

اثر شوک گرمایی بر پاسخ فشار حرارتی شیشه و انتشار ترک

Qingsong Wang, Haodong Chen, Yu Wang, Jinhua Sun*

State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei ۲۳۰۰۲۶, China

چکیده

شکستن شیشه پنجره در آتش سوزی ساختمان می تواند در تامین اکسیژن به دلیل ورود هوای تازه تغییر ایجاد کند. برای بررسی رفتار شکستن شیشه پنجره تحت نرخ های مختلف افزایش درجه حرارت، یک روش المان (عنصر) محدود برای حل تعادل پاسخ دینامیک (پویای) خطی سیستم بکار گرفته شد. معیار کولمب-موهر^۱ و معیار حالت ترکیبی مبتنی بر اس آی اف^۲ بترتیب برای پیش بینی شروع و رشد ترک بکار گرفته شدند. مجموع ۱۲ نرخ افزایش درجه حرارت از ۱۵۰ کلوین بر ثانیه تا ۰/۷۵ کلوین بر ثانیه برای یک بلوک شیشه ای حرارت مرکزی و لبه سایه دار طراحی شدند. حداکثر فشارهای حرارتی بر بخش سایه دار بین لایه گرم و سرد شیشه که جایی است که ترک شروع می شود قرار داده می شوند. تحت نرخ افزایش درجه حرارت سریع، افزایش کمتر درجه حرارت می تواند منجر به فشار دینامیک بزرگتر شود که سپس توسط شروع ترک دنبال می شود. تحت نرخ افزایش درجه حرارت آهسته تر، اثر دینامیک ضعیف تر می شود و فشار حرارتی می تواند با استفاده از روش استاتیک (ایستا) ارزیابی شود.

۱. مقدمه

در آتش سوزی ساختمان، شیشه به تدریج در سطوح اولیه آتش گرم می شود؛ به هر حال، در صورتی که تخلیه انرژی غیر عادی در یک اتاقک یا محفظه اتفاق افتد، شیشه به سرعت گرم می شود که می تواند باعث شوک گرمایی شود. شوک گرمایی هنگامی اتفاق می افتد که گرادیان حرارتی باعث می شود بخش های مختلف یک شیء به میزان های

¹ Coulomb-Mohr

² SIF

مختلف گسترش یابند. این انبساط تفاضلی می تواند از نظر فشار یا کشش به یک اندازه دریافت شود. در برخی مواقع، این فشار می تواند از استحکام ماده تجاوز کند که باعث می شود ترک شکل گیرد. در صورتی که این ترک از انتشار از طریق ماده متوقف نشود، لعاب (پوشش شیشه)، یکپارچگی ساختاری خود را از دست می دهد. اشیاء شیشه ای به علت استحکام پایین و هدایت حرارتی پایین به ویژه در برابر شکست از شوک حرارتی آسیب پذیر هستند. در صورتی که شیشه به طور ناگهانی در معرض حرارت شدید قرار گیرد، شوک باعث خواهد شد شیشه بشکند.

مسائل ترک و افتادن شیشه اولین بار توسط امونس³ طرح شد و سپس برخی کارهای تجربی بر یک بلوک شیشه ای و چندین بلوک شیشه ای تحت اثر آتش یا تابش گرما هدایت شدند. نتایج تجربی بیان کردند که ساز و کار شکست اصلی یک بلوک شیشه ای که در معرض منبع حرارت تابشی است به علت گرادیان های حرارتی است که بین مناطق سایه دار و در معرض حرارت تابشی قرار گرفته است. این نتیجه توسط اسکلی⁴ و همکاران، شیلدز⁵ و همکاران و محققان دیگر تأیید شد. برخی کارهای ریاضی و شبیه سازی نیز برای تحلیل رشد و توزیع فشار انجام شد. کسکی-راهکنن⁶ مدلی را برای پیش بینی درجه حرارت و زمینه های فشار در یک بلوک شیشه ای در معرض منبع تابش پیشنهاد کردند. توسعه یک مدل ریاضی پیشرفته تر توسط پاگنی⁷ و همکاران شکست پنجره های بلوک شیشه ای قلیایی را با توجه به تفاوت گرادیان های حرارتی بین مناطق سایه دار و در معرض قرار گرفته پیش بینی کردند. فشارهای حرارتی بر بلوک های شیشه ای با حرارت نامنظم ناشی از آتش توسط چو⁸ و همکاران بررسی و بحث شدند. توفیلو⁹ و دلشاتسیوس¹⁰ اهمیت فشار مهارشده (به علت کشیدگی محوری) و فشار خمشی یا خم شدن (به علت تغییر شکل طبیعی) را بر شیشه توسط روش های تحلیلی و عددی در نظر گرفتند.

