

УДК 534.222.2+536.46

## ВЛИЯНИЕ РАЗВЕТВЛЕНИЯ КАНАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗЕ

Ц. Е, Чж.-Чж. Цзя

Хунаньский научно-технологический университет, 411201 Хунань, Китай, cumtyeqing@126.com

Выполнены измерения и теоретический анализ избыточного давления в волне детонации и скорости распространения пламени при взрыве газа в условиях разветвления трубы. Результаты показали очевидное влияние разветвления как на скорость пламени, так и на избыточное давление. Амплитуда давления и скорость в точке ветвления резко увеличивались, и наблюдались серьезные разрушения поверхности вблизи этой точки. Подтверждено, что на распространение газовой детонации воздействуют эффект мгновенного расширения поверхности и наличие препятствия.

Ключевые слова: газовая детонация, разветвление канала, ударная волна, пламя, характеристики распространения.

### ВВЕДЕНИЕ

Факторы, влияющие на распространение газовой детонации, изучались многими исследователями во всем мире. В работе [1] установлено, что на этот процесс заметно влияют форма и размеры резервуара, в котором происходит взрыв газа. В [2] получено, что при взрыве смеси метан — воздух в канале с препятствиями давление и скорость пламени растут с увеличением площади препятствия. В экспериментах [3] обнаружено, что профиль давления и скорость пламени предварительно перемешанной смеси меняются при изменении размеров препятствия и коэффициента загромождения рабочего сечения, давление возрастает с увеличением давления разгрузки, но степень увеличения зависит от формы препятствия. В работах [4, 5] представлены экспериментальные и расчетные результаты по распространению детонационной волны в каналах с перфорированными стенками и по дифракции волн горения и детонации, включая дифракцию в неустойчивом режиме перехода от горения к детонации. В [6–8] показано, что препятствие и диафрагма в канале могут вызывать турбулентность и увеличивать скорость пламени. Форма препятствия слабо влияет на ускорение пламени, однако множество препятствий вдоль канала могут постепенно привести к росту скорости. В работах [9, 10] установлено, что газ, распределиться по пространству, ускоряет пламя при

распространении по изогнутому каналу; изменение площади поперечного сечения канала может увеличить турбулентность газа и спровоцировать развитие ударной волны. В [9–11] показано, что в изогнутом канале время действия пламени непрерывно уменьшается с увеличением скорости его распространения. В работах [12, 13] сообщается о ключевой роли турбулентности в ускорении пламени и инициировании ударной волны. На ускорение пламени влияет также диаметр канала: чем он больше, тем выше скорость [14]. В заключение заметим, что большинство результатов по распространению детонации в угольных шахтах получено в предположении одномерного канала без изгибов. Детального описания детонации газа в канале с разветвлениями до сих пор нет. Между тем исследование и экспериментальное моделирование аварий со взрывом газа показывают, что разрушения в канале с ветвлением более серьезные и отличаются от разрушений в неизогнутом канале. Поэтому как с теоретической, так и с практической точки зрения важно изучать характеристики газовой детонации в разветвленном канале. В некоторых старых угольных шахтах распределение штреков весьма сложное, с большим количеством разветвлений. Последствия детонации здесь могут быть очень серьезными. Для предотвращения таких ситуаций и контроля над ними необходима разработка рекомендаций и предупредительных мероприятий. В данной работе экспериментально и теоретически исследовано распространение пламени и ударной волны при

© Ye Q., Jia Z. Z., 2014.

School of Energy & Safety Engineering, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China.

взрыве газа в канале с ветвлением.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1 (см. также [15]).

Для моделирования разветвленного штрека в лаборатории был разработан канал с ветвлением. Эксперименты по взрыву газа выполняли как в неизогнутом, так и в ветвящемся канале. Размер поперечного сечения каналов  $80 \times 80$  мм. Измеряли скорость пламени и избыточное давление во взрывной волне. Схема канала с ветвлением показана на рис. 2. Т-образное соединение каналов находилось на расстоянии 4 м от торца, с которого проводилось инициирование взрыва. Длина каналов  $T_1$  и  $T_2$  была 6 и 1.4 м соответственно. В силу ограниченности пространства для проведения эксперимента исследовали только варианты с открытыми и закрытыми торцами каналов  $T_1$  и  $T_2$ . Размещение датчиков пламени вдоль канала показано на рис. 2. После измерения ими скорости распространения пламени датчики удаляли и на их месте располагали датчики давления для измерения избыточного давления во взрывной волне. Спиральное ускоряющее кольцо устанавливали в месте инициирования в каждом эксперименте.

