

Karakterisering av explosivämnen, krut och sprängämnen

Carina Eldsäter (Ed)
Marita Wanhatalo (Ed)



Omslagsbilden visar fr. v. med början högst upp; prov till mikrokalorimeter, ett oscilloskop vid mätning av detonationshastighet, provhylsa efter slow cook-off, laddning för detonationshastighetsbestämning, detonerbarhetsprov och provuppställning för slow-cook-off. Bilderna är tagna av Reine Adolfsson, Hans Edvinsson, Martin Johansson och Marita Wanhatalo.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Förvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Vapen och skydd
147 25 Tumba

Tel: 08-555 030 00
Fax: 08-555 031 00

www.foi.se

Karakterisering av explosivämnen, krut och sprängämnen

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1765--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år November 2005	Projektnummer E2004
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Carina Eldsäter (Ed) Marita Wanhatalo (Ed)	Projektledare Carina Eldsäter	
	Godkänd av Patrick Goede	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Karakterisering av explosivämnen, krut och sprängämnen		
Sammanfattning <p>En viktig del vid framtagning av nya kemiska ämnen eller material inom all typ av industri, såsom läkemedelsindustri, kemisk industri etc., är att undersöka de egenskaper som ämnet besitter. Denna undersökning, även kallad <i>karakterisering</i>, ska ofta svara på frågan om ämnet har rätt molekylär struktur, hur det beter sig vid olika betingelser och om det fungerar som man hade tänkt sig. När det gäller framtagning av explosivämnen blir omfattningen av karakteriseringen betydligt större eftersom explosivämnen även innebär en säkerhetsrisk. Prestanda är också en parameter som är specifik för explosivämnen eftersom deras arbetssätt innebär deflagration och detonation. Karakterisering görs inte bara vid framtagning av nya explosivämnen utan det används också vid riskbedömningar och felsökning av befintlig ammunition, t.ex. på ammunitionens objekt som lagrats länge eller som "deltagit" vid internationella operationer.</p> <p>Denna rapport ger en allmän orientering av några av de många metoder som finns och som används på FOI vid karakterisering av explosivämnen och explosivämnesinnehållande formuleringar (t.ex. krut och sprängämnen). Fokus ligger på karakterisering som är specifik för explosivämnen och som relaterar till säkerhet och prestanda.</p>		
Nyckelord Karakterisering, explosivämnen, krut, sprängämnen, IM, känslighet, säkerhet, prestanda		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 17 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Vapen och skydd 147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1765--SE	Report type User report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year November 2005	Project no. E2004
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Carina Eldsäter (Ed) Marita Wanhatalo (Ed)	Project manager Carina Eldsäter	
	Approved by Patrick Goede	
	Sponsoring agency Defence Forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Characterisation of energetic materials, propellants and explosives		
Abstract <p>An important part in development of new chemicals and materials is to investigate their properties. This investigation is generally called <i>characterisation</i>. When energetic materials are developed, additional investigations related to safety and performance are needed due to their special nature to deflagrate or detonate. Characterisation is not only done on new materials but is also used in risk assessment of e.g. munition stored for long periods of time or munition carried in out of area operations intended for hometaking. This report focuses therefore on characterisation related to safety and performance of energetic materials (including propellants and explosives).</p> <p>Some of the the test metods most commonly used by FOI in characterisation of energetic materials are summarised. The report deals also with a discussion about testing and qualification of insensitive munitions.</p>		
Keywords Characterisation, energetic materials, propellants, explosives, IM sensitivity, safety, performance		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 17 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

Inledning	5
Termisk stabilitet	5
Småskalig känslighetsprovning	7
Kritisk diameter	8
Stötvågskänslighet	9
Känslighet för brand och upphettning.....	11
Antändningstemperatur.....	11
Karakterisering av prestanda.....	12
IM-testning.....	14
Sammanfattning	15
Referenser	15

Inledning

En viktig del vid framtagning av nya kemiska ämnen eller material inom all typ av industri, såsom läkemedelsindustri, kemisk industri etc., är att undersöka de egenskaper som ämnet besitter. Denna undersökning, även kallad *karaktisering*, ska ofta svara på frågan om ämnet har rätt molekylär struktur, hur det beter sig vid olika betingelser och om det fungerar som man hade tänkt sig. När det gäller framtagning av explosivämnen blir omfattningen av karaktiseringen betydligt större eftersom explosivämnen även innebär en säkerhetsrisk. Prestanda är också en parameter som är specifik för explosivämnen eftersom deras arbetsätt innebär deflagration och detonation. Karaktisering görs inte bara vid framtagning av nya explosivämnen utan det används också vid riskbedömningar och felsökning av befintlig ammunition, t.ex. på ammunitionens objekt som lagrats länge eller som "deltagit" vid internationella operationer.

Karaktisering av energetiska material innebär allt från att beräkna ett ämnes egenskaper, t.ex. energiinnehåll, till att undersöka ett ämnes termiska stabilitet och känslighet i liten skala (ca 100 mg) till mellan- och storskaliga tester där man i många fall testar den färdiga produkten i sin slutliga förpackning. Inom de storskaliga testerna återfinns ofta även sätt att karakterisera prestanda och verkan.

