

Shock induced bubble explosions in liquid cyclohexane

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Konstantinos Mitropetros
aus Pireas, Griechenland

Von der Fakultät III – Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieur-Wissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. G. Fleischer
Berichter: Prof. Dr.-Ing. J. Steinbach
Berichter: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. B. Plewinsky

Tag der wissenschaftlichen Aussprache:
14. April 2005

Berlin 2005

Abstract in English

In this work the influence of shock waves on organic liquids with and without bubbles is investigated. The experiments were performed in a new experimental setup with the help of high speed photography and pressure measurements. The apparatus consisted of a cylindrical autoclave with a bubble generator at its bottom. For the creation of a detonation wave a tube was installed on the top of the autoclave.

The following parameters were varied: The distance between neighboring bubbles, the composition of the gaseous mixture inside the bubbles, the initial pressure of the system, the initial bubble size, and the organic liquid (cyclohexane, 2-ethylhexanal, cumene, and methanol).

Two different types of bubble explosion were observed. Their main difference is the length of their ignition delay. The bubble explosion type I takes place during the first oscillation after the shock wave impact. Further important results about this type of explosion refer to:

- the explosion range in relation to the composition of the gas mixture within the bubble as well as to the initial bubble size.
- the direct ignition of a bubble by a shock wave emitted by a nearby bubble explosion. Such a phenomenon is experimentally observed for the first time.
- the shock induced ignition of gas bubbles containing an initially non explosive fuel-lean gas mixture. Optical recordings of jet penetration into the bubble prove that shock wave induced enrichment in vapor of the surrounding liquid is an important stage before the ignition.
- the observation of bubble explosion type I in all the investigated liquids.
- the mechanism of bubble explosion type I.

The bubble explosion type II takes place with much longer ignition delay. It was observed under certain conditions only. An explosion mechanism is proposed on the basis of the experimental results. According to this mechanism, even non explosive fuel-rich gaseous bubbles can become explosive due to partial condensation of the fuel.

A further group of results refer to cavitation phenomena inside the liquid and to shock induced phenomena on the surface. Additionally, the explosion limits of gaseous cyclohexane in pure oxygen at elevated pressures and temperatures were determined.

The safety engineering aspects of the experimental results are discussed.

Abstract in German

In dieser Arbeit wird der Einfluss von Stoßwellen auf organische Flüssigkeiten mit und ohne Gasblasen untersucht. In einer neu aufgebauten Apparatur wurden Untersuchungen mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitsfotografie und mit Druckmessungen durchgeführt. Die Apparatur bestand aus einem zylindrischen Autoklav mit einem Blasegenerator an seinem Boden. Zur Erzeugung einer Detonationswelle war oberhalb des Autoklavs eine Rohstrecke angeflanscht.

Die folgenden Parameter wurden variiert: Die Entfernung zwischen benachbarten Gasblasen, die Zusammensetzung der Gasmischung in den Blasen, der Anfangsdruck des Systems, die Anfangsgröße der Blasen und die organische Flüssigkeit (Cyclohexan, 2-Ethylhexanal, Cumol und Methanol).

Zwei verschiedene Typen von Blasenexplosionen wurden beobachtet. Ihr Hauptunterschied ist die zeitliche Verzögerung der Zündung. Die Blasenexplosion des Typs I findet während der ersten stoßinduzierten Blasenschwingung statt. Folgende Ergebnisse bzw. Aussagen wurden erhalten:

- Die Explosionsgrenzen hinsichtlich der Zusammensetzung der Gasmischung innerhalb der Blase und der Anfangsgröße der Gasblase wurden ermittelt.
- Die Stoßwelle, die bei der Explosion einer Blase erzeugt wird, kann einer Nachbarblase zünden. Ein derartiger Zündmechanismus wurde erstmalig in der vorliegenden Arbeit beobachtet.
- Gasblasen, die eine anfangs nicht explosionsfähige, magere Gasmischung enthielten, können durch Stoßwellen gezündet werden. Optische Aufzeichnungen von Flüssigkeitsjets in der Gasblase zeigen, dass auf diese Weise eine stoßinduzierte Anreicherung mit Dampf unmittelbar vor der Zündung stattfindet.
- Blasenexplosionen des Typs I wurden in allen untersuchten Lösemitteln festgestellt.
- Der Mechanismus von Blasenexplosion des Typs I wurde beschrieben.

Die Blasenexplosion vom Typ II findet mit einer viel längeren Zündverzögerung statt. Sie wurde nur unter bestimmten Bedingungen beobachtet. Ein Explosionsmechanismus wurde auf der Basis der Beobachtungen vorgeschlagen. Nach diesem Mechanismus können sogar Gasblasen, die anfangs eine nicht explosionsfähige, brennstoffreiche Gasmischung enthalten, durch teilweise Kondensation des Brennstoffs explosionsfähig werden.

Weitere Untersuchungen beziehen sich auf Kavitationsphänomene innerhalb der Flüssigkeit und auf die Wechselwirkung zwischen der Flüssigkeitsoberfläche und einer Stoßwelle. Ferner wurden die Explosionsgrenzen von Cyclohexan in reinem Sauerstoff bei erhöhten Drücken und Temperaturen bestimmt.

Die sicherheitstechnischen Aspekte der Versuchsergebnisse werden diskutiert.