³ Emmons

⁴ Skelly

⁵ Shields

⁶ Keski-Rahkonen

⁷ Pagni

⁸ Chow

⁹ Tofilo

¹⁰ Delichatsios

به هر حال، داده های اندک تجربی و عددی برای حرارت سریع شیشه گزارش شده است.

شوک گرمایی همواره توسط تغییرات سریع و شدید درجه حرارت ایجاد می شود که برای یکپارچگی شیشه بسیار خطرناک است. بنابراین، هدف این کار بررسی اثر نرخ افزایش درجه حرارت بر ایجاد فشار حرارتی شیشه و شروع و انتشار ترک با استفاده از روش المان (عنصر) محدود است.

۲. فرمول های فشار حرارتی و ترک

۲-۱ مدل های پاسخ دینامیک

مدل پاسخ دینامیک فشار نیز در مطالعه قبلی ما بکار گرفته شد و به سادگی در اینجا بیان می شود. معادلات تعادل حاکم بر پاسخ دینامیک خطی سیستم عناصر محدود به صورت زیر است :

$$MU + CU + KU = R \quad (1)$$

که M ، C و K ماتریس های جرم، رطوبت و سختی هستند؛ R بردار بارهای خارجی اعمال شده است؛ U و \dot{U} بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب مجموعه عنصر محدود هستند. طرح یکپارچگی نیومارک^{۱۱} می تواند به عنوان بسطی از روش شتاب خطی درک شود که روشی صریح است و مهم ترین جنبه ها عبارتند از : احتمال پایداری غیر شرطی برای سیستم های غیر خطی و دقت مرتبه دوم. احتمال پایداری غیر شرطی و دقت مرتبه دوم امکان استفاده از یک گام زمانی بزرگ را می دهد و وضوح هر گام زمانی شامل رویه تکراری نیست. از این رو، روش اثربخش نیومارک برای حل پاسخ بار حرارت دینامیک شیشه اتخاذ شد. لطفاً برای جزئیات بیشتر به نشریات مرتبط مراجعه کنید.

۲-۲ مدل فشار حرارتی و معیار ترک

یک مدل فشار حرارتی در مطالعه قبلی ما پیشنهاد شده است و در اینجا به سادگی معرفی می شود. فشار حرارتی توسط اختلاف درجه حرارت بر شیشه ایجاد می شود، در صورتی که افزایش درجه حرارت $T(x, y, z)$ با توجه به وضعیت اولیه باشد، سپس تغییر شکل مرتبط می تواند به سادگی در نظر گرفته شود. در مورد شیشه، افزایش درجه حرارت T منجر به

^{۱۱} Newmark

کشش یکنواخت می شود که بستگی به ضریب انبساط خطی ماده دارد. روش دقیق در مطالعات قبلی ما ارائه شد. معیار کولمب-موهر برای پیش بینی شروع ترک بکار گرفته شد. ترک هنگامی اتفاق می افتد که فشارهای اصلی حداقل و حداکثر در شرایطی که مطابق معادله (۲) ترکیب می شوند :

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}} \geq 1$$

که S_{uc} و S_{ut} استحکام کششی و فشاری نهایی هستند. همواره ۳ و S_{uc} منفی هستند یا در فشار، معیار حالت ترکیبی مبتنی بر عوامل شدت فشار (SIFS)، حالت بکار برده شده برای پیش بینی رشد ترک را در کار فعلی است که فرض می کند ترک ها یکبار بر اساس معادله (۳) که در آن عوامل شدت فشار لحاظ می شود، شروع به رشد می کنند.

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^2 = 1$$

K_I و K_{II} بترتیب عوامل شدت فشار برای حالت های I و II هستند که از شبیه سازی بدست می آیند. K_{IIC} و K_{IC} بر مقادیر سختی شکست مجزای حالت های شکست I و II دلالت می کنند.

