

硝爆の燃焼に関する研究

村門 律, *木内 文一**

述者らは経験と研究によって、次のことを確信するに至った。すなわち、「炭屑の斉発発破においては、爆薬の燃焼は隣接発破の高温・高圧ガスによって起る場合より、近接発破の際に出来る半爆雷管の熱によって起る場合の方がむしろ多い」

また、述者らは「ある条件下では、近接孔にある MS 雷管は前段の発破の影響で秒時狂い、半爆となる」ということを既に発表している。

今回の爆薬燃焼に関する研究によって、次のことを明らかにすることが出来た。

- (1) MS 雷管の添装薬をタルク粉と置きかえた特殊雷管の爆発エネルギーによって、石炭粉混入爆薬は燃焼する。
- (2) MS 雷管を爆薬（模造粉状）と共に鋼製円筒金型容器の中に入れて、外圧によって圧縮すると、MS 雷管は変形し、半爆となる。
- (3) 石炭粉混入爆薬は(2)に上述した変形・半爆雷管の爆発熱エネルギーによって、高い確率で燃焼する。
- (4) (2)に上述した変形・半爆雷管は、爆発した際の管体破裂状況並びに鉛板打抜試験の威力の点について、近接発破の際に出る半爆雷管の状況に非常によく似ている。
(また、上述の変形・半爆雷管の管体破裂状況は、現場にて爆薬が燃焼した際に残っていた雷管遺物の状況に非常によく似ている)
- (5) 石炭粉混入爆薬と石炭粉を混入しない正常爆薬とを、発火温度と発火待時間の点について、クルップ式発火点試験によって比較してみたところ、
発火待時間がゼロの場合（瞬間発火温度）には前者（石炭粉混入爆薬）の温度が後者の温度に比べて高いのに、発火待時間が長い場合には前者の温度の方が後者の温度より低い。
- (6) 変形・半爆雷管と正常雷管とを、爆発温度（と爆発時間と）の点について比較してみると、前者の爆発温度の方が後者の爆発温度に比べて高い。（また、爆発時間についても前者の方が長い）

雷管の爆発温度を熱化学計算方式（J. Taylor の方法）によって計算してみたところ、変形・半爆雷管の場合は、 $3,387^{\circ}\text{C}$ に対し、正常雷管の場合は $2,732^{\circ}\text{C}$ であった。

以上のことを要約してみると、この研究結果は冒頭に述べた述者らの経験と研究に非常によく合致するものである。

1. 結 言

発破は炭鉱における作業の中でも未だ重要なものである。発破の安全性は各種条件下においてガス・炭じんへ着火する確率を減少させることがもっとも重要である。

これがためには、爆薬の爆ごうによる着火の危険性にはもちろんのこと、爆燃あるいは燃焼によるものに

も同時に関心を払わなくてはならないと思考する。

その理由は爆薬が爆燃あるいは燃焼を起すならば、ガス・炭じんに着火する確率が急激に増大するからである。これがため、欧州においても爆薬燃焼の研究が爆薬製造・発破技術の両面に亘って盛んに行なわれている¹⁾。

考えてみるに、わが国の炭鉱においても爆薬燃焼事故が未だ跡を絶たないのは関係者として甚だ遺憾に思う次第である。

爆薬燃焼の原因にはいろいろあるが²⁾、述者らは炭

昭和47年7月17日受理

* 北海道鶴山保安センター 068 岩見沢市2条東15丁目

** 北洋火薬KK07301砂川市豊沼町

鉱での現場経験から、①爆薬燃焼の多くが発破時、斉発結線した孔の中に出ること、②燃焼した爆薬の中から火源となった半爆雷管が出たこと、などに着目して、爆薬燃焼は第1孔よりの高温・高圧ガスによって第2孔の爆薬が燃焼する場合より、むしろ半爆雷管によって同一孔の爆薬が燃焼する場合の方が多いのではないかと推測するに至った。

さて、雷管によってその同一孔の爆薬が燃焼するケースとして、雷管が爆薬から離れているときは雷管の破片によって、石炭粉混入爆薬は燃焼する⁹⁾。しかし、この場合の着火原因は雷管破片が爆薬へささり込んだためであって、上記の場合のように半爆雷管の残管体がそのまま爆薬の中にあったという場合とは異なる。

以上のことから、半爆雷管によって爆薬燃焼は起るといふ考え方に基づいて、述者らは今まで爆薬燃焼実験を行ない、それぞれ所見を発表した¹⁰⁾。

その後、雷管が近接発破の影響で秒時狂いあるいは半爆になることを実験によって明らかにすることが出来た¹¹⁾。

ここで考えてみるに、上記の述者らの爆薬燃焼実験¹⁰⁾においても電気雷管そのものを着火源とはしていない。またこのような実験報文には未だ接していない。

そこで、近接発破によってできる半爆雷管を用いて爆薬燃焼実験を行ないたいと考え、その実験条件はなるべく現場状況に適合するように研究を進め、この実験に成功した。

また一方、爆薬について、石炭粉が混入しない場合は燃焼しないのに、混入した場合は半爆雷管によって燃焼する。この理由についても、実験と考察とを行ない、解明の手懸りを得た。

以上によって、近接発破の際には半爆雷管によって爆薬燃焼が起り得ることを明らかにすることができた。

これらのことは爆薬燃焼の原因を探究する上に、更には事故防止上にも役立つものと思考するので、ここに発表し諸賢のご批判を乞う次第である。

2. 実験

2-1 実験目的

既に、上述したように発破現場で燃焼した爆薬の中に半爆雷管が発見された。(後掲写真 No. 1 参照) また、近接発破によって、雷管が半爆になることも明らかになった。

そこで、半爆雷管によって爆薬燃焼が起り得るか否か、また、起り得るならば、その条件は如何なものであるか、これまでの実験には電気雷管そのものを用いていないので、MS 電気雷管を用いて以上のことを確

める目的で実験を行なう。

2-2 予備実験

2-2-1 実験方法についての考え方

(1) 雷管：実験を初めるにあたって、まず供試雷管製作のため、半爆雷管について考えてみる。半爆雷管は近接発破の際に、第1孔の発破の影響によって⁹⁾第2孔にある雷管の爆粉(DDNP)が死圧となり、爆ごうしなくなるので添装薬を起爆させることができなくなる結果半爆となったものと考えた⁷⁾。

従って、MS 電気雷管の点火玉、延時薬、爆粉(死圧)はそのままとし、添装薬のみをタルクと置き換えた特殊雷管によって、まず爆薬が燃焼することを確め、次に近接発破のときにできる変形の半爆雷管によって爆薬燃焼実験を行なうことにした。

