کد مقاله: CCI2121

دومین کنفرانس احتراق ایران
بهمن ماه 1386 - مشهد- دانشگاه آزاد اسلامی مشهد (نازنین پررنگ10)

انجمن احتراق ایران

طراحی و ساخت مشعل متخلخل تخت

سید عبدالمهدی هاشمی [1]، حسین عطوف [2]، مرتضی طاهرزاده فرد [3]

دانشگاه کاشان، کد پستی 87317-51167
hashemi@kashanu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، مراحل مختلف طراحی و ساخت یک مشعل متخلخل تابشی تخت جهت انجام آزمایشاتی بر روی محیط های متخلخل شرح داده شده است و کوشش شده تا ضمن بیان اصول اولیه حاکم بر احتراق درون محیط های متخلخل، این اصول به صورت تجربی نیز مورد آزمایش قرار گیرند. هدف از تعریف پروژه، طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی از مشعل متخلخل تخت به مظور بهره‌گیری هرچه بیشتر از میزان تشعشع خروجی بوده است و طراحی با تکیه بر ایده ها و دانش مجریان پروژه، صورت پذیرفته است.

واژه‌های کلیدی: احتراق-محیط متخلخل- مشعل

1- مقدمه

احتراق یکی از قدیمی‌ترین تکنولوژی های بشری بوده و بیش از یک میلیون سال در خدمت اهداف بشر قرار گرفته است. در حال حاضر در حدود 90 درصد از انرژی جهان توسط سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود و نیاز بشر به انرژی روز به روز در حال افزایش است. کاهش منابع فسیلی و افزایش تقاضا و از طرفی ملاحظات زیست محیطی ما را بر آن می‌دارد تا در جهت بهینه سازی سیستم‌های احتراق فعلی و کاهش آلاینده‌ها در آنها حرکت کنیم. علاوه بر این، سیستم احتراقی به کار رفته باید از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه و دارای بازده بالا باشد. احتراق در محیط متخلخل یکی از تکنولوژی‌هایی است که در این راستا و در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

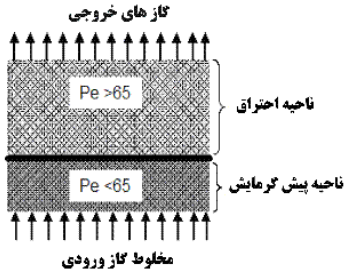
تفاوت عمده بین احتراق در یک محیط متخلخل و یک سیستم احتراقی معمولی در انتقال حرارت بهتر و مؤثرتر بین گازهای سوخته شده و مخلوط نسوخته است. در سیستم احتراق معمولی هدایت در فاز گازی عامل اصلی انتقال حرارت بین مخلوط سوخته شده و مخلوط نسوخته است[1]. در حالیکه در احتراق داخل یک محیط متخلخل انتقال حرارت از طریق فاز جامد و انتقال حرارت تشعشعی نیز اهمیت بسزایی دارد. همچنین انتقال حرارت به طریق جابجایی بین فاز گاز و جامد به جهت افزایش سطح ناشی از ماده متخلخل افزایش می‌یابد. از جمله خصوصیات احتراق در یک محیط متخلخل می‌توان به بالا بودن تشعشع خروجی، آلاینده‌های CO و NO_X کم، دانسیته قدرت زیاد و بازهٔ تغییر زیاد بار حرارتی، کنترل مناسب روی فرآیند گرمایش، دوام و طول عمر زیاد مشعل، توانایی اندازه‌گیری دمای سطح تابشی (با توجه به اینکه اندازه گیری دمای شعله مشکل است) و گرمایش جهتی(در مورد مشعلهای تشعشعی) اشاره کرد.

1- استادیار گروه مهندسی مکانیک
2- دانشجوی فوق لیسانس مهندسی مکانیک
3- دانشجوی فوق لیسانس مهندسی هسته‌ای

Archive of SID

www.SID.ir

شکل زیر شماتیکی از یک مشعل متخلخل است که به منظور کنترل بهتر روی پایداری شعله از دو نوع ماده با تخلخل متفاوت ساخته شده است. به منظور کاهش NO_X از احتراق چند مرحله‌ای شامل پیش گرمایش و احتراق استفاده می‌شود. ضمناً احتراق چند مرحله‌ای نرخ تشعشع را افزایش می‌دهد. قابلیت احتراق مخلوط گازها در محیط متخلخل به خواص هندسی آن بیش از خواص فیزیکی حساسیت دارد.