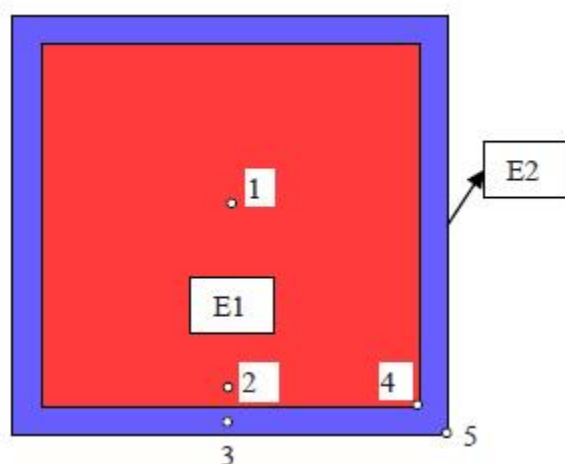
۳. بیان مساله و رویه شبیه سازی

۳-۱ مدل شبیه سازی مساله

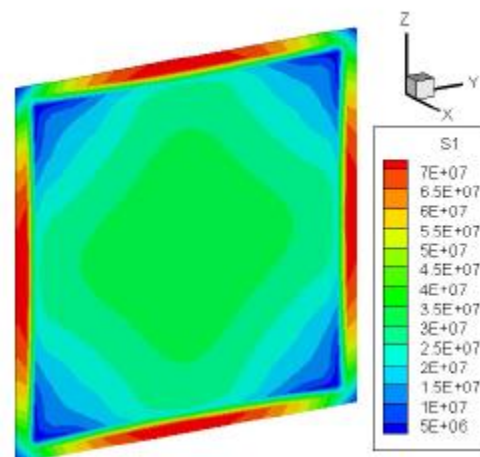
در ساختمان، شیشه پنجره در چهارچوب پنجره برای ثابت و محکم شدن در جای خود جاسازی و حدود ۲ سانتی متر توسط چهارچوب سایه دار می شود. در وضعیت آتش سوزی، نواحی سایه دار به طور مستقیم در معرض تابش آتش قرار نمی گیرند، بنابراین، درجه حرارت پایین تر از ناحیه مرکزی شیشه است. افزایش درجه حرارت ناحیه مرکزی شیشه عمدتاً متاثر از تابش آتش است.

هدایت گرما از ناحیه مستقیم حرارت دیده شیشه و چهارچوب گرم شده، عامل افزایش درجه حرارت ناحیه سایه دار است. به طور کلی، افزایش درجه حرارت ناحیه سایه دار کمتر از افزایش درجه حرارت بخش های مرکزی شیشه است. در بخش پشت شیشه، افزایش درجه حرارت توسط نرخ هدایت گرما از بخش جلویی و نرخ انتقال گرما به محیط کنترل می شود که این درجه حرارت نیز کمتر از درجه حرارت بخش جلویی شیشه است. تفاوت های درجه حرارت بین بخش

سایه دار و بخش بدون پوشش، بین بخش های پشتی و جلویی، فشار حرارتی بین آنها را به علت انبساط آن ایجاد می کند.



شکل ۱



شکل ۲

شکل ۱: وضعیت شیشه حرارت داده شده. قسمت E1 در معرض آتش، قسمت E2 شیشه داخل قاب

شکل ۲: یک توزیع استرس گرمایی شیشه قبل از ترک برداشتن

با توجه به شرایط گرمای شیشه در وضعیت آتش سوزی، یک وضعیت لعاب کاری برای بررسی توزیع فشار حرارتی و انتشار ترک همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است طراحی شد. دو بخش برای شیشه وجود دارد که در افزایش درجه حرارت در نظر گرفته می شوند، بخش های E1 و E2. E1 بر بخشی از شیشه که به طور مستقیم در معرض آتش قرار دارد و E2 بر بخشی از شیشه که توسط چهارچوب سایه دار می شود دلالت دارند. در وضعیت تخلیه انرژی غیر عادی ناشی از آتش، درجه حرارت هوا به شدت افزایش می یابد و باعث می شود متقابلاً "درجه حرارت شیشه افزایش یابد. افزایش سریع درجه حرارت می تواند باعث تراکم فشار حرارتی و احتمالاً ایجاد ترک در شیشه شود. برای بررسی این نوع اثر شوک گرمایی، ۱۲ نوع افزایش درجه حرارت شیشه طراحی شدند تا تاثیر آنها بر ترک شیشه مطالعه شوند که در جدول ۱ فهرست می شوند.

Table 1. Simulation time step and crack parameters for the designed cases

Case No.	Time (s)	Time step (s)	Heating rate (K/s)	Crack time (s)	Temp. diff. at crack (K)	Max σ_1 (MPa)	Static σ (MPa)
1	1	0.01	150.00	0.54	81	75.5	45.9
2	2	0.02	75.00	1.20	90	81.6	51.0
3	5	0.05	30.00	3.30	99	76.1	56.1
4	10	0.10	15.00	7.20	108	81.7	61.2
5	20	0.20	7.50	15.20	114	77.5	64.6
6	30	0.30	5.00	23.40	117	75.4	66.3
7	40	0.40	3.75	32.00	120	76.1	68.0
8	50	0.50	3.00	40.00	120	73.0	68.0
9	60	0.60	2.50	49.20	123	75.3	69.7
10	100	1.00	1.50	84.00	126	74.4	71.4
11	150	1.50	1.00	129.00	129	75.1	73.1
12	200	2.00	0.75	172.00	129	74.0	73.1

Table 2. Glass properties and other parameters used in simulation [26, 27]

