

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

# ***Aspetti Chimici della Propulsione Ibrida Aerospaziale***

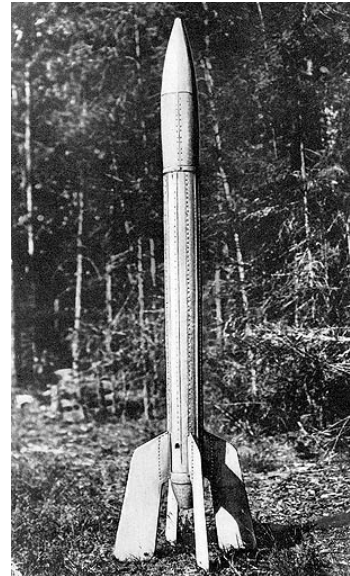
Relatore universitario: Prof.ssa Bertani

Laureando: *Cosimo Casotto*

Padova, 26/09/2023

## Argomenti trattati:

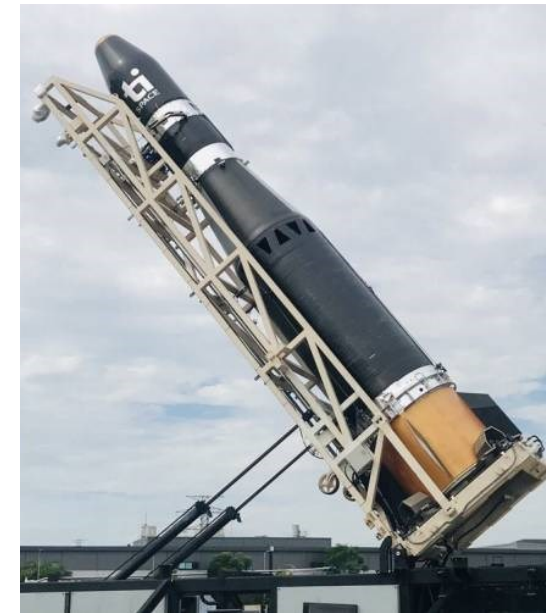
- La storia della propulsione ibrida
- I propellenti ibridi
- Vantaggi e svantaggi



Gird-09, Unione Sovietica, 1933



Spaceship 1, Virgin Galactic, 2004

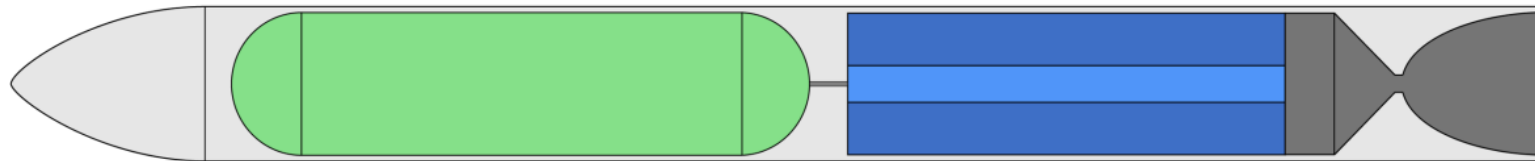


Hapith 1, TiSpace, Presente

- Storicamente: Benzina gelificata (Gird-09) e legno
- HTPB: combustibile più comunemente impiegato
- PE e HDPE
- Paraffina

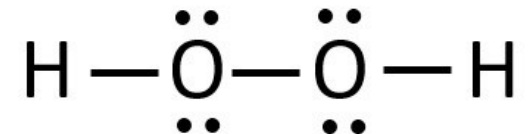
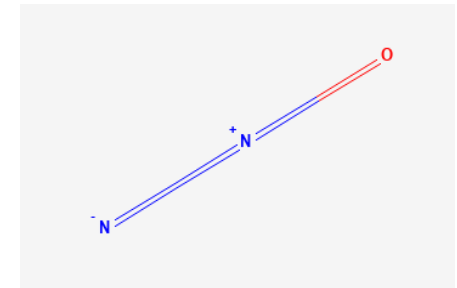