(2) 爆薬：爆薬燃焼に係る事項に次のようなものがある。

①石炭粉が混入した場合は着火・燃焼し易い。石炭の種類・粒度によって多少異なるが、石炭粉の混入率が10~70%の広い範囲で燃焼し、20~30%が最も燃焼し易く、しかも焰を出して燃える⁸⁾。②石炭粉が爆薬中に混入しないでも爆薬の周囲を被覆した状態であれば、一度何らかの原因で爆薬に着火すれば燃焼を継続する⁹⁾。

③Bore hole 装薬の場合、爆薬が加圧されると雷管では正常に起爆しないので不発残留となり、爆薬燃焼の原因となる¹⁰⁾。この加圧程度と爆薬の不爆との関係はガスの種類によって異なる¹¹⁾。④Bore hole の周囲から加熱され、爆薬が予熱されると燃焼し易くなる¹²⁾。

⑤くり粉が爆薬の中に混入、周囲にある、葉包間に介在する場合等も正常に起爆しない、あるいは伝爆しないで爆薬燃焼の原因になる¹³⁾。

これらのうち、爆薬燃焼について主要と考えられる①~③の状態の供試爆薬を用いて実験をすることにした。

(3) 実験装置：Bore hole を想定し、上記(2)に述べたように爆薬の燃焼条件を考えて①砂中埋設と②鉄管密閉の2通りとした。

2-2-2 実験経過

実験経過の大略を述べるが、ここでは爆薬燃焼の条件に関係があるので、燃焼しなかった実験についても簡単に述べることにする。

実験には大別して5種類の供試雷管を使用したもので、この供試雷管の種類別に実験概要を述べる。

(1) MS 雷管の点火玉、延時薬はそのままとし、爆粉と添装薬とをタルクと置きかえた特殊雷管を用いた。

この場合は爆薬は燃焼しなかった。

(2) MS 雷管の点火玉、延時薬、爆粉はそのままとし、添装薬のみをタルクと置きかえた特殊雷管を使用した。この場合、爆粉を死圧にしたものと、そうでないものの2通りを使用した。いずれの場合も爆薬に石炭粉を混入した場合のみ爆薬は燃焼した。

しかし、これらは近接発破によってできる半爆雷管の機能を想定して作った特殊雷管である。

そこで、装薬中の雷管が近接発破の影響で半爆になる物理的現象⁷⁾に着目して、変形の半爆雷管を作ることにした。

これについて、以下(3)、(4)に述べる。

(3) 水中(鉄製円筒56 cmφ×水深33 cm)に2本の雷管を一定間隔に離して吊し、うち1本を起爆して、他の雷管(2枚の薄鉄板で雷管をサンド・ウィッチ、更に密封)を変形させた。

この方法によって変形の半爆雷管を作ることには可能である。しかし、雷管相互の間隔を調節して半爆になる限界距離を何回かの試行によって求めた。しかし、結果は半爆になったり、あるいはならなかったり、そのバラツキが大きく、しかも、この方法によって得た半爆雷管の変形具合は近接発破の現場から出るものとは異なることがわかった。従って、この方法による半爆雷管はこの実験には適当でない⁸⁾と判断した。

(4) そこで、上記(3)のことを考え、次に雷管の上下に薄鉄板を置き、圧押し変形の半爆雷管を作った。この方法によるときは、雷管を3.8~3.9 mm 厚さまで圧縮すると変形の半爆雷管が得られる。しかし、結果はこれも半爆になったり、ならなかったりバラツキがあり、更に変形具合も近接発破の雷管と異なるので、適当でないことがわかった。

(5) 既に上述した(1項)のように近接発破の場合には、第1孔の発破の影響で第2孔の雷管が変形して、半爆となる。この状態を想定して鋼製円筒金型容器に模造爆薬を満ちし、その中にMS雷管を入れて外圧を加えることによって変形の半爆雷管ができる¹⁰⁾。

この変形の半爆雷管について測定並びに実験を行なったところ、通電発火前の変形具合も、通電発火後の管体破壊状況および威力ともそれぞれ近接発破の際に出るものと、あるいは燃焼した爆薬の中に発見されたものと非常によく似ていることがわかった。

この方法による変形の半爆雷管を用いて Bore hole を想定した鉄管密閉装置による爆薬燃焼実験を行なったところ、石炭粉混入爆薬は燃焼することが明らかになった。更に、雷管・爆薬は鉄管密閉と同じ実験条件にて、砂中埋没による実験も行なってみたが爆薬は燃焼しなかった。それでは次にこれらの実験について順を追って説明する。

2-3 特殊雷管(点火玉、延時薬、爆粉)による爆薬燃焼実験(爆粉を死圧にしない場合)

上述した(2-2-2)のように、特殊雷管の2通りのうち、点火玉、延時薬のエネルギーでは爆薬は燃焼しなかった。

従って、ここではまず爆薬が燃焼した点火玉、延時薬、爆粉(死圧としない)をそのままとし、添装薬のみをタルクと置きかえた特殊雷管による実験について述べる。

なお、爆粉を死圧とした場合については2-4に後述する。

2-3-1 供試雷管

表1は供試雷管の特性を表わしたものである。

Table 1 The character of sample detonators

| No. | base charge | initiator | shell | Kind of delay composition |
|-----|----------------|-----------|-------|----------------------------|
| 1 | talcous powder | DDNP | Cu | 10MS delay detonator No. 9 |
| 2 | " | " | " | 20MS delay detonator No. 8 |
| 3 | " | " | Fe | 10MS delay detonator No. 9 |
| 4 | " | " | " | 20MS delay detonator No. 8 |

2-3-2 供試爆薬

(1) 2号黒鷹印硝安爆薬(非NG系、比重1.0)に三井砂川登川4番層の石炭粉(-100 mesh)を20%混入したものを100 g薬包とした。

(2) 爆薬には石炭粉を混入しないで、爆薬周囲を石炭粉で被覆した。

以上2通りの供試爆薬にて実験を行なった。

2-3-3 実験方法並びに結果

(1) 鉄管密閉実験: 上記の供試雷管(2-3-1)と供

Table 2 Combustibility of Ammonium nitrate Explosives containing or covered with coal powder due to special made detonators

| N | S Explosives containing coal powder 20% | Explosives covered with coal powder |
|---|---|-------------------------------------|
| 1 | ○ ○ × | × |
| 2 | ○ ○ ○ | — |
| 3 | ○ × ○ | × × × × × × |
| 4 | ○ ○ × ○ | × × × × × |

Note, Special made detonator: The talcous powder is loaded instead of base charge. S: State of explosives, N: No of sample detonator (Table 1)
○: Explosive burned.
×: Explosive did not burn.