En av anledningarna till att karaktisering av explosivämnen görs är att bedöma hur känsligt ämnet är och vilken säkerhetsrisk som är förknippad med detsamma. Det är även viktigt att så långt det är möjligt kunna bestämma hur den framtagna produkten kommer att bete sig vid användning, exempelvis hur den omgivande miljön påverkar arbetssättet osv. Det finns också en ekonomisk aspekt, vilken hänger ihop med att nyutveckling av energetiska material är mycket kostsamt, och framförallt storskalig säkerhetstestning kostar ännu mer. Små- och mellanskalig karaktisering är därför ett sätt att få fram experimentell information som kan utnyttjas vid beräkningar av t.ex. sårbarhet och verkan. Genom att på ett tidigt stadium i utvecklingsarbetet bedöma om det nya explosivämnet har potential för en tänkt applikation eller ej kan mycket pengar sparas. Det pågår mycket forskning runt om i världen på detta område eftersom resurserna blir allt mindre och man vill ha fram produkter i allt snabbare takt. En annan viktig del är karaktisering av redan befintlig ammunition. Karaktiseringen kan exempelvis ge svar på frågor om varför en ammunition uppträder på ett ibland oväntat sätt vid användning eller efter en viss tids lagring, även om ammunitionen fortfarande är godkänd att använda.

Denna rapport ger en allmän orientering av några av de många metoder som finns och som används på FOI vid karaktisering av explosivämnen och explosivämnesinnehållande formuleringar (t.ex. krut och sprängämnen). Fokus ligger på karaktisering som är specifik för explosivämnen och som relaterar till säkerhet och prestanda. Alla befintliga metoder tas inte upp och de metoder som beskrivs kommer heller inte att beskrivas i detalj utan hänvisning finns till mer utförlig beskrivning.

Termisk stabilitet

Termisk stabilitet hos ett explosivämne är ett vitt begrepp. Kunskap om termisk stabilitet kan ge svar på en lång rad frågor, såsom hur säkert är ett explosivämne då det utsätts för en brand i ett intilliggande förråd? Hur länge kan man lagra ett

explosivämne i ett förråd vid 25°C? Hur kan man initiera ett explosivämne termiskt? FOI använder sig av en mängd metoder för att ta reda på hur termiskt stabilt ett explosivämne är, där de vanligaste metoderna presenteras nedan. En sak att hålla i minnet är att alla dessa metoder ger ett mått på stabiliteten hos ämnet i en viss miljö, dvs. vid en viss uppvärmningshastighet, vid en viss atmosfär, vid en viss energitillförsel, vid en viss provmängd, vid en viss provgeometri etc.. Tillsammans kan denna information ge en mer komplett bild av hur termiskt stabilt ett explosivämne eller en explosivämnesinnehållande formulering (krut och sprängämnen) är.

Termisk stabilitet hos rena explosivämnena har bl.a. studerats med hjälp av masspektroskopi och då undersöks molekylens överlevnadsförmåga vid olika typer av påverkan i en masspektrometer. Ett exempel som studerats är NTO som är känd som ett av dagens få mycket stabila (och lågkänsliga) explosivämnena. I masspektrometern överlevde NTO-molekylen medan andra mindre stabila (och mer känsliga) explosivämnena såsom oktogen och hexogen sönderdelas till mindre fragment under samma betingelser¹.

Andra metoder att studera termisk stabilitet är mikrokalorimetri (heat flow calorimetry), differential scanning calorimetry (DSC), termogravimetri (TGA) och kemiluminiscens (CL).

Med en mikrokalorimeter kan förutom termisk stabilitet även kompatibilitet (förenlighet) mellan explosivämnet och olika kontaktmaterial undersökas. Mätningarna utförs enligt STANAG 4147² och STANAG 4582³. STANAG 4147 behandlar kompatibilitetsmätningar medan STANAG 4582 syftar till att simulera lagring av ett ämne under minst 10 år vid en konstant lagringstemperatur på 25°C. Undersökning med mikrokalorimeter är en av de grundläggande och viktigaste testerna inom explosivämnesutveckling.

Termisk analys (DSC och TGA) kan bl.a. användas till att studera lagringsstabilitet, kompatibilitet mellan två ämnen och fysikaliska egenskaper såsom smältemperatur och glasomvandlingstemperatur (dvs den temperatur då ett krut blir sprött). Vid nyutveckling av explosivämnena är det också viktigt att studera vid vilken temperatur och i hur många steg som ämnet sönderfaller.

Kemiluminiscens (CL) är en typ av ljus som emitteras från en exciterad NO₂-molekyl som bildats i en kemisk reaktion mellan NO och ozon (se nedan). När vissa explosivämnena, såsom hexogen, trotyl, NTO och TATB, sönderfaller bildas NO-molekyler. Om man mäter mängden bildad NO (proportionellt mot mängden emitterat ljus) med avseende på tid får man ett mått på explosivämnets termiska stabilitet vid den aktuella temperaturen. FOI har använt sig av CL vid stabilitetsundersökning av bl.a. hexogen, NTO, TATB, keto-hexogen och nitrocellulosakrut^{4,5}.



Ett explosivämnes benägenhet att sönderfalla (initiera) och fortsätta sönderfalla (autokatalys) kan studeras med t.ex. ARC (Accelerated Reaction Calorimetry) eller med laser-intiering. ARC har använts bl.a. vid karakterisering av FOX-7⁶ och laser-intiering har använts vid jämförelse av sönderfallbenägenhet hos NTO, trotyl och