Polietilene



Ossidante (verde) e grano di combustibile (blu)

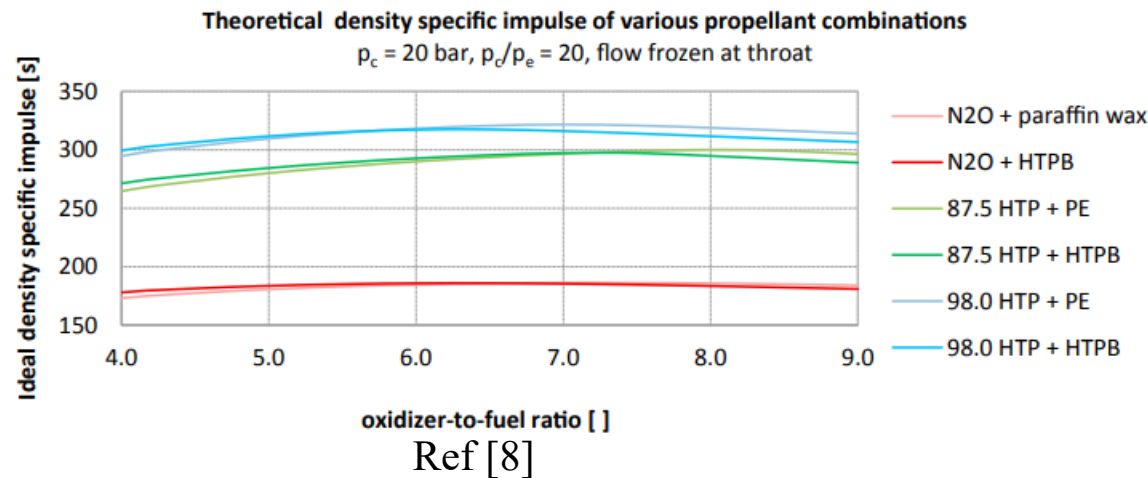
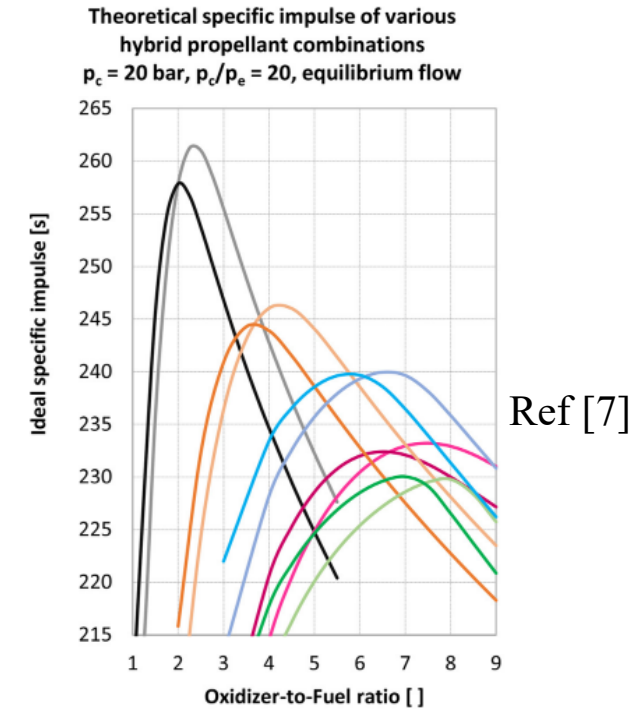
- Ossigeno (liquido)
  - Ossidante più performante. Alta densità di impulso specifico
  - Criogenico  $T = -183^{\circ}\text{C}$
  - Necessità di un sistema di accensione del motore, che in generale può essere utilizzato solamente una volta
- $\text{N}_2\text{O}$ 
  - T critica di  $36^{\circ}\text{C}$  e pressione di vapore di 51 bar a  $20^{\circ}\text{C}$ .
  - Serbatoi autopressurizzanti che permettono una maggiore semplicità
  - Pressione di vapore 31 bar a  $0^{\circ}\text{C}$  quindi i motori che utilizzano quest'ossidante necessitano di un sistema di controllo termico
  - Bassa densità di impulso specifico
- HTP - acqua ossigenata altamente concentrata  $>85\%$ 
  - Liquida a temperatura ambiente
  - Con la strumentazione adatta (taniche in materiale compatibile, ventilazione), diventa facilmente conservabile anche per lunghi periodi. Autodecomposizione 1% all'anno
  - Viene decomposta da un catalizzatore (argento o platino) a 900 - 1100K. Temperatura molto elevata e superiore della temperatura di accensione di tanti combustibili come HTPB. Non necessita sistema di accensione.



