

Kritiese evaluering van termodinamiese ontwerp-prosedures vir vuurpylontstekers

J.H. Knoetze

Departement Chemiese Ingenieurswese, Universiteit van Stellenbosch, Privaat sak X5018, Stellenbosch, 7599

Ontvang 19 Mei 1994; aanvaar 22 Junie 1994

UITTREKSEL

Verskeie metodes bestaan waarvolgens die termodinamiese ontwerp van ontstekers vir vuurpylmotors gedoen kan word. Hierdie metodes is meestal redelik empiries en kan maklik lei tot 'n onder- of oorontwerpte ontsteker. Die bekendste metodes wat gebruik kan word, is die sogenaamde vryevolume-metode, die oppervlakarea-metode, die kritiekedruk-metode, die Bryan-Lawrence-vergelyking, die vryevolume-ontsteektydbenadering, die massadeurvloeikoëffisiënt-metode en die sogenaamde warmtevloed-metode. Elk van hierdie metodes het voor- en nadele. Hierdie publikasie bied 'n opsomming van die metodes asook 'n kritiese evaluering daarvan. Daar word veral klem gelê op die gebreke van sekere metodes en die gepaardgaande probleme wat kan ontstaan indien 'n metode blindweg gevolg word. Die metodes wat oor die algemeen beter resultate vir sekere tipes ontstekers lewer, word geïdentifiseer, terwyl die parameters wat dikwels moeilik bepaalbaar is en die berekeninge beïnvloed, ook geïdentifiseer word. Probleemareas soos bv. die teenstrydighede bevat in verskillende warmteoordragkorrelasies, word bespreek, terwyl die wyduiteenlopende resultate wat verkry word, afhangende van watter metode gevolg word, geïllustreer word aan die hand van die berekeninge vir 'n spesifieke motor. Hierdie berekeninge het getoon dat die massadeurvloeikoëffisiënt-metode en die vryevolume-metode gewoonlik redelik realistiese resultate lewer.

ABSTRACT

Critical evaluation of thermodynamic design procedures for rocket motor igniters

There are different methods that can be used for the thermodynamic design of igniters for solid rocket motors. These methods are mostly empirically based and can easily lead to an under-designed or over-designed igniter. The best-known methods are the free volume method, the surface area method, the critical pressure, the Bryan-Lawrence equation, the ignition delay-free volume method, the mass discharge coefficient method and the heat flux method.

Each of these methods has its advantages and disadvantages. This paper gives a summary of the methods together with a critical evaluation of each method. The disadvantages and deficiencies of the methods are emphasised as well as the problems originating from some of these methods. The methods that usually give better results are identified, while those parameters that are difficult to determine and have a pronounced influence on the calculations are also identified.

Problem areas such as the contradictory results from the different heat transfer correlations are discussed. The spread in calculated igniter size is illustrated through two examples. The calculations identify the mass discharge coefficient method and the free volume method as the two preferred methods.

NOMENKLATUUR

A	=	area blootgestel aan ontstekerverbrandings- produkte	h	=	warmteoordragkoëffisiënt
A_b	=	brandarea	h_c	=	konvektiewe warmteoordragkoëffisiënt
A_p	=	poortarea	h_r	=	stralingswarmteoordragkoëffisiënt
A_t	=	keelarea	ΔH	=	spesifieke warmte vrygestel deur ontstekings- poeier
C	=	konstante in vgl. (3.2)	k_p	=	termiese geleidingsvermoë van dryfmiddel
C_{MD}	=	massadeurvloeikoëffisiënt	K	=	empiriese konstante in vgl. (3.1)
C_p	=	spesifieke warmte by konstante druk	L_g	=	dryfmiddellengte
C_{pr}	=	dryfmiddel se spesifieke warmte	M_r	=	molekulêre massa
D_h	=	hidroulies gelykwaardige deursnee	m_i	=	ontstekingsmateriaal massa
D_t	=	keeldeursnee	m_{ig}	=	massavloei tempo van ontstekerverbrandings- produkte
E_{100}	=	drumpelontstekingsenergie van die dryf- middel	P	=	druk
			q_c	=	ontsteekbaarheid van die dryfmiddel

q	=	warmteoordragtempo
Q	=	totale energie wat nodig is vir dryfmiddel-ontsteking
R	=	spesifieke gaskonstante
t_i	=	ontsteekvertraagtyd
t_{ig}	=	ontstekingsvertraging
T_B	=	temperatuur van ontstekerverbrandingsprodukte
T_{ig}	=	ontstekingstemperatuur
T_o	=	aanvanklike dryfmiddeltemperatuur
T_s	=	dryfmiddel se oppervlaktemperatuur
u	=	snelheid
V_c	=	motor se vrye volume
x	=	aksiale afstand
ρ_{pr}	=	dryfmiddeldigtheid

