

تأثیر تشعشع بر فاصله خاموشی در ابر ذرات

مهدی بید آبادی^۱، میر عماد حسینی^۲، عبدالله شعبانی شهر بابکی^۳

آزمایشگاه تحقیقاتی احتراق، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران

تهران، خیابان هنگام، خیابان دانشگاه، دانشگاه علم و صنعت ایران

mi_hosseini86@yahoo.com

چکیده

به منظور شناسایی هر چه بهتر فرآیند احتراق ذرات ریز جامد، انجام آزمایشات تجربی و ارائه مدل های تحلیلی ضروری می باشد. علت اصلی خاموشی، تلفات گرما به دیواره های محفظه احتراق می باشد. با استفاده از فاصله خاموشی، می توان دیگر پارامترهای شعله را به دست آورد. هنگامی که تلفات حرارتی بیش از تولید حرارت بر واحد حجم شود، خاموشی رخ می دهد. در این مقاله معادله بقای انرژی بین صفحات خاموشی نوشته شده و پس از حل این معادلات، فاصله خاموشی بدست آمده و نتایج با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده اند.

واژه های کلیدی: مدل ریاضی - فاصله خاموشی - غلظت - ابر ذرات - احتراق

1- مقدمه

احتراق ذرات ریز جامد، خصوصا ذرات ریز فلزی کاربرد وسیعی در زمینه های مختلف تکنولوژی مدرن دارند. احتراق ذرات ریز جامد به دلیل اهمیت فراوان آن در شاخه های علوم و مهندسی همانند هوافضا، سوخت و انرژی، سیستم های پیشرانس و همچنین ایمنی انفجار در معادن و سیلوها که جنبه های مختلف استفاده از علم احتراق ابر ذرات هستند، مستلزم بسط و توسعه چه از لحاظ تجربی و چه از لحاظ تحلیلی می باشد [1].

دلایل زیادی از جمله ایجاد شرایط آزمایشگاهی و تاثیرات پارامترهایی نظیر شتاب جاذبه، اثر شناوری [2] و عدم تولید ذراتی با قطر یکسان باعث عقب ماندگی در این زمینه شده است [3]. همان طور که می دانیم سوزش و احتراق به واسطه واکنش همگن آلومینیوم در فاز گازی با اکسیدایزر ایجاد می شود [4].

یکی از پارامترهای مهم شعله، فاصله خاموشی است که علاوه بر محاسبه پارامترهای دیگر شعله توسط آن، در طراحی موتورهای احتراقی میکرونی نقش ویژه ای دارد.

فاصله خاموشی، عمدتا به وسیله افت گرما به صفحات رخ میدهد و موقعی که اندازه یک محفظه احتراق به مقیاسی پایین تر از ضخامت شعله کاهش پیدا کند، طول محفظه احتراق نقش مهمی در انتشار شعله پیدا میکند.

همان طور که میدانیم، زمانی که افت گرما در دیوارها از گرمای تولید شده در منطقه واکنش بیشتر شود، خاموشی اتفاق می افتد [8] و موقعی که اندازه محفظه احتراق مرتبا افزایش می یابد، نسبت سطح به حجم کاهش یافته و اثرات بر هم کنش میان سطح و شعله ناچیز می شود [9].

