石炭地下ガス化の場合のボアホール壁面での温度分布および炭層内温度分布について

正 会 員 外 尾 善 次 郎**

Temperature Distribution on the Surface of Borehole and in Coal Seam in Underground Gasification of Coal

Zenjiro HOKAO

When we gasify the coal in underground by the borehole or channel method, it is very important to know the temperature distribution on the surface of borehole and in coal seam around the hole.

These temperatures depend on many factors, i.e. the concentration of oxygen in the blast, blast quantity and diameter of borehole, etc.

In this paper the author examined this problem theoretically and derived equations, by which we can know the temperature distribution and relations between temperature and above mentioned factors. In practical gasification plan, we can use these results in determination of suitable blast quantity and concentration of oxygen in the blast.

1. ま え が き

石炭の地下ガス化を日本で実施する場合、如何なる方式を採用するかは、大いに検討を要することであろう。ソ連で実施されているような地表からのボーリングによる方法は、地下ガス化本来の目的からは好ましいとしても、日本での立地条件や地下ガス化可能な炭層の賦存状態を考えると、好ましい方法とは考えられない。筆者は既存の坑道を利用し、坑内で地下ガス化する方法を採用することが、日本の条件に適した石炭地下ガス化方式であると考え、炭層内にボアホールをさく孔し、これを利用した地下ガス化について研究を行なつてきた。ボアホールの一端から送られた送風(空気または酸素富化空気)によつて、ボアホール壁面を燃焼させ、ボアホールの他端から発生ガスを坑外へ導き出す方法は、技術的に最も簡単であり地表からのボアホールさく孔費を省くこともできて経済的にも好ましい(ソ連の場合は、ガスの生産原価の約1/3はボアホールさく孔費となつてゐる)。

このように、坑内で炭層内ボアホールをガス化キャナルとして地下ガス化する場合、ボアホール壁面およびその周辺が燃焼してゆく場合の、ボアホール壁面でのガス流方向への温度分布、ボアホールと直角方向への炭層内の温度分布、さらにその温度に影響を及ぼす諸要素を明らかにすることは、石炭地下ガス化研究の大きな課題である。ボアホール直径に対して送風量が適正でなければ、燃焼帯での好ましい温度は得られず、したがつて好ましい発生ガスも得られない。

以下、その温度分布とこれに及ぼす諸要素の影響を明らかにし、また最も好ましい送風量とボアホール直径との関係、さらに送風予熱効果について考察した。

2. ボアホール壁面の温度

第1図に示すように、炭層内に円形断面のボアホールを明け、これをガス化キャナルとする。このボアホールの一端から一定量を送風し、ボアホール内での燃焼を行なわしめる。

いま、ボアホール壁面が燃焼してゆく場合、第一次反応($C + O_2 \rightarrow CO_2$)のみを考慮し、第二次反応^{a)}すなわち還元反応および一酸化炭素の燃焼反応を考えないと、次の熱平衡式が成立する

$$GC_p \frac{dT}{dx} = hS(\theta - T) \dots\dots\dots (1)$$

ただし

G —質量速度 ($kg/m^2 \cdot h$), $G = \gamma v$ (γ は酸素ガスの比重, v は平均流速)

C_p —ガス^{b)}定圧比熱 ($kcal/kg \cdot ^\circ C$)

T —ガスの温度 ($^\circ C$)

第1図 ボアホール断面とボアホール配置

* 昭和39年5月25日受理

** 東京大学工学部助教授、資源開発工学科

h —反応表面（ボアホール壁面）とガス間の伝熱係数
(kcal/m²・h・°C)

S —ボアホール単位容積当りの反応表面積, $S=4/d$
(d はボアホール直径) (m⁻¹)

θ —反応表面の温度 (°C)

x —ボアホール方向への距離 (m)