1. INLEIDING

Die hoofdoel met die ontwerp van 'n ontsteker is om 'n komponent daar te stel wat die verbranding van 'n dryfmiddel op 'n betroubare en voorspelbare wyse inisieer. Ontstekers vir vastedryfmiddel-vuurpylmotors kan in twee hoof tipes verdeel word, nl. pirotegniese ontstekers en pirogene ontstekers. Pirotegniese ontstekers is die tipe ontsteker waar die ontstekingsmateriaal (gewoonlik in poeier- of korrelvorm) in 'n niestruktuure houer (gewoonlik 'n plastiekbakkie of gaassakkie), saam met 'n lontkop geplaas word. Sodra die lontkop geïnisieer word, word die ontstekerhouer uitmekaar geblaas en die brandende ontstekingspoeier of ontstekerkorrels word in die vrye volume van die motor vrygestel. 'n Pirogene ontsteker daarenteen is 'n klein vuurpylmotor wat gebruik word om 'n groter vuurpylmotor te ontsteek. Dit bestaan uit 'n inisieerder (basies 'n klein pirotegniese ontsteker), die ontstekerdryfmiddel (kan ook ontstekerkorrels wees) en die ontstekerhardeware. Die ontstekerverbrandingsprodukte vloei deur die ontstekermondstuk(ke) en word gewoonlik op die dryfmiddeloppervlakte gerig. Die ontstekerhardeware moet struktureel sterk genoeg wees om die ontstekerdruk te kan weerstaan. Na ontsteking van die motor kan die ontstekerhardeware of behoue bly of die ontwerp kan sodanig wees dat dit stadig erodeer.

Die doel van hierdie publikasie is om die metodes wat beskikbaar is vir die berekening van die hoeveelheid ontstekingspoeier in die geval van pirotegniese ontstekers en ontsteker massavloei tempo, in die geval van pirogene ontstekers, krities te evalueer. Moontlike probleme wat kan ontstaan indien van die metodes gebruik word, word geïdentifiseer en sekere riglyne word verskaf om van die probleme te oorkom. Die metodes wat oor die algemeen die minste probleme verskaf, word geïdentifiseer.

2. FAKTORE WAT ONTSTEKERONTWERP BEÏNVLOED

'n Ontstekerontwerp moet gewoonlik aan die volgende vereistes voldoen:

- neergelegde veiligheid
- gespesifiseerde werkverrigting
- gespesifiseerde betroubaarheid
- laagste moontlike koste

Ten einde aan hierdie vereistes te kan voldoen, moet die ontwerper bewus wees van die faktore wat die ontsteking sal beïnvloed. Williams, Barrere & Huang,¹ asook Kumar & Kuo² gee beide 'n oorsig van die effek van die belangrikste parameters op ontsteking, sonder om al die belangrikste vraagstukke te behandel.

Die belangrikste veranderlike is die dryfmiddel- en motorgeometrie. Die dryfmiddelgeometrie definieer die totale oppervlakte wat ontsteek moet word, watter gedeelte van die dryfmiddeloppervlak blootgestel is aan die ontsteker se verbrandingsprodukte, die aanvanklike vrye volume en waar die ontsteker geplaas kan word. Die plasing van die ontsteker is 'n baie belangrike faktor want dit is baie makliker om 'n dryfmiddel met 'n sentrale poort van die voorkant af te ontsteek as van die mondstuk kant af. Die rede hiervoor is dat in die geval van 'n voorkantontsteker die ontstekerverbrandingsprodukte al met die dryfmiddelpoort langs moet vloei tot by die mondstuk wat warmteoordrag na die grein bevoordeel. In die geval van 'n agterontsteker moet die ontsteker se verbrandingsprodukte egter teen die algemene rigting van vloei beweeg.

Die tweede belangrike veranderlike is die dryfmiddel se ontstekingsenergiebehoefte. Dit sluit die invloed van temperatuur, druk, oppervlaktoestand, veroudering, ens. op die ontstekingsenergiebehoefte in. Hierdie energiebehoefte kan op verskeie maniere uitgedruk word, maar gewoonlik word die dryfmiddel-oppervlaktemperatuur wat noodsaaklik is vir stabiele verbranding om in te tree as kriterium gebruik. Hierdie temperatuur staan bekend as die dryfmiddel se ontstekingstemperatuur en is 'n funksie van druk, drukgradiënt en dryfmiddelsamestelling. Tabel 1 toon tipiese ontstekingstemperature wat vir ontwerpdoeleindes gebruik word. Hieruit is dit duidelik dat 'n HTPB-saamgestelde dryfmiddel 'n hoër energie-inset nodig het as bv. 'n tipiese dubbelbasisdryfmiddel.