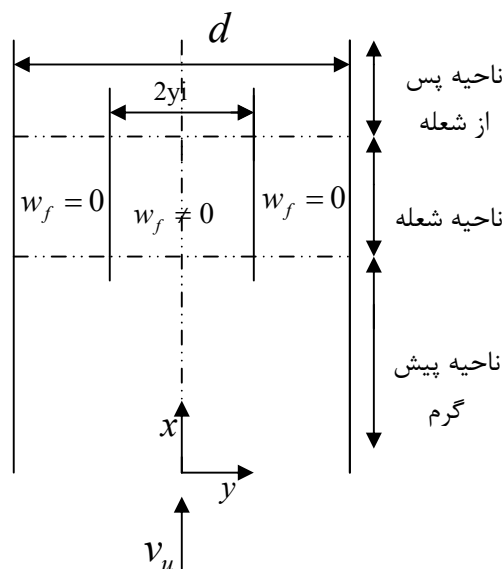
1- دکتری مکانیک

2- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک

3- کارشناس ارشد مکانیک

2- مدل ریاضی

در این فرمول بندی احتراق ذرات ریز فلزی مورد توجه قرار گرفته است. احتراق در فاز گازی، جایی که آلومینیوم بخار شده با اکسیدایزر واکنش می دهد اتفاق می افتد. آنالیز به صورت یک بعدی و جریان در حالت پایدار بررسی می شود. هم چنین عدد لوئیس برابر واحد فرض شده است. در این تحلیل فرض بر این است که مقدار های غلظت و قطر ذرات مشخص باشند و همه نیروهای خارجی، از جمله نیروی جاذبه و اثرات آن ناچیز فرض شده اند. در این مدل ریاضی، معادله انتقال حرارت در ناحیه شعله و در عرض صفحه خاموشی حل می شود. هنگام عبور شعله از میان صفحات خاموشی دیده می شود که شعله تمامی حجم بین صفحات را در برنمیگیرد (شکل 1) و فقط در یک عرض خاصی بین صفحات خاموشی شعله داریم. پس در بین صفحات خاموشی و در قسمت میانی ترم تولید داریم و در کناره های دیواره ترم تولید برابر صفر است.



شکل 1- تصویر شماتیک از صفحات خاموشی

به صورت تئوری می دانیم شعله در ناحیه هایی وجود دارد که دما بزرگتر از دمای اشتعال ذره باشد. بنابراین مرز مشترک بین این دو ناحیه جایی است که دمای شعله برابر دمای اشتعال ذره با قطر خاص است و بعد از آن هر چه به سمت دیواره حرکت می کنیم دمای ذرات پائین تر می آیند و بنابراین در این نواحی شعله ای وجود ندارد. تغییرات دمای سطح صفحات بین k تا k می باشد و فاصله خاموشی با افزایش دمای سطح صفحات کاهش می یابد. خاموشی، عمدتاً به وسیله افت گرما در صفحات ایجاد می شود و از خواص سطح صفحات مستقل است. در این مدل تحلیلی با استفاده از معادله انرژی در ناحیه شعله، فاصله خاموشی برای ابر ذرات آلومینیوم محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه می شود.

2-1- محاسبه فاصله خاموشی

برای محاسبه فاصله خاموشی، معادله تولید انرژی در ناحیه شعله را می نویسیم، که معادله تولید انرژی با وارد شدن از ناحیه پس از شعله به ناحیه شعله را می توان چنین نوشت:

(هدایت، تشعشع) تلفات به دیواره + افزایش انرژی = تولید انرژی

(1)

$$\frac{\partial}{\partial \tau_c} QV = \dot{m}_{a1} C_{p(T_{sc})} [T_{si} - T_u] + \dot{m}_{a2} C_{p(T_u)} \left[\frac{T_i + T_u}{2} - T_u \right] + \lambda_u A \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=d} + IA$$

که ترم سمت چپ، تولید انرژی در واحد حجم است، ترم اول سمت راست افزایش انرژی در ناحیه ای است که شعله وجود دارد، ترم دوم، افزایش انرژی در کناره صفحه خاموشی (جایی که شعله وجود ندارد) است و ترم سوم، ترم تلفات به دیواره در ناحیه خاموشی کناره دیواره و ترم بعد افزایش انرژی به علت انتقال حرارت تشعشی است. برخی از پارامترهای بالا به صورت زیر تعریف می شوند.

$$V = y_i \times \delta_f \times l \quad A = \delta_f \times l \quad \delta_f = v_u \tau_c \quad (2)$$

$$\dot{m}_{a1} = \rho_u v_u y_i \quad \dot{m}_{a2} = \rho_u v_u \left(\frac{d}{2} - y_i \right)$$

T: دمای گاز، (k)
 v_u : سرعت سوزش، (m/s)
 C_g : ظرفیت گرمایی ویژه گاز، (kj/kgk)
 d : فاصله صفحات خاموشی، (m)
 λ : ضریب هدایت گرمایی، (W/mk)
 ρ : چگالی گاز، (kg/m^3)
 τ_c : زمان احتراق تک ذره، (s)
 d_p : قطر ذرات، (m)
 \dot{m} : نرخ جریان جرمی، (kg/s)
 δ_f : ضخامت شعله