いま, 酸素ガスの濃度を ω とし, ガス流方向への拡散を無視すると, 平均濃度分布は次式であらわすことができる。

$$v \frac{d\omega}{dx} = -k'S\omega$$

または

$$-\frac{d}{dx}(v\omega) = k'S\omega \quad \dots\dots\dots (2)$$

この式で k' は総括反応速度恒数をあらわし, v はガスの流速を示す。

$$k' = \xi v \quad \dots\dots\dots (3)$$

とおくと

$$\xi = \frac{Nu}{Re} \quad \dots\dots\dots (4)$$

とあらわすことができる。ただし, Nu は Nusselt 数をあらわし, Re は Reynolds 数を示すものとする。

一方, ガスの状態方程式から

$$r = \frac{p}{RT}$$

であるから (p は圧力, R はガス定数)

$$v = \frac{G}{r} = \frac{GRT}{p}$$

よつて

$$k' = \xi \frac{GRT}{p} \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがつて (2) 式は

$$-\frac{d(T\omega)}{dx} = \xi S(T\omega) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ボアホール入口でのガスの温度を T_0 , そのときの酸素濃度を ω_0 とし, すなわち $T=T_0$ で $\omega=\omega_0$ の境界条件を入れて積分すると

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{T_0}{T} e^{-\xi S x} \quad \dots\dots\dots (7)$$

また, ボアホールを利用した石炭地下ガス化の場合, 必ず熱損失があるので (炭層内あるいは夾炭層岩石を伝わつて熱が逃げる), この熱損失を考慮に入れると, 発生熱量に関して次の式が成り立つ。

$$Qk'S\omega = hS(\theta - T) + \alpha S(\theta - \theta_0) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし

Q —反応による発生熱量 (kcal/kg)

α —ボアホール壁面と炭層内部, あるいは夾炭層との間の総括伝熱係数 (kcal/m²・h・°C)

θ_0 —炭層のガス化前の温度 (°C)

ボアホールに入ってくるガスの理論上の最高温度を T_m とし, ボアホール入口でのガスの温度を T_0 とすると,

$$T_m = T_0 + \frac{Q\omega_0}{\gamma_0 C_p} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし

$$\gamma_0 = \frac{p}{RT_0} \quad \dots\dots\dots (11)$$

以上の諸式を利用して, 結局次の方程式が得られる。

$$\frac{dT}{dx} + \zeta ST = \frac{(T_m - T_0)\xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)} S e^{-\xi S x} + \zeta S \theta_0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし

$$\zeta = \frac{\alpha}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right) GC_p} \quad \dots\dots\dots (13)$$

これを用いて, ガスの温度として次式が得られる

$$T = \theta_0 + \frac{(T_m - T_0)\xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)(\zeta - \xi)} \{e^{-\xi S x} - e^{-\zeta S x}\} + (T_0 - \theta_0)e^{-\zeta S x} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ボアホール壁面の温度は次のようになる。ただし (15) 式は $T_0 = \theta_0$ の場合である。

$$\begin{aligned} \theta = \theta_0 + \frac{(T_m - T_0)\xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)(\zeta - \xi)} \{e^{-\xi S x} - e^{-\zeta S x}\} \\ + \frac{GC_p}{hS} \cdot \frac{(T_m - T_0)\xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)(\zeta - \xi)} \{\zeta S e^{-\zeta S x} - \xi S e^{-\xi S x}\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (15)$$

第2, 3, 4 図には, 送風量がそれぞれ 3, 5, 7m³/h でボアホール直径が 6cm^{d)} の場合のボアホール壁面の温度分布を示している。この場合, 酸素濃度は 70, 50, 30, 20% で, 含有酸素量が増せば, とうぜんボアホール

第2図 ボアホール壁面の温度分布 (送風量3m³/h)

- a) 第二次反応については別に論ずる。
- b) 酸素ガスを以下ガスと略記する。
- c) 地下水の流入など特殊条件は考慮していない。
- d) 炭層内への長孔ボーリングは, ボアホール径が大きくなると困難になる。現在炭鉱で使用されているボーリングビットを考慮し, さく孔技術も考へて $d=6\text{cm}$ 程度が好ましいものと判断した。

第3図 ボアホール壁面の温度分布 (送風量5m³/h)

壁面の温度は高くなる。

送風量 7m³/h の場合で酸素濃度 50% の場合は、最高温度は約 2,100°C であるのに対し、空気だけの場合は 1,300°C である。これらの図からボアホール直径 6cm の場合は、少なくともいかなる程度の送風量が必要であるかがわかる。すなわち、ボアホール壁面の温度を 1,000°C 以上に保つためには、 $d=6\text{cm}$ の場合は、少なくとも 3m³/h 以上の空気を送り込む必要がある。このことは第5図より判断することができる。また30%濃度の酸素富化空気の場合には、1.5m³/h 程度の送風量でボアホール壁面は 1,000°C に達する。第6図より酸素濃度の増加とボアホール壁面最高温度との関係を知ることができる。

