



European Train the Trainer Programme for Responders

Lezione 8

Sorgenti di innesco e la loro prevenzione

Livello I

Vigile del Fuoco

Le informazioni contenute in questa lezione sono rivolte al livello **Vigile del Fuoco**

La lezione è disponibile anche ai livelli III e IV

La lezione fa parte del materiale didattico per i livelli I – IV : Vigile del Fuoco, Capo Squadra, Funzionario di Guardia e Specialista. L'introduzione della lezione riporta le competenze e aspettative di apprendimento

Nota: il materiale è proprietà del Consorzio HyResponder e dovrebbe essere riconosciuto conformemente; gli output del progetto HyResponse sono stati utilizzati come materiale di riferimento



Dichiarazione di limitazione di responsabilità

Nonostante l'attenzione prestata durante la preparazione di questo documento, si applica la seguente dichiarazione di limitazione delle responsabilità: le informazioni in questo documento vengono fornite così come sono e non viene fornita alcuna garanzia che le informazioni siano adatte ad uno scopo particolare. L'utente utilizza le informazioni a suo esclusivo rischio e responsabilità.

Il documento riflette solo le opinioni degli autori. La FCH JU e l'Unione Europea non sono responsabili per qualsiasi uso che possa essere fatto delle informazioni ivi contenute.

Disclaimer

Despite the care that was taken while preparing this document the following disclaimer applies: the information in this document is provided as is and no guarantee or warranty is given that the information is fit for any particular purpose. The user thereof employs the information at his/her sole risk and liability.

The document reflects only the authors' views. The FCH JU and the European Union are not liable for any use that may be made of the information contained therein.

Ringraziamenti

Il progetto è stato finanziato dal Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) con il grant agreement N. 875089. Il JU riceve supporto dal programma di ricerca ed innovazione European Union's Horizon 2020 ed il Regno Unito, Francia, Austria, Belgio, Spagna, Germania, Italia, Repubblica Ceca, Svizzera, Norvegia.

Acknowledgements

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (now Clean Hydrogen Partnership) under Grant Agreement No 875089. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program, Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.

Sommario

L'idrogeno è facilmente infiammabile grazie all'energia minima di accensione (MIE) più bassa tra i combustibili conosciuti. Spesso è difficile stabilire l'esatta sorgente di innesco dell'idrogeno e determinarne il meccanismo specifico. Questa lezione offre una panoramica degli incidenti e dei meccanismi di innesco dell'idrogeno.

Keywords

Energia minima di accensione (MIE), temperature di auto-ignizione, sorgenti di innesco, meccanismi di innesco.

Indice

Sommario	3
Keywords	3
1. Target audience.....	5
1.1 Descrizione del ruolo: Vigile del Fuoco	5
1.2 Livello di competenza: Vigile del Fuoco	5
1.3 Prerequisiti per l'apprendimento: Vigile del Fuoco	5
2. Introduzione ed obiettivi	6
3. Sorgenti di innesco	7
3.1 Innesco da scarica elettrostatica	8
3.2 Innesco meccanico	8
3.3 Innesco da superficie calda	8
4. Meccanismi di innesco dell'idrogeno	9
4.1 Energia minima di accensione (MIE).....	10
4.2 Temperatura di auto-ignizione	12
4.3 Accensione per diffusione	12
5. Accensione spontanea di un rilascio improvviso	13
5.1 Meccanismo di accensione per diffusione	13
6. Prevenzione dell'innesco dell'idrogeno.....	14
6.1 Controllo delle sorgenti d'innesco termiche e meccaniche.....	15
Bibliografia	16

Lezione 8: Sorgenti di innesco e la loro prevenzione

1. Target audience

Le informazioni contenute in questa lezione sono indirizzate al Livello 1: Vigile del Fuoco. Le lezioni sono anche disponibili per i livelli II, III e IV: Capo Squadra, Funzionario di Guardia e Specialista.

La descrizione del ruolo, livello di competenza e aspettative di apprendimento per il Vigile del Fuoco sono descritte di seguito.

1.1 Descrizione del ruolo: Vigile del Fuoco

Un vigile del fuoco si occupa e dovrebbe essere in grado di eseguire operazioni in sicurezza con dispositivi di protezione individuale (PPE), compresi respiratori (BA), utilizzando le attrezzature fornite, come veicoli, scale, manichette, estintori, strumenti di comunicazione e di soccorso, in qualsiasi condizione climatica in aree e situazioni di emergenza che ci si può realisticamente aspettare.