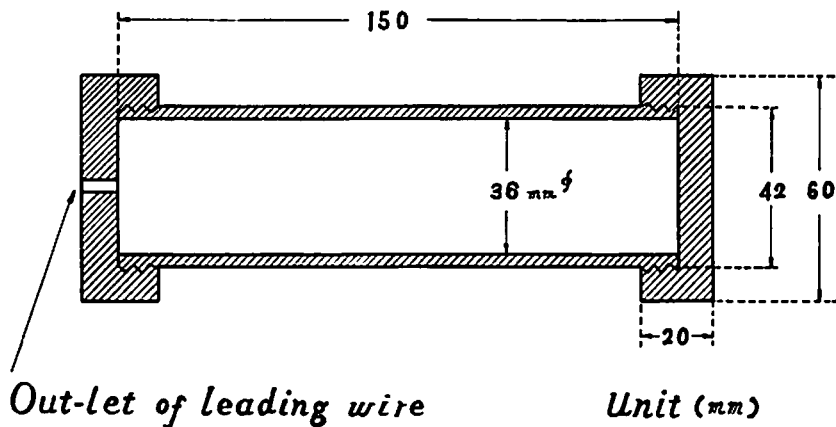


Fig. 1 Apparatus for combustion of explosives by closed steel pipe.

試爆薬 (2-3-2) とを Bore hole を想定した鉄管 (図 1 参照) に挿入し爆薬燃焼実験を行なった。その結果、爆薬は燃焼した (表 2 参照)。

(2) 砂中密閉実験

供試雷管、供試爆薬は上記(1)に同じとし、砂中密閉 (深さ 50 cm) を行なったが、爆薬に石炭粉を混入した場合も、石炭粉で爆薬周囲のみ被覆した場合もいずれも爆薬は燃焼しなかった。

2-4 特殊雷管 (点火玉、延時薬、爆粉) による爆薬燃焼実験 (爆粉を死圧とした場合)

2-4-1 供試雷管

供試雷管として爆粉死圧のものを作るため、爆粉の填圧圧力を 160 kg/本 (≒ 530 kg/cm²) とした。

他は表 1 に同じ。

2-4-2 供試爆薬

上述 (2-3-2) の(1)に同じ。

2-4-3 実験方法並びに結果

上記の供試雷管 (2-4-1) と供試爆薬 (2-4-2) を用い鉄管密閉実験 (図 1 参照) を行なった。

実験結果は表 3のごとく爆薬は燃焼した。

以上の実験 (2-3, 2-4) によって、点火玉、延時

薬、爆粉の特殊雷管の熱エネルギーによって石炭粉混入爆薬は鉄管密閉では燃焼することが明らかになった。

そこで、半爆雷管は近接発破の際、第 1 孔発破の影響で第 2 孔雷管の添装薬が爆ごうしないためにできるものと考えらるならば、鉄管密閉と同じ条件の Bore hole の場合は爆薬に何らかの原因で石炭粉が混入すれば、半爆雷管によって爆薬が燃焼することが、この実験によって更に容易に推察されるようになった訳である。

2-5 圧縮・変形させた半爆の MS 雷管による爆薬燃焼実験

以上の実験はあくまで半爆雷管の機能を想定して作った特殊雷管を用いたものである。

ここで、その延時薬量を考へてみると高段発の雷管でもあった (表 1 参照) ので爆薬燃焼が比較的起り易かったかも知れない。

そこで、次に低段の 10 MS・3 段の雷管そのものを、近接発破を想定して鋼製円筒金型容器によって模造爆薬の中で外圧によって圧縮し、その変形の半爆雷管を用いて、より近接発破の際の状況に適応した爆薬燃焼実験を行なうことにした。

2-5-1 供試雷管

鋼製円筒金型容器 (内径 80 mmφ×高さ 50 mm) の中に仮比重 1.0 の粉状模造爆薬 (硝安 95%+木粉 5%) と雷管 (A, B 社製 10 MS 3 段、鉄管体) とをそれぞれ入れ、外圧によって圧縮し、変形の半爆雷管を作った。この外圧による圧縮圧は 360~450 kg/cm² とした。

この変形の半爆雷管は通電発火前の変形具合、通電発火後の管体破壊状況並びに爆薬を正常に起爆できないこと等が近接発破の際に出る半爆雷管に非常によく

Table 3 Combustibility of Ammonium nitrate Explosives containing coal powder 20 % due to special made detonators.

| No. of Sample detonator | Results of test |
|-------------------------|--------------------------|
| 1 | explosives burned |
| 3 | explosives did not burn. |

Note, Special made detonator: The talcous powder is loaded in stead of base charge and loading pressure of initiator is 160 kg/ piece..

Table 4 Combustibility of Explosives containing coal powder 20% (caked due to hydraulic pressure) in the closed iron pipe by the transformed inferior detonator.

| No. | external pressure given to detonator (kg/cm ²) | the number of sample detonators | results |
|-----|--|---------------------------------|----------------|
| 1 | 360 | 1 | × |
| 2 | 380 | 1 | ○ |
| 3 | 390 | 1 | × |
| 4 | 400 | 1 | ○ |
| 5 | 410 | 2 | ○, ○ |
| 6 | 420 | 4 | ×, ×, ×, × |
| 7 | 450 | 1 | ○ |
| Σ | | 11 | ○=5/11, ×=6/11 |

Note, ○: Explosive burned, ×: Explosive did not burn.

似ている。

2-5-2 供試爆薬

近接発破の際には爆薬も圧縮されることを想定して上述の石炭粉混入爆薬 (2-3-2) をポリエチレン袋に入れ水圧 (20 kg/cm²) で圧縮した。

2-5-3 実験方法並びに結果

(1) 鉄管密閉実験: 上述の供試雷管 (2-5-1) と供試爆薬 (2-5-2) とを用いて鉄管密閉による爆薬燃焼実験 (図1参照) を行なった。

その結果、石炭粉混入爆薬は燃焼した。しかし、爆薬には石炭粉が混入しないで、周囲のみ石炭粉で被覆した場合は燃焼しなかった。

表4は石炭粉混入爆薬の実験結果を示す。

すなわち、①供試雷管11本のうち2本が起爆して半爆とならなかった。なお、この起爆した場合について鉄管の破片状態から破壊威力を判断すると、正常雷管による場合に比し相当威力は小であった。

②半爆となった9本により5回の爆薬燃焼が起きた。③従って、雷管が半爆とならない場合を除くと、燃焼回数/試験回数=5/11-2=5/9≒55.6%という極めて大きい確率で爆薬が燃焼したことになる。