In tabel 1 verwys dubbelbasisdryfmiddel na 'n dryfmiddel waarvan die hoofbestanddele nitro-sellulose en nitro-gliserien is, PBAN-saamgestelde dryfmiddel na 'n dryfmiddel met Polibutadieen-akrilonitriël as bindmiddel, ammonium perchloraat as oksideermiddel en aluminium as brandstof, terwyl 'n HTPB-saamgestelde dryfmiddel van 'n PBAN-saamgestelde dryfmiddel verskil deurdat hidroksigetermineerde polibutadieen die bindmiddel is.

TIPE DRYFMIDDEL	T_{ig} [K]
Dubbelbasis	± 500
PBAN-saamgestelde	$\pm 660-670$
HTPB-saamgestelde	± 700

'n Volgende belangrike faktor is die aanvanklike druk en of die mondstuk verseël is of nie. Die ontsteker vir 'n vuurpylmotor wat by hoë hoogtes ontsteek sonder 'n mondstukseël, moet 'n relatief hoër energie-inset lewer as 'n ontsteker vir 'n motor met 'n mondstukseël wat by seevlak gevuur word. Die operasionele bedryfstemperatuur moet ook in ag geneem word. 'n Dryfmiddelgrein wat aanvanklik by -50 °C is, vereis 'n hoër energie-inset as een wat aanvanklik by 0 °C is.

Die ontstekingspoeier of ontstekerdryfmiddel speel ook 'n belangrike rol. Die parameters wat tydens die ontwerp in ag geneem moet word, is die vlamtemperatuur, verbrandingsenergie, breuk gekondenseerde spesies in die verbrandingsprodukte, ontstekerdruk, ens. Hoe hoër die vlamtemperatuur, hoe hoër is die gastemperatuur in die motor, met die gevolg dat die warmtevlod na die dryfmiddel hoër is.

Die gespesifiseerde werkverrigting moet ook in ag geneem word; die belangrikste hiervan is die maksimum toelaatbare ontstekingsvertraging, die maksimum toelaatbare verspreiding in ontstekingsvertraging en die maksimum toelaatbare drukstygtempo.

3. METODES VIR DIE BEREKENING VAN DIE ONTSTEKINGSMATERIAALMASSA

Metodes vir die ontwerp van ontstekers behels 'n mengsel van empiriese en teoretiese benaderings. Daar bestaan geen enkele algemeen aanvaarde metode om die ontstekingsmateriaal massa of massavloei tempo van ontstekerverbrandingsprodukte te bereken nie – die ontwerper moet gewoonlik 'n kombinasie van die beskikbare metodes gebruik. Van die metodes word deur Barret³ in die NASA-ontstekerhandleiding verduidelik.

3.1 Vrye volume

Daar bestaan 'n redelik herhaalbare verband tussen die massa van 'n gegewe pirotegniese ontstekingsmateriaal wat nodig is en die aanvanklike vrye volume van die motor wat ontsteek moet word. Die volgende empiriese vergelyking word gewoonlik gebruik:

$$m_t = K V_c^z \quad (3.1)$$

Indien inligting gegee deur Sutton⁴ verwerk word, word 'n tipiese waarde $K = 1,1$ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2,1}$] verkry vir metaal/oksiedeermiddel-tipe ontstekingspoeier, terwyl die eksponent z gewoonlik as 0,7 aanvaar word.

3.2 Brandarea

Die oppervlakarea-metode is 'n baie vereenvoudigde metode vir die beraming van die ontstekingsenergie-behoefes en is empiries afgelei op die basis van die totale area blootgestel aan die ontstekerprodukte en die dryfmiddel se ontsteekbaarheid. Volgens Barret³ word die volgende vergelyking gewoonlik gebruik:

$$Q = A C \sqrt{E_{100}} \quad (3.2)$$

Die ontstekingspoeiermassa wat nodig is, kan bereken word as:

$$m_t = \frac{Q}{\Delta H} \quad (3.3)$$

3.3 Kritieke druk

Daar is alreeds gemeld dat die dryfmiddel se ontstekingsenergie afhanklik is van druk. Dit geld veral vir lae drukke. Hierdie afhanklikheid toon 'n eksponensiële vermindering met 'n toename in druk, sodat 'n feitlik drukonafhanklike gebied bereik word wat gewoonlik tussen 300 en 700 kPa abs. vir die meeste dryfmiddels lê. Een van die metodes wat dus gebruik word vir die grootteberaming van ontstekers is om die ontstekingspoeiermassa te bereken wat die druk in die motor tot 'n

sekere waarde sal laat styg. Hierdie metode kan gewoonlik slegs gebruik word in motors met 'n mondstukprop.