1,300°C 程度にボアホール壁面の温度を保つには、空気だけの場合は少なくとも 7m³/h 程度の送風量が必要である。30%の酸素富化空気の場合には 3m³/h 程度でよい。

3. ボアホールと直角方向の炭層内温度分布

ボアホール壁面での温度分布がわかれば、ボアホール方向と直角方向での温度分布も求めることができる。

ボアホール壁面から炭層内部への熱伝導の式は、

$$\frac{d\Theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Theta}{dr} = 0 \quad (19)$$

r はボアホール中心を原点にとつた中心からの距離。

第5図 ボアホール壁面の最高温度と送風量との関係

第6図 ボアホール壁面の最高温度と酸素濃度との関係

第4図 ボアホール壁面の温度分布 (送風量7m³/h)

r_1 をボアホール半径 ($r_1=d/2$) とすると

$$\Theta_{r=r_1}=\theta, \quad \Theta_{r=r_2}=\theta_0 \quad (20)$$

ただし、 r_2 はボアホール中心から十分はなれた点までの距離である。(20)式の境界条件を用いてボアホール中心から r の距離にある点の温度を求めると、

$$\begin{aligned} \Theta = & \frac{\log r_2 - \log r_1}{\log r_2 - \log r_1} \left[\theta_0 + \frac{(T_m - T_0) \xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)(\zeta - \xi)} \{ e^{-\xi s x} - e^{-\zeta s x} \} + \frac{GC_p}{hS} \cdot \frac{(T_m - T_0) \xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)(\zeta - \xi)} \{ \zeta S e^{-\zeta s x} - \xi S e^{-\xi s x} \} \right] + \frac{\log r - \log r_1}{\log r_2 - \log r_1} \cdot \theta_0 \quad (21) \end{aligned}$$

第7, 8, 9 図には Θ の値の変化が示してある。

ただし、ボアホール入口からの距離は、ボアホール壁面が最高温度を示すところをとっている。

4. 最高温度とその位置

ボアホール壁面の温度は(15)式で示され、ガスの温度は(14)式であらわされるが、ボアホール壁面の温度 θ とガス温度 T とはそれほど大きくは変わらない。ボアホール入口付近では、すなわち x が小さいところでは θ の値が大きく、 x が大きくなるとかえって T の方が大きくなる。いま T と θ の最高値を示すところの x の値を求めると、 T に対しては

第7図 ボアホールと直角方向への炭層内温度分布 (送風量3m³/h)

第8図 ボアホールと直角方向への炭層内温度分布 (送風量5m³/h)

第9図 ボアホールと直角方向への炭層内温度分布

$$x_{T_{\max}} = \frac{1}{(\zeta - \xi)S} \ln \left\{ \xi - \zeta \left(1 + \frac{\alpha}{h} \right) (\zeta - \xi) \right\} \times (T_0 - \theta_0) \quad \dots\dots\dots (22)$$

$T_0 = \theta_0$ の場合は

$$x_{T_{\max}} = \frac{1}{(\zeta - \xi)} \ln \frac{\zeta}{\xi} \quad \dots\dots\dots (23)$$

θ に対しては $T_0 = \theta_0$ の場合

$$x_{\theta_{\max}} = \frac{1}{(\zeta - \xi)S} \ln \frac{\zeta}{\xi} \cdot \frac{(h - GC_p \zeta)}{(h - GC_p \xi)} \quad \dots\dots\dots (24)$$

したがって T と θ の最大値は、 $T_0 = \theta_0$ の場合は

$$T_{\max} = \theta_0 + \frac{(T_m - T_0)\xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)(\zeta - \xi)} \left[\exp \left\{ \frac{\xi}{(\zeta - \xi)} \ln \frac{\zeta}{\xi} \right\} - \exp \left\{ \frac{\zeta}{(\xi - \zeta)} \ln \frac{\zeta}{\xi} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\begin{aligned} \theta_{\max} = & \theta_0 + \frac{(T_m - T_0)\xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)(\zeta - \xi)} \left[\exp \left\{ \frac{\xi}{(\zeta - \xi)} \ln \frac{\zeta}{\xi} \right\} \right. \\ & \cdot \frac{(h - GC_p \zeta)}{(h - GC_p \xi)} \left. - \exp \left\{ \frac{\zeta}{(\xi - \zeta)} \ln \frac{\zeta}{\xi} \right\} \right. \\ & \cdot \frac{(h - GC_p \xi)}{(h - GC_p \zeta)} \left. \right] + \frac{GC_p}{h} \\ & \cdot \frac{(T_m - T_0)\xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)(\zeta - \xi)} \left[\zeta \exp \left\{ \frac{\zeta}{(\xi - \zeta)} \ln \frac{\zeta}{\xi} \right\} \right. \\ & \cdot \frac{(h - GC_p \zeta)}{(h - GC_p \xi)} \left. - \xi \exp \left\{ \frac{\xi}{(\zeta - \xi)} \ln \frac{\zeta}{\xi} \right\} \right. \\ & \cdot \frac{(h - GC_p \xi)}{(h - GC_p \zeta)} \left. \right] \quad \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