Properties	Symbol	Value	Units
Thermal expansion co-efficient	α	9.0×10^{-6}	K^{-1}
Modulus of elasticity (Young Modulus)	E	6.3×10^{10}	Pa
Poisson's ratio	ν	0.22	--
Density	ρ	2500	kg/m^3
Ultimate tensile strength	σ_{ut}	7.3×10^7	Pa
Ultimate compressive strength	σ_{uc}	7.3×10^8	Pa
Glass size	--	$0.006 \times 0.6 \times 0.6$	m^3
Shaded edge width	d	0.02	m
Mesh number	--	$2 \times 36 \times 36$	--

شیشه ماده ای معدنی و غیر فلزی است که ساختار بلوری و شفاف ندارد. شیشه های معمولی در محدوده ای از شیشه های سیلیکات با ترکیبی از هیدروکسید سدیم و اکسید کلسیم که در بطری های نوشیدنی های غیر الکلی گاز دار بکار می روند تا شیشه های سیلیکا با (درجه) خلوص بسیار بالا که در فیبرهای نوری استفاده می شوند هستند. استحکام کششی واقعی شیشه در حدود ۲۷ تا ۶۲ مگا پاسکال است. به هر حال، شیشه می تواند فشارهای بسیار بالا را تحمل کند. بنابراین، شکست شیشه اکثراً" به دلیل فقدان استحکام کششی است. شیشه در استحکام کششی ضعیف است زیرا به طور معمول در ترک های میکروسکوپی پوشیده می شود که تراکم فشار موضعی ایجاد می کند. شیشه ساز و کارهایی برای کاهش فشارهای موضعی بالا ندارد و در معرض شکست سریع و بی دوام است. شیشه سیلیکات با ترکیبی از

هیدروکسید سدیم و اکسید کلسیم به طور گسترده در پنجره ها استفاده می شود و نوعی از مواد شکننده است که در این کار انتخاب می شود. خواص این نوع شیشه و پارامترهای شیشه سازی در جدول ۲ نشان داده می شوند.

۳-۲ رویه شیشه سازی

شیشه سازی در این مطالعه اساساً "روش پیشنهاد شده در مطالعه قبلی ما را دنبال می کند. در این روش، دو مدل بکار گرفته شدند، یکی مدل فشار حرارتی و دیگری مدل ترک بر اساس مدل فشار است. در مدل فشار حرارتی، روش المان (عناصر) محدود برای شیشه سازی فشار حرارتی دینامیک بکار برده شد که با استفاده از یکپارچگی زمانی نیومارک تنظیم و بایگانی شد. سپس رخداد ترک توسط معیار کولمب-موهر پیش بینی می شود. در صورتی که ترک شروع شود، برنامه مدل ترک به خود خواهد گرفت. در مدل ترک، پنج معیار رشد ترک برای پیش بینی جهت رشد و طول آن ارائه می شوند که عوامل شدت فشار (K_I ، K_{II} و K_{III}) محاسبه می شوند. در این کار، معیار حالت ترکیبی مبتنی بر SIFS بکار گرفته شد. به علاوه، اثرات توزیع مجدد فشار به دلیل بسط ترک به منظور تخمین صحیح عوامل شدت فشار نوک ترک به طور اختیاری بسط داده شده در نظر گرفته می شوند. به منظور جلوگیری از هزینه های عددی بیش از اندازه، یک الگوی شبکه صحیح در مجاورت نوک ترک با پالایش شبکه های نوک ترک مهیا می شود. فقط عناصر اطراف نوک ترک توسط یک روش فرکتال (دارای حجم نامحدودی از جزئیات دقیق و خطوط یا سطوح بسیار ناصاف و پرپیچ) پالایش می شوند. با انتشار ترک، شبکه نوک پالایش شده نیز حرکت می کند و عناصر همواره پالایش شده پس از طی مسیر ترک به شبکه اصلی بر می گردند.

۴. فشار حرارتی و مسیر ترک بدست آمده توسط شیشه سازی

۴-۱ توزیع فشار حرارتی

دوازده مورد برای بررسی اثر شوک گرمایی بر رشد فشار حرارتی شیشه شیشه سازی شدند. شکل ۲ یک توزیع فشار حرارتی معمول را قبل اینکه فشار به اندازه کافی بزرگ شود تا به شیشه خسارت بزند نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که اولین فشار اصلی عمدتاً در لبه های سایه دار رشد می کند که درجه حرارت همواره در مقدار اولیه حفظ می شود. درجه حرارت بخش مرکزی شیشه افزایش می یابد و سپس تفاوت درجه حرارت در حال رشدی بین بخش مرکزی