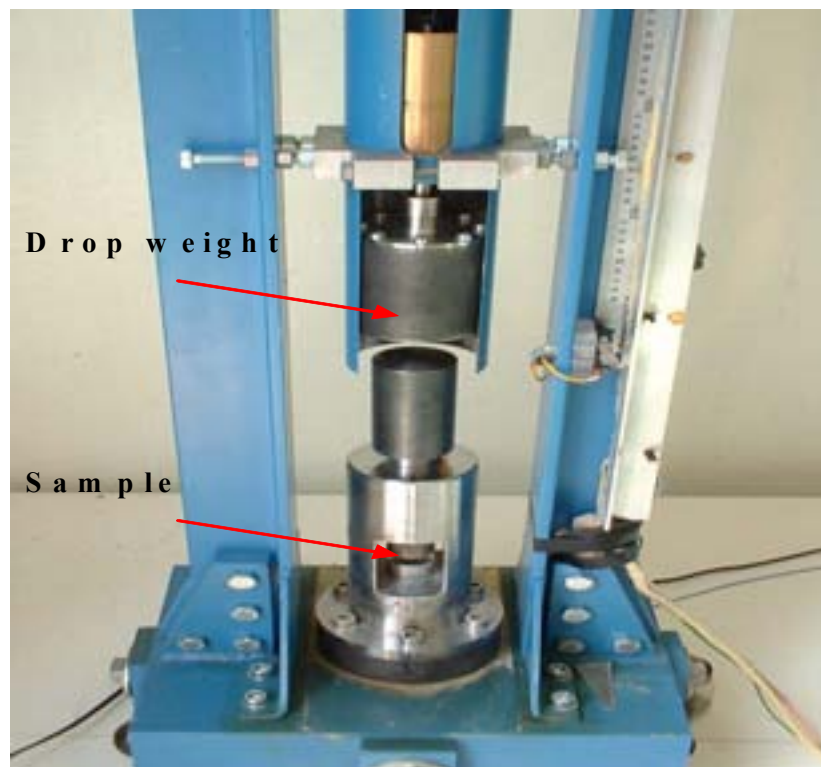
hexogen¹. I ARC mäter man tid-till-initiering vid olika temperaturer och vid laserinitiering mäter man tid-till-initiering vid olika tryck.

Småskalig känslighetsprovning

Småskalig känslighetsprovning tillhör också de grundläggande testerna vid all explosivämnesutveckling. Anser man att ett explosivämne eller en formulering inte klarar dessa test går man inte vidare i utvecklingen av säkerhetsskäl.

Slagkänslighet

Det test som är vanligast vid bestämmandet av ett explosivämnes slagkänslighet är fallhammarprovet. Testet är en ganska grov metod men slagkänsligheten är viktig att fastställa både ur handhavandesynpunkt och ur transportsynpunkt. Det finns en mängd olika fallhammartyper, och därmed testmetoder, där principen för själva fallapparaten är densamma men där detaljerna kring stämplarna, dvs. de ståldetaljer mellan vilka provämnet placeras, kan variera. I Europa har traditionellt BAM fallhammare använts medan man i USA mest använder ERL Typ 12 fallhammare. För att lättare kunna jämföra resultat från olika studier har FOI valt att ha både en BAM och en ERL Typ 12 fallhammare⁷.



Figur 1 Fallhammare av typen ERL Typ 12B

Ett exempel på testmetoder FOI valt att använda sig av är MIL-STD-1751A test 1012 och 1015⁸. Försöken utförs för varje prov i en s.k. ”up and down” serie där negativ (ingen) reaktion gör att man testar vid en högre fallhöjd medan en positiv reaktion leder till test vid en lägre fallhöjd. Bedömning av resultatet sker visuellt och med mikrofon.

Rivkänslighet

Friktionskänsligheten hos ett explosivämne undersöks genom rivprov där explosivämnet utsätts för rivning mellan två ytor, varav den ena vanligtvis är stationär. BAM friktionsapparat är vanligt förekommande, och även den modell som används på FOI. FOI utför testet bl.a. enligt MIL-STD-1751A test 1024⁸. BAM friktionsapparat består av ett fast porslinsstift och en rörlig porslinsplatta fastsatt på en släde. Den rörliga delen drivs av en motor och rörs fram och tillbaka en sträcka av 10 mm under det belastade stiftet. Belastningen varieras för att framkalla reaktion hos provet. Bedömning av resultatet sker med syn och hörsel.

Känslighet för elektrostatisk urladdning

Elurladdningsprov eller gnistprov görs för att få en uppfattning om ett explosivämnes känslighet för elektrostatisk urladdning. Vid vissa betingelser (låg luftfuktighet och högt isolationsmotstånd mot jord) kan en människa laddas upp till en spänning om ca 20 kV. Om hela den upplagrade elektriska energin urladdas uppgår den till 20-40 mJ, vilket räcker mer än väl för att tända många tändämnen och eltändare. Produkter innehållande tändämnen/primärsprängämnen är som regel känsliga för laddningar <50 mJ, medan känsligheten för pyrotekniska satser mer beror av komponenternas egenskaper. Sprängämnen och krut är oftast inte möjliga att tända med statisk elektricitet från personer så länge de föreligger i kompakt form. Det är däremot möjligt att tända damm i blandning med luft på samma sätt som annat brännbart damm⁹.

För att undersöka känsligheten för elektriska urladdningar placeras provet på en metallplatta, varefter en kondensator med känd kapacitans urladdas genom provet. Spänningen över kondensatorn varieras tills provet tändes. Resultatet av testet anges normalt som totalt lagrad energi i kondensatorn vid 50 % tändfrekvens. FOI använder sig av ett egenutvecklat instrument för att undersöka känslighet för elektrostatisk urladdning¹⁰.