表4はこの実験結果を示す。

ここで考えるに、近接発破の際、前段発破の高温・高圧ガスによって隣接孔の爆薬が予熱されたり、高圧下に置かれたりする場合には、更に爆薬の燃焼性を高めるであろうと推察する。

④通電発火後の供試雷管の管体破壊状況は近接発破による半爆雷管によって爆薬が燃焼する際の条件に重大な関係があると思われるので、これについて述べる。①爆薬が燃焼した場合も、しない場合も、いずれも雷管破片は爆薬薬包端 (雷管挿入部) より6~7cm

の範囲に止まっていた。

そこで、管長40mmを考えると半爆雷管のエネルギーは余り分散しないで雷管挿入部付近の爆薬へ集中的に伝えられた。このため爆薬は燃焼したと推察される。このことから、石炭粉の爆薬への混入は雷管挿入部付近の狭い範囲でも燃焼は起り得るであろうと推察される¹³⁾。⑤管体はいわゆる鳥かご状となり¹⁰⁾、爆粉部の膨脹によって縦割れし、その状態は管体上部の塞栓部 (爆薬燃焼の場合、塞栓は焼失) を要として手の

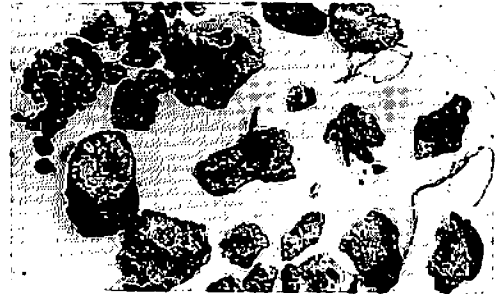


Photo. 1 Remains produced by combustion of explosives in the coal mine blasting.



Photo. 2 Apparatus for combustion of explosives and its experimental result.

指を半開きとした格好である。

⑨内管は円周方向に膨張して縦割れの大きな破片となっていた。

⑩以上の状態を、爆薬が燃焼した場合と、しない場合とについて比較してみると、あまり差は見当らなかった。⑪以上④～⑩の状態は近接発破の場合に出る鳥かご状雷管に非常によく似ている（写真1及び2参照）。

⑫添装薬は爆薬が燃焼しない場合には固化して残っていたが、爆薬が燃焼した場合には残ってはいなかった。これは爆薬が燃焼した際、その燃焼熱で焼失したものと推察する。

この理由は上述のように供試雷管によって爆薬が燃焼した場合も、しない場合も管体の破壊状況が変わらないところから、添装薬が雷管の起爆反応には関与していないと考えられるためである。

以上のことから、近接発破の影響などによって雷管が外圧を受けると爆粉が死圧になり正常に爆ごうしないため添装薬を爆ごうさせることができない結果半爆になるという推定は妥当であったと思される。

更に半爆雷管の延時薬・爆粉（死圧のため爆ごうはしないが、何らかの反応、例えば爆燃あるいは燃焼はしている）のエネルギーでも石炭粉混入爆薬は着火・燃焼し易いので爆薬を燃焼させたと推察する。なお、このことについては後で（3-3, 3-3-3）述べる。

⑬爆薬の状況について

⑭一度着火した爆薬は燃焼を中断することなく全部燃えた。⑮爆薬が燃焼しなかった場合には、雷管挿入部の薬包紙は破れ、薬が飛散していた。

この場合、薬包の末端は7~8cm 残っており、これを手で触ってみると熱くまた少し固化していた（爆薬が燃焼した場合の状態は燃えてしまっているので検べることはできない）。

これらのことを考えてみると、鉄管内密閉実験において爆薬には石炭粉が混入しないで周囲を被覆した場合でも、爆薬への雷管挿入具合が悪いと、例えば薬包端の真中に垂直に入れられないで、周囲の端にまた斜めに入れた場合等は周囲に石炭粉がある条件下では実験回数を多くするとあるいは燃焼することがあるかも知れない。ただし、これはあくまで推測である。

もし、何らかの原因で爆薬へ着火すると薬には石炭粉が混入していないでも周囲に石炭粉がある場合は燃焼を継続することは前に（2-2-1の(2)）も述べた通りである。

⑯爆薬の燃焼時間：供試雷管に通電後5~6秒して青紫色の煙が約2~3分間激しい勢いで脚線口（図1参照）から出る。その後薄い煙（約0.5~1分間）

になって燃焼を終息した。

従って、石炭粉混入の供試爆薬 100g では燃焼時間は約2.5~4分間となる。

ここで、Bore hole 中の爆薬燃焼時間を考えてみる。

石炭粉混入爆薬はその混入率が10~70%の広い範囲で燃焼するが、20~30%が最も燃え易いことから、供試爆薬の石炭粉混入率が20%を考えると一般の場合には上記燃焼時間より長いことが推察される。

ただし、爆薬の種類（主として鋭感剤、可燃物の種類、配合比）¹⁷⁾、爆薬の状態（予熱されている、加圧下にあるあるいは周囲のくり粉の存在）並びに混入石炭の種類・粒子組成等によっても、この爆薬燃焼時間は当然変化することが考えられる。

(2) 砂中密閉実験：上記の鉄管密閉実験と同じ供試雷管と供試爆薬とを用い砂中（深さ50cm）にて爆薬燃焼実験を行なったが、爆薬は石炭粉混入の場合も、石炭粉被覆の場合もいずれについても燃焼はしなかった。

この場合、⑰雷管破片は爆薬周囲の砂の中まで飛散していた。⑱薬包も破れ爆薬も周囲の砂中に飛散していた。以上⑰⑱によって、鉄管密閉実験では爆薬が燃焼したのに砂中密閉では燃焼しない理由を考えてみると次のように推察される。

⑲両者の密閉度が異なる。すなわち、砂中密閉の場合の方が鉄管密閉に比べて圧力が小である。爆薬燃焼は加圧状態では起り易い。⑳砂中密閉では雷管破片が飛散するため、半爆雷管のエネルギーを爆薬のみに集中的に伝えない、更に高温ガスも分散し易い。

(3) 石炭粉混入爆薬が半爆雷管によって燃焼する理由と条件についての実験と考察

上述の実験結果より、次のことが明らかになった。
⑰半爆雷管の場合には、普通爆薬は爆発も燃焼もしない。しかし、石炭粉混入爆薬は燃焼する。

Table 5 Initiation of Ammonium nitrate explosives containing coal powder by No. 6 detonator

| mixed ratio of coal powder(%) | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| state of initiation | O, O | O, Δ | Δ, X | X, X | X, X |

Note, O: Detonation occurred completely.
Δ: Detonation occurred incompletely.
X: Detonation did not occur.