Oxidiser	Fuel	O/F	Specific impulse m/s	Density impulse kg/m <sup>2</sup> s
LOX	RP-1	2,5	3450	3,55*10 <sup>6</sup>
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 98%	HTBP	6,6	3200	4,34*10 <sup>6</sup>
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 98%	PE	7,2	3100	4,21*10 <sup>6</sup>
LOX	HTPB	2,5	3450	3,63*10 <sup>6</sup>
N <sub>2</sub> O	HTPB	8,5	3050	2,54*10 <sup>6</sup>

Ref [4]

Performance di propellenti ibridi in confronto con LOX/RP-1



Isp ideali calcolati a -30°C e a pressione in CC di 20 bar per varie combinazioni di propellenti ibridi

Feature	Advantages over	
	Liquids	Solids
System	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mechanically simpler</li> <li>• Less liquids – simpler injection, feed and control systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemically simpler (including fuel preparation process)</li> <li>• Restartable, throttle able</li> </ul>
Safety	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduced fire hazard</li> <li>• Less prone to hard starts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduced explosion hazard</li> <li>• Zero TNT equivalent</li> <li>• Able to stop</li> </ul>
Performance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Higher propellant density</li> <li>• Possible to improve performance by the addition of metals</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Higher performance</li> </ul>
Environment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comparable with RP-1/LOX</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Does not need any toxic and harmful propellant</li> </ul>

Ref [4]

## Propulsione Green

Un propellente si definisce “green” se ha basse caratteristiche di tossicità ed è facile da trasportare e conservare.




Rispetto ai propellenti liquidi e solidi, i propellenti ibridi sono correlabili a meno danni sia all’ambiente che a cose e persone.

I lanciatori spaziali hanno un’influenza trascurabile sull’atmosfera, specialmente nella troposfera, ma sono gli unici responsabili di inquinamento delle zone più elevate dell’atmosfera.

Strumenti di misura:

- GWP = Global Warming Potential. Indicatore di quanta radiazione infrarossa assorbirebbe un gas nell’atmosfera rispetto all’anidride carbonica.
- iRF = instantaneous radiative forcing. La differenza fra la quantità di radiazione solare assorbita dalla Terra e la radiazione infrarossa emessa dalla Terra dovuta alla presenza di un certo gas.

- Fumi prodotti:
- CO con GWP = 3
  - CO<sub>2</sub> con GWP = 1 e iRF = 4.9E-12 MW/m<sup>2</sup>
  - H<sub>2</sub>O con GWP = 0 e iRF = 1E-8 MW/m<sup>2</sup>

Oxidizer	NFPA 704 (safety) [95]	ADR (road transport)	IMDG (sea transport)	IATA (air transport)
LOX		allowed	allowed	forbidden
98% HTP		allowed	allowed	forbidden
N <sub>2</sub> O		allowed	allowed	allowed

Ref [7]

## Propellenti liquidi

RP-1 combustibile produce molti residui tra cui fuliggine e “carbone cotto”. I motori che lo utilizzano hanno una vita operativa ridotta.

L'idrazina utilizzata come combustibile ipergolico è estremamente tossica.

