مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 267-278

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مقایسه عددی برخورد یک قطره توخالی مذاب و یک قطره توخالی نیمه مذاب به سطح

هادی صفایی[1]، محسن دوازده‌امامی[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان،صندوق پستی 84156-83111، mohsen@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 اردیبهشت 1396

پذیرش: 16 تیر 1396

ارائه در سایت: 20 مرداد 1396

کلید واژگان:

قطره نیمه مذاب

مدل کسر حجمی سیال

جریان تراکم‌پذیر

انجماد

چکیده

در تحقیق حاضر برخورد یک قطره توخالی ZrO_2 در حالت کاملا مذاب و نیمه مذاب به سطح، به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده است. در ابتدا با ارائه یک مدل تحلیلی، تولید ذره توخالی از ذره آگلومره بررسی شده است. با کمک این مدل می‌توان قطر ذره، قطر هسته جامد و ضخامت پوسته ذره توخالی تولیده شده را پیش‌بینی کرد. نتایج این بخش نشان می‌دهد در مقادیر تخلخل اولیه کم ($p = 0.2$) ذره توخالی بوجود نمی‌آید. در ادامه، از داده‌های مدل تحلیلی به عنوان داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. در مدل عددی، هسته جامد مرکزی به صورت یک سیال با ویسکوزیته بالا در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود گاز محبوس در قطره توخالی، تغییرات چگالی و حجم گازدر حین برخورد به سطح بسیار مهم می‌شوند. از این‌رو شکل تراکم‌پذیر معادلات حاکم استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که هیدرودینامیک و زمان انجماد برخورد یک قطره توخالی کاملا مذاب به سطح، با برخورد قطره توخالی نیمه مذاب به سطح، تفاوت دارد. وجود هسته جامد مرکزی در حالت قطره نیمه مذاب، مانع از تشکیل جت ناهمسو می‌شود. به همین دلیل، یک قطره توخالی نیمه مذاب، سریعتر از یک قطره توخالی کاملا مذاب، منجمد می‌شود. زمان کلی انجماد در حالت کاملا مذاب، 35 µs و در حالت نیمه مذاب، 12 µs است. .همچنین اسپلت حاصل برخورد یک قطره نیمه مذاب، پیوسته‌تر از اسپلت یک قطره کاملا مذاب است.

Numerical comparison between the impact of a completely molten and a semi-molten hollow droplet on a surface

Hadi Safaei, Mohsen Davazdah Emami*

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* P.O.B. 84156-83111, Isfahan, Iran, mohsen@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 April 2017
Accepted 07 July 2017
Available Online 11 August 2017

Keywords:
Semi-molten droplet
VOF model
Compressible flow
Solidification

ABSTRACT

In this research, the impact of a completely molten hollow droplet and a semi-molten hollow droplet on a surface is simulated numerically. At first, the production process of hollow particles from the agglomerated particles is addressed analytically. By this model, one can predict the particle diameter, solid core diameter and shell thicknesses of produced particle. The results of this section show that hollow particle may develop only slightly at small initial porosity values (p=0.2). Then, the collected data from analytical model is used as input data for numerical simulation. In the numerical model, the central solid core was assumed to be a fluid with high viscosity. Due to high impact velocity, volume and density changes of the trapped gas inside droplet are important. Therefore the compressible form of governing equations is used. The results show that the hydrodynamic and solidification behavior of a completely molten droplet and a semi-molten droplet during impact process is different. In the semi-molten state, the central solid core prevents the formation of a counter jet. For this reason, a hollow semi-molten droplet is solidified faster than a completely molten hollow droplet. The overall time of solidification in the completely molten state is 35 µs and the corresponding time for semi-molten state, is 12 µs. Moreover, the splat of a semi-molten hollow droplet is more continuous compared with a completely molten droplet.

1- مقدمه

در پوشش‌دهی به روش پلاسمای حرارتی، ذرات پودر تغذیه با عبور از پلاسما، در ابتدا گرم شده، به صورت مذاب یا نیمه مذاب به یک بستر هدف برخورد کرده و یک لایه محافظ را بر روی آن ایجاد می‌کنند. از جمله اهداف پوشش‌دهی، محافظت در برابر خوردگی، سایش، اکسایش و انتقال حرارت است. بدلایل مختلف، تمامی ذراتی که از پلاسما عبور می‌کنند به طور کامل ذوب نمی‌شوند؛ به عنوان مثال ذراتی که از مرکز پلاسما عبور نمی‌کنند احتمال ذوبشان کمتر است [2,1]. در پوشش سد حرارتی[1]، از مواد با ضریب هدایت حرارت پایین (مانند زیرکونیم)، به عنوان ماده پوشش بهره گرفته می‌شود. به علت پایین بودن ضریب هدایت حرارتی این مواد، احتمال ذوب کامل آن‌ها هنگام عبور از پلاسما کم است. استفاده از ذرات توخالی[2]، ذوب

[1] Thermal barrier coating
[2] Hollow

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Safaei, M. Davazdah Emami, Numerical comparison between the impact of a completely molten and a semi-molten hollow droplet on a surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 267-278, 2017 (in Persian)

کامل پوسته آن‌ها را هنگام عبور از پلاسما تضمین می‌کند [3]. ذرات توخالی در ابتدا توسط لونگو [4] ابداع شدند و امروزه به‌طور گسترده در پوشش سد حرارتی به‌کار می‌روند. مطالعات محدود انجام شده در این زمینه، نشان از بهبود خواص پوشش دارد [5-7]. به‌عنوان مثال، می‌توان به کنترل تخلخل پوشش اشاره کرد. با کنترل تخلخل می‌توان ویژگی عایق حرارتی برای پوشش را فراهم کرد؛ به‌عبارت دیگر، با استفاده از این نوع پودرها، می‌توان موادی با مقاومت حرارتی مختلف و ضریب حرات هدایتی قابل تنظیم به‌دست آورد [6]. این ذرات را می‌توان با استخراج آب از ذرات سل-ژل [8] و یا عملیات تیمار پلاسما بر روی ذرات آگلوموره [9-11] بدست آورد.

یک لایه‌ی پوشش، از برخورد تعداد زیادی قطره به سطح، حاصل می‌شود. فرایند برخورد، در مقیاس زمانی میکرو ثانیه اتفاق می‌افتد. با توجه به این مقیاس زمانی کوچک، تجهیزات آزمایشگاهی برای ثبت اطلاعات حاصل از برخورد، محدودیت زیادی دارند. از این‌رو، معمولا محققین برخورد یک تک قطره به سطح را، به‌صورت عددی شبیه‌سازی و ارزیابی می‌کنند. خواص پوشش ایجاد شده، تا حدود زیادی به پارامترهایی نظیر، سرعت برخورد، میزان ذوب ذره قبل از برخورد (به‌صورت کاملا مذاب یا نیمه مذاب)، و دمای سطح زمینه بستگی دارد. در بیشتر تحقیقات انجام شده تاکنون، قطره (توپر[1] و یا توخالی) به‌صورت کاملا مذاب فرض شده است [12-15] و اطلاعات در زمینه برخورد قطره نیمه مذاب به سطح اندک است. از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه برخورد قطره توپر نیمه مذاب به سطح، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

وو و همکاران [1] قطره نیمه مذاب YSZ[2] را مورد توجه قرار دادند. در مدل عددی برای اعمال شرط عدم لغزش در مرز هسته جامد- سیال و نیز حرکت هسته جامد در سیال، از روش مرز غوطه ور[3] استفاده شد. سپس با استفاده از این روش، برخورد قطره نیمه مذاب YSZ به سطح، شبیه‌سازی شد. در این تحقیق فرض شد انتقال حرارت تاثیری بر هیدرودینامیک قطره ندارد، بنابراین معادله انرژی حل نگردید. عدم توانایی مواردی نظیر شبیه‌سازی انجماد قطره، امکان ذوب هسته جامد و پیش‌بینی شکل اسپلت[4] (شکل نهایی قطره پهن شده روی سطح)، از جمله نقاط ضعف مدل ارائه شده است. زیراری و همکاران [16] برخورد قطره مذاب و نیمه مذاب آلومینیوم به سطح را، به‌صورت مایل و عمود، با استفاده از روش گسسته‌سازی المان محدود مطالعه کردند. انتقال حرارت با روش حرارت مخصوص حل شد. در این تحقیق مشخص شد اسپلت تشکیل شده به حالت ذوب ماده بستگی دارد. تابارا و گو [17] با استفاده از تکنیک شبکه انطباقی[5]، برخورد قطره نیمه مذاب YSZ به سطح را شبیه‌سازی کردند. به‌دلیل استفاده از تکنیک شبکه انطباقی، هزینه زمانی این مدل عددی زیاد است. در مدل ارائه شده، تغییر فاز رخ نمی‌دهد و در نتیجه، اندازه هسته جامد ثابت باقی می‌ماند. الوی و همکاران [18] ابتدا با ارائه یک مدل تحلیلی، وجود هسته جامد در ذرات نیکل را هنگام عبور از پلاسما پیش‌بینی کردند. سپس مدلی عددی را ارائه کردند که توانایی شبیه‌سازی برخورد قطره نیمه مذاب به سطح و تغییر فاز را دارد. مساله انتقال حرارت در این تحقیق برای آنتالپی حل شد و هسته جامد مرکزی به صورت یک سیال با ویسکوزیته بالا در نظر گرفته شد. در ادامه برخورد یک قطره نیمه مذاب به سطح، بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد هسته جامد مرکزی باعث به‌وجود آمدن برآمدگی‌هایی در اسپلت نهایی می‌شود. همچنین مشخص شد قطر هسته جامد، نقش مهمی در پخش‌شدن[6] قطره ایفا می‌کند. زو و همکاران [19] مدلی عددی برمبنای روش ترکیبی اویلری- لاگرانژی، برای شبیه‌سازی برخورد قطره نیمه مذاب به سطح ارئه کردند. هسته جامد به صورت یک ماده پلاستیک فرض شد و ویسکوزیته به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شد؛ به طوری که با کاهش دما، ویسکوزیته افزایش یافته و سرعت محلی کاهش می‌یابد. نتیجه این تحقیق نشان داد که میزان پهن‌شدگی قطره به اندازه هسته جامد بستگی دارد، به‌طوری که با کاهش قطر هسته جامد، میزان پهن‌شدگی افزایش می‌یابد.

در تمامی تحقیقات فوق برخورد یک قطره توپر نیمه مذاب به سطح، شبیه‌سازی شده است و اطلاعاتی در زمینه برخورد قطره توخالی نیمه مذاب به سطح وجود ندارد. درون ذرات توخالی معمولا ریزذرات دیگری وجود دارند که این ریزذرات از فرایند تولید ذرات توخالی بوجود می آیند (شکل 1).