3.4 Bryan-Lawrence-vergelyking

Die Bryan-Lawrence-vergelyking is 'n empiriese verband tussen sekere vuurpylmotorparameters en die energie wat nodig is om bevredigende ontsteking te bewerkstellig.

$$Q = 38 \left[A q_c \left[\frac{L_g 4\pi A_p}{A} \right]^{0,59} \right]^{1,06} \quad (3.4)$$

3.5 Vryevolume-ontsteektydbenadering

Ondervinding het geleer dat daar gewoonlik 'n reguitlynverband op logaritmiëse koördinate is tussen $\sqrt{t_{ig} \cdot m_{ig}}$ en V_c . Akiba & Khono⁵ toon dat indien $\ln(\sqrt{t_{ig} \cdot m_{ig}})$ teenoor $\ln(V)$ geplot word, reguitlyne met helling 0,67 verkry word. Hulle data is ongelukkig slegs vir groot motors met ruimtetoepassings bedoel. Hulle toon verder dat verskillende lyne vir eerstestadia- en hoërstadia-motors verkry word (omdat die aanvanklike druk by die hoërstadia-motors baie laag is, word 'n hoër ontstekermassavloei tempo vereis). Indien inligting wat deur Akiba & Kohno gegee word, verwerk word, word die volgende korrelasie verkry vir motors wat aanvanklik by atmosferiese druk verkeer:

$$\sqrt{t_{ig} \cdot m_{ig}} = 1,5 V_c^{0,67} \quad (3.5)$$

3.6 Massadeurvloei koëffisiënt

Die massadeurvloei koëffisiënt-metode, is een van die gewildste metodes vir die berekening van die benodigde ontstekermassavloei tempo. Die massadeurvloei koëffisiënt is die verhouding van ontstekermassavloei tempo, m_{ig} , tot motorkeelarea, A_t :

$$C_{MD} = \frac{m_{ig}}{A_t} \quad (3.6)$$

'n Waarde wat gegrond is op vorige eksperimentele ondervinding van die ontwerper word gewoonlik vir die massadeurvloei koëffisiënt gebruik. Hierdie waarde word gegrond op die motor- en ontstekerkonfigurasie. Indien 'n pirogene ontsteker voor geplaas word, word 'n waarde van tussen 120 en 200 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] gewoonlik gebruik. Vir ontstekers wat by of agter die mondstuk geleë is of wanneer die dryfmiddeloppervlak redelik ontoeganklik vir die ontstekergasse is, word 'n waarde tussen 270 en 330 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] gewoonlik gebruik. Die gebruik van 'n realistiese C_{MD} -waarde verseker dat 'n redelike druk in die motor bereik word wat die ontstekingsproses vergemaklik.

3.7 Warmtevlod

Die doel van die ontsteker is om die dryfmiddel se oppervlakte te verhit tot die temperatuur wat nodig is vir ekwilibriumverbranding om tot stand te kom. Die akkuraatste berekeningsmetode sal dus wees om die massavloei tempo te bereken wat die dryfmiddeloppervlak binne die gespesifiseerde tyd tot by die ontstekings-temperatuur sal verhit.

Volgens Hall et al.⁶ is die tyd tot ontsteking vir 'n pirogene ontsteker:

$$t_i = \left[\frac{T_{ig} - T_o}{2q} \right]^2 (k_p \pi \rho_{pr} C_{pr}) \quad (3.7)$$

Die termiese induksieperiode (t_i) is dus 'n funksie van die warmteoordragtempo per eenheidsarea, q

$$q = h (T_g - T_s) \quad (3.8)$$

Die warmteoordragkoëffisiënt, h , is die som van die konvektiewe en stralingswarmteoordragkoëffisiënte:

$$h = h_c + h_r \quad (3.9)$$

In motors met pirogene ontstekers lewer konveksie vir die dele van die dryfmiddel wat aan die hoësnelheid-gasstroom van die ontstekerprodukte blootgestel is, die grootste bydrae tot h . Die konvektiewe warmteoordragkoëffisiënt, h_c , word gewoonlik met behulp van 'n empiriese vergelyking bereken.

$$Nu = f(Re, Pr, \text{geometrie}) \quad (3.10)$$

In vergelyking (3.10) is die Reynoldsgetal 'n funksie van die ontsteker massavloeiempo en dus is ook die warmteoordragkoëffisiënt 'n funksie van die gelewerde massavloeiempo. Omdat die lokale warmteoordragkoëffisiënt op verskillende plekke in die motor wissel, is 'n iteratiewe berekeningsmetode nodig.