شکل 1- احتراق در محیط متخلخل به همراه پیش گرمایش

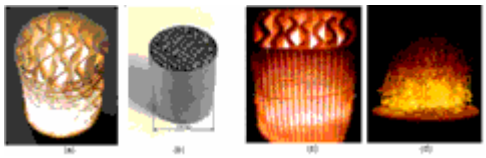
اولین منطقه از مشعل، منطقه پیش گرمایش(preheat) است که از مواد با تخلخل و رسانایی کم تشکیل شده و ناحیه دوم ناحیه احتراق(combustion) است که از مواد با رسانایی و تشعشع بالا ساخته شده و اندازه حفره‌ها نیز بزرگتر است. دلیل اینکه ناحیه پیش گرمایش را از مواد با رسانایی حرارتی کم و حفره‌های کوچک انتخاب می‌کنیم این است که از احتراق و برگشت شعله در این قسمت جلوگیری کنیم. بهترین حالت زمانی اتفاق می‌افتد که احتراق در مرز مشترک بین دو بخش شروع شود و تمام ناحیه بالائی را فرا گیرد که این مسئله بستگی به مواد متخلخل انتخابی دارد. تحقیقات نشان داده که احتراق در دو ناحیهٔ فضایی در محیط متخلخل که یکی نیمهٔ بالادست و دیگری ناحیهٔ باریکی از انتهای پایین دست قرار دارد، می‌تواند پایدار شود. تشعشع خروجی با حرکت دادن شعله به قسمت میانی محیط متخلخل به ماکزیمم مقدار میرسد. عدد پکلت (Peclet number) یک فاکتور مهم در تعیین ناحیه احتراق است. عدد بدون بعد پکلت بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Pe = \frac{S_L d_m C_p \rho}{k} \qquad (1)$$

اگر Pe<65، پخش شعله امکان پذیر نبوده و شعله ای تشکیل نمی‌شود. چرا که نرخ گرمای منتقل شده به محیط متخلخل بیشتر از نرخ گرمای تولید شده است و بر عکس اگر Pe>65 پخش شعله در ماده متخلخل امکان پذیر است.

در رابطه (1)، S_L سرعت شعله آرام(سرعت انتشار شعله آرام در یک محیط آزاد)، d_m قطر معادل حفره‌ها، C_P ظرفیت حرارتی مخصوص، ρ دانسیته و k رسانایی حرارتی مخلوط گاز و هواست[1].

پایداری فرآیند احتراق و میزان تشعشع به خواص محیط متخلخل،بستگی دارد. خواص ماده انتخابی باید در دماهای بالا(1400 تا 1600 یا در نهایت 1700 درجه سانتیگراد) تقریباً ثابت بوده و در مقابل تنشهای حرارتی مقاوم بوده و ترک بر ندارد. در شکل و جدول زیر چند ماده متداول به همراه ساختار ذکر شده است:



شکل 2- چند ماده متداول در مشعل‌های متخلخل

(a) Al2O3 fiber structure; (b) C/SiC structure; (c) static mixer made of zirconia's foam; (d) Fe-Cr-Al-alloy wire mesh

Archive of SID

www.SID.ir

جدول 1- خصوصیات مواد متداول در ساختمان محیط متخلخل

شکل	جنس	ماکزیمم دمای قابل تحمل (درجه سانتیگراد)	ضریب صدور (Emissivity)	ضریب هدایت	پذیرش بازه گرمایی	مقاومت در برابر شوک
a	اکسید آلومینیوم	1950	0/28	5-30	بالا	متوسط
b	کربید سیلیسیم	1600	0/8 -0/9	20-150	پایین	بسیار خوب
c	زیرکونیوم	2300	0/31	2-5	بالا	خوب
d	آلیاژ فلزات	1250	خوب	10-28	بسیار زیاد	بسیار عالی