Kritisk diameter

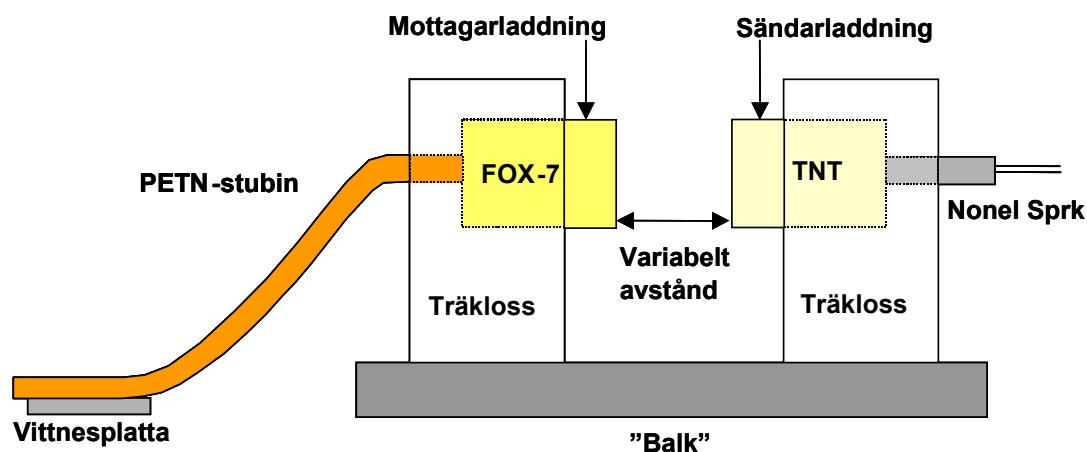
Bestämningen av kritiska diametern är, liksom de obligatoriska känslighetsproven (fallhammare, rivprov, stabilitet osv.), av stor betydelse innan ett nytt explosivämne hanteras vidare. Metoden går ut på att bestämma den minsta diameter vid vilken en stabil eller fullständig detonation fortplantar sig i fasta, pastaformiga eller flytande explosivämnen. Stabil detonation är en detonation som fortplantar sig med konstant hastighet och vid en fullständig detonation fortplantar sig detonationen utefter provets hela längd. FOI utför testet bl.a. enligt provningsmetod 110, från bilaga 3 i FSD 0214¹¹. Vid behov, t.ex. vid karakterisering av flytande sprängämnen, innesluts explosivämnet i rör av olika dimensioner och material. Gjutna eller pressade explosivämnen provas dock utan inneslutning. Det är viktigt att den kritiska diametern alltid jämförs med dimensionen som används i ett småskaligt prov om detta syftar till att studera ett detonationsförlopp¹². Är dimensionen vid det småskaliga provet mindre än eller av samma storlek som den kritiska diametern blir testet inte särskilt meningsfullt. FOI har använt denna metod vid utvärdering av ADN¹³.

Stötvågskänslighet

Gap test

Denna provningsmetod används för att undersöka ett explosivämnes stötvågskänslighet. Testet går ut på att försöka bestämma reaktionen hos det testade ämnet vid olika kraftiga stöteffekter. Detta uppnås genom att man varierar avståndet mellan sändarladdningen och mottagarladdningen. Metoden är avsedd att förutsäga risken att få en oplanerad detonation av ett explosivämne när det utsätts för en stötvåg från ett annat detonerande explosivämne. Gap-tester kan utföras enligt en rad olika metoder och utrustningar, och medger även variationer av provkropparnas dimensioner (small eller large gap test). Mottagarladdningar och sändarladdningar består av rena, pressade eller gjutna och maskinbearbetade cylindrar. Barriärmaterialet mellan laddningarna kan vara plastskivor eller bestå av luft. Den påverkan som en mottagarladdning utsätts för blir av något annorlunda karaktär beroende på om barriären utgörs av luft eller plastskivor. Det kan därför vara av värde att utföra båda typerna av provning¹².

En metod som använts vid FOI är initiering över luftspalt¹⁴. Testerna utförs enligt provningsmetod 116.2, Initiering över luftspalt, från bilaga 3 i FSD 0214¹¹ med smärre avvikelser. Försöksuppställningen kan ses i Figur 2.



Figur 2 Skiss av försöksuppställningen vid GAP-test över luftspalt.

Resultatet från testet anges som ett intervall inom vilket avståndet som motsvarar 50 % sannolikhet för detonation av mottagarladdningen befinner sig. FOI har även använt small-scale gap test vid karakterisering av bl.a. FOX-7⁶ och ADN¹⁵.

Beskjutningsprov

Denna metod är användbar vid bestämning av stötkänslighet vid projektilanslag för fasta, pastaformiga eller flytande explosivämnen och testet utförs enligt FSD 0214¹¹. Provkropparna skall vara cylindriska. Plastiska, flytande eller pulverformiga explosivämnen förpackas i ett tunnväggigt plast- eller papprör. Det undersökta explosivämnet beskjuts med projektiler med platt anslagsyta. En serie skott med olika projektilhastigheter avfyras för att bestämma den minsta hastighet vid vilken en reaktion, deflagration eller detonation, erhålls. De underlag som används för utvärdering är: utslag på ballistisk pendel, ljusemission, knall och initiering av pentyl-

stubin. FOI har bl.a. använt sig av beskjutningsprov (i modellskala) enligt svensk försvarsstandard vid känslighetstestning av nya undervattensexplösivämnen^{16,17}. En sammanställning av resultaten från en rad beskjutningsprov på bland annat tetryl, RDX och TNT, utförda på FOI, finns att läsa i "Beskjutningsprov: Resultatsammanställning av provningar utförda mellan 1962 och 1993" av L. Bodin¹⁸.