4. PROBLEME GEASSOSIEER MET ONTWERPSMETODES

Die vryevolume-konsep is hoofsaaklik van toepassing op pirotegniese ontstekers. Die waardes van K en z moet vir elke tipe ontstekingspoeier bepaal word. Die metode kan dus slegs oorweeg word indien 'n redelike databasis beskikbaar is. Die metode het egter groot gebreke deurdat die area wat ontsteek moet word glad nie in ag geneem word nie, ook nie die posisie van die ontsteker nie, terwyl die tyd tot ontsteking en hoeveel van die ontstekerprodukte deur die mondstuk vloei, ook geïgnoreer word.

Die brandarea-metode is 'n hoogs vereenvoudigde metode en kan in enkele gevalle vir pirotegniese ontstekers gebruik word, maar word nie gebruik vir grootteberekeninge vir pirogene ontstekers nie. Behalwe vir die feit dat slegs die blootgestelde area in ag geneem word en belangrike parameters soos vrye volume, ontstekerposisie, keelarea, ens. geïgnoreer word, is die bepaling van die minimum ontstekingsenergie, E_{100} , 'n probleem. Dit is nie slegs moeilik om hierdie energie akkuraat te bepaal nie, maar die waarde is afhanklik van die metodes wat gebruik word om dit te bepaal. Die voordeel van die metodes is dat onderskeid getref word tussen verskillende dryfmiddels en tussen verskillende ontstekingspoeiers.

Die kritiekedruk-metode kan gebruik word vir motors wat met 'n mondstukprop toegerus is, maar is moeiliker om te gebruik vir pirotegniese ontstekers in motors sonder 'n mondstukprop. Die presiese waarde van die kritieke druk is nie altyd bekend nie, maar 'n waarde van 500 kPa is dikwels voldoende vir pirogene ontstekers. 'n Ander manier waarop die druk gebruik kan word, is om te toets of die ontsteker op sy eie gesmoorde vloei in die motormondstukkeel kan veroorsaak. 'n Empiriese reël is dat indien die ontsteker in 'n fopmotor (slegs die vrye volume en keelarea hoef korrek te wees) gevuur word en gesmoorde vloei ontstaan in die motormondstukkeel, dan sal die ontsteker die motor ontsteek. Vir pirotegniese ontstekers kan hierdie metode egter probleme skep deurdat sekere van die nuwer ontstekingspoeiers, bv. magnesium-teflon-viton en selfs ook boor-kaliumnitraat, 'n baie lae persentasie gas in die verbrandings-produksamestelling het wat beteken dat die ontsteker baie maklik oorontwerp kan word.

Die Bryan-Lawrence-vergelyking sou 'n goeie alternatief gewees het indien die parameter q_c , d.w.s. die ontsteekbaarheid van die dryfmiddel, bekend sou wees. Die ontsteekbaarheid soos in die Bryan-Lawrence-vergelyking gebruik, kom neer op die energie wat per area toegevoeg moet word. Hierdie waarde is egter afhanklik van die metode en tempo van toevoeging sodat dit moeilik is om 'n betroubare waarde daaraan toe te ken.

Die vryevolume-ontsteektydbenadering is hoofsaaklik geskik vir pirogene ontstekers en dan veral vir redelike groot motors. Dit is egter nie heeltemal duidelik uit die artikel van Akiba & Kohno of hulle t_{10} definieer as die motor se ontstekingsvertraging of die tyd totdat die dryfmiddeloppervlak brand nie. Die metode se grootste gebreke is egter dat die posisie van die ontsteker nie in ag geneem word nie, ook nie die aanvanklike brandarea nie en ook nie die mondstukkeelarea nie. Dit is almal parameters wat 'n rol speel by die berekening van die ontstekingsoorgang.

Die massadeurvloei-koëffisiënt-metode is waarskynlik die metode wat die meeste gebruik word, veral vir pirogene ontstekers. Die metode neem egter verskeie belangrike faktore nie in ag nie, bv. die verskillende ontstekingsenergiebehoefes van verskillende dryfmiddels, die effek van vrye volume van die motor, verskillende bedryfsdrukke, geometrie, ens. Dit is bv. bekend dat HTPB-saamgestelde dryfmiddels moeiliker ontsteek as PBAN-dryfmiddels, met die gevolg dat hulle 'n bietjie hoër massavloeiempo vir dieselfde ontstekingsvertraging nodig het. (Die ervare ontwerper sal 'n hoër C_{MD} -waarde gebruik, maar die onervare persoon weet nie tot watter mate hy C_{MD} moet verhoog nie.) Die basiese vergelyking voorspel dat die ontsteker massavloeiempo verminder moet word indien die keelarea van die motor verklein word, maar dieselfde dryfmiddel sal steeds dieselfde energie nodig hê vir ontsteking en veral indien daar 'n mondstukseël of mondstukprop is wat by 'n druk hoër as die ontstekingsdruk meegee, het die motor steeds dieselfde ontsteker nodig vir betroubare ontsteking. Hierdie metode neem hierdie aspek nie in ag nie.