سازه های a و b و c به static mixer معروف اند. از جمله ویژگی‌های این نوع سازه می‌توان به انتقال حرارت رسانایی کم، انتقال حرارت تشعشعی زیاد، پخش خوب و افت فشار کم اشاره کرد. سازه d به شبکه سیمی(wire mesh) معروف است. از جمله ویژگی‌های این نوع سازه می‌توان به انتقال حرارت رسانایی و پخش کم در نتیجه تخلخل بالا، انتقال حرارت تشعشعی زیاد و افت فشار کم اشاره کرد[2].

از کاربردهای مشعلهای تشعشعی متخلخل می‌توان موارد زیر را نام برد:

خشک کردن کاغذ و مقوای نازک در فرایند نورد کاغذ، پرداخت کاری کاغذ، خشک کردن چوب، خشک کردن خمیر چینی، بهبود کیفیت تفلون ها و بهبود کیفیت پلاستیک ها[3].

2- مراحل طراحی و ساخت مشعل متخلخل

گام اول در طراحی، جمع آوری اطلاعات می باشد. با توجه به عدم وجود شرکت سازنده داخلی عمده سعی بر جمع آوری اطلاعات از طریق مقالات، کتب مرجع، اینترنت و الهام از طراحی شرکت های خارجی سازنده مشعل های متخلخل و به خصوص مشعل های متخلخل تابشی تخت قرار گرفت.

شکل 3-نمونه‌ای از مشعل متخلخل تابشی تخت

طراحی پیش مخلوط گاز و هوا

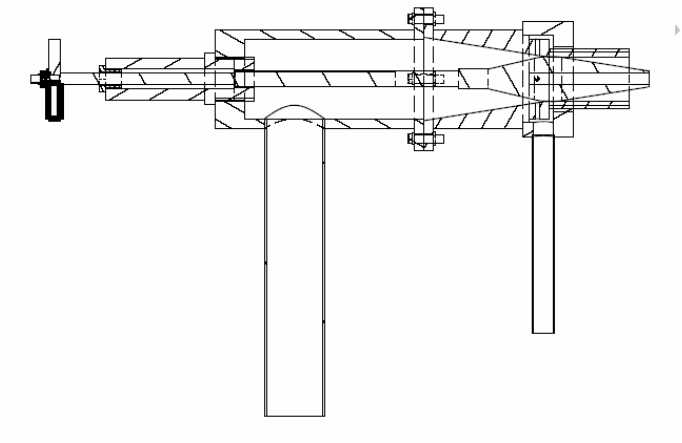
به لحاظ نوع اختلاط سوخت و هوا، از یک دیدگاه، مشعل های گازی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: 1- مشعل های با اختلاط قبلی 2- مشعل های با گاز خام یا بدون اختلاط قبلی. در مشعلهای بدون اختلاط قبلی، سوخت و اکسید کننده قبل از احتراق تا جائی که قابلیت اشتعال به وجود آید، جدا از یکدیگر باقی می‌مانند. این کار در مشعلهایی که در آنها امکان برگشت شعله و انفجار وجود دارد(مانند مشعلهای اکسیژن و سوخت)، انجام می‌شود. اما به طور کلی مشعل های تشعشعی با نوع اول کار می‌کنند[3]. از دیدگاهی دیگر، اختلاط سوخت و هوا می‌تواند به صورت طبیعی و یا اجباری صورت گیرد. در نوع طبیعی، اختلاط بر اساس انرژی جنبشی حاصل از انبساط تخلیه سوخت گازی از درون یک اریفیس صورت می‌گیرد. بسته به فشار گاز ورودی، این مشعل ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول مشعل ها تحت فشار اتمسفر بوده که فشار گاز در آنها از 2 تا 12 اینچ آب متغیر است. این مشعل ها در وسایل خانگی و تجاری کوچک به کار می‌روند. دسته دوم مشعل های تحت فشار بالا (تا 40psi) بوده که حرارت زیادی را تولید می‌کنند و در تجهیزاتی نظیر کوره‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع

Archive of SID

www.SID.ir

مشعلها نیز ساختاری مشابه دسته اول دارند. در نوع اجباری، جریان هوا به کمک فن تأمین شده و با گاز مخلوط می‌شود. در این نوع اختلاط، می توان کنترل بهتری روی میزان دبی سوخت و هوا داشت و در نتیجه عملکرد مشعل را کنترل کرده و از اختلاط کامل سوخت و هوا نیز اطمینان حاصل نمود. با توجه به کنترل بهتر سیستم اختلاط اجباری، در این طرح از این نوع اختلاط استفاده شد[1].