## Propellenti solidi

Basati sul perclorato di ammonio che è tossico ed inquinante. Producono CCP (Condensed combustion products).

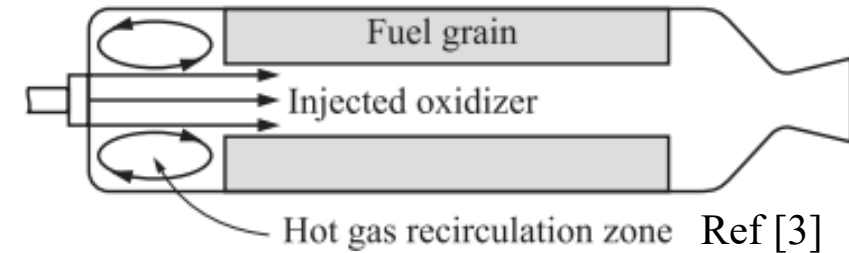
## Propellenti ibridi

Produzione di CCP soprattutto in condizioni “fuel rich” che si ottengono durante l'erosione del grano.

- N<sub>2</sub>O non cancerogeno e conservabile con contenitori compatibili
- HTP non tossica e conservabile con contenitori compatibili



## Regression Rate Basso



$$\dot{r} = a G_{ox}^n$$

In cui  $a$  e  $n$  vengono detti "coefficienti balistici" e dipendono in generale solo dalla composizione dei propellenti. Dipendono dalla pressione in camera di combustione solo in presenza di additivi o di grano solido di ossidante (motore ibrido inverso).

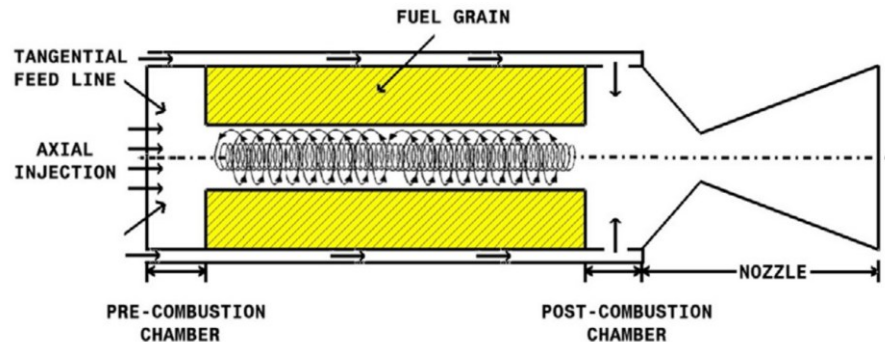
Fuel	a	n	Range $\dot{r}$ [mm/s]
Polyethylene	0,104	0,352	0,35 – 0,7
Plexiglas	0,111	0,377	0,4 – 0,8
HTPB	0,198	0,310	0,6 – 1,0
Parafine	0,488	0,62	0,5 – 4,5

Ref [4]

$$T = \dot{m}V_e + (p_e - p_0) A_e$$

- Difficoltà di interazione e contatto tra ossidante e grano di combustibile
- "Wall blowing effect" : l'ossidante crea uno strato limite che interferisce con la penetrazione dell'ossidante nel grano

- **Additivi nel grano:**
  - L'aggiunta di particelle (2-5  $\mu\text{m}$ ) di composti di alluminio o di magnesio può aumentare lo scambio di calore radiativo. I composti favorevoli risultano essere gli idruri per la de-idrogenazione. Tuttavia gli studi condotti fino ad ora al Politecnico di Milano e dalla US Air Force hanno mostrato che l'aggiunta degli additivi nel grano non porta a grandi risultati ( $\dot{r} \sim 1 \text{ mm/s}$ ).
- **Iniettori vortex, grani multi-port e diaframmi**
  - Sono strategie volte ad aumentare l'area di contatto, la turbolenza in camera e l'interazione tra i propellenti. Il vortex consente all'ossidante di aderire meglio alla parete del grano e diminuire il "blowing effect". Le geometrie multi-port permettono una superficie di contatto più estesa ma lasciano molto grano residuo.