Die warmtevloed-metode is 'n akkurate metode, maar vereis dat sekere prosesse in die motor akkuraat bereken moet kan word. Die metode is afhanklik van 'n betroubare warmteoordragkorrelasie. Daar bestaan verskeie empiriese warmteoordragkorrelasies wat gebruik kan word. In tabel 2 is agt van die korrelasies gebruik om die warmtevloed na die dryfmiddel te bereken vir 'n motor met 'n stervormige dryfmiddelgeometrie met 'n aanvanklike vloeiarea van 67 cm². Die berekende warmtevloed verskil met tot 200%, wat beteken dat die verskil tussen die kortste en langste ontsteekvertraagtyd wat m.b.v. vergelyking (3.7) bereken word, met tot 800% sal verskil. Die Dittus-Boelter-vergelyking is in tabel 2 ingesluit slegs om as verwysing te dien. Indien hierdie metode dus gebruik word, moet seker gemaak word dat die warmteoordragkorrelasie wat gebruik word, toepaslik en betroubaar is. Daar is duidelik 'n behoefte aan 'n meer betroubare warmteoordragkorrelasie. Daar word aanbeveel dat die Davey-vergelyking gebruik word omdat dit enersyds warmtevloede lewer wat naby die middel van die waardes in tabel 2 lê en andersyds goeie resultate daarmee in simulاسies behaal is.

5. VERGELYKING TUSSEN DIE METODES

Uit die voorafgaande bespreking is dit duidelik dat nog heelwat werk gedoen kan word om beter ontwerpmetodes vir die termodinamiese ontwerp van ontstekers daar te stel. Die kritiek wat op sommige van die metodes

TABEL 2 Vergelyking van warmteoordragkorrelasies			
Toestande: $L_g = 0,50\text{m}$ $D_t = 40\text{mm}$ $m_{ig} = 0,23\text{kg s}^{-1}$ $u = 650\text{m s}^{-1}$ $T_g = 1\ 600\ \text{K}$ $T_s = 500\text{K}$ $x = 0,20\text{m}$			
KORRELASIE	h $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	q kW m^{-2}	VERWYSING
$Nu_D = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$	830	910	Dittus-Boelter
$Nu_D = 0,036 Re_D^{0,8} Pr^{0,4} (x/D)^{-0,2} (T_g/T_s)^{0,18}$	1 250	1 350	Davey ⁸
$h_c = 1,56 \cdot 10^{-3} Pr^{0,6} C_p (Pu/R)^{0,8} M_r^{-0,1}$ $T_f^{-0,67} (xD_H)^{-0,1} (A_p/A_t)^{0,4}$	990	1 100	Peretz ⁹
Grafiese voorstelling	2 000	2 200	Carlson & Seader ¹⁰
$Nu_x = 0,09 Re_x^{0,8}$	2 300	2 500	Most & Summerfield ¹¹
$St = 0,08 Re_x^{-0,02}$	1 800	2 000	Allan et al. ⁸
$Nu = K Re^{0,5} Pr^{0,33} + \phi(T,P)$	1 500	1 700	DeSoto & Friedman ¹²
Grafiese voorstelling	900	1 000	White & Rozanski ¹³

hierbo gelewer is, sal vervolgens m.b.v. 'n paar voorbeelde geïllustreer word. Gestel 'n ontsteker moet ontwerp word vir 'n voorgestelde nuwe motor wat 'n HTPB-saamgestelde dryfmiddelgrein met 'n stergeometrie bevat. Die grein is 500 mm lank, die poortarea is 6 750 mm², die brandende omtrek 480 mm en die keeldeursnee 45 mm. Tabel 3 toon die tipiese resultate wat met die verskillende metodes verkry word indien 'n pirotegniese ontsteker gekies word. Vir die doeleindes van tabel 3 is aanvaar dat die korrels van die ontstekingspoeier wat in die ontsteker gebruik word, 'n brandtyd van 50 ms het. Daarvolgens is dit duidelik dat dit gevaarlik is om metodes wat vir groot motors met pirogene ontstekers ontwikkel is, direk op kleiner motors te gaan toepas. Praktiese toetse het getoon dat in 'n motor met hierdie dimensies 'n ontsteker met ongeveer 20-25g ontstekingspoeier (indien dit van die metaal/oksiedeermiddel-tipes is) nodig is. Volgens hierdie berekeninge lewer die vryevolume-benadering goeie resultate in geval van pirotegniese ontstekers.