حال به بررسی نحوه محاسبه شدت تشعشع می پردازیم.
معادله کلی شدت تشعشع بصورت زیر می باشد:

$$\frac{dI}{dx} = +K_a I + K_s I - K_a I_b - \frac{K_s}{4\pi} \int I(\Omega) P(\theta, \Phi) d\Omega \quad (3)$$

در رابطه بالا ترمهای سمت راست معادله بترتیب شدت تشعشع ناشی از جذب، پراش، تابش و پراش ورودی ناشی از ذرات دیگر (incoming scattering) و مقادیر K_s ، K_a و I بترتیب برابر با ضریب پراش نور، ضریب جذب و شدت تشعشع می باشند. $p(\theta, \Phi)$ تابع فازی پراش می باشد [7].

از طرف دیگر ضرایب جذب و پراش نور برای ذرات جامد به شکل زیر محاسبه می شوند [5]:

$$K_a = \frac{3}{2} Q_a \frac{\sigma}{\rho_p d_p} \quad (4)$$

و با فرض اینکه پراش نور تنها توسط ذرات صورت می گیرند.

(5)

$$K_s = \frac{3}{2} Q_s \frac{\sigma}{\rho_p d_p}$$

در ناحیه شعله، معادله شدت تشعشع به صورت زیر در می آید.

$$\frac{dI}{dx} = +K_a I + K_s I - K_a I_b \quad (6)$$

که:

$$k_t = k_s + k_a \quad (7)$$

$$I_b = \frac{\sigma}{\pi} (T_f^4 - T_u^4)$$

σ : ثابت استفان بولتزمن

در نتیجه معادله شدت تشعشع به فرم زیر در می آید.

$$\frac{dI}{dx} = k_t I - k_a I_b \quad (8)$$

با حل معادله (8) و با استفاده از شرایط مرزی فوق:

$$y = 0 \longrightarrow I_0 = \frac{\sigma}{\pi} T_f^4 \quad (9)$$

$$I = (I_0 - I_b \frac{k_a}{k_t}) \exp(k_t y_i) + \frac{k_a}{k_t} I_b \quad (10)$$

شدت تشعشع در ناحیه شعله به دست می آید.

پس معادله (1) را به صورت زیر می توان نوشت.

() ()

$$y_i v_u \partial Q = \rho_u v_u y_i C_{p(T_{sc})} (T_i - T_u) + \rho_u v_u \left(\frac{d}{2} - y_i \right) \frac{1}{2} C_{p(T_u)} (T_i - T_u) + \lambda_u v_u \tau_c \frac{T_i - T_u}{\frac{d}{2} - y_i}$$

$$\left((I_0 - I_b \frac{k_a}{k_t}) \exp(k_t y_i) + \frac{k_a}{k_t} I_b \right) v_u \tau_c$$

∂ : کسر جرمی سوخت

2-2- پارامترهای بی بعد

با استفاده از پارامترهای بدون بعد زیر، معادله تولید انرژی را به شکل بدون بعد می نویسیم.

$$\theta = \frac{T}{T_u} \quad \zeta = \frac{y}{d/2} \quad \phi = \frac{\partial}{\partial_{st}} \quad (12)$$

$$B_1 = \frac{Q \phi \partial_{st}}{\rho_u C_{p(T_u)} T_u}$$

$$B_2 = \frac{\lambda_u \tau_c}{\rho_u C_{p(T_u)} y_i (d - 2y_i)}$$

$$B_3 = \frac{\sigma T_u^3 \tau_c}{\pi \rho_u C_{p(T_u)} y_i}$$

$$B_4 = \frac{T_u^3 \sigma \tau_c k_a}{\rho_u C_{p(T_u)} \pi k_t y_i}$$

با حل معادله (11) داریم:

$$\frac{Q\phi\partial_{st}}{\rho_u C_{p(T_u)}(\theta_i - 1)} = \frac{C_{p(T_{sc})}}{C_{p(T_u)}} + \frac{d}{4y_i} - \frac{1}{2} + \frac{\lambda_u \tau_c}{\rho_u C_{p(T_u)}} \frac{2}{y_i(d - 2y_i)} + \quad (13)$$

$$\frac{\sigma T_u^3 (\theta_i^4 - \frac{k_a}{k_t} (\theta_i^4 - 1)) \tau_c}{y_i \pi \rho_u c_{p(T_u)} (\theta_i - 1)} \exp(k_t y_i) + \frac{T_u^3 (\theta_i^4 - 1) \sigma \tau_c k_a}{y_i \rho_u c_{p(T_u)} \pi (\theta_i - 1) k_t}$$