⑰供試爆薬：2号黒鷹印硝安爆薬（30mmφ×100g）
殉爆：3.0倍=O, O, 3.5倍=X, X

⑱石炭粉：三井砂川登川4番層，-100mesh

⑲起爆方法：6号雷管1本にて起爆

②完爆雷管の場合には、普通爆薬は爆発するが、石炭粉混入爆薬は爆発も燃焼もしない。

なお、石炭粉混入爆薬が完爆雷管によって爆発しなくなるのは、その石炭粉混入率が11%超えるときであった(表5参照)。また、このとき燃焼は起きなかった。

表5は正常雷管による石炭粉混入爆薬の起爆実験の結果を示す。

さて、雷管によって爆薬が燃焼するのは、半爆雷管による石炭粉混入爆薬の場合であって、完爆雷管や石炭粉が混入しない爆薬の場合にはなぜ燃焼が起らないか、これらの理由を説明するため実験と考察を行なう。それには、雷管と爆薬の両者について検討する必要があるので次の順序で行なう。

①雷管については、爆発温度、爆発時間並びに火焰持続時間等について完爆と半爆の場合を比較し、いずれが爆薬を燃焼させる場合の着火源となるか検討する。

②爆薬については、発火温度、発火待時間について石炭粉が混入した場合と、しない場合とを比較し、いずれが、着火・燃焼しやすいか検討する。

ここで、まず雷管の完爆、半爆の場合の爆発温度をそれぞれ熱化学方程式によって計算する。

3-1 完爆雷管の爆発温度

(1) 仮定事項：点火玉、延時薬、爆粉、並びに添装薬はそれぞれ管内の特定位置で燃焼または爆発反応をする訳であるが、本計算では反応生成物は管内で均一に混合されるものとした。

また、遊離炭素はきわめて少量であるため除外した。

(2) 基礎資料

①10 MS 雷管 (A社10段)

| 点火玉 | 延時薬 | 爆粉 | ペントライト | 計 |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.004 g | 0.600 g | 0.200 g | 0.400 g | 1.204 g |

②反応生成物

| CO ₂ | CO | N ₂ | H ₂ | H ₂ O | C | 発熱量 |
|-----------------|-------|----------------|----------------|------------------|--------|------------|
| 45cc | 230cc | 105cc | 4cc | 0.1 g | 0.04 g | 895.5cal/本 |

(3) 爆発温度計算

上記(1)、(2)により爆発温度を J. Taylor の計算法¹⁸⁾によって求めると、2,732°Cを得た。

なお、雷管の爆発熱量について、井田¹⁹⁾は実測値(鉄管体)として、984, 1,035, 1,059 cal/本 (in Na Cl powder), また990, 1,073 cal/本 (in air) を得ている。

また一方、熱化学方程式を利用した計算値として6号テトリール/雷管混入爆粉の混成雷管では795 cal/本、更

に雷管の爆発温度は添装薬の爆発温度と考えることができるとし、上記実測値と比較して計算値が若干小さい値であったとしている。

更に、熱化学方程式を用いて計算したものに次のような例がある。

添装薬の爆発温度は疋田の計算では²⁰⁾、装填比重 $\Delta = 1.6 \sim 1.0$ の範囲でペントリット 3,300~4,100°K、テトリールは 2,400~3,200°K、TNT は 2,200~2,800°K また一方、添装薬の爆発温度の実測値としては、Fox²¹⁾のペントリット 4,200°K ($\Delta = 1.62$)、テトリール 3,350~3,650°K ($\Delta = 1.62$) 水嶋²²⁾はスペクトル線反転法によってテトリール、ヘキソゲン、ペントリットについて 2,100~2,400°K の値をそれぞれ得ている。

以上のことから、雷管の爆発温度は約 2,000~3,500°C 程度であることが判明した。そこで、上述の本計算値 2,732°C は一応妥当と考えられるので、次に同様な方法により半爆雷管の爆発温度を次に計算する。

3-2 半爆雷管の爆発温度

(1) 仮定事項：半爆雷管の管体破裂状況から添装薬は爆発反応には関与していない(2-5-3参照)更に、添装薬のみをタルクと置きかえた特殊雷管によっても爆薬燃焼が起きる(2-3, 2-4参照)こと等がそれぞれ実験結果により判明した。

従って、本計算では添装薬を除いた点火玉、延時薬並びに爆粉等の成分は完爆または完全燃焼反応をしたものとする。更に完爆の場合と同様に遊離炭素は極く少量のため除外して計算する。

(2) 基礎資料

| | CO ₂ | CO | N ₂ | H ₂ | H ₂ O | C | 発熱量 |
|-----------|-----------------|-------|----------------|----------------|------------------|----------|-----------|
| 完爆の場合① | 45cc | 230cc | 105cc | 4cc | 0.1 (g) | 0.04 (g) | |
| 添装薬のみの場合② | 45 | 140 | 60 | 4 | — | — | |
| 半爆の場合①-② | — | 90 | 45 | — | 0.1 | 0.04 | 354 cal/本 |

(3) 爆発温度計算

上記(1)、(2)により完爆雷管の場合と同様に J. Taylor の計算法によって求めると、3,387°Cを得た。

以上の結果、半爆雷管の爆発温度は約 3,400°C と推定される。

3-3 発火温度と発火待時間

(1) 理論式による推定：半爆雷管では石炭粉混入爆薬は起爆しないで燃焼した(2-3, 2-4, 2-5-3参照)また正常雷管によって石炭粉混入20%爆薬は起爆しない(表5参照)こともそれぞれ実験結果で判明した。

ここで考えるに、爆薬が雷管によって起爆するか、燃焼するかについては、雷管の爆発温度と加熱接触時

間並びに爆薬の発火温度、発火待時間の問題等を考えてみる必要がある。

これらの問題について、文献を検べてみることにする。まず熱起爆について考える。

熱起爆の理論は古く、Garner²³⁾、Muraur²⁴⁾、Andreev²⁵⁾等は熱起爆を爆薬分子の分解に必要な活性化エネルギー E と分解によって生ずる反応熱 Q との熱平衡の問題として考え、活性化エネルギーの分子間の統計的分布や熱損失を考慮に入れても、 $Q > E$ の場合には連鎖反応が起り得るので爆ごうが生じると考えた。