هنگام عبور از پلاسما و قبل از برخورد به سطح، این ریزذرات معمولا به صورت ذوب‌نشده باقی می‌مانند. با توجه به وجود ریز ذرات ذوب نشده در مرکز ذرات توخالی، در تحقیق حاضر، برخورد یک قطره توخالی نیمه مذاب به سطح به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود.

برای شبیه‌سازی عددی، اطلاعاتی مانند قطر قطره توخالی، ضخامت پوسته احاطه کننده قطره و قطر هسته جامد لازم است. محدوده قطر و ضخامت پوسته ذره توخالی در مرجع [3] موجود است. اما اطلاعات در زمینه قطر هسته جامد مرکزی وجود ندارد. از این‌رو قبل از شبیه‌سازی عددی برخورد قطره به سطح، فرایند تولید ذره توخالی با ارائه یک روش تحلیلی بررسی می‌شود. با کمک این روش، اطلاعاتی نظیر قطر، ضخامت پوسته و قطر هسته جامد بدست می‌آید، سپس از اطلاعات به‌دست آمده در روش عددی استفاده می‌شود.

پژوهش‌های تحلیلی صورت گرفته در زمینه فرایند تولید ذرات توخالی بسیار اندک است. سولوننکو و همکاران [11] نحوه تولید و رفتار ذرات ZrO_2، Ni، CoNiCrAlY و SiO_2 را در جت پلاسما مورد توجه قرار دادند. آن‌ها با فرض تعادل مکانیکی، مدلی نیمه تحلیلی را ارائه کردند که با کمک آن می‌توان ضخامت پوسته احاطه‌کننده گاز را برحسب تخلخل و قطر اولیه ذره مشخص کرد. در این تحقیق فرض شد که ذره هنگام عبور از پلاسما، کاملا ذوب شده است و بنابراین اثرات انتقال حرارت و وجود هسته جامد مرکزی در

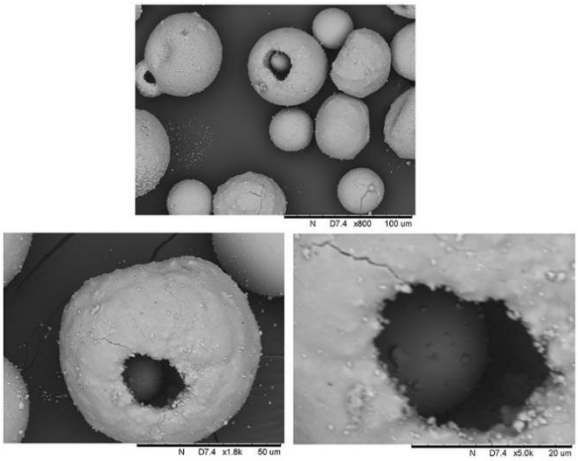


Fig. 1 SEM image of the hollow ZrO_2 particles

شکل 1 تصویر الکترون روبشی از ذرات توخالی ZrO_2

[1] Dense
[2] Yttria Stabilized Zirconia
[3] Immersed boundary
[4] Splat
[5] Mesh adaptation
[6] Splash

فرایند ساخت این قطرات مورد توجه قرار نگرفته است. سولوننکو [20] در تحقیق دیگری، فرایند تولید ذرات توخالی از ذرات آگلوموره[1] را با در نظر گرفتن اثرات انتقال حرارت، به صورت تحلیلی مورد ارزیابی قرار داد. پارامترهای موثر بر فرایند تولید، تشخیص داده شد. نشان داده شد که با تغییر شار حرارتی، می‌توان ذراتی با قابلیت کنترل قطر و ضخامت پوسته به‌دست آورد. گولدیف [10] روشی جدید برای تولید ذرات توخالی با قابلیت کنترل قطر و ضخامت را مورد مطالعه قرار داد. در این روش از پلاسمای دما پایین برای تولید ذرات توخالی استفاده شد.

در تمامی روش‌های تحلیلی ارائه شده تاکنون، فرض شده است ذرات آگلوموره به‌طور کامل در جت پلاسما ذوب می‌شوند. لذا وجود هسته جامد و نیز اندازه آن، در این ذرات تاکنون پیش‌بینی نشده است. از اینرو در تحقیق حاضر، ابتدا مدل تحلیلی ارائه می‌شود که توانایی پیش‌بینی قطر هسته جامد را دارد. این مدل همچنین می‌تواند ضخامت و قطر ذره را پس از تولید، پیش‌بینی کند. در ادامه، از داده‌های مدل تحلیلی استفاده شده و برخورد یک قطره توخالی نیمه مذاب به سطح، به صورت دو بعدی شبیه‌سازی می‌شود. بدین منظور و با توجه به فیزیک مساله، از مدل عددی استفاده می‌شود که توانایی شبیه‌سازی جریان دوفازی تراکم‌پذیر را داشته باشد. در این مدل عددی، بر خلاف بسیاری از مدل‌های عددی ارائه شده، تغییر قطر هسته جامد و ذوب مجدد[2] آن پیش‌بینی شده است. درنهایت، با شبیه‌سازی عددی، اطلاعاتی نظیر دینامیک برخورد قطره، زمان انجماد و دیگر پارامترهای مرتبط با فرایند برخورد حاصل می‌گردد.

2- مدل تحلیلی برای تولید ذرات توخالی

روش‌های مختلفی برای تولید ذرات توخالی وجود دارد؛ برای مثال یکی از روش‌های مهم و صنعتی تولید این نوع از ذرات، انجام عملیات تیمار پلاسما[3] بر روی ذرات آگلوموره است [11]. ذرات آگلوموره دارای ساختار غیریکنواخت و متخلخل هستند (شکل 2).

در عملیات تیمار پلاسما بر روی ذرات آگلوموره، ابتدا این ذرات گرم می‌شوند، سپس مقداری از گاز درون از آن‌ها خارج شده و سطح ذره به دمای ذوب می‌رسد. با ادامه انتقال حرارت، گاز محبوس در آن‌ها منبسط شده و به سمت مرکز ذره می‌رود و یک پوسته مایع کروی را ایجاد می‌کند. درنهایت با سرد کردن قطرات می‌توان ذرات توخالی را تولید کرد [11] (شکل 3).

در ابتدا با کمک حل نیمه‌تحلیلی و استفاده از تعادل شبه‌پایای حرارتی و تعادل مکانیکی تولید ذرات توخالی بررسی می‌شود. در حل نیمه‌تحلیلی از مدل ظرفیت حرارت کلی[4] برای محاسبه دما در ذره استفاده می‌شود. برای

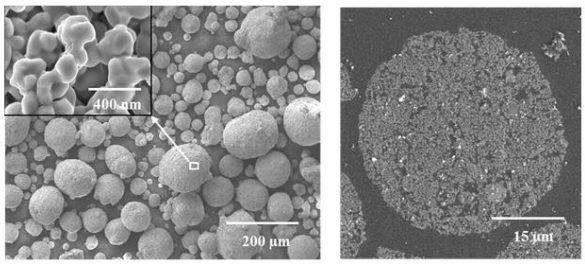


Fig. 2 SEM image of the agglomerated ZrO_2 particles

شکل 2 تصویر الکترون روبشی از ذرات آگلوموره

[1] Agglomerated
[2] Remelting
[3] Plasma treatment
[4] Lumped capacitance

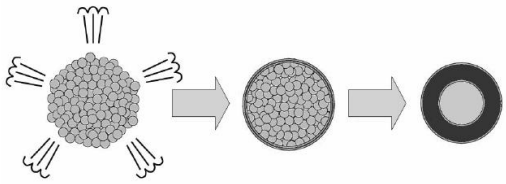


Fig. 3 Formation of hollow particles from the agglomerated particles

شکل 3 مراحل تشکیل ذرات توخالی از ذرات آگلوموره[11]

استفاده از این روش, عدد بایوت[5] باید مقداری کمتر از 0.1 داشته باشد. عدد بایوت به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\mathrm{Bi} = \frac{h_\infty D_{\mathrm{sp}}}{6k_{\mathrm{mix}}} \tag{1}$$

که D_{sp}، h_∞ و k_{mix} به ترتیب بیانگر قطر ذره جامد، ضریب انتقال حرارت همرفتی محیط و ضریب انتقال حرارت هدایتی ذره آگلوموره است. ضریب انتقال حرارت هدایتی با توجه به میزان تخلخل اولیه در ذره از رابطه (2) محاسبه می‌شود:

$$k_{\mathrm{mix}} = (1-p)k_{\mathrm{sp}} + pk_{\mathrm{g}} \tag{2}$$

که p تخلخل اولیه ذره، k_{sp} و k_{g} بترتیب ضریب انتقال حرارت هدایتی ذره جامد و گاز است. قطر ذرات آگلوموره زیرکونیم (ZrO_2) در محدوده‌ی 50-130 µm در نظر گرفته شده است. مقدار تخلخل p در ذرات آگلوموره در محدوده 0.2-0.7 قرار دارد [11]. مقدار $k_{\mathrm{sp}} = 2.32\,\mathrm{w/m.K}$ و $k_g = 0.024\ \mathrm{w/m.K}$ می‌باشد. با توجه به موارد فوق، بیشینه مقدار عدد بایوت در حدود 0.004 خواهد بود که بسیار کمتر از 0.1 است. با توجه به قطر کم ذرات، فرض می‌شود که آن‌ها با سرعت جت پلاسما حرکت می‌کنند، بنابراین:

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 2 \tag{3}$$

با استفاده از مدل ظرفیت حرارت کلی، برای انتقال حرارت در ذره، معادله انرژی به فرم زیر ساده خواهد شد:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_{\mathrm{mix}} C V T_{\mathrm{p}}\right) = h_\infty A\left(T_{\mathrm{p}} - T_\infty\right) \tag{4}$$

که C، V، T_{p}، A و T_∞ ترتیب بیانگر ظرفیت گرمای ویژه ذره، حجم ذره، دمای ذره، سطح ذره و دمای پلاسما است. ρ_{mix} چگالی مخلوط است که از رابطه (5) به‌دست می‌آید.

$$\rho_{\mathrm{mix}} = (1-p)\rho_{\mathrm{l}} + p\rho_{\mathrm{g}} \tag{5}$$

که ρ_{l} و ρ_{g} به ترتیب بیانگر چگالی مایع و چگالی گاز است. در تحقیق حاضر چگالی زیرکونیم مایع و زیرکونیم جامد تقریبا برابر فرض شده است. فاصله پیموده شده Z از دهانه جت، با در نظر گرفتن سرعت متوسط $\overline{U}$ برای ذره، از رابطه (6) به‌دست می‌آید.

$$Z = \overline{U} \cdot t \tag{6}$$

تغییرات دما از دهانه جت پلاسما تا ناحیه خروج ذرات، به صورت $T_\infty = c_1 \cdot Z + c_2$ در نظر گرفته شده و با توجه به رابطه (6)، رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$T_\infty = c_3 \cdot t + c_2 \tag{7}$$

ثوابت c_2 و c_3 با توجه به دمای در مشعل و در ناحیه خروج ذرات تعیین می‌شود. اگر $T_{\infty 1}$ ، $T_{\infty 2}$ و t_{f} بترتیب دما در دهانه جت پلاسما، دما در ناحیه خروج ذرات از پلاسما و کل زمان طی شده ذره از ورود به جت تا خروج از آن باشد، ثوابت c_2 و c_3 بترتیب $T_{\infty 1}$ و $(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})/t_{\mathrm{f}}$ خواهند شد. نهایتا با حل رابطه (4) دمای $T_{\mathrm{p}}(t)$ بفرم رابطه (8) درمی‌آید.