1.2 Livello di competenza: Vigile del Fuoco

Formazione nell'uso sicuro e corretto di PPE, BA e altre attrezzature che si prevede saranno utilizzate durante le operazioni di primo intervento. I soccorritori devono essere supportati da conoscenze e pratiche adeguate. I comportamenti che proteggeranno loro e gli altri colleghi dovrebbero essere descritti dalle procedure operative standard (SOP). È richiesta la capacità pratica di valutare dinamicamente il rischio per la propria sicurezza e degli altri.

1.3 Prerequisiti per l'apprendimento: Vigile del Fuoco

EQF 2 Conoscenza concreta di base del campo di lavoro o di studio. Abilità cognitive e pratiche di base necessarie per l'utilizzo di informazioni rilevanti al fine di svolgere compiti e risolvere problemi di routine utilizzando regole e strumenti semplici. Lavorare o studiare sotto supervisione con una certa autonomia.

2. Introduzione ed obiettivi

Questa lezione fornirà ai soccorritori le informazioni sulle possibili sorgenti di innesco dell'idrogeno e sui relativi meccanismi, inclusa l'accensione spontanea per meccanismo di diffusione durante un improvviso rilascio di idrogeno. La lezione copre le principali caratteristiche relative all'innesco della miscela idrogeno-ossigeno: energia di accensione minima, la sua dipendenza dalla concentrazione di idrogeno nella miscela, temperatura di auto-ignizione ed effetto della triboelettricità. Questa lezione descrive anche i metodi utilizzati per la prevenzione dell'innesco dell'idrogeno attraverso un'attenta valutazione della possibilità di accensione e l'eliminazione delle sorgenti di innesco.

Alla fine della lezione il soccorritore/allievo sarà in grado di:

- Riconoscere i diversi tipi di sorgenti di innesco;
- Identificare i meccanismi di accensione dell'idrogeno a seconda della sorgente di innesco;
- Confrontare i valori dell'energia minima di accensione (MIE) e della temperatura di auto-ignizione dell'idrogeno con quelli degli altri combustibili comuni;
- Illustrare la variazione di energia di accensione minima in funzione del contenuto di idrogeno nella miscela;
- Valutare le fasi di accensione spontanea di un improvviso rilascio di idrogeno;
- Riconoscere i mezzi per controllare le sorgenti di innesco dell'idrogeno;
- Indicare le principali misure di prevenzione di innesco dell'idrogeno.

3. Sorgenti di innesco

È difficile definire l'esatta sorgente di innesco dell'idrogeno a causa della bassa energia di accensione minima (MIE) dell'idrogeno. Pertanto, è spesso difficile distinguere cosa provoca esattamente l'accensione dell'idrogeno ed il meccanismo di accensione. Di seguito è riportato l'elenco delle possibili sorgenti di innesco.

Sorgenti elettriche:

- Scariche elettriche (es. da apparecchiatura elettrica)
- Scariche elettriche statiche (es. filtri per particolato senza messa a terra)
- Arco elettrico (es. interruttori, motori elettrici, telefoni cellulari, cercapersone e radio).
- Scariche atmosferiche (es. fulmine in prossimità del camino di sfiato)
- Carica elettrica generata da apparecchiature in funzione (compressori, generatori, veicoli, e altre apparecchiature della struttura)
- Cortocircuiti elettrici o altre apparecchiature elettriche
- Particelle cariche

Sorgenti meccaniche:

- Scintille meccaniche (da rapide chiusure di valvole)
- Scintille da attrito e/o urto
- Frattura del metallo
- Vibrazione meccanica e ripetuta flessione

Sorgenti termiche:

- Superfici calde (es. apparecchiature per il riscaldamento)
- Fiamme libere
- Getti caldi
- Gas esausti (es. da motori a combustione o camini per lo scarico dei fumi)
- Cariche esplosive (es. cariche usate nella costruzione, fuochi d'artificio o dispositivi pirotecnici)
- Catalizzatori, esplosivi o materiali reattivi chimicamente
- Onde d'urto e/o frammenti
- Onde di pressione o acustiche riflesse o ripetute

Altre sorgenti:

- Radiazione ionizzante (radioattività)
- Radiazione elettromagnetica
- Radiazione con ultrasuoni
- Raggi laser o flash
- Compressione adiabatica (aumento di pressione)

Lezione 8: Sorgenti di innesco e la loro prevenzione

È generalmente riconosciuto che i gas puri non si caricano elettrostaticamente in condizioni normali [3], ma questo si riferisce generalmente a basse velocità e pressioni. Quando i gas vengono rilasciati a pressioni molto elevate, il flusso diventa sonico e non è nota la propensione alla produzione di carica elettrostatica. È noto che i gas puri tendono a non caricarsi, ma che invece le particelle all'interno del flusso di gas si caricano elettrostaticamente [3].