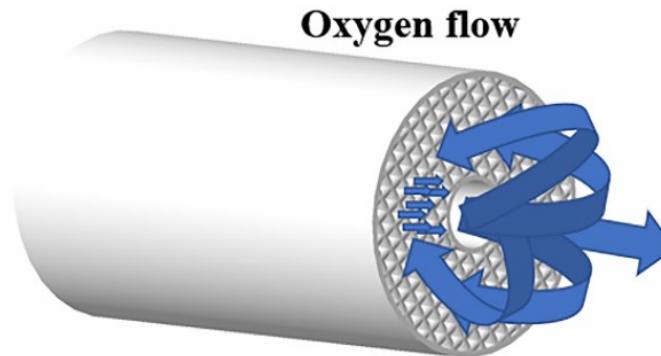
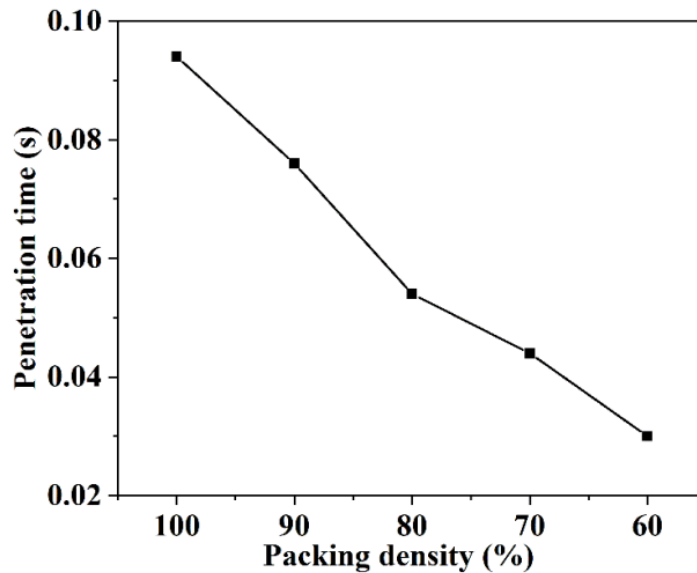
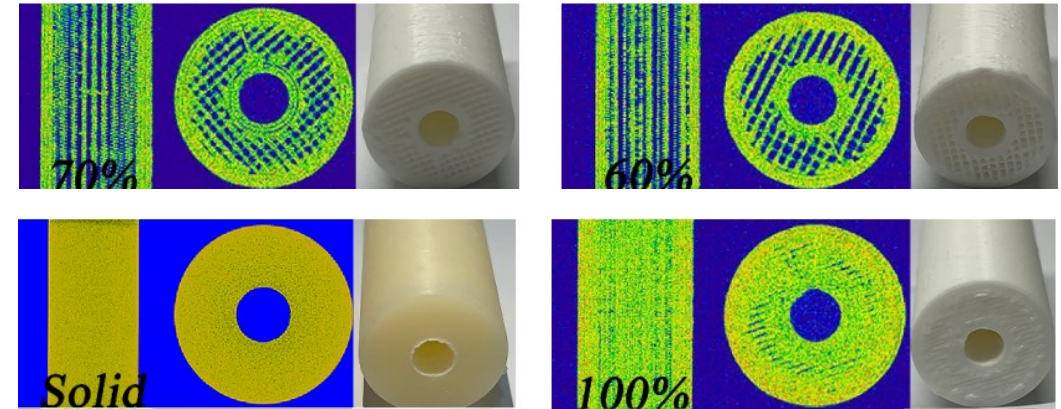
Ref [14]



Ref [8]