[5] Biot

$$T_{\mathrm{p}}(t)=\left(T_0+\frac{\rho CV}{h_\infty A}c_3-c_2\right)\cdot\exp\left(-\frac{h_\infty A}{\rho CV}\right)+c_3t+c_2-\frac{\rho CV}{h_\infty A}c_3 \quad (8)$$

که T_0 دمای اولیه ذره است. رابطه‌ای مشابه توسط الوی و همکاران [18] به‌دست آمده که برای ذرات توپر می‌باشد و اثرات کشش سطحی در آن در نظر گرفته نشده است. شکل اصلاح شده رابطه مذکور با در نظر گرفتن اثر کشش سطحی در ادامه ارائه می‌شود. با رسیدن دمای ذره به دمای ذوب T_{m}، تغییر فاز رخ داده و دیگر رابطه فوق برقرار نیست. با توجه به ضریب انتقال حرارت هدایتی کوچک هوا و سرامیک، برای شبیه‌سازی فرایند تغییر فاز از تقریب شبه پایا[1] استفاده می‌شود. در حین تغییر فاز، دمای ناحیه جامد برابر T_{m} در نظر گرفته می‌شود. پس از رسیدن به دمای ذوب، گرمای نهان ذوب نیز در معادلات مربوطه وارد می‌شود. در این مرحله، یک پوسته مایع اطراف ذره ایجاد می‌شود. هوای محبوس مابین ذرات، آزاد شده و در زیر پوسته مایع قرار می‌گیرد. در مرکز نیز هسته جامد قرار دارد (شکل 4).

از آنجا که میزان تخلخل حجمی، $p=V_{\mathrm{g}}/V_{\mathrm{total}}$ است، با فرض کروی بودن حفره‌های هوا، میزان تخلخل سطحی $A_g/A_{\mathrm{total}}=p^{2/3}$ خواهد شد.

با توجه "شکل 4" و با نوشتن معادله انرژی بر روی پوسته جامد، رابطه (9) حاصل می‌شود:

$$\frac{T_\infty-T_{\mathrm{m}}}{\frac{1}{\pi D_{\mathrm{p}}^2h_\infty}+R_{\mathrm{t}}}=\frac{1}{2}(1-p)^{2/3}\pi D_{\mathrm{s}}^2.\rho_{\mathrm{l}}H_{\mathrm{fs}}.\left(-\frac{dD_{\mathrm{s}}}{dt}\right) \quad (9)$$

که H_{fs} بیانگر گرمای نهان ذوب و R_{t} بیانگر مقاومت حرارتی است. زیرنویس l به معنای مایع و زیر نویس s به معنای جامد است. R_{t} از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{\mathrm{t}}=\frac{1}{2\pi k_{\mathrm{l}}}\left(\frac{1}{D_{\mathrm{p}}-2\Delta_{\mathrm{p}}}-\frac{1}{D_{\mathrm{p}}}\right)+\frac{1}{2\pi k_{\mathrm{g}}}\left(\frac{1}{D_{\mathrm{p}}}-\frac{1}{D_{\mathrm{p}}-2\Delta_{\mathrm{p}}}\right) \quad (10)$$

که D_{p} قطر و Δ_{p} ضخامت پوسته قطره توخالی است. برای محاسبه مقاومت حرارتی، نیاز به دانستن D_{p} و Δ_{p} است. فرض می‌شود هوای آزاد شده به صورت کروی در زیر پوسته مایع قرار می‌گیرد. با توجه به شار حرارتی منتقل شده، هوا امکان انبساط دارد. رفتار هوا را همانند گاز ایده‌آل در نظر گرفته و معادله حالت گاز ایده‌آل برای آن به‌کار برده می‌شود.

$$P_{\mathrm{g}}V_{\mathrm{g}}=m_{\mathrm{g}}RT_{\mathrm{g}} \quad (11)$$

که R ثابت اختصاصی گاز، V_{g} حجم گاز، m_{g} جرم گاز آزاد شده و P_{g} فشار گاز است. V_{g} از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_{\mathrm{g}}=\frac{4\pi}{3}\left(\left(\frac{D_{\mathrm{p}}}{2}-\Delta_{\mathrm{p}}\right)^3-\left(\frac{D_{\mathrm{s}}}{2}\right)^3\right) \quad (12)$$

و همچنین:

$$m_{\mathrm{g}}=\left(1-\frac{D_{\mathrm{s}}^3}{D_{\mathrm{p0}}^3}\right)m_{\mathrm{g0}} \quad (13)$$

که m_{g0} و D_{p0} بترتیب بیانگر جرم اولیه گاز در ذره آگلومره و قطر اولیه ذره آگلومره است. بنابراین، با استفاده از روابط (11)، (12) و (13)، فشار گاز از رابطه (14) محاسبه می‌شود:

$$P_{\mathrm{g}}=\frac{6m_{\mathrm{g0}}RT_{\mathrm{g}}}{\pi D_{\mathrm{p}}^3}\left(1-2\Delta_{\mathrm{p}}/D_{\mathrm{p}}\right)^{-3}\left(1-\frac{D_{\mathrm{s}}^3}{D_{\mathrm{p0}}^3}\right) \quad (14)$$

با توجه به اثرات کشش سطحی با فرض تعادل مکانیکی و با توجه به رابطه (14)، می‌توان نوشت:

$$P_{\mathrm{out}}+\frac{4\sigma}{D_{\mathrm{p}}}\cdot\left(1+\frac{1}{1-2\Delta_{\mathrm{p}}/D_{\mathrm{p}}}\right)=\frac{6m_{\mathrm{g0}}RT_{\mathrm{g}}}{\pi D_{\mathrm{p}}^3}\left(1-2\Delta_{\mathrm{p}}/D_{\mathrm{p}}\right)^{-3}\left(1-\frac{D_{\mathrm{s}}^3}{D_{\mathrm{p0}}^3}\right) \quad (15)$$

حال از بقای جرم برای پوسته مایع استفاده می‌شود. جرم پوسته مایع، برابر جرمی است که از ذره اصلی جدا شده و تشکیل پوسته مایع را داده است (چگالی مایع و جامد را برابر در نظر گرفته شده‌اند). بنابراین:

$$\frac{\pi(1-p)\rho_{\mathrm{s}}D_{\mathrm{p0}}^3}{6}\cdot\left[1-\frac{D_{\mathrm{s}}^3}{D_{\mathrm{p0}}^3}\right]=\frac{\pi\rho_{\mathrm{l}}D_{\mathrm{p}}^3}{6}\cdot\left[1-\left(1-\frac{2\Delta_{\mathrm{p}}}{D_{\mathrm{p}}}\right)^3\right] \quad (16)$$

و نهایتا:

$$\frac{\pi(1-p)D_{\mathrm{p0}}^3}{6}\cdot\left[1-\frac{D_{\mathrm{s}}^3}{D_{\mathrm{p0}}^3}\right]=\frac{\pi D_{\mathrm{p}}^3}{6}\cdot\left[1-\left(1-\frac{2\Delta_{\mathrm{p}}}{D_{\mathrm{p}}}\right)^3\right] \quad (17)$$

در صورت رسیدن ذره به دمای ذوب، با حل معادله دیفرانسیل (9) به‌طور همزمان با معادلات غیرخطی (15) و (17) مقادیر D_{s}، D_{p} و Δ_{p} به‌دست می‌آیند. در فرایند حل باید توجه کرد که ابتدا زمان کلی حرکت ذره در پلاسما از رابطه (6) مشخص می‌شود و سپس با کمک رابطه (8) زمان رسیدن ذره به دمای مذاب محاسبه می‌شود. در صورتی که این زمان از زمان کلی حرکت ذره در پلاسما کمتر باشد، آن‌گاه معادلات (9)، (15) و (17) حل می‌شوند. اگر با حل این معادلات $D_{\mathrm{s}}=0$ شود به این معناست که ذره کاملا ذوب شده است، در صورتی که قسمت زیادی از ذره ذوب شود و $\Delta_{\mathrm{p}}=0$ بدین معناست که ذره متلاشی می‌شود و اگر $\Delta_{\mathrm{p}}<0$ باشد به معنای عدم تشکیل ذره توخالی است. برای تولید ذرات، تفنگ پلاسمای تزریق از مرکز و یا تزریق از کنار استفاده می‌شود. در این‌جا نتایج تنها برای تفنگ پلاسما با تزریق از کنار ارائه شده‌اند (شکل 5).

با توجه به مراجع [21,11]، دما در دهانه جت و جایی که ذرات رها می‌شوند برابر 8000 K، و دما در ناحیه خروج ذرات از پلاسما 2000 K فرض می‌شود. نتایج تحلیلی برای سه تخلخل اولیه $p=0.2$، $p=0.5$ و $p=0.7$ آورده شده است. شبیه‌سازی تحلیلی و عددی برای ذره ZrO_2 انجام شده است که خواص آن در جدول 1 آمده است.