Il percorso di scarica in molti casi pratici sarebbe probabilmente contorto e non in linea retta. Ciò richiederebbe che l'idrogeno si scarichi attraverso curve, il che potenzialmente consentirebbe ai materiali sulla superficie del percorso di scarico, ad es. tubazioni, di essere erose e formare particelle che potrebbero caricarsi elettrostaticamente [3].

3.1 Innesco da scarica elettrostatica

Esistono tre tipi principali di scariche elettrostatiche: scintilla, spazzola e corona [1]. Una *scarica a scintilla* è un singolo canale di plasma tra un conduttore ad alto potenziale e un conduttore messo a terra. Una *scarica a spazzola* è una scarica tra un isolante carico e un punto conduttore con messa a terra. Una *scarica a corona* è una scarica silenziosa, solitamente continua, con una corrente ma senza un canale plasma.

Gli studi intrapresi molti anni fa sugli sfiati dell'idrogeno nell'atmosfera hanno mostrato che l'accensione era rara durante il bel tempo, ma era più frequente durante i temporali, nevischio, nevicata e nelle notti fredde e gelate [1].

3.2 Innesco meccanico

Le proprietà rilevanti delle particelle metalliche o scintille per la loro capacità di provocare l'innesco di miscele infiammabili sono:

- Dimensioni
- Materiale
- Velocità
- Temperatura
- Numero
- Rateo e tempo di combustione

Esistono delle soglie di pressione di contatto metallo-metallo e velocità relativa per far sì che si producano scintille durante l'impatto, lo sfregamento o la molatura. Al di sopra della soglia, le particelle metalliche vengono rilasciate dal più debole dei due materiali. Generalmente, queste vengono prodotte solo quando la velocità relativa tra le due superfici supera 1 m/s [4].

3.3 Innesco da superficie calda

Questo fenomeno, comune per le miscele gas/vapore-aria più infiammabili, può essere descritto come segue: se l'ambiente circostante fornisce una temperatura sufficientemente elevata, il calore di combustione non può essere disperso alle superfici circostanti, consentendo alla reazione di ossidazione a catena di progredire [3].

4. Meccanismi di innesco dell'idrogeno

Nel 2007, Astbury e Hawksworth hanno pubblicato uno studio che analizza le statistiche degli incidenti con innesco dell'idrogeno e dei meccanismi associati [1]. Gli autori hanno rilevato segnalazioni di perdite di idrogeno ad alta pressione che si infiammano senza ragioni ovvie, e sono stati proposti diversi meccanismi di accensione. È stato sottolineato che nonostante ci siano stati molti casi di rilasci con seguente innesco, ci sono state anche segnalazioni di rilasci in cui non è avvenuta alcuna ignizione del gas. Per i casi in cui si sono verificate accensioni senza sorgenti di innesco evidenti, i meccanismi suggeriti sono piuttosto speculativi, mancando di un'analisi scientifica rigorosa. Questo lavoro ha identificato le lacune nella conoscenza dell'esatto meccanismo di innesco dei rilasci di idrogeno. I meccanismi che sono stati considerati da Astbury e Hawksworth [1] includono la generazione di carica elettrostatica, l'innesco meccanico, l'effetto Joule-Thompson inverso, l'accensione per diffusione, la compressione adiabatica improvvisa e l'innesco da superficie calda. Questi meccanismi saranno discussi di seguito nella presente lezione.

