

УДК 534.222.2

ДЕФИЦИТ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ И РАДИУС КРИВИЗНЫ ГИБКИХ ДЕТОНИРУЮЩИХ ШНУРОВ

Ю.-Ц. Вэнь, Я.-К. Е, Н. Янь

Государственная лаборатория взрывных процессов и технологий Пекинского технологического института, 100081 Пекин, Китай, yeYaokun@163.com

Исследовано возникновение дефицита скорости детонации в изогнутых детонационных шнурах вследствие эффекта обтекания угла детонационной волной и эффекта задержки времени распространения. Физическая модель и уравнение для определения дефицита скорости построены с использованием метода анализа размерностей. По экспериментальным данным получена полуэмпирическая формула для определения дефицита скорости в детонирующих шнурах одного размера. Показано, что дефицит скорости детонации и величина, обратная радиусу кривизны, связаны экспоненциальной зависимостью.

Ключевые слова: дефицит скорости детонации, гибкий детонирующий шнур, радиус кривизны, время задержки.

ВВЕДЕНИЕ

Гибкий детонирующий шнур (ДШ) широко применяется для улучшения работы нежестких многоточечных синхронизированных взрывных контуров, которые используются в боеголовках направленного действия и взрывных цепях. Чем точнее синхронизирован выход детонационной волны из детонирующего шнура, тем эффективнее работа взрывного контура [1, 2]. Согласно результатам исследований по разработке боеголовок с элементами, формируемыми взрывом [3], при несинхронности выхода детонационных волн из детонирующих шнуров, большей 100 нс, хвостовое оперение таких боеголовок становится несимметричным, что ухудшает стабильность в полете. При проектировании нежестких взрывных контуров следует учитывать, что детонирующие шнуры должны принимать различную форму, чтобы удовлетворить требованиям конструкции боеголовки. В ряде исследований [4–6] показано, что изгиб детонирующего шнура приводит к дефициту скорости детонации и в конечном счете к ошибкам в синхронизации многоточечных взрывных контуров. Поэтому изучение дефицита скорости детонации изогнутых детонирующих шнуров является не просто интересной проблемой, но и необходимо в связи с недо-

статком теоретического базиса при их практическом применении.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ

В работе [4] тестировалось время срабатывания прямого и изогнутого гибкого ДШ в различных условиях. Показано, что время срабатывания изогнутого шнура больше, чем прямого. Это явление названо эффектом времени задержки [7]. Суть его состоит в эффекте обтекания угла детонационной волной [8, 9]: детонационная волна, проходя поворот изогнутого шнура, оказывается нестационарной [10, 11] и в результате возникает дефицит скорости детонации, что в конечном счете и ведет к эффекту времени задержки.

На рис. 1 показаны два шнура одинаковой длины: изогнутый (OA) и прямой (OB). Прохождение детонации по изогнутому шнуру OA можно рассматривать как процесс распространения по непрерывным поворотам. На появление дефицита скорости детонации в изогнутом шнуре влияют следующие факторы:

1) геометрические параметры изогнутого ДШ: толщина оболочки Δ , ее плотность ρ_s , радиус кривизны R ;

2) функциональные параметры заряда в изогнутом шнуре: плотность заряда ρ , диаметр заряда d , его критический диаметр d_{cr} , скорость детонации прямого заряда D , коэффициент расширения продуктов детонации β ;

© Yu-Quan Wen, Yao-Kun Ye, Nan Yan., 2012.

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China.

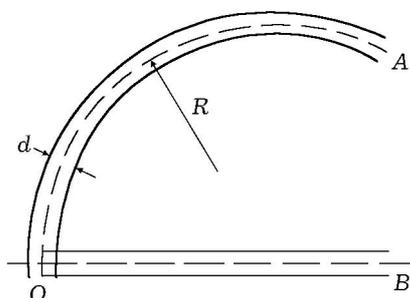


Рис. 1. Прямой и изогнутый детонационные шнуры

3) такие внешние факторы, как скорость звука c_s и давление воздуха p , можно не учитывать ввиду наличия оболочки.

Дефицит скорости детонации для изогнутого шнура δ_D может быть представлен на основе анализа размерностей [6, 12] в виде

$$\delta_D = f(\rho_s, c_s, R, d_{cr}, \rho, \Delta, d, D, \beta). \quad (1)$$

Используя параметры d_{cr} , ρ , D как масштабы в (1), получаем

$$\frac{\delta_D}{D} = f\left(\frac{d_{cr}}{d}, \frac{d_{cr}}{R}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{c_s}{D}, \frac{d_{cr}}{\Delta}, \beta\right). \quad (2)$$