با توجه به طرح اولیه دستگاه لازم بود تا در فاصله ای کوتاه در یک محفظه، سوخت و هوا به طور کامل با یکدیگر مخلوط شده و بلافاصله وارد محفظه احتراق شوند. از آنجا که کارکرد دستگاه به عنوان یک دستگاه آزمایشگاهی و نه صنعتی مد نظر است، می‌بایست قابلیت کار با دبی های مختلف هوا و گاز نیز در نظر گرفته شود تا اختلاط به خوبی صورت گیرد. در ضمن می‌بایست افت فشار مخلوط سوخت و هوا نیز کم باشد تا تأثیر آن در احتراق داخل محیط متخلخل که غلبه بر افت فشار داخل آنهاست، ملموس و قابل مشاهده شود. برای رسیدن به اهداف ذکر شده تصمیم بر آن شد تا بدون ایجاد تغییر در دبی هوا به نحوی با تغییر سطح مقطع هوای ورودی، سرعت آن را تغییر داده تا ضمن اطمینان از اختلاط کامل هوا و گاز در دبی های مختلف، افت فشار آن را نیز کنترل کنیم. این امر به کمک حرکت دو مخروط در یکدیگر امکان پذیر شد. قطعات از جنس پروفیلهای فولادی هستند.



شکل 4- طرح نهایی پیش مخلوط کن

انتخاب فن و کنترل دبی گاز و هوا

در انتخاب فن باید به دو عامل هد و دبی توجه کرد. چون این دستگاه بصورت آزمایشگاهی طراحی شده است، لذا می بایست بازه وسیعی از این دو عامل را پوشش دهد. با در نظر گرفتن دبی و هِدی که در نمونه‌های خارجی مشعل(خصوصا شرکت RADMAX) در نظر گرفته شده بود، از مدلهای موجود در بازار ایران، فن سانتریفیوژ مدل 260 w – 3000/3600 rpm size 2 ½" – انتخاب شده است.

در مورد کنترل دبی هوا و گاز نیز با توجه به آزمایشگاهی بودن دستگاه لازم است تا دبیهای گاز و هوا را بتوان بخوبی کنترل نمود. بدین منظور از دو شیر دروازه ای و سوزنی بترتیب برای هوا و سوخت انتخاب شده است.

طراحی نشیمنگاه محیط متخلخل، پایه و سایر تجهیزات نگه دارنده

نشیمنگاه محیط متخلخل باید قابلیت نصب انواع محیطهای متخلخل با ضخامتهای گوناگون و نیز قابلیت تحمل دمای زیاد را دارا باشد. همچنین طراحی پایه باید گونه ای صورت گیرد تا بتوان مشعل را در زوایای مختلف مورد آزمایش قرار داد و مونتاژ و دمونتاژ آن نیز به آسانی امکان پذیر باشد. پایه از دو قسمت ثابت و گردان تشکیل شده است. شکل و جنس پایه از پروفیلهای چهار گوش فولادی، میلگرد و ورقهای با ضخامتهای مختلف می باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

شکل 5-دو نمای کلی از مجموعه مشعل ساخته شده

انتخاب محیط های متخلخل

با توجه به عدم تولید سرامیک های مورد استفاده در مشعل های متخلخل، در داخل کشور، از سرامیک های مشابهی که در بخاری های بدون دودکش و نوعی سرامیک متخلخل (فومی) که در فیلتر کردن مذابهای مختلف در صنعت ریخته گری جهت بهبود کیفیت مذاب کاربرد دارد، استفاده شد. سرامیک نوع اول سوراخ دار(Perforated Ceramics) بوده و در ابعاد 10×13 می باشد. ابعاد، جنس و نمونه ای از سرامیک های فومی(Porous Media) استفاده شده، در جدول و شکل زیر ارائه شده است.