و لبه ها وجود دارد. تفاوت درجه حرارت منجر به فشار حرارتی می شود که در نهایت می تواند شیشه را بشکند. حداکثر فشار کششی در چهار لبه و فشار کمتر در چهار گوشه قرار دارد و بخش مرکزی مقدار متوسطی را نشان می دهد. برای مقایسه، یک روش ساده برای محاسبه فشار حرارتی استاتیک استفاده از معادله زیر است :

$$\sigma = E\alpha(T - T_0)$$

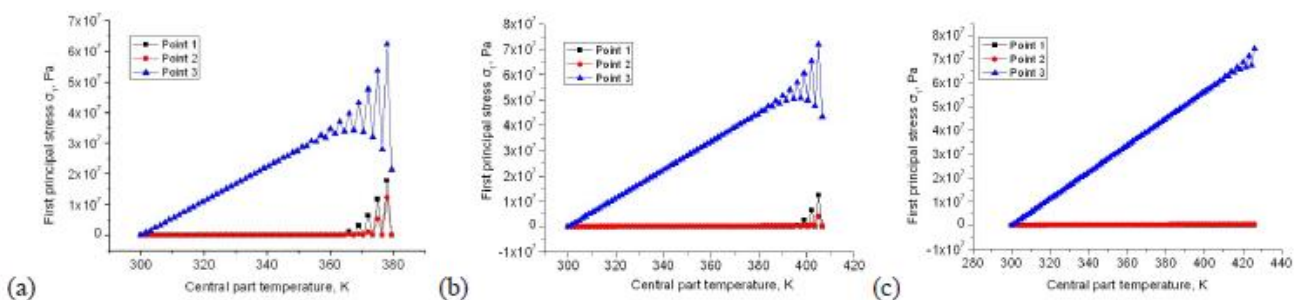
که در آن فشار شکست نرمال (معمول) یا E ، ضریب یانگ^{۱۲} یا ضریب انبساط حرارتی خطی است، T درجه حرارت گرمایی شیشه و T_0 درجه حرارت سایه دار شیشه است.

۲-۴ رفتار دینامیکی اولین فشار اصلی (۱)

بزرگ ترین فشار اصلی در لبه های سایه دار قرار دارد و با افزایش اختلاف درجه حرارت رشد می کند. در یک افزایش درجه حرارت سریع ۱۵۰ کلوین بر ثانیه (مورد ۱)، فشار به طور جدی در مرحله بعد قبل از شروع ترک نوسان دارد. فشارهای حرارتی در نقطه ۱، ۲ و ۳ در شکل ۳(۱) نشان داده می شوند. می توان از شکل ۳(۱) مشاهده کرد که فشار ۱ با افزایش درجه حرارت بخش مرکزی افزایش می یابد. مقدار در نقطه ۳ که در لبه است بیشترین و در نقطه ۲ کمترین است. حداکثر مقادیر بترتیب در نقاط ۱، ۲ و ۳، ۱۷/۹، ۱۲/۲ و ۶۲/۴ مگا پاسکال هستند. پس از اینکه درجه حرارت بیش از ۳۶۰ کلوین می شود، مقدار در نقطه ۳، با افزایش درجه حرارت، شروع به نوسان می کند و در درجه حرارت های بالاتر، فشارها در نقطه ۱ و ۲ نیز شروع به نوسان می کند. این نوسان به علت شوک گرمایی به شیشه است که می تواند باعث شکست شیشه در اختلاف درجه حرارت پایین تر شود. هنگامی که درجه حرارت با نرخ آهسته تر افزایش می یابد، سوابق رشد فشار حرارتی شبیه به یکدیگر هستند. اشکال ۳(۲) و ۳(۳) تکامل اولین فشار اصلی را با افزایش درجه حرارت ۱۵۰ کلوین در ظرف ۱۰ و ۱۰۰ ثانیه نشان می دهند که بترتیب موارد ۴ و ۱۰ هستند. فشار ۱ در نقطه ۳ با افزایش درجه حرارت افزایش می یابد و برخی رفتار نوسانی را در مرحله بعد نشان می دهد که شبیه به رفتار نوسانی

^{۱۲} Young

مورد ۱ است. به هر حال، دامنه یا مقدار نوسان با کاهش نرخ گرما کوچکتر و کوچکتر می شود. رفتار فشار در در نقاط ۱ و ۲ روند یکسانی را همانند روند نقطه ۳ نشان می دهد. در مورد ۱۰، نوسان فشار در نقاط ۱ و ۲ حتی دیگر قابل تشخیص نیست و اثر شوک گرمایی به صفر می رسد. بجز سه مورد معمول فوق که در اینجا بحث شد، موارد دیگر نیز شبیه سازی شدند که آنها رفتارهای مشابه نشان می دهند و مقادیر دقیق در جدول ۱ فهرست می شوند.