Semenoff²⁶⁾は熱起爆の問題を爆薬内の熱の発生速度と逸散速度との比較の問題として考え、両者が等しくなったときが起爆の臨界条件であるとした。

これらの熱起爆理論はいずれも爆薬へ熱を与える熱源の時間的变化については考慮していない。

しかし、雷管による起爆は爆薬に長時間熱エネルギーが与えられるのではなく非常に短時間のみである。

これらのことについて、Bryan²⁷⁾は次式を紹介している。

$$\Delta T = 2F \left(\frac{t}{\pi k \rho C_p} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (3.1)$$

但し、 ΔT =温度上昇、 F =与えられた熱量、 t =加熱時間、 k =熱伝導度、 ρ =比重、 C_p =熱容量

即ち、この式によれば熱を与えられた爆薬の表面温度は与えられた熱量や加熱時間の平方根にそれぞれ比例し、熱伝導度や熱容量の平方根に逆比例する。

また Evan²⁸⁾によれば、爆薬試料を取囲むガスをピストンで断熱圧縮することにより、短時間加熱した場合に点火の生ずるガス温度を測定して、ガスを理想気体と仮定し、ガス温度は次式で計算している。

$$T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{\gamma-1} \dots \dots \dots (3.2)$$

但し、 T_1 、 T_2 は初期及び圧縮後の温度、 V_1 、 V_2 は初期及び圧縮後のガス容積、 γ は比熱比である。

ピストンによるガスの断熱圧縮の場合の加熱時間は致 MS といわれている。

そこで、(3.2) 式による発火点は短時間の加熱であるので、通常発火点に比べて遙かに高い温度で初めて発火することがわかる。

また一方、定温加熱の場合の発火待時間 τ sec と加熱時間 $T^\circ K$ の間には一般的に Arrhenius の理論式²⁹⁾の関係がある。

$$\log \tau = A/T - B \dots \dots \dots (3.3)$$

但し、 A 、 B は火薬類の性状によってきまる定数である。従って、この式からも待ち時間が小なる場合は高い温度でしか火薬類は発火しないが、発火待時間が大なる場合は比較的低温度でも容易に発火すること等が推察される。

ここで、半爆雷管の場合は正常雷管に比べて、爆発

Table 6 Ignition temperature and ignition delay period of ammonium nitrate explosives containing coal powder

| $\begin{matrix} M\% \\ \backslash \\ \text{°C} \end{matrix}$ | 20 | 11 | 10 | 9 | 8 | 0 | $\begin{matrix} M\% \\ \backslash \\ \text{°C} \end{matrix}$ | 20 | 11 | 10 | 9 | 8 | 0 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|------|------|------|------|------|------|
| 460 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 330 | 4.0 | 3.5 | 3.0 | 3.5 | 3.0 | 3.0 |
| 450 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 320 | 6.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 3.5 | 3.0 |
| 440 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 310 | 8.0 | 6.5 | 6.5 | 5.0 | 4.5 | 5.0 |
| 430 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 300 | 12.5 | 12.0 | 10.0 | 10.5 | 11.0 | 9.0 |
| 420 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 290 | 12.0 | 15.0 | 17.0 | 13.0 | 13.0 | 14.0 |
| 410 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 280 | 14.0 | 20.0 | 15.0 | 17.0 | 14.0 | × |
| 400 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 270 | 22.0 | 30.0 | 19.0 | 13.0 | 15.0 | × |
| 390 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 260 | 24.0 | 25.0 | 20.0 | 31.0 | 22.0 | × |
| 380 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 250 | 25.0 | 33.0 | 26.0 | 25.0 | 30.0 | × |
| 370 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 0.5 | 240 | 45.0 | 38.0 | 58.0 | × | × | × |
| 360 | 2.0 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 230 | 55.0 | × | 70.0 | × | × | × |
| 350 | 3.0 | 2.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | | | | | | | |
| 340 | 3.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5 | 2.0 | | | | | | | |

Note, M: mixed ratio of coal powder, This table shows ignition delay period (sec)

温度が高いことが判った (2,732°C:3,387°C)。また爆薬との爆発接触時間についても爆発並びに火焰持続の時間がいずれも大であることが容易に考えられる。更に爆薬について石炭粉を混入した場合としない場合との発火温度と発火待時間の関係を知るため次の実験を行なった。

(2) 爆薬の発火温度と発火待時間の測定

①石炭粉：三井砂川登川 4 番層，-100 mesh [2-3-2の(1)に同じ]

②爆薬：北洋火薬 2 号黒鷹印硝安爆薬 [2-3-2の(1)に同じ]

③測定方法：発火点試験（クルップ式）

④測定結果：表 6 は石炭粉を混入しない爆薬（原薬）と混入した爆薬の発火温度と発火待時間の測定結果を示す。

測定結果，次のことが判明した。

① 2 号黒鷹印硝安爆薬（原薬）は 280°C 以下では，分解するが発火はしないで，ガス化して後に食塩のみが残る。

② 石炭粉混入爆薬は混入なし爆薬に比べて，瞬間発火温度は高いが，待時間が長くなると 280°C 以下でも発火する。すなわち，火源との接触時間が長くなると低温度でも発火することが実験によっても確かめられた。

3-4 考 察

(1) 従来から石炭粉混入爆薬は燃え易いことは判っていたが，今回の爆薬についての発火点試験（クルップ式）によっても，石炭粉の混入しない爆薬に比べて，混入した爆薬の方が低温度でも燃焼を開始することが確かめられた訳である。

ここで，爆薬の雷管による燃焼を考える場合は前にも述べたが（3-3）着火源である雷管側としては半爆雷管の爆発温度と半爆の際の爆薬との爆発接触時間，他方爆薬側としては発火待時間と発火温度とをそれぞれ考えた。

ここで，雷管の爆発温度，火源としての持続時間は半爆雷管の場合が正常雷管の場合に比べていずれも大である。理由としては，爆発温度については正常雷管の推定爆発温度が 2,732°C に比し，半爆雷管が 3,387°C である。また火源としての持続時間は正常雷管の場合，爆発時間は数 μ sec，火焰の持続時間も 300 μ sec である²⁰⁾のに対し，半爆雷管の場合は爆発反応が爆ごうではなくて爆燃であると推定されるところから，正常雷管に比べて爆発時間も火焰の持続時間もいずれも遙かに大であると考えられる。

従って，石炭粉混入爆薬は原薬に比べて発火待時間を考慮に入れると着火・燃焼し易いことと相俟って，

正常雷管では燃焼しないのに半爆雷管によっては燃焼するものと考えられる。

(2) 石炭粉が混入しない場合は一度着火しても燃焼を中断するが，石炭粉混入爆薬の場合は燃焼を継続する。この理由については次のように考えられる。

① 石炭粉が混入した場合の方が燃焼温度が高い，また着火温度は低い（表 6 参照）

② 薬包中に一定温度以上の小熱源が入ると爆薬成分の硝安が分解して酸性性ガスを出す，また一方薬中に混ぜられた石炭粉からは還元性のガスを発生し酸化還元反応がガス層で逐次行なわれてゆくため，硝安・石炭粉の混合物はその燃焼性を持続する²¹⁾。