Analizzando il Major Hazard Incident Database Service dell'Health and Safety Executive (Regno Unito), Astbury e Hawksworth [1] hanno rilevato 81 incidenti che hanno coinvolto un rilascio di idrogeno. Di questi, solo per 4 casi è stato segnalato un ritardo tra il rilascio e l'accensione. Gli autori hanno presunto che in altri casi l'idrogeno sia stato innescato immediatamente. In 11 casi è stata identificata la sorgente di innesco, ma nei restanti, ovvero nell'86,3% degli incidenti, la sorgente d'innesco non era chiara. Per quanto riguarda i rilasci non di idrogeno, nell'1,5% dei casi non si è verificata ignizione, mentre nel 65,5% la sorgente d'innesco non è stata identificata. Ciò consolida la supposizione che ci sia una differente propensione all'accensione tra i rilasci idrogeno e gas non idrogeno. Di seguito vengono riportati alcuni incidenti esaminati da Astbury e Hawksworth [1]. Nel lavoro svolto da Nusselt, in Germania, sono state riportate diverse accensioni spontanee di rilasci di idrogeno a 2,1 MPa. In questi esperimenti, era stata notata una quantità di ossido di ferro (cioè ruggine) all'interno dei cilindri di stoccaggio anche se apparentemente asciutti, e inizialmente si è pensato alla possibilità di una carica elettrostatica. Tuttavia, gli esperimenti sui rilasci d'idrogeno tramite un lungo tubo con una restrizione ad "imbuto" non hanno mostrato accensioni, ad eccezione del caso in cui l'imbuto era ostruito da un coperchio di ferro. Il meccanismo non è stato compreso, quindi sono state intraprese ulteriori prove. Solo quando i test sono stati eseguiti al buio è stata osservata una scarica a corona. Quando l'idrogeno fuoriusciva da una flangia e il tubo veniva tamburellato per sollevare la polvere, la scarica della corona aumentava. In questo caso si è verificata un'accensione. Ulteriori ricerche hanno mostrato che quando venivano utilizzati fili di rame affilati per aumentare l'entità delle scariche a corona, l'accensione avveniva quando il filo era piegato rispetto alla direzione del gas, mentre non si verificava alcuna accensione quando il filo puntava nella direzione del flusso [1].

Un altro incidente riportato da Astbury e Hawksworth [1] riguarda un cilindro di stoccaggio dell'idrogeno collegato ad un apparato di laboratorio. Un tecnico di laboratorio ha forzato

Lezione 8: Sorgenti di innesco e la loro prevenzione

l'apertura (ha aperto la valvola) per ripulire la connessione e, quando lo ha fatto, il gas in uscita si è innescato immediatamente. Bond [5] ha attribuito questa ignizione al fenomeno dell'accensione per diffusione nel 1991. Sebbene in questo incidente non sia citata la pressione del gas, si può presumere che la pressione sia stata di 23 MPa, tipica per tali cilindri. Reider et al. [16] hanno testato il rilascio di una grande quantità di idrogeno per determinare i livelli di pressione sonora. L'idrogeno gassoso è stato rilasciato ad una pressione iniziale di 23,6 MPa e con una portata iniziale di 54,4 kg/s per un periodo di 10 s. Il gas è stato trasferito attraverso un tubo di diametro nominale di 200 mm e una valvola a sfera di diametro di 150 mm in un recipiente cilindrico dotato di un ugello convergente-divergente per lo sfiato nell'ambiente. Nel test in cui il gas non è stato innescato intenzionalmente, dopo 10 s la valvola di diametro 150 mm è stata chiusa e 3 s dopo aver iniziato a chiudere la valvola si è verificata l'accensione. I tre potenziali meccanismi di innesco esaminati erano: elettrificazione del gas, elettrificazione delle particelle nel gas, e particelle metalliche che abrasano una barra di metallo saldata intorno l'orifizio dell'ugello. Di questi, il primo è stato scartato poiché è noto che i gas puri hanno una carica elettrostatica trascurabile. È stato preso in considerazione il secondo meccanismo, ma il sistema era stato accuratamente pulito e spurgato con aria prima del test. Tuttavia, la velocità del gas rilasciato, 1216 m/s, era molto più alta rispetto a quella utilizzata in precedenza, quindi questo potenziale meccanismo poteva non essere scartato. Il terzo meccanismo è stato considerato come una possibilità in quanto la velocità di rilascio era elevata al punto da poter staccare le particelle e farle urtare sulla barra. Anche questo meccanismo deve essere considerato. Tuttavia, dopo l'innescò si è riscontrato che la barra era stata strappata ad un'estremità, e questo potrebbe essere stata una possibile sorgente d'innescò non inizialmente prevista. Inoltre, l'accensione spontanea "inaspettata" del rilascio di idrogeno in esperimenti su larga scala è stata riportata anche da Chaineaux et al. (1991) [6], Groethe et al. (2005) [7].