Dieselfde berekening kan nou vir 'n pirogene ontsteker herhaal word. Die resultate word in tabel 4 verskaf. Indien 'n rekenaarprogram¹⁵ gebruik word om die ontstekingsoorgang te bereken, word gevind dat bevredigende resultate verkry word met massavloeiempo's van 0,20 kg/s tot 0,40 kg/s. Met hoër ontstekermassavloeiempo's word 'n ontstekingspiek voorspel, terwyl daar met laer massavloeiempo's 'n gevaar van vertraagde ontsteking bestaan.

Die berekeninge toon dat die vryevolume- en massadeurvloeiëffisiënt-metodes in hierdie stadium die beter metodes is om te gebruik vir die termodinamiese ontwerp vir relatief klein vuurpylmotors.

By groter motors word dit meer riskant om die vryevolume-konsep te gebruik en is die massadeurvloeiëffisiënt-metode die geskikste.

6. GEVOLGTREKKINGS

Uit die voorafgaande bespreking is dit duidelik dat selfs die metodes wat tans as die beste beskou word vir die termodinamiese ontwerp van 'n vuurpylmotorontsteker, nog heelwat tekortkominge het. Heelwat werk kan dus

TABEL 3 Ontstekingspoeiermassa nodig vir pirotegniese ontsteker

METODE	m_i (g)
Vrye volume	21
Kritieke druk (700 kPa)	6
Kritieke druk (2000 kPa)	18
Vryevolume-ontsteektyd	8
Massadeurvloeiëffisiënt	16

TABEL 4 Benodigde massavloeiempo vir pirogene ontsteker (Brandtyd 100 ms)

METODE	m_{ig} (kg/s)
Vrye volume	0,21
Kritieke druk (700 kPa)	0,95
Kritieke druk (500 kPa)	0,68
Vryevolume-ontsteektyd	0,15
Massadeurvloeiëffisiënt	0,31

nog gedoen word om 'n beter ontwerpmetode vir ontstekers daar te stel. So 'n metode moet die dryfmiddel en motorgeometrie in ag neem. Die dryfmiddel en motorgeometrie definieer die totale oppervlakte wat ontsteek moet word, watter gedeelte blootgestel is aan die ontstekerverbrandingsprodukte, die vrye volume en waar die ontsteker geplaas kan word. Verder moet die dryfmiddel se ontstekingsenergiebehoefes ook in ag geneem word. Dit sluit in die invloed van die aanvanklike

temperatuur, druk, oppervlaktoestand, veroudering, tipe dryfmiddel, ens. Ander parameters wat 'n rol speel by die berekening van die massavloeiempo van verbrandingsprodukte wat die ontsteker moet lewer, is die aanvanklike druk en of die mondstuk aanvanklik verseël is. Streng gesproke moet die tipe ontstekingspoeier (of dryfmiddel in die geval van 'n pirogene ontsteker) ook in ag geneem word - hoe hoër die energie-inhoud van die verbrandingsprodukte, hoe hoër is die tempo waarteen energie aan die dryfmiddel oorgedra kan word. Dit is duidelik dat die twee beste metodes wat tans gebruik kan word, naamlik die mondstuk-deurvloeiëffisiënt-metode en die vryevolume-metode ernstige tekortkominge het. Ten spyte van hulle gebreke kan hierdie metodes met sukses aangewend word indien hulle met oorleg gebruik word.

SUMMARY

The major objective in the design of an igniter is to induce the combustion reaction in a controlled and predictable manner at a stipulated rate. Igniters for solid propellant rocket motors can be divided into two general types, namely pyrotechnic and pyrogen igniters. An igniter design is usually based on the following priority of requirements, namely safety, specified performance, specified reliability and lowest possible cost.

In order to be able to meet these requirements, the igniter designer must be aware of the factors that influence igniter design. These include the propellant- and motor geometry, the propellant ignition energy requirements (often characterized as the ignition temperature), the initial motor pressure, the ignition powder or propellant used and the specified safety, performance and reliability requirements. There are different methods that can be used for the thermodynamic design of igniters for solid rocket motors. These methods are mostly empirically based and can easily lead to an under-designed or over-designed igniter. The best-known methods are the free volume method, the surface area method, the critical pressure, the Bryan-Lawrence equation, the ignition delay-free volume method, the mass discharge coefficient method and the heat flux method.

