

Diss. ETH Nr. 6954

**Elektrische Funken  
und explodierende Drähte  
als Zündquellen  
brennbarer Methan-Luftgemische**

Abhandlung

zur Erlangung des Titels eines

Doktors der Technischen Wissenschaften

der

Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

vorgelegt von

FILIP Alexandr

dipl. Ing.-Chem. TH Prag

geboren am 1. Januar 1943

in der Tschechoslowakei

Angenommen auf Antrag von

Prof. M. Berchtold, Referent

Prof. Dr. T. H. Erismann, Korreferent

1982

## 9. Zusammenfassung

Zunächst wird eine Versuchsapparatur beschrieben, die experimentelle Vergleiche der Zündwirkung elektrischer Funken mit derjenigen explodierender Drähte gestattet. Diese Apparatur eignet sich ebenfalls zur Bestimmung der Zündgrenzen brennbarer Gasgemische bei einem Anfangsdruck bis zu 1 MPa (10 bar) und einer Anfangstemperatur von 20<sup>0</sup>C (es ist vorgesehen, das Zündgefäß mit einer elektrischen Heizung zu versehen, so dass die Anfangstemperatur bis auf etwa 200<sup>0</sup>C erhöht werden kann). Zur Hauptsache besteht die Einrichtung aus einem zylindrischen Zündgefäß, einem Zündgerät und Messgeräten, die sowohl die Zündenergie als auch den Druckverlauf während der Verbrennung messen und registrieren. Die Zündung und die Verbrennung kann überdies visuell und/oder photographisch durch eine durchsichtige Polyester-Berstmembrane am Zündgefäß beobachtet bzw. registriert werden.

Mit dieser Ausrüstung wurden vergleichende Messungen an elektrischen Funken und explodierenden Drähten durchgeführt, um die Ursachen der unterschiedlichen Zündwirkung dieser beiden Arten von Zündquellen näher zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Messung des zeitlichen Leistungsverlaufes und der umgesetzten Energie in der Zündquelle,
- Registrierung der durch die schnelle Expansion der überhitzten Luft bzw. des Metallplasmas ausgelösten sphärischen Stosswellen in Funktion des Abstandes von der Zündquelle,
- photographischer Vergleich der Zündquellen hinsichtlich ihrer Grösse, Helligkeit und Wirkungsdauer unter Einschluss von Aufnahmen im nahen Infrarot-Bereich zwischen 800 und 950 nm sowie mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (8000 Bilder/s) im sichtbaren Bereich,
- Vergleich der Zündwirkung bei der Einleitung einer deflagrativen Verbrennung in Methan-Luftgemischen bei einer Anfangstemperatur von 20<sup>0</sup>C und barometrischem Anfangsdruck.

Die erforderlichen Vergleichskriterien wurden aus dem zeitlichen Druckverlauf der Verbrennung hergeleitet. Ergänzend wurde die Zündwirkung der genannten Zündquellen mit derjenigen glühender Platindrähte von 0.5 mm Durchmesser und einer Länge von 10 und 100 mm verglichen. Dabei wurde die zur Zündung des Gasgemisches erforderliche Drahttemperatur in Abhängigkeit von der Gaszusammensetzung mittels eines Faden-Pyrometers gemessen.

Die Ergebnisse der Experimente deuten darauf hin, dass der Zündvorgang eines brennbaren Gasgemisches in erster Linie durch die Wärme bestimmt wird, die von der Zündquelle auf das Gasgemisch übertragen wird. Die sphärische Stosswelle, die bei einer Funkenentladung oder einer elektrisch ausgelösten Drahtexplosion entsteht, spielt dabei nur eine sekundäre Rolle, indem sie eine Expansion der Zündquelle und damit eine Vergrößerung der wärmeübertragenden Fläche bewirkt. Die erste instabile Flamme, die sich während des Zündvorganges bildet, kann sich demzufolge etwas schneller zu einer Flammenfront mit annähernd konstanter Verbrennungsgeschwindigkeit entwickeln.

Die Ergebnisse der Versuche wurden mit rechnerischem "Hot-spot"-Modell der erzwungenen Zündung brennbarer Gase verglichen, wobei eine gute qualitative Übereinstimmung festgestellt werden konnte.