(3) 変形の半爆雷管によって石炭粉混入爆薬が燃焼したのは Bore hole 装薬を想定しての鉄管密閉内の条件であった。これに反し砂中密閉内では燃焼しなかった。これらの理由については既に上述したので [2-5-3(2)] ここでは重複を避ける。

ここで，実験条件と現場条件とを対比するため，近接発破を考えてみると，① 第 1 孔の発破の影響によって第 2 孔の孔壁は周囲から圧力を受けるため爆薬は圧縮される，② このとき，孔中に残っているくり粉及び 2 次的に孔壁が崩れるため新たにできた石炭粉等は爆薬の周囲，薬包間に介在あるいは爆薬の中へ入る。

③ 更に，亀裂等がある場合はこれらを通じて高温・高温ガスの影響をうけて直接燃焼はしないが，燃焼し易い状態を作る。

以上①～③は爆薬燃焼を容易にする条件である。従って近接発破の場合は実験条件のうち，鉄管内密閉よりも更に爆薬燃焼が起り易いとも推測される。

4. 結 論

炭鉱における爆薬燃焼の原因はいろいろあるが，現場経験や実験によって，近接発破の際に出る半爆雷管が着火源となる場合の方が従来から考えられている隣接孔よりの高温・高圧ガスによる場合よりむしろ多いのではないかと推察するに至った。また，従来，石炭粉混入爆薬は燃焼し易いといわれている。これらのことについて実験と考察を行なったところ，次のことが明らかになった。

(1) 近接発破の際に出る半爆雷管は爆粉 (DDNP) が死圧になったため添装薬を爆ごうさせない結果できるものと考え，添装薬のみをタルクと置きかえた特殊雷管によって爆薬燃焼実験を行なった。

この半爆雷管によって，爆薬に石炭粉が混入している場合は燃焼する。

(2) 次に，近接発破によって隣接孔の雷管が半爆になる物理的現象に着目し，鋼製円筒金型容器に爆薬（模造粉状爆薬，比重 1.0）と雷管（10 MS 3 段，鉄

管体)とを入れ外圧によって圧縮し、変形の半爆雷管を製作した。この変形の半爆雷管は通電発火前の変形具合も、通電発火後の管体破裂状態(鳥かご状)並びに鉛板試験による威力も近接発破の際に出るものと、更に燃焼した爆薬の中に発見されたものとよく似ている。

この変形の半爆雷管によって、Bore holeを想定した鉄管密閉装置による爆薬燃焼実験を行なったところ、爆薬に石炭粉が混入した場合は極めて大きい確率(55.6%)で燃焼した。

しかし、石炭粉が混入しない場合は燃焼しなかった。この実験のように雷管そのものを用いて爆薬燃焼実験を行なった報文には未だ接していない。

(3) 従来、爆薬に石炭粉が混入した場合は、混入しない場合に比べて着火し易く、かつまた燃焼性が大きいといわれていたが、クルップ式発火点試験を行なってこれらの関係を検べたところ、瞬間発火温度は前者の場合が高いのに、発火待時間が長くなった場合の発火点は前者の方が低い。

しかも、後者の場合、硝安爆薬(非NG系、比重1.0)は280°Cまでは唯熱分解するのみで焰を出さないのに、前者の場合は発火待時間を長くすれば低い温度(例えば230°C)でも焰を出して燃焼する。

更に、前者の場合一度着火すれば燃焼を継続するのに、後者の場合は燃焼を中断する。この理由は熱分解によって硝安からは酸化性ガスが出、また一方、石炭粉からは還元性のガスが出る。従って、石炭粉が混入している場合はこれら両方のガスにより酸化還元反応が逐次行なわれ、燃焼性が持続するものと思われる。

(4) 石炭粉混入爆薬は正常雷管の完爆によっても2号黒鷹印硝安爆薬の場合は、石炭粉混入率が11%以上になると爆発しなくなる。もちろんこの場合爆薬は燃焼しない。また一方、半爆雷管の場合は石炭粉混入爆薬は燃えるが、起爆はしない。

これらの理由について、考察したところ、①MS雷管(10MS)の爆発温度を完爆の場合と半爆の場合について、熱化学方程式を用いて比較した結果、後者の方が前者に比べて高い(2,732°C:3,387°C)、②着火火源として爆薬との接触時間について、完爆と半爆の場合を比較してみても後者の方が遙かに大きい。

半爆雷管によって石炭粉混入爆薬が燃焼するのは以上の①②と③に上述した石炭粉混入爆薬が燃焼し易いことが原因であると思われる。

従って、以上(1)~(4)によって、近接発破の際には第1孔の発破の影響で第2孔の雷管は半爆となるが、もし第2孔の爆薬に石炭粉が混入している場合はこの半

爆雷管によって爆薬が大きい確率で燃焼することが容易に推察される。

以上のようなことが判った訳である。ここで考えるに半爆雷管は近接発破の際に起るが、爆薬への石炭粉の混入も近接発破の際には条件次第では起り得る。

また一方、爆薬燃焼の原因あるいは燃焼を容易にする条件はいろいろあるが、これらのうち多くのものは近接発破によって2次的にできると思考する。

従って、爆薬燃焼事故防止に万全を期するには、従来からの対策はもちろんのこと、とくに近接発破にならないよう注意する必要がある。

しかし、発破状況にはいろいろ変化があるので、常に万全を期することは困難な場合がある。

そこで、発破の際には爆薬が燃焼したとしてもガス・炭じん爆発にはならないよう、また少なくとも人身事故にはならない手段を併わせ講じておく必要がある。

これには更に、爆薬燃焼防止に関する検定火薬類の研究も絶対に欠かせないものと思われている。

終に、この実験にご援助をいただいた室工大の内藤、浜田両先生、北大磯部、山下両先生、札幌鉱山監督局指導課の方々、北洋火薬KK照井繁義氏、北海道鉱山保安センター福島金次郎氏並びに実験試料を提供していただいた日本化薬KK山田正幸氏、須貝勘市氏、空知公二氏、日本油脂KK鈴木良次、大杉俊彦の両氏及び実験にご便宜を与えて下さった北海道鉱山保安センター近藤忠和氏にそれぞれ深甚な謝意を表する。