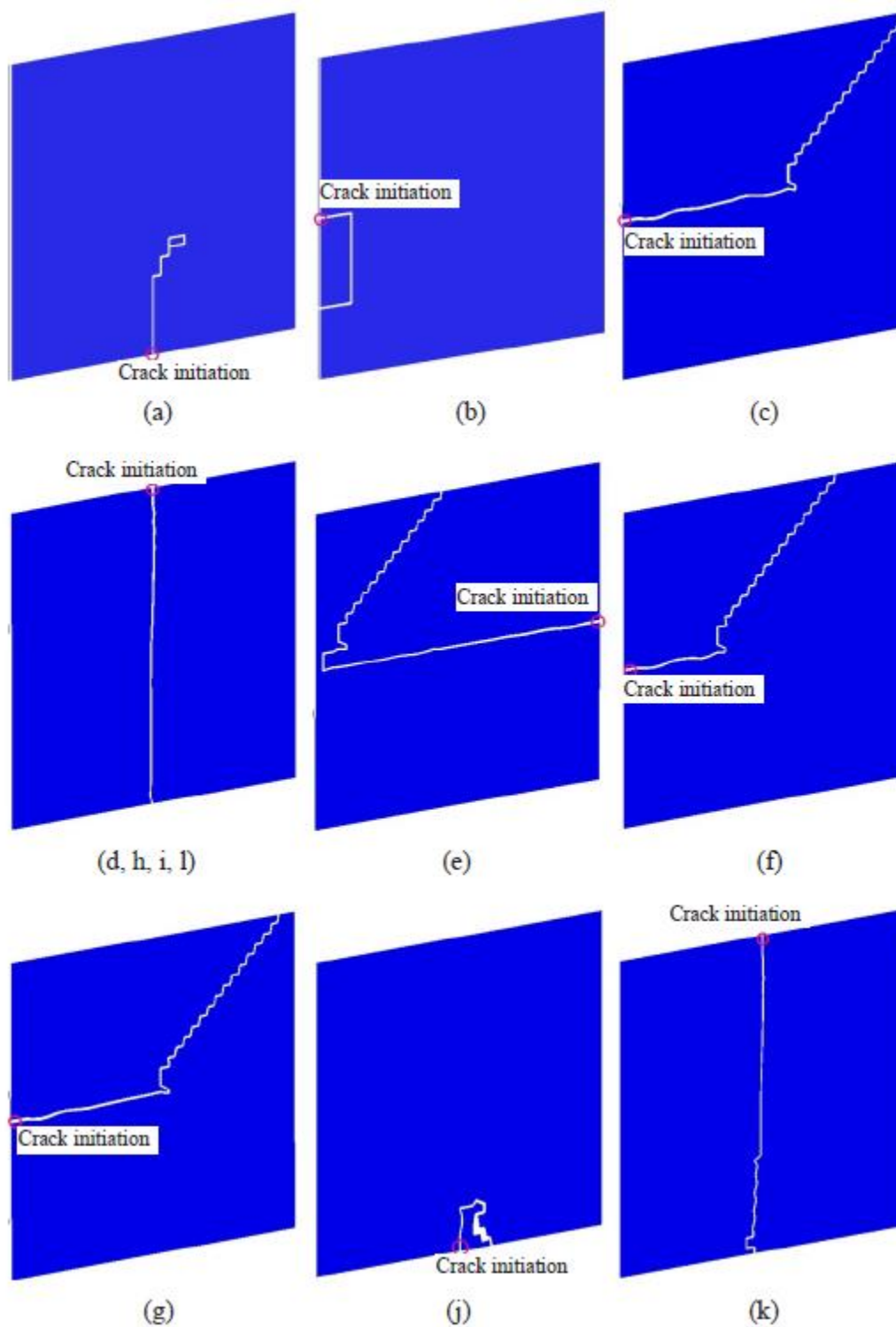


۳-۴ شروع ترک و مسیر ترک

تحلیل فوق نشان می دهد که بیشترین مقدار اولین فشار اصلی در لبه بین بخش های گرم و سرد شیشه قرار دارد. بنابراین، اولین ترک از اینجا شروع می شود که توسط شبیه سازی ها بهبود می یابد و نتایج در شکل ۴ نشان داده می شوند. مکان های شروع ترک در لبه هستند که ممکن است در بالا، پایین، چپ یا راست باشند. به دلیل اینکه چهار لبه مقادیر یکسان دارند و هر یک از آنها ممکن است ترک بردارند. انتشار ترک و مسیرهای نهایی برخی تفاوت ها را نشان می دهند. به طور کلی، آنها می توانند به سه نوع الگوی ترک تقسیم شوند: (۱) طی مسیر در مرکز و تقسیم شیشه به دو بخش مانند موارد ۴، ۸، ۹، ۱۱ و ۱۲؛ (۲) طی مسیر در مرکز و تغییر مسیر به گوشه مانند موارد ۳، ۵، ۶ و ۷ و (۳) طی مسیر به مرکز و برگشتن به گونه ای که جزیره ای را شکل دهد مانند موارد ۱، ۲ و ۱۰. برای الگوی ۱، ترک از یک مرکز لبه تا لبه مقابل با تغییر جهت های اندک شروع می شود و خط مسیر صاف است. برای الگوی ۲، اولین مسیر ترک قبل از اینکه به سمت گوشه برود شبیه به الگوی ۱ است و سپس مسیری کج یا زیگ زاگ به سمت گوشه را دنبال می کند. برای الگوی ۳، ترک از لبه شروع می شود و پس از انتشاری کوتاه به لبه اصلی بر می گردد و در نهایت یک جزیره را شکل می دهد.