Abschliessend wurde die untere Zündgrenze von Methan-Luftgemischen bei barometrischem Anfangsdruck und einer Anfangstemperatur von 20°C ermittelt. Wiederum wurden dabei explodierende Drähte mit elektrischen Funken gleicher Energie verglichen. Im Blickpunkt stand in erster Linie der Einfluss von Drahtmaterial und Drahtdurchmesser auf die Lage der unteren Zündgrenze. Als Vergleichskriterien dienten der maximale Druck und die maximale Druckerhöhungsgeschwindigkeit während der Verbrennung. Explodierende Wolframdrähte von 0.045 mm Durchmesser erwiesen sich als die wirksamste Zündquelle unter den gegebenen Umständen, und zwar nicht nur im Vergleich mit Wolframdrähten von 0.1 mm Durchmesser und Kupferdrähten verschiedener Durchmesser, sondern auch verglichen mit elektrischen Funken. Ferner wurde im untersuchten Energiebereich (1J bis 4J) kein Einfluss der Zündenergie auf die Lage

der unteren Zündgrenze festgestellt. Die unterschiedliche Zündwirkung elektrischer Funken und explodierender Drähte bei der Bestimmung der Zündgrenzen brennbarer Gasgemische ist nicht nur auf die verschiedene Wärmeleitung von der Zündquelle aus in das Gas zurückzuführen; es ist auch eine hemmende Wirkung des stark ionisierten Kupferdampfes auf die Radikalbildung während des Zündvorganges zu erkennen.

## Summary

Test equipment was set up allowing an experimental comparison of the ignition effect of electric sparks and exploding wires. This equipment is also suited for a determination of flammability limits of combustible gas mixtures at 20°C and pressures up to 10 bar. The arrangement consists of a cylindrical vessel, an ignition apparatus and measuring instruments which can determine the energy of the ignition sources as well as the pressure variations during combustion in the vessel. The ignition and combustion can also be observed by photography or visually through a transparent burst membrane.

Comparative measurements were performed for the purpose of finding the cause of the different ignition effects of electric sparks and exploding wires. The following experiments were carried out:

- measurement and recording of the power function during the discharge and the resulting ignition energy,
- measurement and recording of the spherical shock waves which are created due to an expansion of air or metal plasma after electric discharges,
- photographic comparison of electric sparks and exploding wires by means of a high speed camera (8000 frames/s) and infrared photographs (800-950 nm wave length),
- comparison of the ignition effect of these two sources by instigation of a deflagration in methane-air-mixtures at 20°C and atmospheric pressure.

The criteria for the comparison of the ignition effect were derived from the pressure changes during the combustion of the gas in the vessel. In addition to these experiments, an investigation was made concerning the ignition effect of glowing platinum wires of 0.5 mm diameter and 10 mm resp. 100 mm length. The temperature of the platinum wires was measured

by a pyrometer.

The resulting experimental data show that the ignition of combustible gases is determined mainly through heat which is conducted from the ignition source into the gas. The spherical shock waves are of secondary importance for the ignition. They cause the expansion of the ignition source and thus promote the heat conductivity into the gas.

These conclusions were compared with a hot-spot model of the ignition. A good qualitative agreement between this mathematical model and the experimental results was found.

Finally the lower flammability limit of methane-air-mixture under conditions of atmospheric pressure and temperature was determined by means of electric sparks and exploding wires of the same ignition energy. The influence of wire material and wire diameter on the ignition effect was investigated. As criterion the maximum pressure and the maximum pressure rate during the combustion in the vessel were used. Exploding tungsten wires of 0.045 mm diameter proved to be the most efficient ignition source under the given conditions, not only compared with tungsten wires of 0.1 mm diameter and copper wires of various diameters, but also in comparison with electric sparks of the same ignition energy. It appears that the different ignition effects depend not only on the heat conductivity from the ignition source into the gas, but also on the inhibition effect of ionized copper vapour on the radical reactions during the ignition. Within the ignition energy range investigated (1 J to 4 J), the lower flammability limit was found not to depend upon the ignition energy.