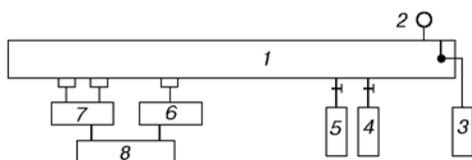


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования взрыва газа:

1 — канал, в котором производится взрыв газа, 2 — вакуумный манометр, 3 — устройство для инициирования взрыва, 4 — вакуумный насос, 5 — система подачи газа, 6 — система измерения давления, 7 — система измерения скорости пламени, 8 — система сбора и анализа данных



Рис. 2. Схема расположения датчиков в месте ветвления канала

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Данные о скорости распространения пламени и избыточном давлении во взрывной волне приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Значения в них являются средним арифметическим повторяющихся экспериментов при одинаковом положении датчиков.

Анализ результатов, представленных в табл. 1, показал следующее.

(1) При открытых торцах скорость распространения пламени в канале  $T_1$  возрастает перед точкой ветвления. Однако возрастание не столь велико и примерно соответствует увеличению скорости в неизогнутом канале при тех же условиях. Характеристики распространения в канале  $T_1$  подобны характеристикам в неизогнутом канале при тех же условиях. За точкой ветвления скорость пламени резко возрастает, причем со значительно большим ускорением, чем в неизогнутом канале при тех же условиях.

(2) При закрытых торцах скорость распространения пламени в канале  $T_1$  повышается перед точкой ветвления, что примерно соответствует ситуации в неизогнутом канале при тех же условиях. Характеристики распространения в канале  $T_1$  подобны характеристикам в неизогнутом канале при тех же условиях. Ско-

Таблица 1  
Скорость распространения пламени при взрыве газа в разветвляющемся канале

Датчик	$L/D$	Скорость, м/с		
		неизогнутый канал	разветвленный канал	
			$T_1$	$T_2$
1	47	235.2	241.6	241.6
		166.3	173.4	173.4
2	52	276.6	282.3	282.3
		167.5	175.6	175.6
3	54	298.9	300.9	305.6
		143.2	141.6	149.5
4	60	367.9	398.6	414.3
		89.3	110.3	115.6
5	70	391.6	419.7	426.5
		2.4	3.2	3.8

Примечание. Цифра над чертой — канал с открытыми торцами, под чертой — канал с закрытыми торцами.

рость пламени в точке ветвления слегка уменьшается, за этой точкой резко возрастает до пикового значения и затем уменьшается до нуля на расстоянии, примерно равном расстоянию до выхода.

Итак, бифуркация канала приводит к увеличению скорости распространения пламени.

Данные табл. 2 свидетельствуют о следующем.

(1) При открытых торцах избыточное давление в волне увеличивается в канале  $T_1$  перед точкой ветвления. Степень этого возрастания невелика и примерно соответствует такому же в неизогнутом канале при тех же условиях. Характеристики распространения в канале  $T_1$  подобны характеристикам в неизогнутом канале при тех же условиях. За точкой ветвления избыточное давление продолжает расти вплоть до расстояния, примерно равного расстоянию до выхода, причем это увеличение заметно больше, чем в неизогнутом канале при тех же условиях. Избыточное давление в канале  $T_2$  больше, чем в канале  $T_1$ .

(2) При закрытых торцах избыточное давление в волне увеличивается в канале  $T_1$  перед точкой ветвления. Степень его возрастания не так велика и примерно соответствует увеличению давления в неизогнутом канале при тех же условиях. Характеристики распространения в канале  $T_1$  подобны характеристикам в неизо-

гнутом канале при тех же условиях. За точкой ветвления избыточное давление резко увеличивается, причем заметно больше, чем в неизогнутом канале при тех же условиях. Некоторое время рост давления сохраняется, однако скорость нарастания уменьшается и становится примерно равной скорости роста давления в неизогнутом канале. На выходе из каналов  $T_1$  и  $T_2$  пик избыточного давления достигает максимума. Избыточное давление в канале  $T_2$  больше, чем в канале  $T_1$ .

Итак, разветвление канала приводит к увеличению избыточного давления во взрывной волне.

На рис. 3 видно, что поверхность  $CBD$  можно рассматривать как клиновидное препятствие, которое появляется по центру канала. Таким образом, точку  $B$  можно считать источником возмущения. В то же время пространство за точкой ветвления резко расширяется. Таким образом, мы имеем дело с резко расширяющимся каналом с клиновидным препятствием. Распространение взрыва в газе в разветвляющейся трубке испытывает влияние этих двух факторов — резкого расширения потока и наличия препятствия. Согласно работам [6–8, 16–21] наличие быстрого расширения увеличивает интенсивность турбулентности и скорость горения. После того как взрывная волна в газе проходит точку бифуркации, пламя и волна детонации входят в канал  $T_2$ , сжимают и нагревают газ, что приводит к его взрыву.