В случае, когда конструкция детонационного шнура фиксирована, параметры ρ_s/ρ , c_s/D , d_{cr}/Δ , β могут рассматриваться как константы, что позволяет упростить выражение (2):

$$\frac{\delta_D}{D} = \left(\frac{d_{cr}}{d}\right)^m f_1\left(\frac{d_{cr}}{R}\right). \quad (3)$$

Для шнура одного и того же размера материал оболочки и параметры заряда d , d_{cr} , D постоянны, и выражение (3) преобразуется к виду

$$\frac{\delta_D}{D} = n f_1\left(\frac{1}{R}\right). \quad (4)$$

Здесь величина n связана с d и d_{cr} . Для выражения (4) существуют два граничных условия:

1) если исходить из предположения, что R_{cr} является критическим радиусом кривизны, при котором еще возможно устойчивое распространение детонации в изогнутом шнуре, то при $R < R_{cr}$ процесс распространения будет прерван ввиду слишком большого дефицита скорости детонации. Поэтому при $R \rightarrow R_{cr}$ дефицит скорости детонации стремится к максимуму и величина $n f_1(1/R)$ в (4) принимает максимальное значение;

2) при $R \rightarrow \infty$ детонационный шнур можно рассматривать как прямую линию с отсутствием какого-либо дефицита скорости, в этом случае значение $n f_1(1/R)$ в (4) близко к нулю.

Исходя из указанных выше ограничений, можно предполагать, что

$$n f_1\left(\frac{1}{R}\right) = a \left[1 - \exp\left(-\frac{b}{R}\right)\right], \quad a, b > 0. \quad (5)$$

С учетом (5) выражение (4) может быть записано в виде

$$\frac{\delta_D}{D} = a \left[1 - \exp\left(-\frac{b}{R}\right)\right]. \quad (6)$$

При $R \rightarrow R_{cr}$ для уравнения (5) имеем $\delta_D/D = a$ ($0 < a \leq 1$); при $R \rightarrow \infty$ — $\delta_D/D \rightarrow 0$, т. е. оба случая соответствуют условиям, определенным выше, поэтому соотношение между δ_D/D и $1/R$ определяется величинами a и b ($0 < a \leq 1$, $b > 0$).

Для того чтобы получить величины a и b , необходимо одновременно определить дефицит скорости детонации для шнуров с одними и теми же параметрами заряда, но с разными радиусами кривизны и, используя данные теста, решить уравнение (6). После этого можно получить полуэмпирическую формулу для изогнутых шнуров с одними и теми же параметрами заряда.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Поскольку дефицит скорости детонации приводит к росту времени срабатывания изогнутого шнура по сравнению с прямым шнуром такой же длины, значение дефицита скорости для шнуров различного радиуса изгиба может быть рассчитано исходя из их известной длины и времени задержки в них. Следовательно, соотношение между дефицитом скорости и радиусом кривизны можно получить на основании уравнения (6) путем подгонки аппроксимирующей кривой к экспериментальным данным.

Для проведения экспериментов было сконструировано устройство, названное «один на шесть» [4], которое позволяло после подрыва входного заряда инициировать одновременно несколько шнуров (рис. 2). Время детонации каждого из них определялось по взрыву выходных зарядов. При постановке эксперимента в устройстве использовался один прямой шнур и пять шнуров с радиусами кривизны 5, 10, 15,

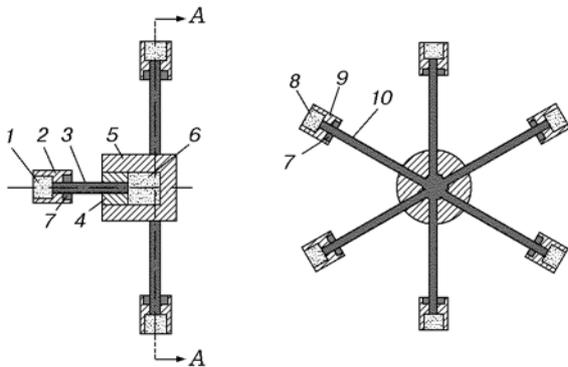


Рис. 2. Синхронизирующий модуль разветвления «один на шесть»:

1 — входной инициирующий заряд, 2 — входной узел сопряжения, 3 — входной детонирующий шнур, 4 — уплотнитель, 5 — переходная муфта «один на шесть», 6 — промежуточный заряд, 7 — склейка, 8 — выходной заряд, 9 — выходной узел сопряжения, 10 — выходные детонирующие шнуры, равномерно распределенные по окружности

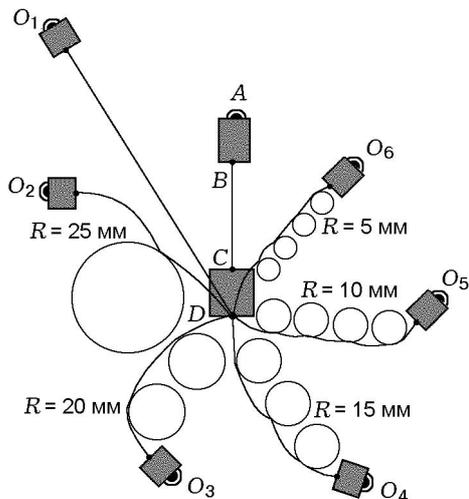


Рис. 3. Схема взрывного контура «один на шесть»