4.1 Energia minima di accensione (MIE)

L'Energia Minima di Accensione (MIE) dei gas e vapori infiammabili è il valore minimo dell'energia elettrica, immagazzinata nel circuito di scarica con una perdita nei conduttori il più piccola possibile, che (quando si scarica attraverso uno spinterometro) accende la miscela quiescente (calma/ferma) nella composizione più infiammabile. Una debole scintilla causata dalla scarica di elettricità statica da un corpo umano può essere sufficiente per accendere un qualsiasi combustibile [3]. Per una data composizione della miscela devono essere variati i seguenti parametri del circuito di scarica per ottenere le condizioni ottimali: capacità, induttività, tensione di carica, forma e dimensioni degli elettrodi nonché distanza tra gli elettrodi [4]. Oltre alla composizione della miscela, il MIE dipende da altri fattori come la pressione e la temperatura iniziali. Poiché la maggior parte delle sorgenti d'innescò genera più di 10 mJ, praticamente tutti i combustibili comuni si infiammano nella miscela con l'aria se la loro concentrazione supera il limite inferiore di infiammabilità (LFL). Le sorgenti d'innescò in grado di formare onde d'urto, ad esempio scariche di scintille ad alta energia e esplosivi, possono avviare direttamente la detonazione.

Lezione 8: Sorgenti di innesco e la loro prevenzione

Come mostrato in [Figura 1](#), l'idrogeno ha il MIE più basso rispetto ad altri combustibili: 0,017 mJ per le miscele idrogeno-aria e 0,0012 mJ per la miscela idrogeno-ossigeno (vedi lezione su "Proprietà dell'idrogeno rilevanti per la sicurezza"). Come accennato in precedenza, il MIE dipende dalla concentrazione di idrogeno nella miscela infiammabile (sia con l'aria che con qualsiasi altro ossidante). Per una data miscela combustibile e un tipo di innesco, esiste un'energia minima dipendente dalla concentrazione al di sotto della quale non si verifica l'accensione. Il MIE diventa infinito ai limiti di infiammabilità ([Figura 2](#)) delle miscele idrogeno-aria; entro tali limiti, l'energia di accensione varia di quasi tre ordini di grandezza.

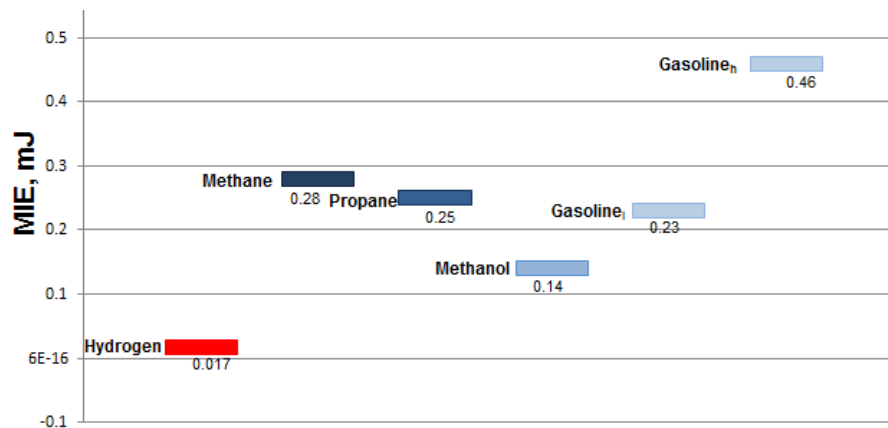


Figura 1. Valori del MIE per l'idrogeno ed altri combustibili - *Methane*: metano; *propane*: propano; *gasoline*: benzina.

Come mostrato nella [Figura 2](#), una sorgente con energia di accensione di 0,24 mJ non innescherà il metano o il propano ma innescherà una miscela di idrogeno e aria nell'intervallo di concentrazione da 6,5 a 58 vol. % di idrogeno. Una sorgente con energia di 1 mJ innescherà una miscela idrogeno-aria con un contenuto di idrogeno compreso tra 6 e 64 vol. %. Si noti che ai limiti dell'infiammabilità l'energia di accensione è in qualche modo simile per i tre combustibili. Il suo valore è relativamente alto rispetto al MIE e molte sorgenti di innesco sarebbero in grado di fornire questo livello di energia. È necessaria meno energia per innescare una miscela più vicina alla sua composizione stechiometrica.