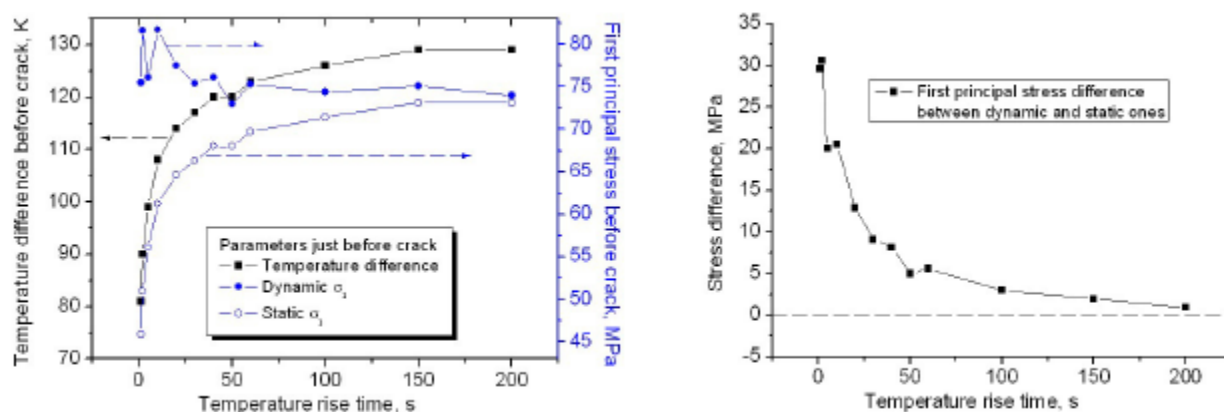
۴-۴ مقایسه و مباحث

فشار حرارتی هنگامی که هبه اندازه کافی بزرگ می شود باعث شکستن شیشه می شود، به هر حال، هنگامی که نرخ افزایش درجه حرارت متفاوت است، فشار حرارتی حتی در اختلاف درجه حرارت یکسان تفاوت دارد. ۱۲ مورد با نرخ افزایش درجه حرارت مختلف شبیه سازی شدند و برخی پارامترهای بسیار مهم در جدول ۱ فهرست می شوند. برای مقایسه ساده، اختلاف درجه حرارت بین بخش های گرم و سرد، اولین فشار اصلی دینامیک بدست آمده از شبیه سازی و فشار استاتیک بدست آمده از معادله تجربی (۴) در شکل ۵ ترسیم شدند. با زیاد شدن زمان افزایش درجه حرارت بخش مرکزی، یعنی با کاهش نرخ حرارت، اختلاف درجه حرارت نیز دقیقاً قبل از ترک افزایش می یابد که نشان می دهد که تحت نرخ سریع حرارتی، افزایش کم درجه حرارت می تواند شیشه را بشکند. از جنبه فشار حرارتی، با زیاد شدن زمان افزایش درجه حرارت بخش مرکزی، روند فشار دینامیک با برخی نوسان ها کاهش می یابد. فشار استاتیک افزایش می یابد زیرا اختلاف درجه حرارت افزایش می یابد. فشارهای بدست آمده توسط دو روش نزدیک تر و نزدیک تر می شوند که نشان می دهد که در نرخ های افزایش درجه حرارت پایین تر، اثر دینامیکی ضعیف تر می شود. در وضعیت آتش سوزی، در صورتی که آتش به سرعت توسعه یابد، مانند تخلیه انرژی غیر عادی که می تواند باعث شود درجه حرارت شیشه به سرعت افزایش یابد، شیشه تحت خطر بالقوه ترکی بزرگتر است.



اولین فشار اصلی ۱ پارامتری بسیار مهم برای پیش بینی شروع ترک شیشه است. اختلاف مقدار بدست آمده از اف ای