شکل 6- نمونه ای از سرامیک فومی‌استفاده شده از جنس SiC

جدول 2-ابعاد و جنس سرامیک های فومی‌استفاده به عنوان محیط متخلخل

Archive of SID

www.SID.ir

جنس	ابعاد	نوع(میزان تخلخل)	تعداد
$Zr-SiC-Al_2O_3$	150×120×22	10	6
		20	6
		30	6
	استوانه ای با قطر 100 و ضخامت 20 میلیمتر	10	6
		20	12
		30	12
	100×30×22	10	4
		20	4
		30	4

3- راه اندازی مشعل متخلخل

استفاده از سرامیک سوراخ دار

اولین آزمایشی که با دستگاه انجام شده است، مربوط به سرامیکهای سوراخدار می‌باشد. پس از ایجاد جرقه شعله بلندی بر روی سرامیکها ایجاد شده و پس از تنظیم دبی گاز و هوا کم‌کم شعله سبز رنگی در ناحیه ای کوچک، در بالای سرامیکها تشکیل می‌شود. رنگ این قسمت از شعله مربوط به رادیکالهای CH می باشد [4]. با کاهش بیشتر دبی گاز این بخش از شعله به داخل حفره‌های سرامیک نفوذ می‌کند. از این نقطه کارکرد به بعد سرامیکها بطرف قرمز شدن پیش می‌رود و می‌توان انتقال حرارت، از طریق تشعشع را در سیستم مشاهده نمود. البته پس از تشعشع سرامیکها، شعله نارنجی رنگی به بیرون زبانه می کشد.این شعله ناشی از تشعشع H2O و CO2 است[4]. در شکل زیر پروفیلی که در نتیجه نفوذ شعله سبز رنگ به داخل سرامیک به وجود آمده و آن را قرمز کرده است نشان داده شده است.

شکل 7- نفوذ قسمت سبز رنگ شعله در سرامیک ها و شکستن آنها در اثر تنش حرارتی

همانطورکه در شکل فوق مشخص است بخشی از شعله به صورت آزاد و با رنگ نارنجی تند بالای بستر سرامیکی تشکیل می شود.

استفاده از سرامیک فومی

قبل از هر چیز تعریف تخلخل که در این قسمت بدان اشاره می‌شود، بیان می‌گردد. تخلخل نسبت حجم(سطح) خالی به حجم(سطح) پر می‌باشد. در این قسمت به مشاهده کارکرد سه نوع سرامیک متخلخل با واحد تخلخل 10، 20 و 30 (میزان تخلخل بر اینچ مربع) پرداخته می‌شود.

مراحل اولیه در راه‌اندازی سیستم برای این نوع سرامیکهای متخلخل مشابه نوع سوراخدار است. این نوع از سرامیک با نوع قبلی به لحاظ ساختار و جنس، تفاوتهای اساسی دارد. مشاهدات نشان می‌دهد که شعله به هیچ وجه به داخل سرامیک با

Archive of SID
www.SID.ir

تخلخل 10 نفوذ نمی‌کند و حداکثر می‌توان احتراق را روی سطح و نه داخل محیط متخلخل داشت. ولی در دو نوع دیگر، شعله با تنظیم دبی مخلوط (گاز و هوا) بعد از مدت کوتاهی(وقتیکه حرارت از طریق هدایت به لایه‌های زیرین منتقل می‌شود) به داخل محیط متخلخل کشیده شده و به تمام حجم سرایت پیدا می‌کند. تصاویر زیر که از آزمایش سرامیکها با سه نوع تخلخل می‌باشد گواهی بر موارد ذکر شده است.