20 и 25 мм, которые образовывали цилиндрическую поверхность соответствующего радиуса. Схема устройства и его реальный вид показаны на рис. 3, 4. На рис. 3 AB , BC , CD соответствуют входному инициирующему заряду, входному детонирующему шнуру и промежуточному заряду. Точка D — место соединения шести выходных шнуров: AO_1 , AO_2 , AO_3 , AO_4 , AO_5 , AO_6 . Основные параметры детонирующих шнуров промежуточных инициирующих зарядов приведены в табл. 1.

Обычно для определения времени сраба-



Рис. 4. Фотография экспериментального контура

тывания различных взрывных устройств используются линии типа включено — выключено [13], поэтому для регистрации времени детонации в данных экспериментах одна такая линия присоединялась к точке A , чтобы зарегистрировать время старта, а шесть других — к точкам $O_1 \div O_6$ для регистрации времени окончания процесса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Было проведено три эксперимента, в которых регистрировалось время срабатывания каждого шнура во взрывном контуре «один на шесть». Результаты представлены в табл. 2. Из этих данных видно, что время срабатывания всех изогнутых шнуров больше, чем прямого (AO_1), и чем больше кривизна шнура, тем больше время детонации в нем.

Если считать, что скорость детонации промежуточных зарядов равна скорости детонации прямого шнура, то осредненная скорость детонации D прямого отрезка ДШ может быть получена путем деления суммарной длины шнуров и промежуточных зарядов (отрезок AO_1) на среднее время t_{AO_1} из табл. 2: $D = 7954.6$ м/с. Тогда среднее время детонации всех промежуточных зарядов на каждой взрывной линии равно 7.54 мкс. На основе этих данных можно установить истинные значения времени детонации t , средней скорости D' и дефицита скорости δ_D изогнутого шнура при различных радиусах кривизны (табл. 3).

Для того чтобы получить значения величин a и b в (6), использовались значения δ_D/D

Таблица 1
 Параметры детонирующих шнуров и инициирующих зарядов во взрывном контуре

Компонент	Марка	d , мм	Масса, мг	L , мм	ρ , г/см ³
Входной шнур	Ю-6	1	95	50	1.68
Выходной шнур	Ю-6	1	285	150	1.68
Входной заряд	Ю-9С	3.6	65	4	1.70
Промежуточный заряд	Ю-9С	5.0	156	4.7	1.70
Выходной заряд	Ю-9С	3.6	33	2	1.70

Таблица 2
 Время срабатывания детонирующих шнуров

Номер опыта	t_{AO_1} , мкс	t_{AO_2} , мкс	t_{AO_3} , мкс	t_{AO_4} , мкс	t_{AO_5} , мкс	t_{AO_6} , мкс
1	26.42	26.9	26.51	26.78	26.88	27.01
2	26.73	26.45	26.93	27.14	27.18	27.26
3	26.05	26.36	26.4	26.44	26.39	26.46
Среднее	26.4	26.57	26.61	26.79	26.82	26.91

Таблица 3
 Чистое время детонации шнуров
 с различными радиусами кривизны

R , мм	t , мкс	D' , м/с	δ_D , м/с
25	19.03	7882.3	72.3
20	19.07	7865.8	88.8
15	19.25	7792.2	162.3
10	19.28	7780.1	174.5
5	19.37	7743.9	210.6

Таблица 4
 Значения величин δ_D/D и $1/R$
 для каждого радиуса кривизны

R , мм	$1/R$	δ_D/D
25	$40 \cdot 10^{-3}$	$9.08 \cdot 10^{-3}$
20	$50 \cdot 10^{-3}$	$11.16 \cdot 10^{-3}$
15	$66.7 \cdot 10^{-3}$	$20.41 \cdot 10^{-3}$
10	$100 \cdot 10^{-3}$	$21.93 \cdot 10^{-3}$
5	$200 \cdot 10^{-3}$	$26.48 \cdot 10^{-3}$

и $1/R$ для каждого радиуса кривизны, приведенные в табл. 4. Кривая, аппроксимирующая данные табл. 4, имеет вид

$$\frac{\delta_D}{D} = 0.02989 \left[1 - \exp \left(- \frac{12.1501}{R} \right) \right] \quad (7)$$

(рис. 5).