## ADDITIVE MANUFACTURING

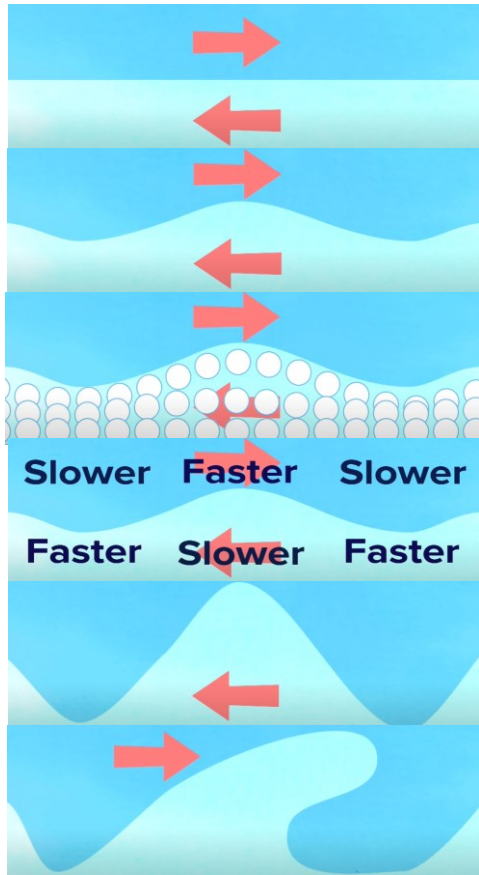
- Geometrie elicoidali
- Materiali compositi (PPB1 ABS+LDPE)
- Stampi per grani con geometrie complesse
- Strutture di supporto per grani di paraffina
- Grani porosi da uno studio di Xiaodong et al. : stampando grani con densità di “impaccamento” dal 60% fino al 100% è stato visto che i grani meno densi erodono più velocemente.



1. Accensione e penetrazione nel grano.
2. Frattura e separazione
3. Combustione prolungata

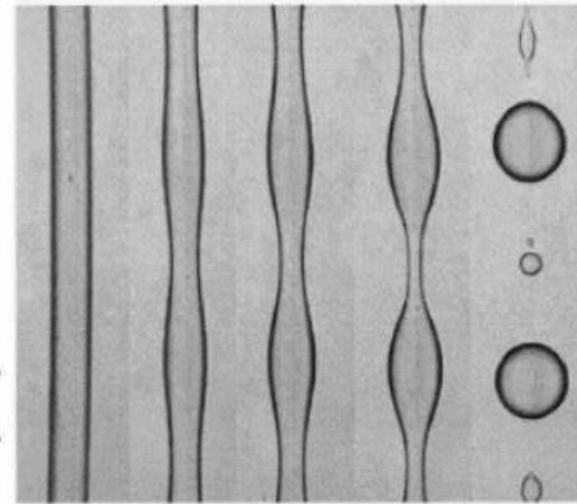
## LA PARAFFINA

Si crea uno strato di paraffina liquida sul grano in cui si manifestano instabilità di Kelvin-Helmholtz e di Plateau-Raleigh.



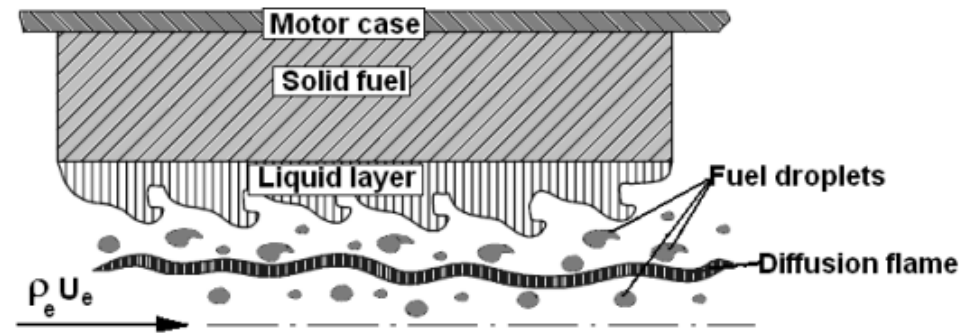
K-H

Ref [18]