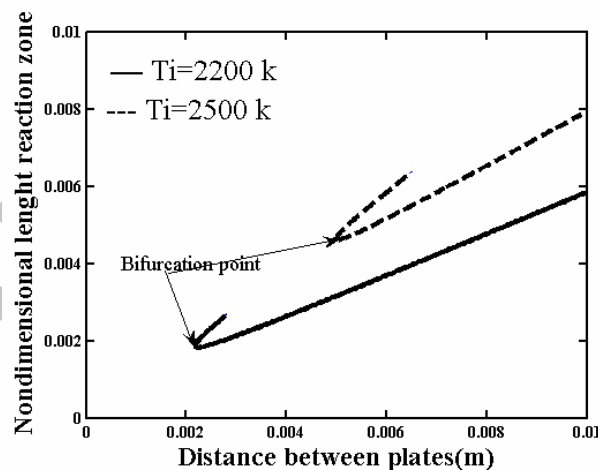
و در حالت بی بعد، فاصله خاموشی از معادله زیر بدست می آید:

$$\frac{B_1}{(\theta_i - 1)} = \frac{C_{p(T_{sc})}}{C_{p(T_u)}} + \frac{d}{4y_i} - \frac{1}{2} + 2B_2 + \quad (14)$$

$$\frac{B_3 (\theta_i^4 - \frac{k_a}{k_t} (\theta_i^4 - 1))}{(\theta_i - 1)} \exp(k_t y_i) + \frac{B_4 (\theta_i^4 - 1)}{(\theta_i - 1)}$$

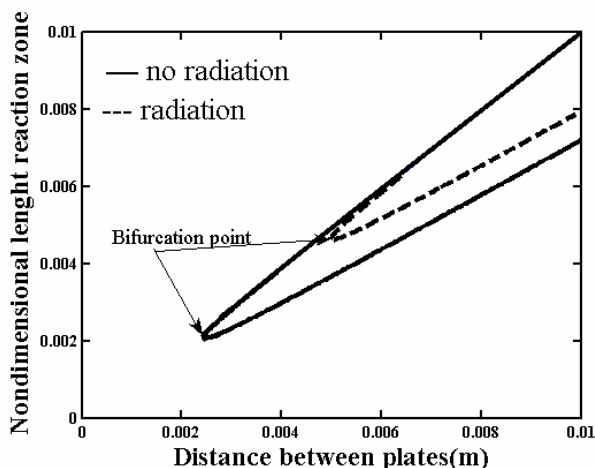
3- نتیجه گیری

با توجه به این مدل تحلیلی، فاصله خاموشی برای ذرات با قطرهای مختلف بدست می آید. در نمودار (1) دیده می شود که با نزدیک شدن صفحات خاموشی به یکدیگر، طول ناحیه احتراق کم می شود و بالاخره در یک فاصله مینیمم بین صفحات، دیگر شعله ای وجود نداشته و خاموشی اتفاق می افتد. در واقع خاموشی در جایی که منحنی تغییر جهت می دهد (نقطه عطف منحنی) اتفاق می افتد.



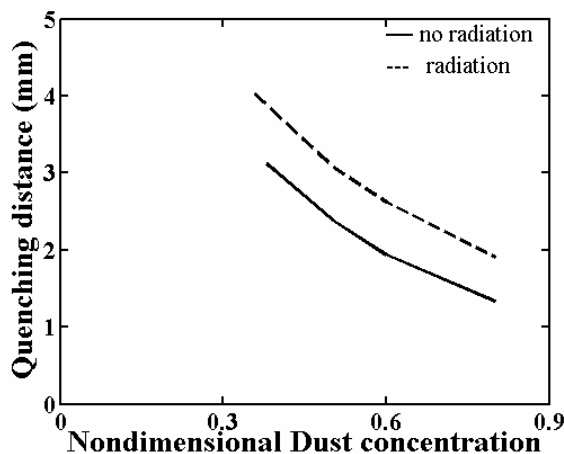
نمودار 1- تغییرات طول ناحیه احتراق نسبت به فاصله صفحات خاموشی

در نمودار (2) تغییرات طول ناحیه احتراق نسبت به فاصله صفحات خاموشی از یکدیگر، در حالت با تشعشع و بدون تشعشع رسم شده و دیده می شود که تشعشع باعث افزایش فاصله خاموشی می شود.