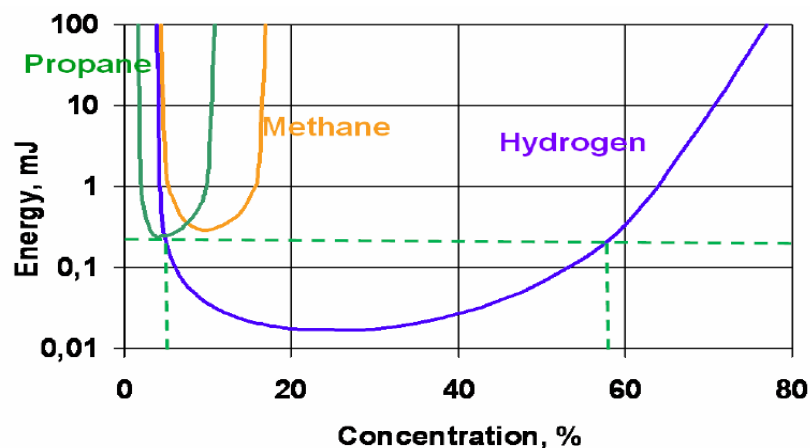


Figura 2. Energia di accensione in funzione della concentrazione del combustibile (idrogeno, propano o metano) nell'aria [8].

Lezione 8: Sorgenti di innesco e la loro prevenzione

L'energia immagazzinata come elettricità statica su un oggetto varia in funzione delle sue dimensioni e della sua capacità, della tensione a cui è caricato, e della costante dielettrica del mezzo circostante [3]. Per modellare l'effetto della scarica statica, un essere umano viene considerato come un condensatore di 100 picofarad (pF), caricato a una tensione dai 4.000 ai 35.000 volt. L'energia totale è dell'ordine dei millijoule (mJ). Gli oggetti più grandi immagazzineranno più energia. Questa energia viene tipicamente scaricata in meno di un microsecondo ed è sufficiente per accendere non solo miscele quasi stechiometriche ma anche miscele prossime ai limiti di infiammabilità. Alcuni materiali isolanti come legno, carta e alcuni tessuti formano tipicamente uno strato conduttivo che può prevenire l'accumulo di elettricità statica assorbendo acqua dall'aria in ambienti in cui l'umidità relativa è maggiore del 50% [9].

4.2 Temperatura di auto-ignizione

La temperatura di auto-ignizione è la temperatura minima necessaria per avviare una reazione di combustione di una miscela combustibile-ossigeno in assenza di una fonte di innesco esterna [3]. La temperatura di auto-ignizione standard dell'idrogeno nell'aria è superiore a 510 °C [10]. Questa è relativamente alta rispetto agli idrocarburi con molecole lunghe. Tuttavia, questa temperatura di auto-ignizione può essere ridotta da superfici catalitiche come il platino. Gli oggetti a temperature comprese tra 500 e 580 °C possono innescare miscele idrogeno-aria o idrogeno-ossigeno a pressione atmosferica. Gli oggetti sostanzialmente più freddi a circa 320 °C possono causare l'accensione dell'idrogeno in caso di contatto prolungato a una pressione inferiore a quella atmosferica [11]. La temperatura di accensione da getto d'aria calda è di 670 °C [12].

4.3 Accensione per diffusione

Il fenomeno dell'accensione per diffusione è stato analizzato da Wolanski e Wojcicki [13], che hanno dimostrato il verificarsi dell'accensione quando l'idrogeno ad alta pressione veniva immesso in uno “*shock tube*” riempito di aria o ossigeno. Hanno scoperto che l'accensione poteva essere ottenuta anche se la temperatura era inferiore alla temperatura di auto-ignizione dell'idrogeno.

5. Accensione spontanea di un rilascio improvviso

5.1 Meccanismo di accensione per diffusione

Negli ultimi decenni sono stati fatti molti tentativi per spiegare l'accensione spontanea di un rilascio improvviso, a partire dallo studio pionieristico di Wolanski e Wojcicki [13] sul cosiddetto “meccanismo di accensione per diffusione” come discusso nella [Sezione 4.3](#). I dati sperimentali hanno fornito le condizioni critiche di questo fenomeno. Sfortunatamente, non possono fornire una visione dettagliata delle dinamiche del processo. Ad esempio, l'esatta posizione dei punti di accensione iniziali e la progressione della reazione chimica all'interno dei tubi a valle di un disco di rottura (*burst disk*) o di una valvola possono essere difficilmente identificati con mezzi sperimentali ad elevate pressioni [3].