Detonerbarhetsprovning

Detonerbarhetsprovning är ett relativt enkelt och billigt test som är användbart vid bestämning av känsligheten hos ett explosivämne för detonationsstötståg. Testerna utförs enligt SÄI Allmänna råd 1986:1¹⁹. Vid provningen används en stålcylder, med påsvetsad botten och gängat lock, fylld med explosivämnet. Tre standarddimensioner på cylindern kan användas, innerdiameter 25 mm och längd 300 mm, innerdiameter 50 mm och längd 500 mm eller innerdiameter 100 mm och längd 1000 mm. Vid användandet av den minsta dimensionen sker initieringsförsöket med en standardsprängkapsel, vid övriga dimensioner utnyttjas en booster¹². Om ingen fortplantning fås vid användandet av den minsta dimensionen görs försök med nästföljande dimension. Vid utebliven detonation vid provning fås, redan vid provning med den minsta dimensionen, en god indikation på lågkänslighet hos ett explosivämne. Metoden har bl. a. använts för jämförande undersökningar av känsligheten vid framtagande av en ny lågkänslig sprängämneskomposition vid FOI²⁰ (Figur 3).



Figur 3 Resultat av detonationsprov med 25 mm rör. NaCl (överst), Hexotol (mitten) och FOF-4 (nederst).

Känslighet för brand och upphettning

Koenentest

I Koenentest görs ett prov i stålhylsa, bl a för att bestämma känsligheten hos fasta och flytande substanser när de utsätts för stark upphettning i ett slutet utrymme. Det ger även en vägledning i bedömningen om ett ämne är att betrakta som explosivämne eller ej⁹. Koenentest är en välbeprövad metod som är relativt enkel att genomföra¹². Testet utförs enligt FN:s standard ST/SG/AC.10/11²¹ där en stålhylsa med väggjockleken 0,5 mm, innerdiametern 24 mm och längden 75 mm fylls med prov upp till ca 60 mm höjd. Stålhylsan värms utvändigt tills provet antänds. Tid till tändning, brinntid och typ av reaktion studeras i förhållande till diametern på avlastningsöppningen i stålhylsans lock. Om en explosion sker så att hylsan splittras räknas antalet splitter, vid minst 3 bitar vid en håldiameter av 1 mm anses det vara ett explosivämne. FOI har bl.a. använt sig av Koenentest vid karakterisering av det lågkänsliga explosivämnet FOX-7⁶.

Slow cook-off

Slow cook-off testet simulerar transport och lagringssituationer där explosivämnet utsätts för långsam utvändig upphettning. Explosivämnet innesluts i en hylsa enligt FSD 0243²². Provet upphettas därefter långsamt med en jämn hastighet av 3.3°C/timme tills en explosion sker eller 300°C uppnåtts, varvid provet avbryts. Under försöket registreras temperatur och tryck. FOI har använt sig av denna testmetod, med vissa justeringar, vid känslighetstestning av nya undervattens-explosivämnen¹⁶.

Brandprovning (Fast cook-off)

Fast cook-off, eller brandprov, syftar till att utvärdera känsligheten hos ett explosivämne när det utsätts för direkt brand. För testet innesluts explosivämnet i en hylsa och upphettas därefter i ett standardbål tills en explosion inträffar. Testet utförs enligt FSD 0240²³. Under försöket registreras temperatur, tryck och tid. Efter explosion dokumenteras hylsans utseende. FOI har använt sig av denna testmetod vid känslighetstestning av nya undervattensexplivämnen¹⁶.

Antändningstemperatur

Wood's metallbad

Vid bestämning av antändningstemperaturen för ett explosivämne placeras en liten mängd prov i en aluminiumhylsa eller ett provrör av glas. Provmängden kan variera mellan 15 och 200 mg beroende på ämnets egenskaper. Upphettning sker genom att provröret ställs i ett värmebad, som utgörs av en smälta av Woods metall, och därefter mäts tiden till antändning som funktion av temperaturen. FOI har bl. a. använt sig av Woods metallbad vid karakteriseringen av det på FOI framtagna explosivämnet FOX-7²⁴ och vid utvärdering av oxidatorn ADN¹⁵.

Antändningstemperatur kan även mätas med hjälp av DSC (differential scanning calorimetry). FOI har visat att det råder god korrelation mellan värden uppmätta i DSC och i Wood's metallbad²⁵.

Karakterisering av prestanda

Karakterisering av explosivämnen och explosivämnesinnehållande formuleringar (krut och sprängämnen) med avseende på prestanda är olika komplicerat beroende på om det är fråga om ett raketkrut, kanonkrut eller ett sprängämne. Det krävs också olika typer av test för att få fram de materialdata som är förknippade med respektive produkt. En kortfattade beskrivning av dessa test och exempel på termodynamiska beräkningsprogram ges nedan.

Raketkrut

Den parameter som bäst anger ett raketkruts prestanda är specifik impuls. Vid beräkning av specifik impuls behövs två materialrelaterade indata - sammansättning hos krutet och dess bildningsvärme.

Sammansättningen får man fram genom att utföra elementaranalys och det utförs av externa analyslaboratorier.

Mätning av bildningsvärme görs med hjälp av en bombkalorimeter. Med en bombkalorimeter mäts förbränningsenergin, dvs. den kemiskt bundna energin i ett ämne, vid fullständig förbränning i ett överskott av syre. Från förbränningsenergin kan sedan bildningsvärmets beräknas²⁶.