تخلخل10

تخلخل20

تخلخل30

شکل 8- تشکیل شعله داخل محیط با تخلخل 20 و 30

ترکیب سرامیکهای فومی

همانطور که گفته شد سرامیکهای با تخلخل کم(مثلاً نوع 10) نمی‌تواند شعله را در داخل خود نگه دارد یعنی شعله یا در روی و یا در زیر آن تشکیل می‌شود. محل استقرار شعله توسط دبی گاز و هوا(و در نتیجه فشار زیر سرامیکها) تعیین می‌شود. اگر این نوع سرامیکهای متخلخل بر روی نشیمنگاه قرار گیرند و دبی ها ماکزیمم باشد با کم کردن متناسب دبی گاز و هوا ابتدا شعله در روی سرامیک قرار می‌گیرد و اگر این کاهش دبی ادامه یابد ناگهان شعله به زیر سرامیک کشیده خواهد شد که با صدا همراه است.

سرامیکهای با تخلخل کم بسترهای مناسبی برای برای پیش گرم کردن مخلوط گاز و هوای ورودی هستند. از این لحاظ این بسترها را می‌توان در لایه های زیرین محیطهای متخلخل قرار داد. با توجه به مطالب گفته شده در بخش اول، با استفاده از یک سرامیک با تخلخل کم در پایین ترین لایه و 3 عدد سرامیک با تخلخل زیادتر در لایه های بالائی، می‌توان شعله را در داخل حجم محدودی نگهداشت و از آنها بعنوان سطوح تشعشعی استفاده کرد. با قرار دادن سرامیک نوع 10 در بالاترین لایه می‌توان توزیع تابش همگن تری را در سطوح کناری مشاهده کرد. تصویری را که در ادامه مشاهده می‌کنید، مربوط به آزمایشی است که می‌توان دقیقاً با شکل 1 در بخش اول منطبق دانست.

Archive of SID

www.SID.ir

شکل 9- احتراق در محیط متخلخل به همراه پیش گرمایش با استفاده از SIC

در این مقاله مطابق با جدول دو از سرامیک های با اجناس مختلف و با سازه static mixer استفاده شد. دمای ذوب سرامیک های فومی، از جنس SiC، که در این مقاله از آنها استفاده شد در حدود 1650 درجه سانتیگراد است. اما در طول تست دستگاه مشاهده شد که در ناحیه ای که احتراق صورت می‌گیرد (در لایه دوم از سرامیک ها) سرامیک ها ذوب می‌شوند. از طرف دیگر، اگر سرامیکها در حالی که شعله داخل آنها تشکیل شده است از روی سوراخ ورودی به نشیمنگاه کنار کشیده شوند مشاهده می‌شود که به سرعت، شعله خاموش می‌شود. بنابراین تأثیر پیش گرمایش مخلوط سوخت و هوا در احتراق داخل محیط متخلخل را به خوبی می‌توان درک کرد.

4- نتیجه گیری

دستگاه آزمون مشعل تابشی تخت در مجموعه آزمایشگاهی مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان ساخته شده است. هدف از ساخت این مجموعه انجام تست روی این دسته از مشعل‌ها با هدف دستیابی به دانش ساخت این دسته از مشعل هاست. در در این تحقیق، اصول اولیه حاکم بر احتراق در محیط متخلخل به صورت عملی آزمایش شد. تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل بستگی به تخلخل آن دارد که چنانچه از حدی کمتر باشد شعله در محیط متخلخل تشکیل نمی‌شود. استفاده از چنین تخلخل هایی به عنوان پیش‌گرم‌کن توصیه می‌شود. همچنین باید به دمای شعله داخل محیط متخلخل توجه داشت تا موجب ذوب محیط نشود.

مراجع

1- Pantangi, V.K., Mishra, S.C., "Combustion of Gaseous Hydrocarbon Fuels within Porous Media – A Review",Indian Institute of Technology Guwahati, Guwahati, Assam – 781039
2- Mößbauer, S., Pickenäcker, O., Pickenäcker, K., Trimis, D., "Application of the Porous Burner Technology in Energy- and Heat-Engineering", Fifth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment (Clean Air V), Volume I, pp. 519-523, 1999.
3- Baukal, C.E.Jr, "Industrial Burners Handbook", CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, D. C. , 2003.
4- Turns, S. R. , "An Introduction to Combustion", McGraw-Hill, 2000.

Archive of SID
www.SID.ir