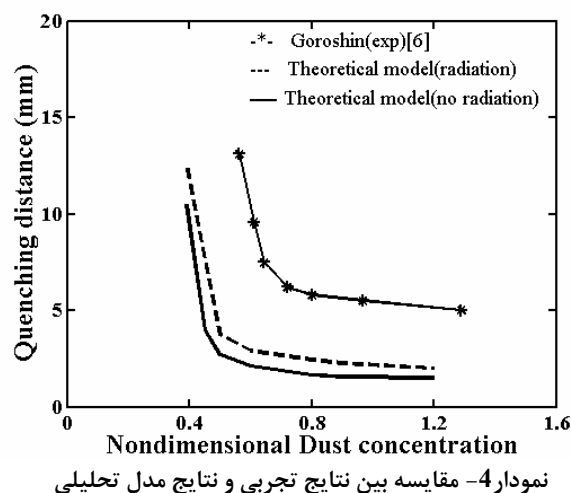
نمودار 2- تاثیر تشعشع در تغییرات طول ناحیه احتراق نسبت به فاصله صفحات خاموشی

در نمودار (3) تغییرات فاصله خاموشی برای ذرات با قطرهای یکسان ($5.4 \mu m$) در حالت با تشعشع و بدون تشعشع بر حسب غلظت رسم شده است. با کاهش غلظت، فاصله خاموشی افزایش یافته، که این تغییرات با مدل های تحلیلی قبلی و نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد.



نمودار 3- تغییرات فاصله خاموشی بر حسب تغییرات غلظت برای ذرات با قطر یکسان

نتایج تجربی و نتایج بدست آمده از این مدل تحلیلی در نمودار (4) رسم شده است، که حاکی از قابل قبول بودن نتایج بدست آمده از این مدل می باشد. همان طور که در شکل مشخص است، با کاهش غلظت، فاصله خاموشی به شدت افزایش یافته و منحنی دچار نوسان می شود، که به این غلظت مینیمم، حد رقیق انتشار می گویند. در نظر گرفتن ترم تشعشع باعث نزدیک شدن نتایج، به نتایج تجربی می شود.



مراجع:

- 1- Dreizin, E. L., combustion explosion, and shock waves 39(681-693), 2003
- 2- Linnet, J., and Simpson, C.J.S.M., "Combustion of Metal Dust Clouds", Sixth symposium (international) on combustion Chapman and hall, pp. 20-27, (1956)
- 3- Eapen B.Z., Hoffmann V.K., Schoenitz M., Dreizin, E. L. Combust. Sci. Technol. 176:1055-1069 (2004).
- 4- Merzhavov, A.G., Grigorjev, Yu.M, and Galchenko, Yu.A. "Aluminum Ignition", Combustion and Flame, Vol. 29, pp. 1-14, (1997)
- 5- Bohren, C.F. , Huffman, D.R. "Absorption and Scattering of Light by Small Particles" ,Wiley Science Series, (1998)
- 6- Goroshin, S., Bidabadi, M., and Lee, J. H. S., Quenching Distance of Laminar Flame in Aluminum Dust Clouds, Combust Flame, 105(1996), pp. 147-160
- 7- Robert Siegel, and John R. Howell, "Thermal Radiation Heat Transfer", Washington, New York, London, (1982)
- 8- K.K. Kuo, Principles of Combustion, Wiley, New York, 1986, p. 326.
- 9- Kyu Tae Kim, Dae Hoon Lee, Sejin Kwon., Effects of Thermal and Chemical Surface-Flame Interaction on Flame Quenching, Combustion and flame, 146 (2006) 19-28