Beräkning av specifik impuls görs genom att anta ideala gasförhållanden och kemisk jämvikt (1). T = temperatur och M = gasprodukternas medelmolekylvikt. Information om dysparametrar (areaökning eller tryckskillnad mellan innertryck och yttertryck) behövs också. Exempel på termodynamiska beräkningsprogram där specifik impuls kan räknas fram är NASA CEA^{27,28} och ICT-koden²⁹.

$$I_{sp} \propto \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1)$$

Viktiga parametrar för krut är deras brinnhastighet och tryckexponent vid förbränningen. Dessa beror av krutkomposition och den temperatur och tryck vid vilken förbränningen sker. Experiment som syftar till att mäta brinnhastigheten hos ett krut vid olika tryck görs därför. Dessa experiment kan utföras i en s.k. Crawford bomb som arbetar under nära konstant tryck (< 25 MPa). Isolerade stavar av krutet antänds i ena änden med en glödtråd och tiden mellan avbränningen av två silvertrådar på ett bestämt avstånd från varandra mäts därefter. Vieille's brinnhastighetsekvation, där r = brinnhastighet, a = konstant, p = tryck och n = tryckexponent, används för att bestämma tryckexponenten.

$$r = ap^n \quad (2)$$

Tryckexponenten, n , beräknas genom linjär regression av trycket och brinnhastighets värden plottas i logaritmisk skala. Metoden finns beskriven i ref. ³⁰. Detta är en vanlig metod för att utvärdera krut och har använts vid FOI i en rad utvärderingar, bl.a. vid utveckling av ADN-baserade raketkrut och FOX-7 baserade kompositioner¹⁴.

Kanonkrut

En parameter som anger ett kanonkruts prestanda är force eller arbetsvärde. Vid beräkning av arbetsvärde behöver man veta sammansättning och bildningsvärde hos krutet. På samma sätt som för raketkrut bestäms sammansättningen genom elementaranalys och bildningsvärdet med hjälp av en bombkalorimeter.

Då kanonkrut brinner vid betydligt högre tryck än raketkrut gäller inte ideala gaslagen. Därför måste beräkning ske under realgasförhållanden.

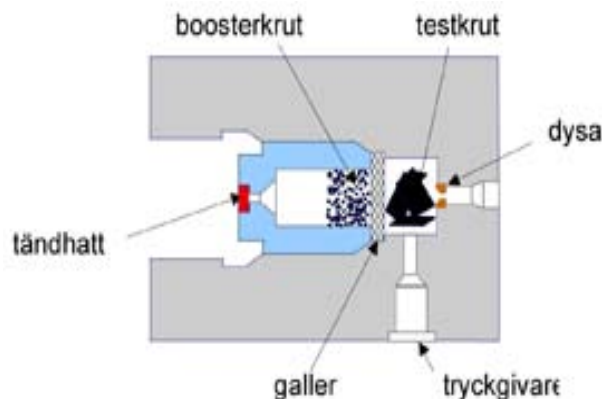
Sker krutets förbränning vid konstant volym och utan värmeförluster uppnås flamtemperaturen, T_{flam} , och då kan man räkna ut arbetsvärdet, f ³¹. Exempel på termodynamiska beräkningsprogram där arbetsvärdet kan räknas fram är bl.a. en FOI-modifierad variant av NASA CEA programmet^{32,33} och ICT-koden²⁹.

$$f = \frac{R_0 \cdot T_{flam}}{M} \quad (3)$$

Brinnhastigheten hos kanonkrut är liksom för raketkrut en viktig parameter. De flesta använder sig av Vieille's brinnhastighetsekvation (2) även för kanonkrut. Det finns även de som anser att den halvempiriska brinnhastighetsekvationen, definierad av Muraour-Aunis (4), är bättre att använda i kanonsammanhang. r är brinnhastigheten vinkelrätt mot krutkornens ytor, p = gasernas tryck, a och b är konstanter³¹. FOI använder sig främst av Vieille's ekvation (2) vid utvärdering av EMBLA-resultat.

$$r = a + bP \quad (4)$$

Vid brinnhastighetsmätningar av kanonkrut vill man kunna mäta vid högre tryck än vad som är möjligt med Crawford bomben (<25 MPa). Istället använder man sig av EMBLA 75 (Bofors explosives bomb)³⁴ för att få fram brinnegenskaperna vid högre tryck (50-350 MPa). Förbränningen i EMBLA-bomben sker genom att en tändhatt tänder ett känt snabbbrinnande startkrut som åstadkommer önskat tryck i bomben (Figur 4).



Figur 4 EMBLA bomb

Startkrutet tänder provkrutet och övertrycket i bomben släpps ut genom ett dyshål. En tryckgivare mäter trycket och brinntiden uppmäts. Utvärderingen av brinnhastigheten sker även här med brinnhastighetsekvationen (ekvation 2)³⁵.

Sprängämnen

Det mest kompletta sättet att karakterisera ett sprängämne kan göras experimentellt genom att studera expansionen av detonationsprodukterna inuti ett metallrör. Detta test kallas cylindertest. Cylindertestet ger information om sprängämnets arbetsförmåga och fungerar för alla typer av applikationer utom för undervattenstillämpningar. Metoden går i korthet ut på att man i en kopparcylinder har ett sprängämne som initieras med en booster i ena änden. När detonationsfronten tar sig framåt i sprängämnet kommer kopparcylinderns väggar att expandera och därmed kan den radiella ökningen av kopparcylindern som funktion av tid mätas. Med dessa data görs ett antal numeriska beräkningar för att få fram parametrarna i Jones-Wilkins-Lee-ekvationen (även känd som JWL tillståndsekvation)²⁶.

Cylindertest har använts vid FOI vid bl.a. framtagning av JWL-ekvationen för FOX-7³⁶.

Ett exempel på ett termodynamiskt beräkningsprogram som används av FOI vid beräkning av detonationshastighet, detonationstryck och volymexpansion är Cheetah 2.0³⁷. Den tillståndsekvation som Cheetah 2.0 vanligen använder sig av är BKW och den är kalibrerad för sprängämnen som innehåller C, H, N och O med ett detonationstryck upp till det som oktogen har.