ام^{۱۳} دینامیک و محاسبه تئوری (نظری) در شکل ۶ نشان داده می شود. می توان مشاهده کرد که با زیاد شدن زمان افزایش درجه حرارت، اختلاف کوچکتر و کوچکتر می شود که از ۲۹/۶ تا ۰/۹ مگا پاسکال مرتبط با نرخ افزایش درجه حرارت از ۱۵۰ تا ۰/۷۵ کلوین بر ثانیه است. همچنین نشان می دهد که هنگامی که درجه حرارت کمتر از ۱ کلوین بر ثانیه است، فشار حرارتی دینامیک بسیار نزدیک به فشار حرارتی استاتیک است و بنابراین، فشار حرارتی می تواند با استفاده از یک فشار استاتیک تحت نرخ افزایش درجه حرارت کمتر ارزیابی شود. تحلیل فوق نشان می دهد که تحت نرخ افزایش درجه حرارت سریع بالای ۵۰ کلوین بر ثانیه، پاسخ فشار دینامیک بزرگ است و نمی تواند در پیش بینی ترک شیشه حذف شود. تحت نرخ افزایش آهسته تر، اثر دینامیک کمتر است و فشار حرارتی به سادگی می تواند با استفاده از یک روش استاتیک ارزیابی شود.



۵. نتیجه گیری

پاسخ های فشار حرارتی دینامیک در این مقاله با استفاده از یک برنامه المان (عنصر) محدود شبیه سازی شدند. تعادل پاسخ پاسخ دینامیک خطی کلی یک سیستم با استفاده از روش نیومارک حل می شود. معیار کولمب-موهر برای پیش بینی شروع ترک و معیار حالت ترکیبی مبتنی بر SIFS برای پیش بینی رشد ترک بکار گرفته شد. حداکثر فشار در لبه بلوک شیشه ای بین بخش های گرم و سرد شیشه قرار دارد و فشار به طور جدی در مرحله بعد قبل از شروع ترک نوسان دارد. مکان های شروع ترک در هر چهار لبه بلوک شیشه ای وجود دارند. تحت نرخ سریع افزایش

^{۱۳} FEM

درجه حرارت، افزایش درجه حرارت کمتر می تواند منجر به فشار دینامیکی بزرگتر شود که نمی تواند در پیش بینی ترک شیشه نادیده گرفته شود. تحت نرخ آهسته تر افزایش درجه حرارت، اثر دینامیکی ضعیف تر می شود و فشار حرارتی می تواند به سادگی با استفاده از یک روش استاتیک ارزیابی شود.

منابع:

- [۱] Emmons, H. W., ۱۹۸۶. "The Needed Fire Science," Fire Safety Science - Proceedings of the ۱st International Symposium, International Association for Fire Safety Science, pp. ۲۳-۵۳.
- [۲] Klassen, M. S., Sutula, J. A., Holton, M. M., Roby, R. J., ۲۰۱۰. Transmission Through and Breakage of Single and Multi-Pane Glazing Due to Radiant Exposure: State of Research, Fire Technology ۴۶, p. ۸۲۱.
- [۳] Zhang, Q. W., Zhang, H. P., Nan, J. L., Yang, J. P., Zhu, J. Y., ۲۰۰۵. Behavior of Single Window Glazing in Full-scale Enclosure Fire Test, Progress in Safety Science and Technology, Vol V, Pts a and B ۵, p. ۱۰۷۸.
- [۴] Shields, T. J., Silcock, G. W. H., Flood, M., ۲۰۰۲. Performance of a Single Glazing Assembly Exposed to a Fire in the Centre of an Enclosure, Fire and Materials ۲۶, p. ۵۱.
- [۵] Chow, W. K., Hung, W. Y., Gao, Y., Zou, G., Dong, H., ۲۰۰۷. Experimental Study on Smoke Movement Leading to Glass Damages in Doubleskinned Façade, Construction and Building Materials ۲۱, p. ۵۵۶.
- [۶] Klassen, M. S., Sutula, J. A., Holton, M. M., Roby, R. J., Izbicki, T., ۲۰۰۶. Transmission Through and Breakage of Multi-pane Glazing due to Radiant Exposure, Fire Technology ۴۲, p. ۷۹.
- [۷] Shields, J., Silcock, G. W. H., Flood, F., ۲۰۰۵. Behaviour of Double Glazing in Corner Fires, Fire Technology ۴۱, p. ۳۷.
- [۸] Skelly, M. J., Roby, R. J., Beyler, C. L., ۱۹۹۱. An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires, Journal of Fire Protection Engineering ۳, p. ۲۵.
- [۹] Bowditch, P. A., Sargeant, A. J., Leonard, J. E., Macindoe, L., ۲۰۰۶. Window and Glazing Exposure to Laboratory-Simulated Bushfires, Bushfire CRC, Victoria, Australia.
- [۱۰] Xie, Q. Y., Zhang, H. P., Wan, Y. T., Zhang, Q. W., Cheng, V.D., ۲۰۰۸. Full-scale Experimental Study on Crack and Fallout of Toughened Glass with Different Thicknesses, Fire and Materials ۳۲, p. ۲۹۳.
- [۱۱] Chow, W. K., Gao, Y., ۲۰۰۸. Thermal Stresses on Window Glasses upon Heating, Construction and Building Materials ۲۲, p. ۲۱۵۷.