل: وجود تخلخل در ذرات پودر باعث کاهش دانسیته می‌شود.



مشخصات پودر

۴- دانسیته نشست

بیشترین دانسیته قابل حصول برای پودر با تکان دادن مداوم و بدون اعمال فشار خارجی است.

وزن مشخصی از پودر داخل استوانه‌ای ریخته شده و تحت نوسان با فرکانس ۲۸۴ بار در دقیقه و به مدت ۱۰۰۰ بار تکان می‌خورد.

ارتفاع پودر داخل استوانه رفته رفته کاهش یافته و در نهایت ثابت می‌ماند.

با تقسیم وزن پودر اولیه به حجم حاصل از نوسانها، دانسیته نشست به دست می‌آید.



مشخصات پودر

۵- قابلیت تراکم

قابلیت تراکم یا فشردن پودر، استعداد پودر برای افزایش چگالی در اثر اعمال فشار را نشان می‌دهد.

معیار آن اندازه‌گیری دانسیته خام یا دانسیته پودر بعد از فشردن است.

برای محاسبه دانسیته خام، وزن مشخصی از پودر را داخل استوانه با ابعاد استاندارد ریخته و تحت فشار ۴۱۴ مگاپاسکال قرار می‌دهند. با اندازه‌گیری ابعاد پودر فشرده شده می‌توان چگالی خام را حساب کرد.



مشخصات پودر

۵- قابلیت تراکم

نسبت تراکم (C_R) عبارت است از نسبت دانسیته خام به دانسیته ظاهری پودر، یک پارامتر مهم در طراحی قالب شکل‌دهی است.

$$C_R = \frac{V_L}{V_C} = \frac{\rho_g}{\rho_a}$$

چگالی ظاهری یک پودر آهن افشانش آبی معمولی 2.9 gr/cm^2 و در فشار 414 Mpa تا چگالی 6.78 gr/cm^2 فشرده می‌شود بنابراین نسبت فشردن:

$$C_R = \frac{\rho_g}{\rho_a} = \frac{6.78}{2.9} = 2.34$$

بعبارت دیگر اگر ارتفاع پس از فشردن 18 mm باشد ارتفاع اولیه پودر درون قالب $18 \times 2/34 = 42/1 \text{ mm}$ است.



مشخصات پودر

۵- قابلیت تراکم

عوامل موثر:

1. اصطکاک بین دانه‌ای: هرچه بیشتر، دانسیته خام کمتر
2. سختی دانه: هرچه سختی بیشتر قابلیت فشردن کمتر
3. وجود روانکار دانسیته خام را افزایش می‌دهد
4. وجود ناخالصی مانند اکسید یا ذرات سرامیکی دانسیته خام را کاهش می‌دهد.
5. عناصر آلیاژی که باعث افزایش سختی ذرات پودر شود، قابلیت فشردن را کاهش می‌دهد.



مشخصات پودر

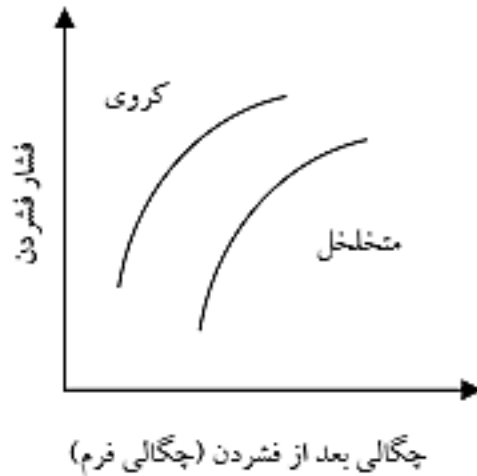
۵- قابلیت تراکم

عوامل موثر:

۶. شکل و اندازه دانه

هرچه اندازه دانه کمتر سطح بیشتر و اصطکاک

بین دانه‌ای مانع فشرده شدن می‌شود.





مشخصات پودر

۶- آهنگ جریان

آهنگ جریان سهولت جاری شدن پودر است.

هرچه آهنگ جریان بیشتر پر شدن قالب راحت تر و مخلوط سازی و همگن کردن ترکیب پودر بهتر انجام می گیرد.