در ابتدا برای صحه‌گذاری مدل تحلیلی حاضر، ضخامت نسبی پوسته ذره

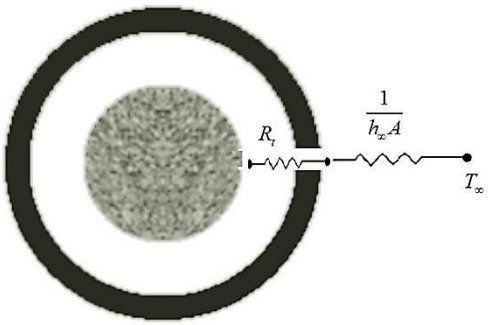


Fig. 4 The schematics of a hollow particle and the considered thermal resistances

شکل 4 شماتیک یک ذره توخالی و مقاومت‌های حرارتی

[1] Quasi-Steady

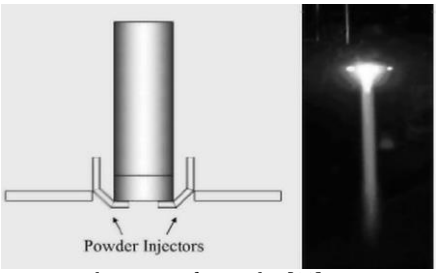


Fig. 5 Plasma gun with injection from sides [11]

شکل 5 پلاسمای شعاعی با تزریق از کنار

($\delta_p = \Delta_p/D_{p0}$) برای $p = 0.45$ با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی [11] مقایسه می‌شود (شکل 6).

مشاهده می‌شود که در مدل تحلیلی حاضر برای $D_{p0} > 43$ µm ضخامت پوسته، کمتر از مدل تحلیلی [11] پیش‌بینی می‌شود، زیرا در مدل تحلیلی [11]، کاهش جرم پوسته به‌واسطه هسته جامد مرکزی در نظر گرفته نشده است. از طرفی برای $D_{p0} < 43$ µm مقدار ضخامت پوسته بیشتر از مدل حاضر پیش‌بینی می‌شود. علت این امر آن است که در مدل حاضر در قطرهای کوچک، ذوب کامل ذره پیش‌بینی می‌شود. از مقایسه نتایج حاضر با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی [11]، مطابقت مناسبی مشاهده می‌شود که به معنای صحت مدل تحلیلی حاضر است.

در جدول 2 برخی از شرایط اولیه و حالت ذوب ذرات در این شبیه‌سازی، آورده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود با توجه به هدایت حرارتی کم ذره ZrO_2، در هیچ یک از حالات داده شده ذره به‌صورت کامل ذوب نمی‌شود. علاوه بر این، ذره با قطر حدود 120 µm و تخلخل اولیه 0.2، به دمای ذوب نمی‌رسد. براساس نتایج حاصل، مشاهده می‌شود که افزایش میزان تخلخل اولیه، با افزایش حالت ذوب ذره همراه است، به‌طوری‌که در این حالت، ذره با تخلخل اولیه 0.5 و یا 0.7 و با قطر 130 µm نیز به دمای ذوب می‌رسد، که این امر برای تولید ذرات توخالی مطلوب است. از دیگر نتایجی که در جدول آورده شده است، افزایش احتمال متلاشی شدن ذره با افزایش میزان تخلخل اولیه است.

در نمودار "شکل 7"، تغییرات قطر ذره برحسب قطر اولیه ذره پس از عبور از پلاسما آورده شده است. در این شکل، تنها مواردی که ذره آگلوموره به دمای ذوب می‌رسد و همچنین ذره توخالی تشکیل می‌شود، آورده شده است.

مشاهده می‌شود در هر قطر اولیه از ذره آگلوموره، تغییرات قطر ذره

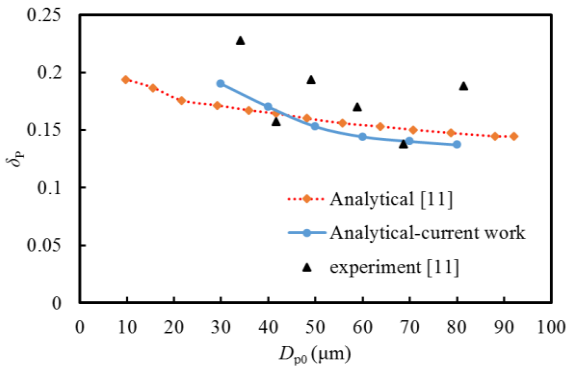


Fig. 6 Relative shell thickness of the hollow particle

شکل 6 ضخامت نسبی پوسته ذره توخالی

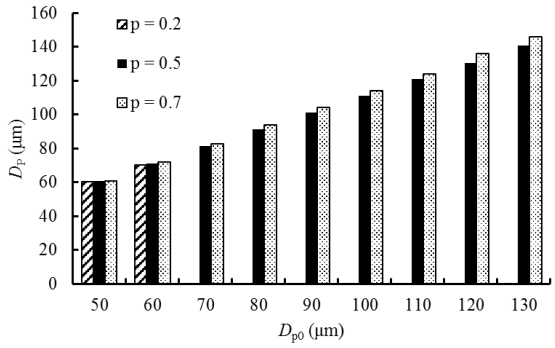


Fig. 7 Diameter variation against initial diameter

شکل 7 تغییرات قطر برحسب قطر اولیه

توخالی وابسته به تخلخل اولیه است. قطر نهایی ذره بیشتر از قطر اولیه است و با افزایش میزان تخلخل این افزایش قطر بیشتر نیز می‌شود (تا 16 درصد بیش از قطر اولیه). این مساله از آنجا نشات می‌گیرد که با افزایش تخلخل، هوای بیشتری منبسط شده و بر دیواره قطره فشار وارد می‌کند. همچنین در تخلخل‌های اولیه کم (0.2)، ذره توخالی ایجاد نمی‌شود. این بدان علت است که در این حالت، اگرچه پیوستن حفره‌های هوا به یکدیگر، باعث بوجود آمدن حفره‌های بزرگتر می‌شود، اما از آن جا که مقدار گاز کم است، افزایش فشار حاصل از افزایش دما نمی‌تواند بر کشش سطحی غلبه کرده و یک حفره توخالی را به‌وجود آورد.

تغییرات قطر هسته جامد برحسب قطر اولیه در نمودار "شکل 8" نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود، در هر قطر اولیه از ذره آگلوموره، قطر هسته جامد مستقل از تخلخل اولیه است که می‌تواند به دلیل وابستگی قطر هسته به گرمای نهان ذوب و مقدار زیاد گرمای نهان باشد. با این حال مشاهده می‌شود در یک قطر خاص از ذره اولیه، قطر هسته جامد با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد، زیرا افزایش تخلخل به معنی کاهش نهان ذوب موثر است و در نتیجه مقدار بیشتری از ذره ذوب می‌شود. با افزایش قطر اولیه، در صد ذوب ذره کمتر شده و حتی ممکن است ذره ذوب نشود.

نمودار "شکل 9" تغییرات ضخامت نسبی پوسته ذره را نسبت به قطر اولیه ذره نشان می‌دهد.

برخلاف قطرهسته جامد، ضخامت پوسته ذره تولید شده به مقدار بسیار زیادی به تخلخل اولیه و نیز قطر اولیه ذره وابسته است. براساس این نمودار، در یک قطر مشخص از ذره اولیه، ضخامت پوسته ذره با افزایش تخلخل اولیه

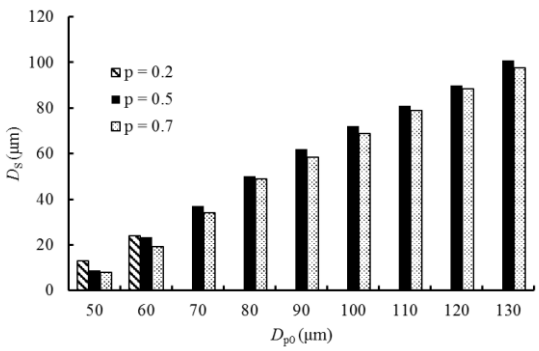


Fig. 8 Solid diameter variation against initial diameter

شکل 8 تغییرات قطر هسته جامد برحسب قطر

جدول 1 خواص ZrO_2 [23,22]

Table 1 properties of the ZrO_2

L (Jkg^{-1})	C_p ($Jkg^{-1}K$)	T_s (K)	T_l (K)	k_s ($Wm^{-1}K^{-1}$)	k_l ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Contact angle	μ ($kgm^{-1}s^{-1}$)	σ (Nm^{-1})	ρ (kgm^{-3})
1.41×10^5	713	2949	2951	2	3	90°	0.021	0.43	5890

جدول 2 شرایط اولیه و حالت ذوب ذرات

Table 2 Initial simulation conditions for first plasma gun

قطر (μm)	حالت ذوب برای p = 0.2	حالت ذوب برای p = 0.5	حالت ذوب برای p = 0.7
50	نیمه-مذاب	نیمه-مذاب	نیمه-مذاب، متلاشی
60	نیمه-مذاب	نیمه-مذاب	نیمه-مذاب، متلاشی
80	نیمه-مذاب	نیمه-مذاب	نیمه-مذاب، متلاشی
130	ذوب نشده	نیمه-مذاب	نیمه-مذاب، متلاشی

کاهش می‌یابد، زیرا افزایش تخلخل به معنای کاهش جرم مایع اصلی در ذره است. همچنین با افزایش قطر اولیه ذره، میزان ضخامت پوسته کاهش می‌یابد. ضخامت‌های کم و نزدیک به صفر به معنای متلاشی شدن ذره است که این امر در تخلخل‌های اولیه بالاتر، مشهودتر است. بنابراین، اگرچه مقدار زیاد تخلخل اولیه از یک سو باعث افزایش حالت ذوب ذره می‌شود، اما از سویی دیگر این افزایش با متلاشی شدن ذره اولیه نیز همراه است.

3- شبیه‌سازی عددی

3-1- معادلات حاکم

سرعت برخورد قطره به سطح در شرایط پاشش حرارتی متغیر است، اما به‌طور معمول این سرعت بالای 100 m/s است [24]. در چنین شرایطی تراکم‌پذیری گاز محبوس و به تبع آن تغییرات چگالی و حجم گاز محبوس مهم می‌شود [25]. از این رو، لازم است از معادلات مناسب بهره گرفت که بتوانند فیزیک مساله را به‌خوبی مدل کنند. به‌دلیل اهمیت تراکم‌پذیری، در تحقیق حاضر برای ردیابی مرز مشترک بین دو سیال، از مدل میلر و همکاران [26] استفاده شده است. این مدل، یک مدل تراکم‌پذیر برمبنای روش کسر حجمی سیال است که در ابتدا برای انفجارات زیر آب مورد استفاده قرار گرفت. شکل اصلاح شده این معادلات، به‌طوری که مساله انجماد نیز قابل شبیه‌سازی باشد در مرجع [25] آورده شده است. در این‌جا تنها معادلات حاکم بر مساله بیان می‌شوند:

- **معادله کسر حجمی سیال** [26]:

$$\frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot(\alpha\vec{V}) = \frac{-\alpha\psi_{\mathrm{d}}}{\rho_{\mathrm{d}}}\frac{DP}{Dt} = \alpha(1-\alpha)\beta + \alpha\vec{\nabla}\cdot(\vec{V})$$

$$\beta = \left\{\left(\frac{\psi_{\mathrm{d}}}{\rho_{\mathrm{d}}}\right) - \left(\frac{\psi_{\mathrm{g}}}{\rho_{\mathrm{g}}}\right)\right\} \tag{18}$$

که ψ بیانگر تراکم‌پذیری $(\psi = (\partial\rho/\partial P)_s)$ سیال است. در تحقیق حاضر برای هوا، معادله حالت گاز واقعی $(P = z\rho RT)$ در نظر گرفته شده و فرض می‌شود مایع اندکی تراکم‌پذیر است و از معادله حالت ایزوترم برای آن استفاده می‌شود. بنابراین، ترم تراکم‌پذیری برای هوا و مایع به ترتیب $\psi_{\mathrm{g}} = 1/zRT$ و $\psi_{\mathrm{d}} = (\partial\rho/\partial P)_{\mathrm{s}} = 1/a^2$ خواهد شد که a سرعت صوت در مایع است.