Из сравнения выражений (6) и (7) следует, что $a = 0.02989$, $b = 12.1501$, оба эти значения удовлетворяют ранее наложенным ограничениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлено физическое обоснование возникновения дефицита скорости детонации в изогнутых гибких детонационных

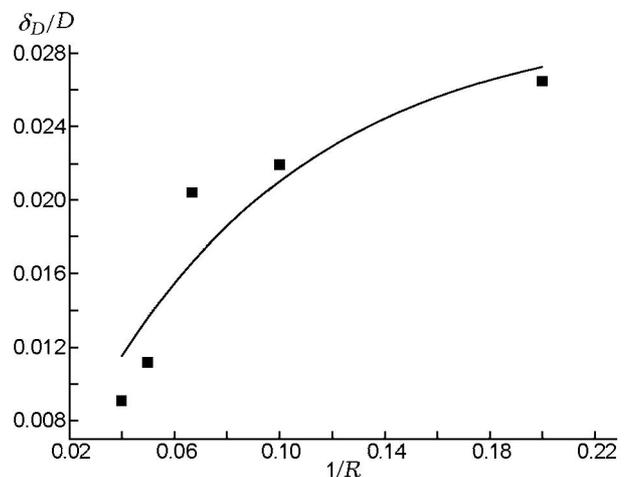


Рис. 5. Аппроксимирующая кривая для данных табл. 4

шнурах и проведено исследование этого эффекта методом анализа размерностей. Разработано экспериментальное устройство для проведения экспериментов по определению дефицита скорости в шнурах с различными радиусами кривизны. На основе теоретического анализа и экспериментальных данных получена полуэмпирическая формула для расчета дефицита скорости детонации в шнурах с одним и тем же размером заряда. Она показывает, что значение дефицита скорости детонации для изогнутых детонационных шнуров зависит главным образом от их радиуса кривизны; соотношение между дефицитом скорости детонации и обратным радиусом определяется экспоненциальной зависимостью. Гибкие детонационные шнуры должны быть или прямыми, или с одинаковым радиусом кривизны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bai Ying-wei, Zhang Rui, Li Zhe, Zhou Xiao-bin, Wang Ke-xuan, Chu En-yi.** Design on mild multi-point synchronous explosive circuit // J. of Energetic Mater. [in Chinese]. — 2009. — N 2.
2. **Wen Yu-quan, Jiao Qing-jie, Lu bing.** Structural design and time analysis of synchronous explosive circuit in rigid eccentric circumferential lines // Acta Armamentarii [in Chinese]. — 2003. — N 2.
3. **Luo Jian, Jiang Jian-wei, Zhu Bao-xiang.** The effect of multile-point initiation on the explosively formed penetrator formation // J. Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance [in Chinese]. — 2004. — V. 24, N 2. — P. 27–29.
4. **Ye Yao-kun, Wen Yu-quan, Yan Nan.** Study on delay time of detonation wave of curving flexible detonating fuse // Initiators and Pyrotechnics [in Chinese]. — 2009. — N 4.
5. **Wang Shu-shan, Jiao Qingjie, Feng Chang-gen, Chen Lang, Wan Shi.** Detonation velocity deficits in a curved charge of the finite size // J. of Beijing Institute of Technology [in Chinese]. — 1994. — S1.
6. **Li Xiao-gang, Wen Yu-quan, Jiao Qing-jie, Jia Ning-bo.** Detonation velocity deficits of superfine desensitized HMX charged in curve limited channel // Chinese J. of Energetic Mater. [in Chinese]. — 2009. — N 3.
7. **Li Xiao-gang, Jiao Qing-jie, Wen Yu-quan.** Delay time of detonation wave of superfine insensitive HMX charged in limited corner channel // Chinese J. of Energetic Mater. [in Chinese]. — 2008. — N 5.
8. **Held M.** Detonation wave's corner effects // Chinese J. of Energetic Mater. [in Chinese]. — 2000. — N 3.
9. **Cox M., Campbell A. W.** Corner-turning in TATB // 7th Intern. Symp. on Detonation. — 1981. — P. 624–633.
10. **Li Shensg-cai, Feng Chang-gen, Zhao Tong-hu.** The influence of the angle of convex corner on the effect of detonation waves // Chinese J. of Explosion and Shockwaves [in Chinese]. — 1999. — V. 19, N 2. — P. 289–294.
11. **Liu Ju-peng.** Studies and Application of the Detonation Wave Turning around a Corner [in Chinese]. — Beijing: Beijing Inst. of Technology, 1991.
12. **Tan Qing-ming.** Dimension Analysis [in Chinese]. — Univ. of Science and Technology of China Press, 2005.
13. **Li Guo-xin, Cheng Guo-yuan, Jiao Qing-jie.** Explosive Initiator Experiment and Testing Technology [in Chinese]. — Beijing: Beijing Inst. of Technology Press, 1998.

*Поступила в редакцию 10/III 2011 г.,
в окончательном варианте — 9/VIII 2011 г.*