The free volume concept is usually more applicable to pyrotechnic igniters. The value of K and z in equation 3.1 need to be determined for each type of igniter material. The surface area method is a highly simplified method and can be used for simple pyrotechnic igniters, but is generally not used for sizing pyrogen igniters. The critical pressure method can be used for motors with a sealed nozzle, but is not so easy to use for motors without a nozzle-seal. The exact value of the critical pressure is not always known, but another way of using the pressure is to use the attainment of choked nozzle flow as a requirement for ignition. The ignition delay-free volume method is suitable for sizing pyrogen igniters for large rocket motors, but ignores parameters such as igniter location, initial burning surface area and throat area. The mass discharge coefficient method is probably the most widely used method for the sizing of igniters, especially pyrogen igniters. The method fails to account for certain effects, for example the different energy requirements of different propellants, the effect of motor free volume, different operating pressures, geometry,

etc. The heat flux method is an accurate method, but requires a sophisticated treatment of certain processes within the rocket motor. The method is dependent on a reliable empirical heat transfer correlation. There are many correlations and Table 2 demonstrates that the calculated heat flux can differ by up to 200%, depending on which heat transfer correlation is used.

The calculations shown in Tables 3 and 4 illustrate that the two methods that are at present the most reliable are the mass discharge-coefficient-method and the free volume method. The uncertainty in the heat transfer correlations results in the heat flux method not being as reliable as one would prefer. In order to be able to use this method a more reliable heat transfer correlation should first be obtained. When a reliable heat transfer correlation becomes available, the heat flux method would be the more reliable method.

In spite of the deficiencies identified, igniters can be sized according to existing methods if the methods are used with the necessary caution.

LITERATUURVERWYSINGS

- Williams, F.A., Barrere, M. & Huang, N.C. (1969). *Fundamental Aspects of Solid Propellant Rockets* (AGARDograph 116, Technivision Services, Slough, England).
- Kumar, M. & Kuo, K.K. (1984). Flame spreading and Overall Ignition Transient. In *Fundamentals of Solid Propellant Combustion. Progress in Astronautics and Aeronautics*, Kuo, K.K. & Summerfield, M. (ed.) Vol. 90, AIAA, 1984.
- Barrett, D.H. (1971). Solid Rocket Motor Igniters, *NASA SP-8051*, March 1971.
- Sutton, G.P. (1984). *Rocket Propulsion Elements* (5th ed.) (John Wiley and Sons, 1986) p. 322-323
- Akiba, R. & Kohno, M. (1986). Experiments with Solid Rocket Technology in the Development of M-35II, *Acta Astronautica*, 13(6/7), 349-361.
- Hall, A.R., Southern, G.R. & Sutton, D. (1979). Some Measurements of Ignition Delay and Heat Transfer with Pyrogen Igniters, *AGARD Solid Rocket Proceedings*, AGARD no. 259, 1979, pp. 9-1 to 9-9.
- Incropera, F.P. & De Witt, D.P. (1990). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (3rd. ed.) (John Wiley & Sons) p. 496.
- Allan, D.S., Bastress, E.K. & Smith, K.A. (1967). Heat Transfer Processes during Ignition of Solid Propellant Rockets, *J. Spacecraft*, 4(1), 95-100.
- Peretz, A., Kuo, K.K., Caveny, L.H. & Summerfield, M. (1973). Starting Transient of Solid-Propellant Rocket Motors with High Internal Gas Velocities, *AIAA Journal*, 11(12), 1719-1727.
- Carlson, L.W. & Seader, J.D. (1967). Heat Transfer Characteristics of Hot Gas Ignition, *AIAA Journal*, 5(7), 1272-1279.
- Most, W.J. & Summerfield, M. (1969). Starting Thrust Transients of Solid Rocket Engines, *Aerospace and Mechanical Sciences Report*, no. 873 (Guggenheim Laboratories for the Aerospace Propulsion Sciences, Princeton University, Princeton, New Jersey).
- DeSoto, S. & Friedman, H.A. (1965). Flame Spreading and Ignition Transients in Solid Grain Propellants, *AIAA Journal*, 3(3), 405-412.
- White, C.M.P. & Rozanski, J.D. (1985). Consumable Light Weight Ignition System for Full Head End Web, *AIAA-85-1393*. AIAA/SAE/ASME/ASEE 21st Joint Propulsion Conference.
- Kuna, M., Peretz, A. & Manheimer-Timnat, Y. (1977). Performance Predictions of BPN Pyrogen-Type Igniters for Rocket Motors, *J. Spacecraft*, 14(4), 202-206.
- Knoetze, J.H. (1990). Die Voorspelling van die Werkverrigting van Vastedryfmiddel-vuurpylmotors. Ph.D.(Ing.)-proefskrif, Universiteit van Stellenbosch.