- **معادله‌ی فشار** [26]:

با استفاده از معادله بقای جرم، معادله فشار به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\left(\alpha\frac{\psi_{\mathrm{d}}}{\rho_{\mathrm{d}}} + (1-\alpha)\frac{\psi_{\mathrm{g}}}{\rho_{\mathrm{g}}}\right)\left[\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{V}\cdot\vec{\nabla}P\right] + \vec{\nabla}\cdot(\vec{V}) = 0 \tag{19}$$

- **معادله مومنتوم** [25]:

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot(\vec{V}\vec{V}) - \vec{\nabla}\cdot\left\{\nu\left[\vec{\nabla}\vec{V} + (\vec{\nabla}\vec{V})^{\mathrm{T}}\right]\right\} = \vec{\nabla}P + \vec{F}_{\mathrm{vol}} + \vec{S}_{\mathrm{v}} \tag{20}$$

$\vec{F}_{\mathrm{vol}}$ نیروی کشش سطحی است که بعنوان یک نیروی حجمی در نظر گرفته شده و مقدار آن با کمک روش برکبیل محاسبه می‌شود [27]. ترم $\vec{S}_{\mathrm{v}}$ چشمه برای اصلاح معادله مومنتوم هنگام انجماد قطره است. این ترم چشمه توسط ولر [28] به‌صورت زیر مشخص شد:

$$\vec{S}_{\mathrm{v}} = -A\vec{V} \tag{21}$$

که:

$$A = \frac{-C(1-\theta)^2}{(\theta^3+\varepsilon)} \tag{22}$$

که C یک ثابت است و مقدار آن به ریخت‌شناسی[1] محیط متخلخل بستگی دارد. کمیت ε مقدار کوچکی است که برای جلوگیری از ناپایداری حل عددی در مخرج استفاده می‌شود. θ کسر مایع درون قطره است و از رابطه (23) به‌دست می‌آید [29].

$$\theta = 0.5\,\mathrm{erf}\left(\frac{4(T-T_m)}{(T_l-T_s)}\right) + 0.5 \tag{23}$$

- **معادله انرژی** [25]:

معادله انرژی برای جریان تراکم‌پذیر، با صرف‌نظر از اثرات اتلاف لزجت و

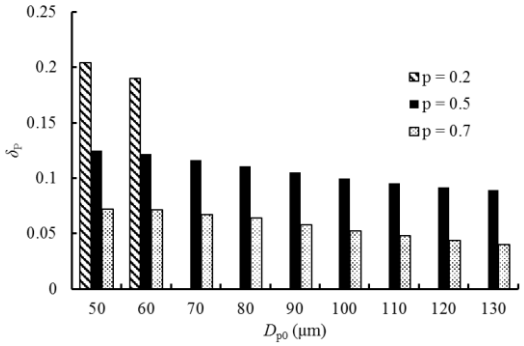


Fig. 9 particles Relative shell thickness variation against initial diameter

شکل 9 تغییرات ضخامت نسبی پوسته برحسب قطر اولیه

[1] Morphology

با در نظر گرفتن انجماد قطره، به صورت زیر است:

$$\frac{\partial\left(\rho C_{\mathrm{peff}}\vec{V}T\right)}{\partial t}+\vec{\nabla}\cdot\left(\rho C_{\mathrm{peff}}\vec{V}T\right)=\vec{\nabla}\cdot\left(k_{\mathrm{eff}}\vec{\nabla}T\right)+\frac{\partial P}{\partial t}-\left(\frac{\partial\rho K_{\mathrm{E}}}{\partial t}+\vec{\nabla}\cdot\left(\rho\vec{V}K_{\mathrm{E}}\right)\right)+S_{\mathrm{h}}\ ,$$

$$S_{\mathrm{h}}=-\rho L\frac{4\left(\frac{(T-T_{\mathrm{m}})}{(T_{\mathrm{l}}-T_{\mathrm{s}})}\right)^2}{(T_{\mathrm{l}}-T_{\mathrm{s}})\sqrt{\pi}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{V}\cdot\vec{\nabla}T\right) \tag{24}$$

C_{peff}، K_{eff}، T_{l} و T_{s} به ترتیب بیانگر ظرفیت گرمای ویژه مخلوط، ضریب انتقال حرارت هدایتی مخلوط، دمای شروع انجماد[1] و دمای اتمام انجماد[2] است. T_{m} میانگین T_{l} و T_{s} است ($T_{\mathrm{m}}=(T_{\mathrm{l}}+T_{\mathrm{s}})/2$). در فرمول‌بندی حاضر، به‌جای بررسی تک تک فازها به صورت مجزا، از خواص متوسط آن‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور ضرایب K_{eff}، C_{peff} و ... به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند: (لازم به ذکر است که قطره شامل فاز مایع و جامد است.)

$$\begin{aligned}k_{\mathrm{eff}}&=\alpha k_{\mathrm{d}}+(1-\alpha)k_{\mathrm{g}}\\ k_{\mathrm{d}}&=\theta k_{\mathrm{l}}+(1-\theta)k_{\mathrm{s}}\\ C_{\mathrm{peff}}&=\alpha C_{\mathrm{pd}}+(1-\alpha)C_{\mathrm{pg}}\end{aligned} \tag{25}$$

همچنین ρ در روابط فوق به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}\rho&=\alpha\rho_{\mathrm{d}}+(1-\alpha)\rho_{\mathrm{g}}\\ \rho_{\mathrm{d}}&=\theta\rho_{\mathrm{l}}+(1-\theta)\rho_{\mathrm{s}}\end{aligned} \tag{26}$$

که در معادلات فوق، زیر نویس d به معنای قطره است.

لازم به ذکر است شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار اپن‌فوم انجام شده است. در این نرم افزار بسیاری از معادلات ذکر شده در تحقیق، وجود ندارند. برای حل معادلات، از الگوریتم و نحوه گسسته‌سازی ذکر شده در مرجع [26] استفاده شده است. از این‌رو، با انتخاب حلگر اینترفوم از نرم‌افزار اپن‌فوم، الگوریتم فوق افزوده شده است. همچنین، برای حل مساله انجماد، معادله انرژی به این حلگر اضافه شده و معادله مونتوم اصلاح گردیده است.

4- نتایج و بحث

در این بخش از اطلاعات به‌دست آمده از بخش تحلیلی استفاده شده و برخورد یک قطره توخالی به سطح شبیه‌سازی می‌شود. نتایج بخش تحلیلی نشان می‌دهد که ذره توخالی پس از تولید، در همه حالات دارای هسته جامد ذوب نشده است. در صورت استفاده از تفنگ پلاسمای تزریق از مرکز، به‌دلیل آن‌که ذرات از مرکز پلاسما عبور می‌کنند احتمال این‌که یک ذره کاملا توخالی به‌وجود آید، بیشتر است. برای مثال اگر دمای مرکز پلاسما K 12000 فرض شود، با حل معادلات (9)، (15) و (17) مقدار قطر هسته جامد تقریبا صفر می‌شود. از این‌رو در بخش عددی، در ابتدا برخورد یک قطره کاملا توخالی و مذاب به سطح، شبیه‌سازی شده و سپس برخورد یک قطره توخالی نیمه مذاب به سطح، شبیه‌سازی می‌شود. نتایج حاصل از برخورد در هر حالت ارزیابی و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

4-1- برخورد قطره کاملا توخالی و مذاب به سطح

در ابتدا برخورد قطره زیرکونیم (ZrO_2) به سطح صاف با سرعت اولیه 100 m/s، به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده است. قطرخارجی قطره $D_0=60\ \mu m$ و قطر داخلی آن $d_0=44.4\ \mu m$ (ضخامت پوسته 7.8 mμ) می‌باشد. دمای اولیه قطره 3000 K و دمای هوای اطراف و بستر برخورد 652 K است. دامنه حل مساله در "شکل 10" نشان داده شده است که شامل 1.2 میلیون گره می‌باشد. برای کسب نتایج بهتر، از شبکه ریز در نزدیکی سطح زمینه و همچنین در نزدیکی محور تقارن استفاده شده است.

مکان اولیه قطره اندکی (5 μm) بالاتر از سطح زمینه در نظر گرفته شده تا میدان سرعت قبل از برخورد قطره به سطح، به حالت پایدار برسد. به عنوان شرایط مرزی، در مرزهایی که با اتمسفر در تماس‌اند برای سرعت، شرط گرادیان صفر و برای فشار، شرط فشار ثابت اتمسفر در نظر گرفته شده است. در روی مرز پایینی (محل برخورد قطره به سطح) برای سرعت، شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است.