IM-testning

Då det Svenska försvaret går från ett invasionsförsvaret till ett insatsförsvaret ökar naturligtvis behovet av åtgärder som ökar både plattformarnas och personalens säkerhet. Vid internationella insatser är acceptansen för svenska förluster låg varför dessa måste minimeras. Den svenska trupptransportkapaciteten är begränsad både till sjöss och i luften och ett ytterligare problem är dessutom svårigheten att utnyttja transporthjälp från andra länder, som har som policy att inte transportera icke NATO-klassad ammunition. Ett flertal länder har numera en policy att i möjligaste mån använda sig av IM. IM står för "Insensitive Munition" och har tidigare i Sverige kallats för lågkänslig ammunition. Det dokument som idag styr det mesta av IM-arbetet internationellt sett är en NATO-standard, STANAG 4439³⁸.

Det är viktigt att komma ihåg att IM är ett helhetskoncept där man uppnår IM-status för ett helt ammunitionsobjekt i sin förpackning. Denna helhetssyn gör det möjligt att uppnå IM-målen på ett flertal olika sätt. Man kan använda mindre känsliga energetiska material, designa sin ammunition så att den ej detonerar vid höga påfrestningar och använda skyddande förpackningar. Det är oftast nödvändigt att använda en kombination av dessa metoder.

De test som idag är internationellt mest accepterade och rekommenderas i STANAG 4439 är följande:

Hot	Test	IM-krav
Bränslebrand i lager, magasin, flygplan eller fordon	Brandprov STANAG 4240	Ej kraftigare reaktion än brand
Brand i närliggande förråd, magasin eller fordon	Långsam uppvärmning (slow cook-off) STANAG 4382	Ej kraftigare reaktion än brand
Angrepp från vapen med mindre kaliber	Beskjutningsprov STANAG 4241	Ej kraftigare reaktion än brand
Angrepp från fragmenterande vapen	Beskjutningsprov med fragment STANAG 4496	Ej kraftigare reaktion än brand
Angrepp från RSV	Beskjutningsprov med RSV STANAG 4526	Ej kraftigare reaktion än partiell detonation
Detonation i lager, magasin, flygplan eller fordon	“Sympathetic detonation” STANAG 4396	Ej kraftigare reaktion än partiell detonation

Sammanfattning

Denna rapport är en sammanställning av de vanligaste metoder FOI använder sig av vid karakterisering av explosivämnen och explosivämnesinnehållande formuleringar (krut och sprängämnen). Karakterisering i denna rapport berör metoder som ska svara på frågor relaterade till säkerhet och prestanda. Metoderna utgår från liten skala och beroende på om explosivämnet uppfyller de säkerhetskrav som finns, väljer man att gå vidare till större skala eller avsluta karakteriseringen. Rapporten berör även kortfattat de test som används internationellt vid den allt viktigare IM-kvalificeringen av ammunition för t.ex. utlandstjänst.

Referenser

- 1 H. Östmark, H. Bergman, G. Åqvist, The chemistry of 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one (NTO): thermal decomposition, *Thermochimica Acta* **1993**, 213, 165-175.
- 2 STANAG 4147 (Edition 2) - Chemical Compatibility of Ammunition Components with Explosives (Non-nuclear Applications), Military Agency for Standardisation (MAS), Brussels **2001 (June)**, p.
- 3 STANAG 4582 (First Draft) - Explosives, Nitrocellulose based propellants, stability test procedure and requirements using heat flow calorimetry, Military Agency for Standardisation (MAS), Brussels **2002 (July)**, p.
- 4 H. Östmark, H. Bergman, K. Ekvall, A. Langlet, A study of the sensitivity and decomposition of 1,3,5-trinitro-2-oxo-1,3,5-triazacyclo-hexane, *Thermochimica Acta* **1995**, 260, 201-216.
- 5 G. Åqvist, *Beskrivning av kemiluminiscensapparat för bestämning av kvävemonoxid*, FOA-D-94-00014-2.3-SE, **1994**, 59.
- 6 H. Östmark, H. Bergman, U. Bemm, P. Goede, E. Holmgren, M. Johansson, A. Langlet, N. Latypov, A. Pettersson, M.-L. Pettersson, N. Wingborg, C. Vörde, H. Stenmark, L. Karlsson, M. Hihkiö, 2,2-dinitro-ethene-1,1-diamine