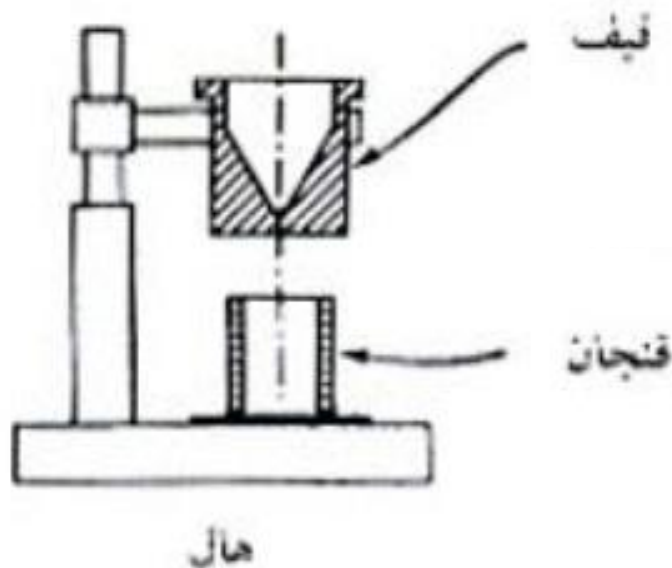
برای اندازه گیری آن از **جریان سنج هال** استفاده می شود



مشخصات پودر

۶- آهنگ جریان

مقدار مشخصی پودر را داخل قیف ریخته و زمان لازم برای خالی شدن قیف را اندازه می گیرند.



هرچه زمان کمتر، آهنگ جریان بیشتر

هرچه اندازه دانه کمتر، اصطکاک بین دانه‌ای بیشتر و در نتیجه به راحتی جاری نمی‌شوند. برای مثال آرد و شکر

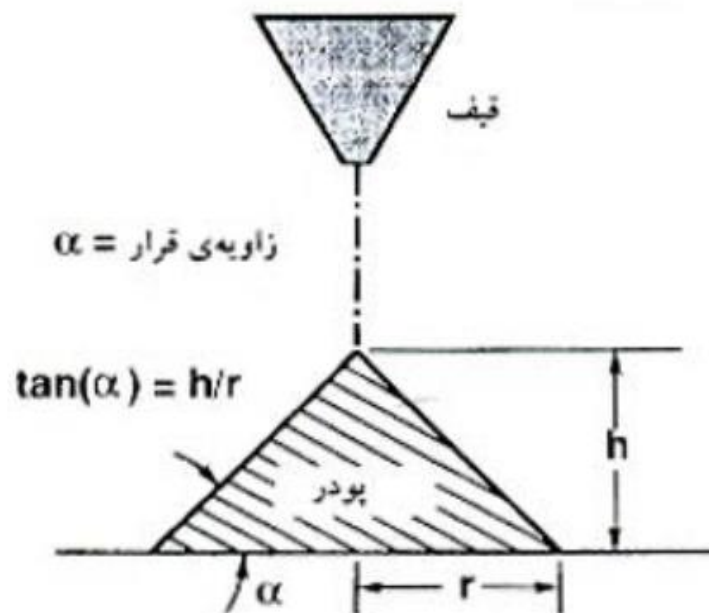


مشخصات پودر

۷- اصطکاک بین دانه‌ای

اصطکاک بین دانه‌ای پارامتر بسیار مهمی است که تقریباً بر روی اغلب خواص پودر تاثیر می‌گذارد.

هرچه سطح پودر بیشتر، اصطکاک بین دانه‌ای هم بیشتر



یکی از شاخص‌های اصطکاک بین دانه‌ای

زاویه قرار یا خواب است.



مشخصات پودر

۷- اصطکاک بین دانه‌ای

پارامتر دیگری که می‌توان توسط آن اصطکاک بین دانه‌ای را اندازه گرفت نسبت چگالی نشست به چگالی ظاهری هست.

به این نسبت، **نسبت هاوسند** گویند و هرچه بیشتر باشد اصطکاک بین دانه‌ای بیشتر خواهد شد.

شکل ظاهری پودر بر روی چگالی نشست و نسبت هاوسند تاثیرگذار است. به‌طوریکه هرچه ذرات پودری نامنظم‌تر باشد، در اثر نوسان روی هم انباشته شده و چگالی نشست و ضریب هاوسند افزایش خواهد یافت.