È opinione condivisa che la probabilità di accensione spontanea dell'idrogeno in caso di rilascio improvviso da apparecchiature ad alta pressione è relativamente alta se non sono in atto misure di mitigazione. Tuttavia, non ci sono riferimenti in codici e standard per quanto riguarda il problema dell'accensione spontanea o il design ingegneristico specifico per evitarlo o promuoverlo per le tubazioni, lo stoccaggio e l'uso di sistemi ad alta pressione che impiegano idrogeno compresso [3]. Il controllo dell'accensione spontanea nei rilasci di idrogeno ad alta pressione è una delle sfide nella sicurezza dell'idrogeno.

6. Prevenzione dell'innesco dell'idrogeno

Le sorgenti di innesco devono essere eliminate o isolate in modo appropriato e le operazioni sugli impianti FCH dovrebbero essere condotte come se potessero verificarsi sorgenti di ignizione impreviste. Devono essere previsti metodi di messa a terra per ridurre al minimo il rischio di scariche elettrostatiche e il rischio di fulmini in ambienti esterni. I materiali selezionati per l'uso in ambienti con idrogeno dovrebbero essere valutati per la loro capacità di scaricare l'elettricità statica. I materiali isolanti come legno, carta e alcuni tessuti in genere formano uno strato conduttivo che può prevenire l'accumulo di elettricità statica assorbendo l'acqua dall'aria in ambienti in cui l'umidità relativa è maggiore del 50%. Le pratiche consigliate per i metodi di messa a terra atti a prevenire le scariche statiche possono essere trovate in vari standard nazionali e internazionali che riguardano l'installazione di apparecchiature elettriche in ambienti pericolosi. Anche le apparecchiature elettriche selezionate per l'uso in ambienti con idrogeno possono essere sorgenti di scintille o generazione di calore, e occorre prestare attenzione a seguire gli standard elettrici nazionali e internazionali appropriati per l'installazione.

Esistono diversi modi per eliminare o almeno ridurre il rischio di accensione. L'Health and Safety Executive (UK) ha compilato l'elenco delle seguenti misure preventive [14]:

- Utilizzo di apparecchiature elettriche adeguate (ovvero le apparecchiature classificate per la zona in cui si trova). L'attrezzatura meccanica dovrebbe essere selezionata in modo simile.
- Messa a terra di tutte le apparecchiature con un impianto.
- Eliminazione delle superfici con temperatura superiore alla temperatura di auto-ignizione dei materiali infiammabili immagazzinati ed utilizzati.
- Fornitura di protezione contro i fulmini.
- Scelta corretta dei veicoli/motori a combustione interna che possono lavorare nell'area.
- Scelta corretta delle apparecchiature per evitare sorgenti di radiazioni elettromagnetiche ad alta intensità, ad es. limitazioni della potenza in ingresso dei sistemi in fibra ottica, evitamento di laser ad alta intensità o sorgenti di radiazioni infrarosse.
- Divieto di fumare/uso di fiammiferi o accendini.
- Controllo sull'uso dei normali veicoli.
- Controllo sulle attività che creano delle aree pericolose intermittenti, ad es. carico/scarico cisterna.
- Controllo delle attività di manutenzione che possono provocare scintille/superfici calde/fiamme libere tramite uno schema di autorizzazione al lavoro.

Lezione 8: Sorgenti di innesco e la loro prevenzione

- Precauzioni per il controllo del rischio da incrostazioni piroforiche, solitamente associate alla formazione di solfuro di ferro all'interno delle apparecchiature di processo.

6.1 Controllo delle sorgenti d'innesco termiche e meccaniche

L'accensione della miscela idrogeno-aria può essere causata da una superficie calda. Per l'idrogeno, la temperatura delle superfici calde o dei punti caldi non deve superare i 585 °C anche per pochi mm² secondo gli esperimenti condotti nell'ambito del progetto europeo MECHEX (si noti che la temperatura di auto-ignizione dell'idrogeno, 510 °C, è ancora inferiore a quella sopra specificata).

È preferibile la separazione fisica delle sorgenti d'innesco, come saldatura, fiamme o lavorazione a caldo.