- (FOX-7) - Properties, analysis and scale-up, *32nd International Annual Conference of ICT*, July 3-6, 2001, Karlsruhe, Germany **2001**, p.26/21-21.
- 7 L. Bodin, *Nya fallhammaren ERL 12B med testresultat*, FOI 03-272:5, **2003**, FOI Swedish Defence Research Agency, 8.
- 8 Department of Defence, Safety and Performance Tests for the Qualification of Explosives (High Explosives, Propellants and Pyrotechnics), in, Vol. MIL-STD-1751A (DoD USA, 2001) 201pp.
- 9 I. Seijlitz, *Explosivämneskunskap*, Tryckeri AB Knappen, Karlstad, **1987**, p. 205.
- 10 L. Bodin, T. Hultman, *El-urladdningsaggregat för testning av explosivämnen*, FOI 03-272:6, **2003**, FOI Swedish Defence Research Agency, 8.
- 11 Försvarets Materielverk, Miljötålighetsprovning av ammunition - Kvalificering av explosivämnen för militärt bruk, in: Försvarets..Materielverk (Ed.), Svensk Försvarsstandard, Vol. FSD 0214 (1999) 41pp.
- 12 N. Roman, *Småskaliga provningsmetoder med möjlig användning vid utveckling av okänsliga explosivämnen*, FOI MEMO 02-272:7, **2003**, 12.
- 13 H. Edvinsson, A. Hahma, *Kritiska parametrar för ADN*, FOA Rapport 00-2472/S, **2000**, FOA,
- 14 R. Adolfsson, L. Bodin, C. Eldsäter, Å. Pettersson, N. Roman, M. Wanhatalo, *Optimisation and characterisation of compositions with low sensitivity based on FOX-7 and energetic binders. Large-scale GAP test of pure FOX-7 (in Swedish)*. Technical Report FOI-R-0668-SE, **2002**, FOI, 1-25.
- 15 S. Karlsson, H. Östmark, Sensitivity and Performance Characterization of Ammonium Dinitramide (ADN), *11th International Detonation Symposium*, August 31 - September 4, Snowmass, Colorado, US **1998**, p.801-806.
- 16 H. Edvinsson, M.-L. Pettersson, E. Holmgren, B. Sandberg, H. Östmark, A. Helte, J. Lundgren, M. Johansson, J. Irving, *Utveckling av ADN/Al*, Technical Report FOI-R-1704-SE, **2005**, FOI, 39 pp.
- 17 Försvarets Materielverk, Beskjutningsprov mot explosivämnen för lågkänslig ammunition i modellskala, 12.7 mm pansarprojektil, in: Försvarets..Materielverk (Ed.), Svensk Försvarsstandard, Vol. FSD 0241 (1993) 3pp.
- 18 L. Bodin, *Beskjutningsprov: Resultatsammanställning av provningar utförda mellan 1962 och 1993.*, FOA-D--94-00035-2.3--SE, **1994**, FOA,
- 19 SÄIFS, Sprängämnesinspektionens författningssamling. Sprängämnesinspektionens allmänna råd om känslighetsprovning av explosivämnen, in: (1986) Kapitel 12, 83-89.
- 20 R. Adolfsson, L. Bodin, C. Eldsäter, Å. Pettersson, M. Wanhatalo, *Formulation of FOX-7 based explosives (in Swedish)*, Technical Report FOI-R-1311-SE, **2004**, FOI, 23.
- 21 *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Manual of Tests and Criteria*, ST/SG/AC.10/11/Rev. 4, 4th Ed., **2003**, United Nations,
- 22 Försvarets Materielverk, Långsam uppvärmning av explosivämnen för lågkänslig ammunition i modellskala, 3.3°C/H, in: Försvarets..Materielverk (Ed.), Svensk Försvarsstandard, Vol. FSD 0243 (1993) 3pp.
- 23 Försvarets Materielverk, Brandprovning av explosivämnen för lågkänslig ammunition i modellskala, in: Försvarets..Materielverk (Ed.), Svensk Försvarsstandard, Vol. FSD 0240 (1993) 5pp.
- 24 H. Östmark, A. Langlet, H. Bergman, N. Wingborg, U. Wellmar, U. Bemm, *FOX-7—A New Explosive with Low Sensitivity and High Performance*, *11th*

- International Detonation Symposium*, August 31 - September 4, Snowmass, Colorado, US **1998**, p.807-812.
- 25 N. Wingborg, M. van Zelst, *Comparative study of the properties of ADN and HNF*, Scientific Report FOA-R--00-01423-310--SE, **2000**,
- 26 M. Su'ceska, *Test Methods for Explosives*, Springer-Verlag, **1995**, p.
- 27 S. Gordon, B. J. Mc Bride, *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications - 1. Analysis*, NASA Ref. Publ. 1311, **1994**, 61.
- 28 B. J. Mc Bride, S. Gordon, *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications - 2. Users Manual and Program Description*, NASA Ref. Publ. 1311, **1996**, 178.
- 29 H. Bathelt, F. Volk, M. Weindel, *The ICT-Thermodynamic-Code (ICT-Code) - User's Manual*, **2000**,
- 30 A. Magnusson, T. Hultman, *Bestämning av kruts förbränningshastighet - Datorprogram och hårdvara*, FOA Rapport C20917-2.1, **1992**, FOA,
- 31 L.-E. Larsson, *Kanoners Innerballistik ver 2.4*, **2000**, Bofors Weapon Systems AB, 78 pp.
- 32 S.-E. Flygar, *CEC89. Computer Programme for Thermochemical Equilibrium Calculations with Real Gas State Assigned Volume*, FOA Report C20854-2.1, **1991**, FOA, 42.
- 33 S.-E. Flygar, *INCEC93, inläsningsprogram till termokemiprogrammet CEC93*, FOA Rapport C20973-2.1, **1994**, FOA, 69 pp.
- 34 Bofors Explosives, *EMBLA-Utrustning för bestämning av brinnhastigheten för krut*, **1995**, 9 pp.
- 35 Bofors Explosives, *EMBLA-WinEMBLA. Program för bestämning av brinnhastigheten i EMBLA-bomb*, **1995**, 17 pp.
- 36 S. Karlsson, H. Östmark, C. Eldsäter, T. Carlsson, H. Bergman, S. Wallin, A. Pettersson, *Detonation and sensitivity properties of FOX-7 and formulations containing FOX-7*, *12th International Detonation Symposium*, August 11-16, San Diego, CA, US **2002**, p.286-291.
- 37 L. E. Fried, W. M. Howard, P. C. Souers, *Cheetah 2.0 Users Manual*, UCRL-MA-117541 Rev. 5, **1998**, Lawrence Livermore National Laboratory,
- 38 *Military_Agency_for_Standardisation, STANAG 4439 (Ed 1): Policy for Introduction, Assessment and Testing for Insensitive Munitions (MURAT)*, **1998**, NATO, 5 pp.