مراحل برخورد قطره به سطح در "شکل 11" آورده شده است. در اندک زمانی پس از برخورد (0.1 μs) یک شوک در هوای اطراف ناحیه برخورد ایجاد شده که به‌واسطه آن مقدار گردابی[3] ($\vec{\xi}=\vec{\nabla}\times\vec{V}$) در ناحیه سطح مشترک دو سیال افزایش یافته و به $2.8\ \times 10^8\ 1/s$ می‌رسد. با افزایش مقدار گردابی، تنش برشی در سطح مشترک دو سیال افزایش یافته که این امر جدایش قطره روی سطح را تسهیل می‌کند. در زمان 0.2 μs یک جت ناهمسو ایجاد شده که به سمت بالا حرکت می‌کند. با گذشت زمان، هوای محبوس داخل قطره، متراکم شده و در لحظه 0.4 μs بیشترین مقدار تراکم را اخذ می‌کند. در این لحظه فشار هوا در داخل قطره به بیشترین مقدار خود (حدودا 1×10^7 Pa) می‌رسد. با افزایش فشار، چگالی هوا نیز زیاد شده و به 280 kg/m^3 می‌رسد. افزایش فشار در حفره هوا، بر مایع اطراف حفره نیرو وارد کرده و باعث چرخشی شدن مایع می‌گردد. همچنین گاز محبوس، منبسط شده و در نهایت این انبساط و چرخشی شدن جریان، موجب می‌شود قطره در زمان 0.8 μs گسیخته شود. با گسیخته شدن، ریز قطراتی از قطره اصلی جدا می‌شوند که این پدیده گسیختگی انفجاری قطره نام دارد. بدلیل وجود اثرات کشش سطحی و اتلاف لزجت، از سرعت سیالی که روی سطح در حال پهن شدن است کاسته می‌شود، به‌طوری که سرعت آن روی سطح در زمان 0.4 μs و 1.2 μs به ترتیب به 87 m/s و 45 m/s می‌رسد. قطره در زمان 2.6 μs به حداکثر پهن‌شدگی خود (3.6 D_0) روی سطح می‌رسد. با کاهش سرعت، اثرات کشش سطحی نمایان می‌شود. با توجه به ساختار گسسته قطره بر روی سطح، کشش سطحی باعث جمع‌شدگی و شکل کروی ریز قطرات بر روی سطح می‌شود. در این حالت، کشش سطحی باعث کاهش قطر قطره پهن شده روی سطح نمی‌شود.

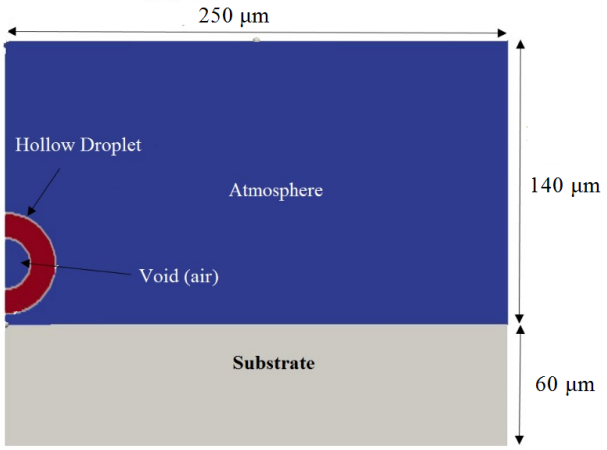
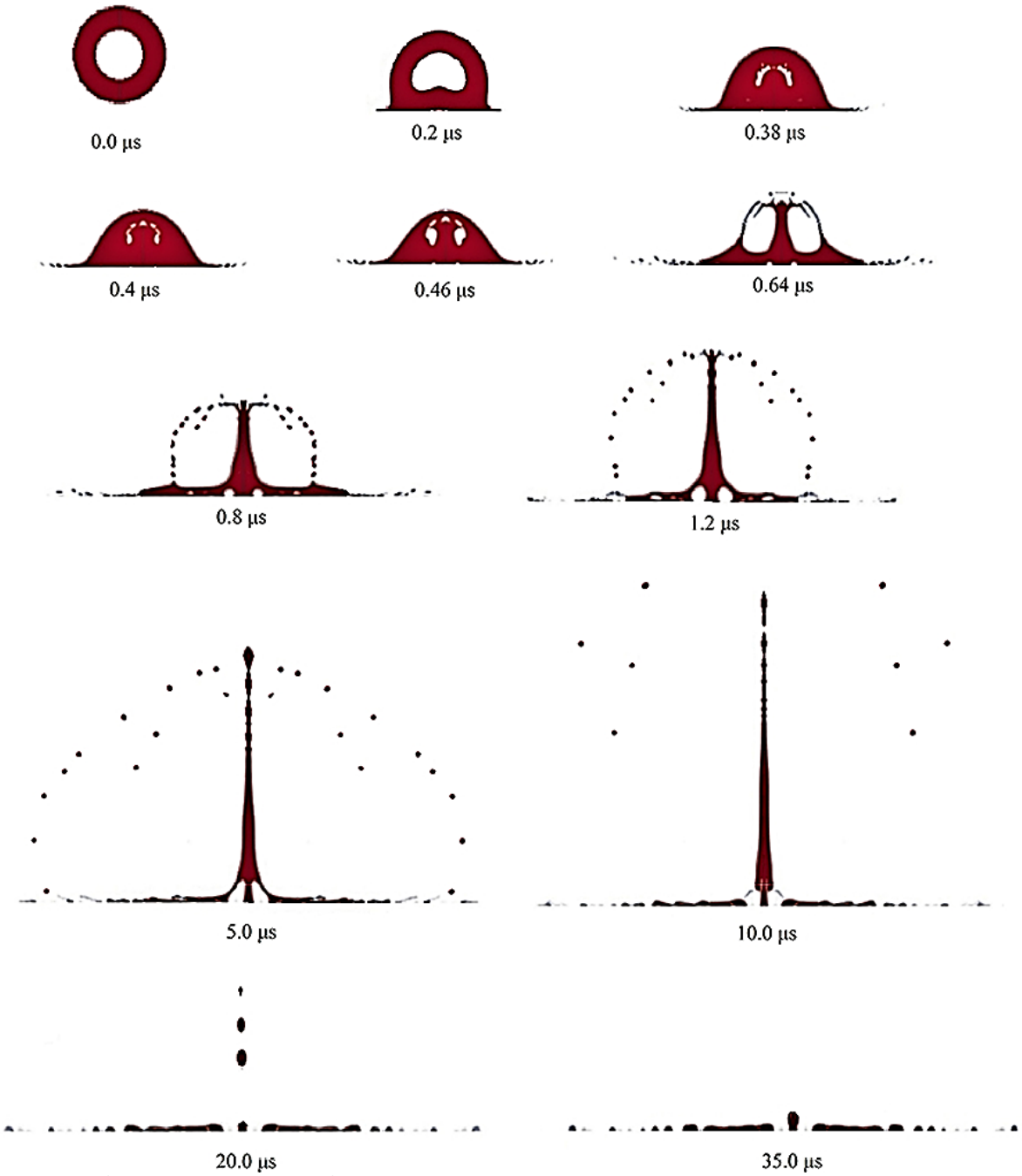


Fig. 10 Schematic view of the domain of solution

شکل 10 طرح‌واره‌ای از دامنه حل مساله

[1] Liquidus
[2] Solidus
[3] Vorticity



ز. 11 Snapshots of the droplet impact on the surface

شکل 11 مراحل برخورد قطره توخالی

4-2- انجماد قطره توخالی کاملا مذاب

مدل استفاده شده برای انجماد قطره در مرجع [25] صحه‌گذاری شده است. مقاومت حرارتی بین قطره و سطح زمینه با توجه به مرجع [30]، $1.8 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^2KW^{-1}}$ فرض شده است. "شکل 12" مراحل انجماد قطره را نشان می‌دهد.

به‌دلیل دمای پایین سطح زمینه، در مناطق نزدیک به سطح زمینه در مدت زمان 0.4 μs، دمای قطره از 3000 K به 2500 K می‌رسد. بنابراین، انجماد قطره از زمان تقریبی 0.4 μs با تشکیل لایه‌ای از قطره منجمد شده روی سطح شروع می‌شود. به‌دلیل ایجاد شوک در هنگام برخورد و به‌واسطه تبادل مومنتوم، ضخامت قطره در لبه‌های آن کاهش یافته که این امر سبب انجماد سریع قطره در لبه‌ها می‌شود. انجماد در لبه‌های قطره باعث گسیختگی آن روی سطح می‌شود. با گذشت زمان، بر ضخامت لایه‌ی منجمد شده افزوده می‌شود و درنهایت قطره در زمان تقریبی 35 μs کاملا منجمد می‌شود. پس از آن‌که قطره به بیشینه مقدار پهن‌شدگی خود رسید، بخاطر شکل گسسته قطره روی سطح، انجماد قطره روی سطح سریع‌تر اتفاق می‌افتد. از این‌رو، بیشینه قطر قطره تقریبا ثابت مانده و قطره به سمت داخل کشیده نمی‌شود. این مساله را در فاکتور پهن‌شدگی[1](نسب قطر قطره در حال پهن شدن بر روی سطح به قطر اولیه قطره) قطره در "شکل 16" می‌توان مشاهده کرد.

[1] Spreading factor

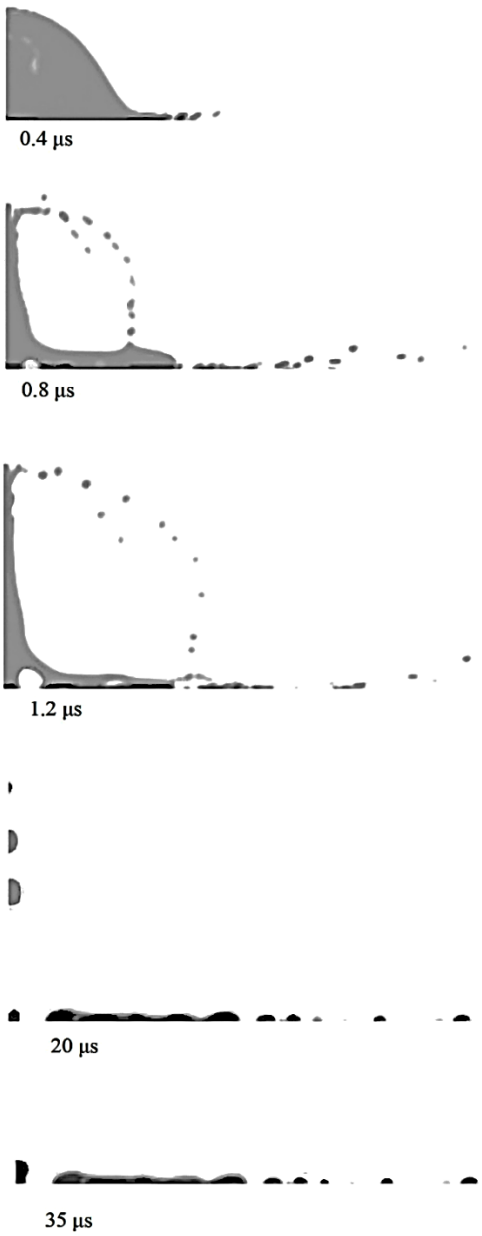


Fig. 12 Stages of completely molten hollow droplet solidification

شکل 12 مراحل انجماد قطره توخالی مذاب

4-3- برخورد قطره نیمه مذاب به سطح

در این بخش برخورد یک قطره توخالی نیمه مذاب (همراه با هسته جامد) به سطح شبیه‌سازی می‌شود. پس از تولید ذرات توخالی، این ذرات به عنوان پودر تغذیه، مجددا از پلاسما عبور کرده تا ذوب شوند و به سطح هدف برخورد کنند. در اینجا فرض می‌شود ابعاد ذرات تولید شده پس از عبور مجدد از پلاسما تغییر نمی‌کنند. بنابراین، با توجه به نتایج حاصل در بخش تحلیلی، قطر خارجی قطره $D_0 = 60\ \mu m$ ، قطر داخلی $d_0 = 44.4\ \mu m$ (ضخامت پوسته 7.8 mμ) و قطر هسته جامد $D_0 = 10\ \mu m$ در نظر گرفته شده است (ذره آگلوموره اولیه قطری برابر $D_0 = 50\ \mu m$ دارد). در "شکل 13" تغییر فرم قطره نشان داده شده است.