Поток газа, пройдя поверхность  $CBD$ , разделяется, и в зоне разделения возникает вихрь под влиянием возмущения в точке  $B$ . Образуются свободные сдвиговые слои вдоль поверхностей  $BC$  и  $BD$ . Взаимодействие свободного сдвигового слоя с вихрем увеличивает интенсивность турбулентности потока газа и является причиной различия скорости горения и скорости течения газа, что вынуждает фронт закручиваться и приводит к возникновению воз-

Таблица 2

Избыточное давление в ударной волне при взрыве газа в разветвляющемся канале

Датчик	$L/D$	Избыточное давление, $1,01 \cdot 10^5$ Па		
		неизогнутый канал	разветвленный канал	
			$T_1$	$T_2$
1	47	0.75	0.72	0.72
		0.92	0.91	0.91
2	52	0.823	0.813	0.813
		1.035	0.996	0.996
3	54	0.847	1.123	1.341
		1.085	1.351	1.486
4	60	1.012	1.231	1.375
		1.214	1.472	1.526
5	70	0.751	0.962	0.996
		1.463	1.748	1.794

Примечание. Цифра над чертой — канал с открытыми торцами, под чертой — канал с закрытыми торцами.

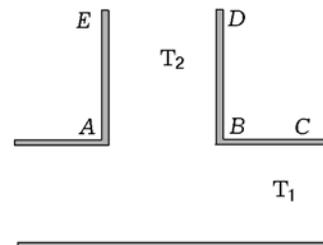


Рис. 3. Схема ветвления канала

мушений поверхности фронта. Вследствие резкого расширения канала и воздействия препятствия фронт пламени сначала расширяется и вытягивается, затем закручивается и его поверхность становится неровной, что ведет к быстрому увеличению площади фронта. Деформация фронта пламени способствует более полному взаимодействию газа с кислородом вследствие более однородной диффузии между ними. Поэтому скорости горения и тепловыделения увеличиваются, и скорость распространения пламени растет.

Большая скорость горения вызывает ускорение расширения продуктов горения и усиливает интенсивность волны сжатия. В то же время взрывная волна нагревает и сжимает смесь несгоревших газов на фронте пламени, и возникают новые возмущения. Таким образом, градации поля течений увеличиваются, пламя вызывает всё большие деформации и в результате растут кинетическая энергия турбулентности и скорость горения. Если этот процесс продолжается, между течением газа и процессом горения возникает положительная обратная связь, которая увеличивает скорость пламени и скорость тепловыделения. Кроме того, влияние отражения и дифракции ударной волны на поверхности *CBD* еще больше усложняет картину распространения ударной волны. Множество отраженных волн и волн дифракции достигают зоны реакции за фронтом ударной волны, что приводит к резкому увеличению скорости реакции и скорости энерговыделения. Как следствие, это может обеспечить большее количество энергии для распространения ударной волны и увеличить ее интенсивность. Горючая смесь перед фронтом пламени может быть дополнительно сжата и нагрета за счет роста интенсивности ударной волны. Поэтому формируется положительная обратная связь между течением газа, ударной волной и фронтом пламени.

Понятно, что увеличение скорости пламени при взрыве газа в разветвляющемся канале является следствием взаимного влияния взрывной волны, турбулентности и теплового эффекта. Следовательно, необходимо избегать разветвлений штрека, так же как следует исключить возможность возникновения препятствий. Если без ветвлений невозможно обойтись, необходимо принять соответствующие превентивные меры в соответствии с характеристиками взрыва газа, чтобы подавить распространение

взрывной волны и уменьшить интенсивность взрыва.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Канал в месте ветвления можно считать резко расширяющимся и имеющим здесь препятствие в виде клина. Распространение взрыва газа происходит под влиянием обоих этих факторов.

2. Действие избыточного давления в ударной волне и скорости пламени на взрыв газа в разветвляющемся канале носит сложный характер. Распространение взрыва газа представляет собой взаимодействие ударной волны, пламени и сложного течения. Избыточное давление в ударной волне и скорость пламени резко увеличиваются в точке бифуркации, и поверхность канала в месте бифуркации достаточно сильно разрушается.

3. Разветвления канала могут инициировать турбулентность, приводить к закручиванию фронта и возникновению возмущений на поверхности фронта. Очевидно, что это увеличивает площадь поверхности пламени и скорость тепловыделения. В то же время ветвление канала может индуцировать ударную волну и увеличить ее интенсивность.

4. Диаметр канала и условия на торце канала (открытый или закрытый) сильно влияют на скорость распространения пламени и избыточное давление в ударной волне.