なお、本稿は爆薬への石炭粉混入率を20%として半爆雷管による爆薬燃焼実験を行なったが、次回はこの石炭粉混入が如何にして起るか、等の問題について述べる。

昭和47年5月24日 工業火薬協会春季講演会に発表

昭和47年6月22日 日本鉱業会北海道支部春季講演会に発表

文 献

1) 例えば、国際鉱山保安研究所会議論文集

①Erst Eitz, Hans Meerbach: 268p, 1963

②АНДПееВ К.К., ХОТИ В.Г.: 355p, 1963

③G. Nenquin, E. Demelenne: 307p, 1963

④G. Nenquin, E. Demelenne: 449p, 1965

⑤O. A. Gurton, W. Dick: 619p, 1967

⑥J. Plant, L. P. Barbero: 625p, 1967

⑦J. Bigourd, J. Cocou: 688p, 1967

⑧H. Ahrens, Eitz: 655p, 1967

⑨J. Bigourd: 407p, 1969

2) 例えば、前掲1)と

①南坊平造: 火薬協会誌 No. 2, 10p, 1939

- ② // : 採鉱火薬学 (1948), 121~197p
- ③佐藤三郎他: 工火協 Vol. 17, No. 3, 35p, 1956
- ④新美政義: 工火協 Vol. 23, No. 1, 49p, 1962
- ⑤福田, 宮崎: 工火協 Vol. 19, No. 1, 121, 1958
- ⑥福田寛雄: 工火協 Vol. 22, No. 2, 71p, 1961
- ⑦福山郁生: 九州鉱山学会誌 Vol. 30, No. 5, 94p, 1962
- ⑧疋田 強: 工火協 Vol. 24, No. 1, 45p, 1963
- ⑨村門 律: 九州鉱山学会誌 Vol. 32, No. 12, 27 p, 1964
- ⑩町田, 木内他: 工火協 Vol. 25, No. 3, 164p, 1964
- ⑪吉富, 福山: 工火協 Vol. 25, No. 3, 168p, 1964
- ⑫横川六雄: 工火協 Vol. 25, No. 3, 156p, 1964
- ⑬吉田 正: 工火協 Vol. 25, No. 3, 154p, 1964
- ⑭村門 律: 九州鉱山学会誌 Vol. 33, No. 8, 1p, 1965
- ⑮渡辺, 酒井, 坂口: 工火協 Vol. 28, No. 6, 468 p, 1967
- ⑯村門 律: 日本鉱業会誌 Vol. 86, No. 987, 425 p, 1970
- ⑰松隈, 国谷, 古閑他: 採鉱と保安 Vol. 17, No. 4, 186p, 1971
- ⑱香月, 古閑, 手島他: 工火協 Vol. 31, No. 3, 131p, 1970
- 3) 前掲2) の⑦
- 4) // 2) の⑧
- 5) // 2) の⑩
- 6) 伊藤, 佐々: 日本鉱業会誌 Vol. 77, No. 882, 1047p, 1961, Vol. 79, No. 898, 261p, 1963
工火協誌 29, No. 4, 246p, 1968
- 7) 前掲2) の⑭, ⑯
- 8) 例えば, 前掲1) の⑦, 2) の⑦⑧⑩
- 9) 例えば, // 2) の⑧⑩
- 10) 例えば, // 1) の①②⑧
- 11) 例えば, // 1) の①⑥⑦⑧, 2) の⑮
- 12) 例えば, // 1) の③, 2) の⑦⑪⑬
- 13) 例えば, // 1) の②⑥, 2) の⑥⑪⑬
- 14) 前掲2) の⑰
- 15) // 1) の⑧
- 16) // 2) の⑭
- 17) // 1) の②
- 18) J. Taylor: Detonation in Condensed Explosives, 33~64p, 1952
- 19) 井田一夫: 工火協 Vol. 21, No. 3, 161p(1960), Vol. 21, No. 5, 283p (1961), Vol. 22, No. 1, 3p (1961), Vol. 22, No. 3, 126p (1961), Vol. 22, No. 5, 283p (1961)
- 20) 疋田, 木原: 工火協 13, 106p, 1952
- 21) J. C. Fox: PB 36954, 1945
- 22) 水島容二郎: 工火協講演会, 1940年4月
- 23) W. E. Garner: Trans Faraday Soc, 34, 985, 1938
- 24) H. Muraour: Trans Faraday Soc, 34, 989, 1938
- 25) K. K. Andreev: Chem. Zbl. 1, 489, 1934
- 26) N. Semenov: 「Chemical Kinetics and chain Reactions」, 1935
- 27) G. J. Bryan and E. C. Noonan: Proc. Roy. Soc 167, July, 1958
- 28) J. I. Evan and A. M. Yuill: Proc. Roy. Soc 176, July, 1958
- 29) 岡崎一正: 工業火薬ハンドブック, 337, 1966
- 30) 井田一夫: 工火協 Vol. 21, No. 3, 161p (1960)
- 31) 例えば, 前掲1) の③⑥, 2) の⑩

Studies on Combustion of Ammonium Nitrate Explosives.

by T. Murakado and B. Kiuchi

In the simultaneous blasting, the combustion of ammonium nitrate explosives are more frequently due to the heat of misfired detonator in the charge hole than to high temperature and high pressure due to detonation of explosives in the nearby charge hole.

Also authors have published that under certain circumstances, the detonation of explosives in a charge hole is apt to bring about misfires of the M.S. delay detonators in nearby charge holes.

Through the present studies authors found out the following results.

(1) The explosives containing coal powder burn due to thermal energy of detonation of special made M.S. delay detonators in which the talcous powder is loaded instead of base charge.

(2) When the M.S. delay detonator in explosives is pressed in the cylindrical steel-container by the external pressure, it is transformed into inferior cap.

(3) The explosives containing coal powder burn in high probability by the thermal energy of transformed inferior-detonator.

(4) The transformed inferior-detonator is similar to the misfired detonator in blasting, considering the form of transformed shell after explosion and the results of the lead plate test.

(5) Comparing the explosives containing coal powder with the normal explosive in the ignition temperature and ignition delay periods by Krupp's method, the former's temperature is higher than the latter's at the zero time delay period, but lower in the region of long time one.

(6) Comparing the transformed inferior-detonator with the normal detonator in the explosive temperature, the former's temperature is higher than the latter's.

By authors' thermo-chemical calculation, the explosion temperature of transformed inferior-detonator is 3,387°C, and that of the normal detonator is 2,732°C.

(Hokkaido Mine Safety Service Center, Iwamizawa city. Hokuyo Explosive Co, Ltd. Sunagawa plant.)