مانند حالت قبل، ابتدا قطره روی سطح پهن شده و در زمان 0.2 µs یک جت ناهمسو ایجاد شده که به سمت بالا حرکت می‌کند. در زمان 0.3 µs جت ناهمسو با هسته جامد برخورد کرده، از سرعت آن کاسته شده و حرکت رو به بالای جت متوقف می‌شود. پس از این برخورد، اندکی از سیال به سمت بیرون پاشیده می‌شود. همچنین، هسته جامد به مایع پایینی چسبیده و از روی سطح جهش نمی‌کند. با گذشت زمان، پوسته بالایی به سمت پایین حرکت کرده و سیال در حال پهن شدن روی سطح را تغذیه می‌کند. با حرکت رو به پایین پوسته، هوای داخل قطره متراکم شده و افزایش فشار حاصل از تراکم در زمان 0.8 µs، باعث گسیختگی پوسته از بالا می‌شود. از آنجا که در این حالت جت ناهمسو ایجاد نمی‌شود، اسپلت تشکیل شده نسبت به حالت قبل ضخیم‌تر است. از این‌رو شوک ایجاد شده در زمان برخورد، باعث گسیختگی قطره نمی‌شود. به همین دلیل، اسپلت تشکیل شده دارای گسیختگی کمتری نسبت به حالت قبل است. قطره در زمان 2 µs به بیشینه پهن‌شدگی ($2.2\ D_0$) خود می‌رسد. در این حالت از آن‌جا که قطره پهن شده شکل پیوسته‌ای دارد، کشش سطحی باعث جمع شدگی لبه‌های قطره به سمت داخل می‌شود. حرکت قطره به سمت داخل در زمان 10 µs به‌دلیل آن‌که قسمت زیادی از قطره در تماس با سطح منجمد شده است، متوقف می‌شود.

در اسپلت حاصل، مشاهده می‌شود که در اطراف هسته جامد، حفره‌های هوا وجود دارند. به عبارت دیگر، وجود هسته جامد منشا تخلخل در اسپلت و

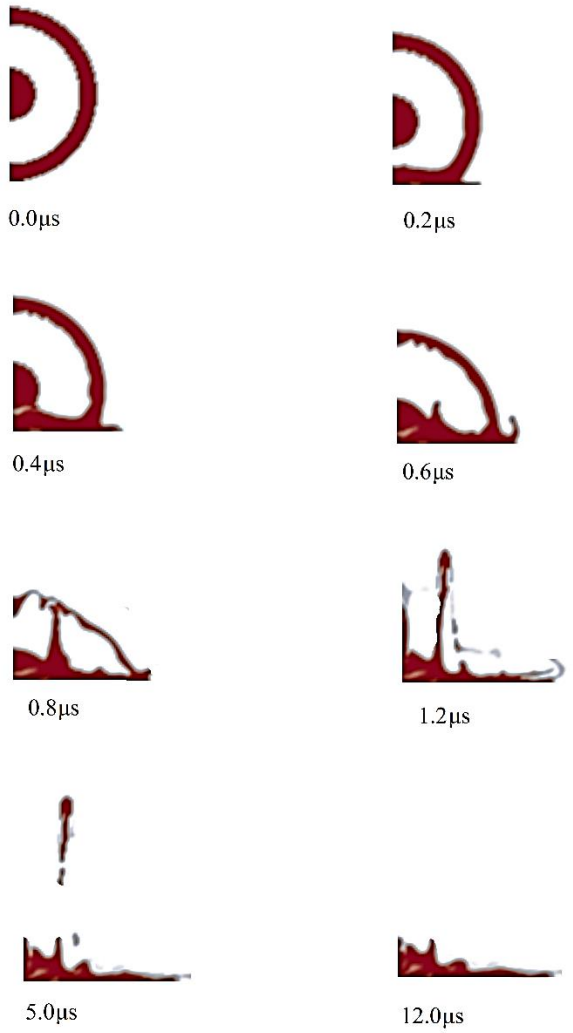


Fig. 13 particles Relative shell thickness variation against initial diameter

شکل 13 مراحل برخورد قطره توخالی نیمه مذاب به سطح

در نتیجه، در پوشش است. وجود حفره‌های هوا، از طرفی ضریب انتقال حرارت پوشش را کاهش می‌دهند و از طرفی دیگر، باعث کاهش پیوند مکانیکی اسپلت می‌شوند.

عدم وجود جت ناهمسو باعث می‌شود تا در حالت نیمه مذاب، ماده کمی (5 درصد) به خارج از ناحیه حل منتقل شود. این امر نهایتا به بالا رفتن بازده پوشش (نسبت جرم ماده قبل از پوشش به جرم ماده بعد از پوشش) منتهی می‌شود. در حالت کاملا مذاب، تقریبا 50 درصد جرم قطره از ناحیه حل خارج می‌شود.

در "شکل 14" تغییرات فشار برحسب زمان در نقطه برخورد اولیه قطره به سطح، برای هر دو حالت قطره کاملا مذاب و قطره نیمه مذاب نشان داده شده است.

پس از برخورد اولیه به سطح، مشاهده می‌شود به‌دلیل تغییر در انرژی جنبشی و همچنین تغییرات شتاب، فشار در نقطه برخورد زیاد می‌شود. در حالت کاملا مذاب، این افزایش فشار تا زمان 0.4 µs ادامه پیدا می‌کند و پس از آن افزایش فشار متوقف می‌شود. بیشینه فشار که در زمان 0.4 µs اتفاق می‌افتد، به‌دلیل برخورد پوسته بالایی قطره به جت ناهمسو است. در حالتی که قطره نیمه مذاب است، تا قبل از زمان 0.3 µs روندی مشابه حالت قبل اتفاق می‌افتد. در زمان 0.3 µs به‌دلیل برخورد هسته جامد مرکزی با جت ناهمسو، فشار به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد و پس از آن افزایش فشار، متوقف می‌شود. فشار زیاد در هنگامی که قطره دارای هسته جامد است، می‌تواند به چسبندگی قطره به سطح کمک کند و باعث پیوند مکانیکی قوی‌تر بین قطره و سطح شود.

4-4- انجماد قطره توخالی ZrO_2 نیمه مذاب

در "شکل 15" مراحل انجماد قطره نیمه مذاب آورده شده است.

در ابتدا، پس از برخورد جت ناهمسو با هسته جامد و در اثر تبادل حرارت، قسمتی از جت منجمد می‌شود. انجماد قطره در ناحیه برخورد آن به سطح، در زمان تقریبی 0.4 µs شروع می‌شود. همانند حالت قبل، با گذشت زمان و تبادل حرارت، بر ضخامت لایه منجمد شده افزوده می‌گردد. در زمان 10 µs تقریبا تمام نواحی در تماس با هسته، منجمد می‌شود، در حالی که در بقیه نواحی، قسمت‌هایی از قطره به صورت مذاب باقی مانده است. در نهایت قطره در زمان 12 µs کاملا منجمد می‌شود. این زمان بسیار کمتر از حالتی است که قطره کاملا توخالی است. زیرا در این حالت جت ناهمسو تشکیل نمی‌شود و بنابراین قطره در تماس با سطح، سریع‌تر منجمد می‌شود. وجود هسته و برآمدگی در شکل نهایی اسپلت، می‌تواند باعث ایجاد تخلخل در پوشش شود.

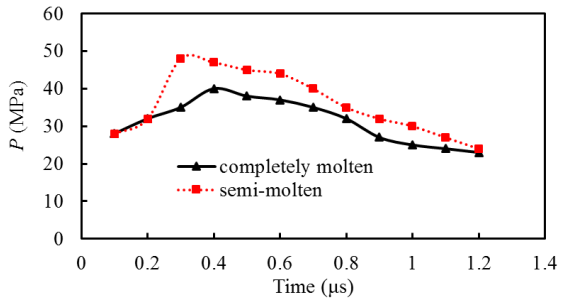


Fig. 14 Pressure variation in the impact location

شکل 14 تغییرات فشار در نقطه برخورد

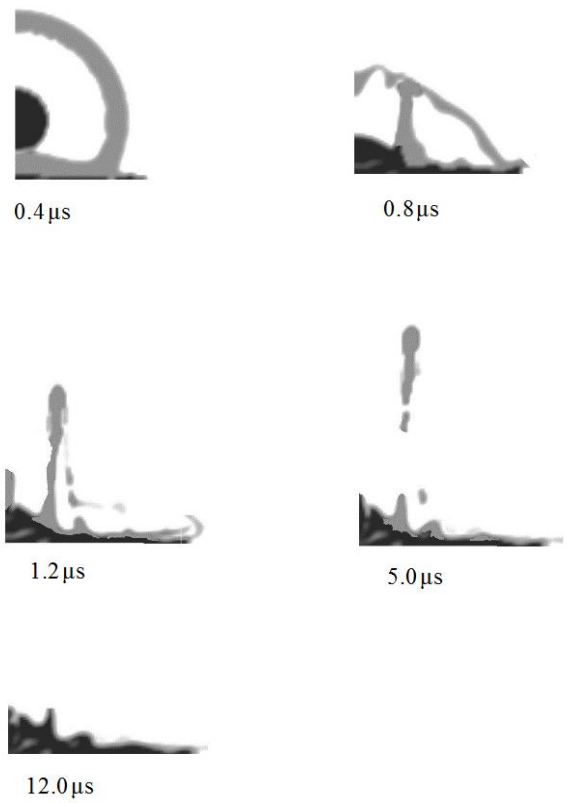


Fig. 15 Stages of semi-molten hollow droplet solidification

شکل 15 مراحل انجماد قطره توخالی نیمه مذاب (قسمتهای مشکی)

در "شکل 16" مقدار فاکتور پهن‌شدگی در هر دو حالت قطره توخالی کاملا مذاب و قطره توخالی نیمه مذاب، نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود در حالت کاملا مذاب، فاکتور پهن‌شدگی بیشتر از حالت نیمه مذاب است. زیرا در حالت کاملا مذاب، به‌دلیل ضخامت کمتر در لبه قطره، شوک ایجاد شده در لحظه برخورد، باعث شتاب بیشتری به قطره روی سطح می‌شود. نهایتا این امر باعث بزرگتر شدن فاکتور پهن‌شدگی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود در حالت کاملا مذاب، بیشینه مقدار پهن‌شدگی قطره؛ تقریبا ثابت می‌ماند. زیرا در این حالت، شکل قطره گسسته است و کشش سطحی تاثیر کمی بر جمع‌شدگی قطره دارد. اما در حالت نیمه مذاب، از آن‌جا که شکل اسپلت حاصل پیوسته است، کشش سطحی باعث جمع شدن لبه قطره به سمت داخل شده و در نتیجه فاکتور پهن‌شدگی کاهش می‌یابد.