5. Следует избегать ветвлений штрека и накопления в канале препятствий. Если не удастся этого сделать, необходимо принять соответствующие предупредительные меры в соответствии с характеристиками распространения взрывной волны в газе.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (гранты 51004048, 51374003).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bartknecht W., He H. D., Weng D. Q. Explosions: Course, Prevention, Protection. — Beijing, China: Chem. Ind. Press, 1985.
2. Phylaktou H., Andrews G. E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle // Combust. Flame. — 1991. — V. 85, N 3-4. — P. 363–379.
3. Ibrahim S. S., Masri A. R. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration // J. Loss Prevent. Proc. — 2001. — V. 14, N 3. — P. 313–221.

4. **Васильев А. А., Дроздов М. С., Хидиров С. Г.** Неклассические режимы дифракции волн в горючих смесях // Физика горения и взрыва. — 2006. — V. 42, № 6. — С. 137–143.
5. **Vasil'ev A. A.** Modes of a detonation and high-speed burning in channels with perforated walls // Proc. of the Second Intern. Seminar, Inst. for Fire Protection. — Moscow, 1998. — P. 582–592.
6. **Lin B. Q., Zhou S. N., Zhang R. G.** Influence of barriers on flame transmission and explosion wave in gas explosion // J. China Univ. Min. Technol. — 1999. — V. 28, N 2. — P. 104–107.
7. **Lin B. Q., Jian C. G., Zhou S. N., Ru A. P.** Influence of reflected wave of gas explosion on flame transmission in confined space // J. China Univ. Min. Technol. — 2005. — V. 34, N 1. — P. 1–5.
8. **Xie B., Fan B. C., Wang K. Q., Xia Z. Z.** Experimental study of flame acceleration and overpressure induced by baffle // J. China Coal Soc. — 2002. — V. 27, N 6. — P. 627–630.
9. **Xia C. J., Zhou K. Y., Shen Z. W., Dong Y. X., Nian W. M., Wang H. L.** Experimental study on the propagation characteristics of unsteady gaseous detonation through 90° round bend // J. Exp. Mech. — 2002. — V. 87, N 2. — P. 87–92.
10. **Wang H. L., Zhou K. Y., Xia C. J.** Experimental studies of the propagation of detonation waves through the bends // Fire Sci. — 2001. — V. 10, N 4. — P. 209–212.
11. **Wang C. Y., He X. Q.** An experimental study of flame thickness in gas explosion // Explos. Mater. — 2001. — V. 30, N 2. — P. 28–32.
12. **Liu Q. M., Fan B. C., Li H. Z.** Study on the production and acceleration of shock wave induced by combustible suspension dust // Chin. J. Comput. Phys. — 1997. — V. 14, N 3. — P. 290–296.
13. **Chen Z. H., Fan B. C., Liu Q. M., Li H. Z.** Experimental study on the phenomenon of two phase explosion in a large tube // Exp. Measur. Fluid Mech. — 1998. — V. 12, N 1. — P. 44–49.
14. **Xu J. D., Zhou X. Q., Wu B.** Study on the size effect in the propagation of gas explosion in mine pit // China Safety Sci. J. — 2001. — V. 11, N 6. — P. 36–40.
15. **Ye Q.** Propagation characteristics of gas explosion in limited space. — Xuzhou, Jiangsu: China Univ. Min. Technol. Press, 2012.
16. **Wager H. G.** Some experiments about flame propagation // Intern. Conf. on Fuel-Air Explosions. Montreal, Que., 1981. — Waterloo, Ont.: Univ. of Waterloo Press, 1982. — P. 77–99.
17. **Lee J. H., Knystautas R., Chan C. K.** Turbulent flame propagation in obstacle-filled tubes // Proc. Combust. Inst. — 1985. — V. 20, N 1. — P. 1663–1672.
18. **Lin B. Q., Zhou S. N., Zhang R. G.** The inducing condition of shock waves in gas explosion // J. Exp. Mech. — 1998. — V. 13, N 4. — P. 463–468.
19. **Lin B. Q., Zhang R. G., Lv H. H.** Research on accelerating mechanism and flame transmission in gas explosion // J. China Coal Soc. — 1999. — V. 24, N 1. — P. 56–59.
20. **Ye Q., Jia Z. Z., Lin B. Q.** The analysis on flame acceleration mechanism of gas explosion propagation in duct // Safety Coal Mines. — 2008. — N 1. — P. 78–80.
21. **Ye Q., Lin B. Q., Jiang C. G., Jia Z. Z.** Propagation characteristics of gas explosion in duct with sharp change of cross sections // Disaster Adv. — 2012. — V. 5, N 4. — P. 999–1003.

*Поступила в редакцию 31/V 2013 г.,  
в окончательном варианте — 6/IX 2013 г.*