P-R

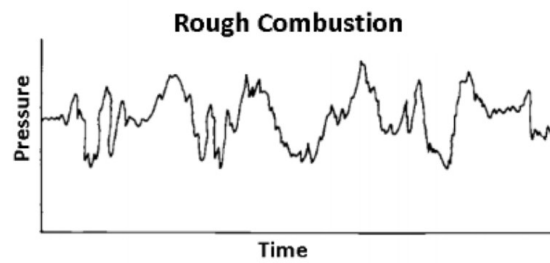
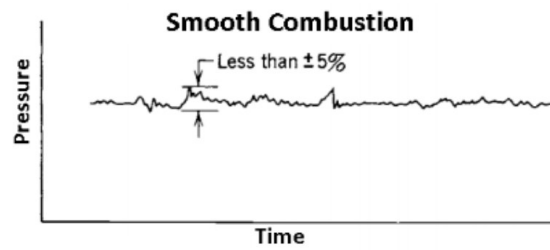
La somma delle due tipologie di instabilità dà origine al fenomeno dell' "entrainment": la paraffina sciolta viene dissociata in piccole goccioline che si aggiungono al flusso di ossidante aumentando il regression rate e la spinta del motore. Si ottengono così, regression rate fino a 0,5 cm/s.



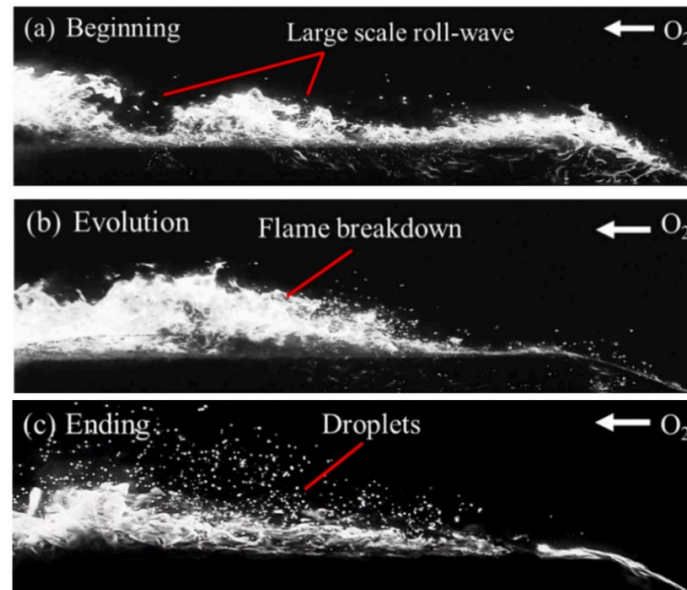
Ref [4]

Si ha l'instabilità di combustione quando i processi di combustione in un motore, non sono ben controllati. L'instabilità porta ad oscillazioni della pressione in camera di combustione.

- Rough combustion : oscillazioni di  $\pm 5\%$  della pressione media.
- Smooth combustion : oscillazioni inferiori a  $\pm 5\%$  della pressione media.



Ref [20]



Ref [6]

Non sono molto rilevanti per un motore ibrido e sono causate dalla flessibilità della linea di ossidante (vibrazioni), e dall'instabilità della fiamma. In particolare, per i grani di paraffina i cicli di accumulo e di entrainment sono accompagnati da oscillazioni della pressione.

1. Propulsione ibrida come opzione per il futuro
  1. Propulsione Green
  2. Micro lanciatori
2. Vantaggi di performance e semplicità rispettivamente su propulsione solida e liquida
3. Punti critici
  1. Instabilità di combustione
  2. Regression rate
4. Si può affermare che la propulsione ibrida stia uscendo dalla sua fase primitiva e che col tempo raggiungerà il livello di sviluppo di altre modalità di propulsione. Al momento si presta particolarmente ai piccoli lanciatori sub orbitali e in particolare ai team universitari.



**Bibliografia:**

**<https://www.mybib.com/b/mavpmZ>**