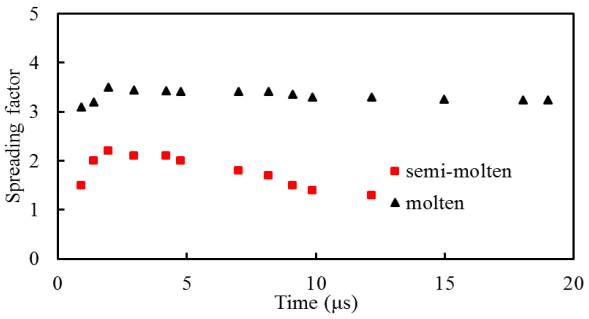


Fig. 16 Transient variation of hollow droplet spreading factor

شکل 16 تغییرات فاکتور پهن‌شدگی با زمان

5- نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر در ابتدا تولید ذره توخالی از ذره آگلوموره با کمک یک مدل نیمه تحلیلی بررسی شد. با کمک این مدل، قطر ذره، قطره هسته جامد و ضخامت پوسته ذره توخالی قابل پیش‌بینی است. همچنین با استفاده از این مدل، مشخص شد در مقادیر تخلخل اولیه کم (p=0.2)، ذره توخالی بوجود نمی‌آید، در حالی که برای مقادیر بزرگ تخلخل اولیه (p=0.7)، ذره دچار فروپاشی می‌شود. در مرحله بعد، از اطلاعات بخش تحلیلی استفاده شد و برخورد یک قطره توخالی به سطح، در حالت مذاب و نیمه مذاب، به صورت عددی شبیه‌سازی شد. با توجه به سرعت بالای برخورد، از مدل تراکم‌پذیر کسر حجمی سیال برای شبیه‌سازی عددی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد، برخورد یک قطره توخالی نیمه مذاب، بطور مشخص با برخورد یک قطره کاملا توخالی متفاوت است. در صورت وجود هسته جامد، جت ناهمسو ایجاد نمی‌شود. این امر باعث می‌شود زمان انجماد قطره کم شده و ضخامت اسپلت حاصل افزایش یابد. همچنین در این حالت، اسپلت حاصل، به‌دلیل ضخامت بیشتر دارای گسیختگی کمتری است. در اثر برخورد هسته جامد به جت مایع، اگرچه دمای جت زیاد است ولی هسته فقط به میزان اندکی ذوب می‌شود. وجود هسته جامد می‌تواند منشاء تخلخل در پوشش شود.

6- فهرست علایم

C_p	ظرفیت گرمای مخصوص ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
d_0	قطر داخلی قطره (μm)
D_0	قطر خارجی قطره (μm)
H	آنتالپی کل (Jkg^{-1})
k	ضریب انتقال حرارت هدایتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
L	گرمای نهان ذوب (Jkg^{-1})
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
T	دما (K)
$\vec{V}$	میدان سرعت (ms^{-1})
U_0	سرعت اولیه برخورد (ms^{-1})

علایم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
θ	کسر مایع درون قطره
α	کسر حجمی سیال
σ	کشش سطحی (Nm^{-1})

زیرنویس‌ها

d	قطره
g	گاز
l	مایع
mix	مخلوط
s	جامد

7- تقدیر و تشکر

نویسندگان از جناب آقای دکتر حمیدرضا سلیمی جزی و مرکز CACT دانشگاه تورنتو به‌خاطر در اختیار قرار دادن برخی از شکل‌ها در تحقیق حاضر تشکر می‌نمایند.

8- مراجع

[1] T. C. M. Wu, M. Bussmann, J. Mostaghimi, The impact of a partially molten YSZ particle, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 18, No. 5-6, pp. 957-964, 2009.
[2] M. Friis, C. Persson, J. Wigren, Influence of particle in-flight characteristics on the microstructure of atmospheric plasma sprayed yttria stabilized ZrO 2, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 141, No. 2, pp. 115-127, 2001.
[3] O. P. Solonenko, I. P. Gulyaev, A. V. Smirnov, Plasma processing and deposition of powdered metal oxides consisting of hollow spherical particles, *Technical Physics Letters*, Vol. 34, No. 12, pp. 1050-1052, 2008.
[4] F. N. Longo, N. F. Bader III, M. R. Dorfman, Hollow sphere ceramic particles for abradable coatings, *Google Patents*, 1984 .
[5] P. H. Gao, Y. G. Li, C. J. Li, G. J. Yang, C. X. Li, Influence of powder porous structure on the deposition behavior of cold-sprayed WC-12Co coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 17, No. 5-6, pp. 742-749, 2008.
[6] O. P. Solonenko, A. V. Smirnov, Spreading and solidification of hollow molten droplet under its impact onto substrate: computer simulation and experiment, *5th International Workshop on Complex System*, Sendai, Japan, September 25-28, 2007.
[7] K. Shinoda, H. Murakami, Splat morphology of yttria-stabilized zirconia droplet deposited via hybrid plasma spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 19, No. 3, pp. 602-610, 2010.
[8] H. l. Fan, F. Ran, X. X. Zhang, H. M. Song, X. Q. Niu, L. B. Kong, L. Kang, Hollow carbon microspheres/mno2 nanosheets composites: Hydrothermal synthesis and electrochemical behaviors, *Nano-Micro Letters*, Vol. 7, No. 1, pp. 59-67, 2015.
[9] P. H. Gao, G. J. Yang, S. T. Cao, J. P. Li, Z. Yang, Y. C. Guo, Heredity and variation of hollow structure from powders to coatings through atmospheric plasma spraying, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 305, No 1, pp. 76-82, 2016.
[10] I. Gulyaev, Experience in plasma production of hollow ceramic microspheres with required wall thickness, *Ceramics International*, Vol. 41, No. 1, pp. 101-107, 2015.
[11] O. P. Solonenko, I. P. Gulyaev, A. V. Smirnov, Thermal plasma processes for production of hollow spherical powders: Theory and experiment, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 219-234, 2011.
[12] M. Pasandideh-Fard, S. Chandra, J. Mostaghimi, A three-dimensional model of droplet impact and solidification, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 11, pp. 2229-2242, 2002.
[13] C. Le Bot, S. Vincent, E. Arquis, Impact and solidification of indium droplets on a cold substrate, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 44, No. 3, pp. 219-233, 2005.
[14] A. Kumar, S. Gu, H. Tabbara, S. Kamnis, Study of impingement of hollow ZrO2 droplets onto a substrate, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 220, No. 1, pp. 164-169, 2013.
[15] A. Kumar, S. Gu, S. Kamnis, Simulation of impact of a hollow droplet on a flat surface, *Applied Physics A*, Vol. 109, No. 1, pp. 101-109, 2012.
[16] M. Zirari, A. A. El-Hadj, N. Bacha, Numerical analysis of partially molten splat during thermal spray process using the finite element method, *Applied Surface Science*, Vol. 256, No. 11, pp. 3581-3585, 2010.
[17] H. Tabbara, S. Gu, Numerical study of semi-molten droplet impingement, *Applied Physics A*, Vol. 104, No. 4, pp. 1011-1019, 2011.
[18] S. Alavi, M. Passandideh-Fard, J. Mostaghimi, Simulation of semi-molten particle impacts including heat transfer and phase change, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 21, No. 6, pp. 1278-1293, 2012.
[19] Z. Zhu, S. Kamnis, S. Gu, Numerical study of molten and semi-molten ceramic impingement by using coupled Eulerian and Lagrangian method, *Acta Materialia*, Vol. 90, No 1. pp. 77-87, 2015.
[20] O. Solonenko, Similarity criteria of HOSP formation at plasma processing of agglomerated particles, *High-Tech Plasma Processes Conference*, Toulouse, France, June 23-27, 2014.
[21] E. Safaei Ardakani, *Numerical and Experimental Study of the Arc Fluctuations in a DC Plasma Torch*, Thesis, Mechanical and Industrial Engineering Department, University of Toronto, 2016.
[22] A. Kumar, S. Gu, Porous surfaces via impinging and solidifying molten hollow melt droplets on substrates, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 65, No. 6, pp. 771-775, 2012.
[23] H. Liu, H. S. Jazi, M. Bussmann, J. Mostaghimi, Experiments and modeling of rapid solidification of plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia, *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 20, pp. 6013-6021, 2009.
[24] C. Zhang, C. J. Li, H. Liao, M. P. Planche, C. X. Li, C. Coddet, Effect of in-flight particle velocity on the performance of plasma-sprayed YSZ electrolyte coating for solid oxide fuel cells, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 12, pp. 2654-2660, 2008.
[25] H. Safaei, M. Davazdah Emami, Effect of initial impact velocity on dynamics, solidification rate and shape of formed splats of hollow droplets in thermal plasma condition, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 295-305, 2017. (in persian فارسی)
[26] S. Miller, H. Jasak, D. Boger, E. Paterson, A. Nedungadi, A pressure-based, compressible, two-phase flow finite volume method for underwater explosions, *Computers & Fluids*, Vol. 87, No. 1, pp. 132-143, 2013.
[27] J. U. Brackbill, A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992.

[28] V. R. Voller, C. Prakash, A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 8, pp. 1709-1719, 1987.
[29] F. Rösler, D. Brüggemann, Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage: Numerical analysis and comparison with experiments, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 8, pp. 1027-1033, 2011.
[30] S. Shakeri, S. Chandra, Splashing of molten tin droplets on a rough steel surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 23, pp. 4561-4575, 2002.