L'innesco meccanico è generalmente il risultato di stress meccanico in condizioni anomale o di guasto (cioè sfregamento, molatura e impatto o una combinazione di questi fattori) e consiste solitamente in tre fasi: generazione di calore, trasferimento di calore all'ambiente esplosivo circostante ed infine l'accensione stessa [15]. Il controllo dell'innesco meccanico richiede un'attenta progettazione delle apparecchiature mediante uno dei seguenti mezzi:

- Limitazione della velocità di rotazione,
- Prevedere una distanza sufficiente tra parti fisse e rotanti,
- Posizionamento di sensori di temperatura.

L'energia prodotta dall'impatto può essere anche di un paio di Joule ed è sufficiente per accendere la miscela idrogeno-aria. Per evitare l'accensione per urto è necessario [15]:

- Utilizzare strumenti anti-scintilla appropriati,
- Spurgare l'idrogeno prima di qualsiasi intervento,
- Evitare il contatto tra alluminio e acciaio.

Le lavorazioni a caldo hanno somiglianze con l'innesco meccanico, anche se non generate da un guasto meccanico del processo ma da un'attività umana. È necessario prevenirne qualsiasi incidente derivante tramite [15]:

- Consegna del "permesso di lavoro a caldo",
- Formazione adeguata del personale interessato,
- Fornire un'adeguata attrezzatura antincendio,
- Interruzione dell'alimentazione del gas durante l'intervento,
- Spurgo dell'attrezzatura prima dell'intervento.

Bibliografia

1. Astbury, GR and Hawksworth, SJ (2007). Spontaneous ignition of hydrogen leaks: a review of postulated mechanisms. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, pp. 2178-2185.
2. Moorehouse, J, Williams, A and Maddison TE (1974). An investigation of the minimum ignition energies of some C1 to C7 hydrocarbons. *Combustion and Flame*. Vol. 23, pp. 203-213.
3. Molkov, V (2012). *Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II*. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
4. HyFacts Project. Chapter IM. Hydrogen ignition mechanisms. Prevention and mitigation of ignition. Available from: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/> [accessed on 23.11.20].
5. Bond, J (1991). *Sources of ignition: flammability characteristics of chemicals and products*. Oxford: Butterworth Heinemann.
6. Chaineaux, J, Mavrothalassitis, G and Pineau, J (1991). Modelization and validation of the discharge in air of a vessel pressurized by flammable gas. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Vol. 134, pp. 104-137.
7. Groethe, M, Merilo, E, Colton, J, Chiba, S, Sato, Y and Iwabuchi, H (2005). Large-scale hydrogen deflagrations and detonations, *Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety*, 8-10 September 2005, Pisa, Paper 120105.
8. Schmidchen, U (2009). Hydrogen safety facts and myths. 3rd International Short Course and Advanced Research Workshop “Progress in Hydrogen Safety”, Belfast, 27th April-1st May 2009, Northern Ireland, UK.
9. ISO/TR 15916 (2004). *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneva.
10. BRHS, Biennial Report on Hydrogen Safety (2009). The European network of excellence “Safety of hydrogen as an energy carrier” (NoE HySafe). Available from: www.hysafe.org [accessed on 23.11.20].
11. Baratov, AN, Korolchenko, AY and Kravchuk, GN (Eds.) (1990). *Fire and explosion hazards of substances and materials*. Moscow: Khimia. 496 p., ISBN 5-7245-0603-3 part 1, ISBN 5-7245-0408-1 part 2 (in Russian).
12. NASA (1997). *Safety standard for hydrogen and hydrogen systems. Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation*.

Lezione 8: Sorgenti di innesco e la loro prevenzione

Technical report NSS 1740.16, Office of safety and mission assurance, Washington. Available from: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf> was cancelled on July 25 2005 [accessed 13.05.14].

13. Wolanski, P and Wojcicki, S (1972). Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere. Proceedings of the Combustion Institute. Vol. 14, pp. 1217-1223.
14. Health and Safety Executive (2012). Hazardous Area Classification and Control of Ignition Sources. Available from: <http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasareaclas.htm> [accessed 23.11.20].
15. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. PhD thesis. University of Ulster.
16. Reider, R, Otway, HJ and Knight HT (1965). An unconfined large volume hydrogen/air explosion. Pyrodynamics. Vol. 2, pp. 249-261.