これらの式からわかるように、送風量を増加すると、 $x_{T_{\max}}$ と $x_{\theta_{\max}}$ の値は増加する。すなわち送風量が多いほど、最高温度を示す点はボアホール入口から遠ざかつてゆく。

また α の値が小さいほど、すなわち炭層中への、あるいは夾炭層岩盤への熱損失が小さいほど、 $x_{T_{\max}}$ と $x_{\theta_{\max}}$

の値は大きくなることもわかる。また当然のことであるが熱損失が少ないほど、最高温度も大きくなる。同一送風量の場合は、 s が小さいほど、すなわち d が大きくなるほど、 $x_{T_{\max}}$ 、 $x_{\theta_{\max}}$ は大きい値を示すことも上式から判断できる。

5. 送風予熱効果

送入する空気または酸素富化空気を予熱すれば、地下ガス化効率がよくなるであろうということは常識的にも想像されうる。ボアホール壁面燃焼の場合の壁面温度は

第10図 送風予熱の場合の送風量とボアホール壁面の最高温度との関係

第11図 送風予熱温度とボアホール壁面最高温度の増加との関係

(15)式によつて示されるが、これは送入空気と炭層温度が等しいとした場合、すなわち送入空気の予熱を実施していない場合である。予熱した場合のボアホール壁面の温度は、次の式ようになる。

$$\theta = \theta_0 + A(e^{-\xi s x} - e^{-\zeta s x}) + B(\zeta S e^{-\zeta s x} - \xi S e^{-\xi s x}) + (T_0 - \theta_0) \left(1 - \frac{\zeta G C_p}{h}\right) e^{-\zeta s x} \quad \dots\dots\dots (27)$$

ただし

$$A = \frac{(T_m - T_0)\xi}{\left(1 + \frac{\alpha}{h}\right)(\xi - \zeta)}, \quad B = \frac{G C_p}{h S} \times A$$

第10図、第11図には、予熱した場合のボアホール壁面最高温度の増加の状態が示してある。500°C に予熱した空気を送れば、ボアホール壁面の最高温度は約 200°C 程度高くなる。空気だけ送風する場合と酸素富化空気の場合とでは、多少増加の程度は違うが予熱の効果には大差はない。最高温度が増せば、とうぜん燃焼帯の移動も増加し、ガス化効率は良くなるはずである。第10図、第11図も $d=6\text{cm}$ の場合を示している。

6. 結 論

(i) ボアホールを利用した石炭地下ガス化の場合、ボアホール壁面、およびボアホール方向と直角の方向での、炭層内の温度分布を求めた。

(ii) この温度分布に影響を及ぼす送風量、ボアホール直径、含有酸素量などの関係が明らかにされた。

(iii) 最高温度の位置と最高温度に影響する送風量、ボアホール壁面と炭層奥部との総括伝熱係数、ボアホール直径などの関係が明らかにされた。

(iv) 送風予熱効果が明らかにされた。

この研究に対し御指導を賜った東京大学伊木教授に対し謝意を表するとともに、数値計算を手伝ってもらった技術員小林璋司君、佐々木義則君に深く謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Б.В. Канторович: Основы теории горения и газификации твердого топлива. АН СССР. Москва 1958
- 2) В.А. Смирнов: Перемещение плоского фронта горения в твердом топливе. "Лод газ. углей" 1958. No. 4, p. 12~15

剝土工事での基岩盤水力輸送における最適ズリ粒度

クズバス地区で実際に行なつた試験、ならびに試算の結果は、このような場合、特殊粉砕機によつて岩塊を細かいズリにし、水力輸送するのが適していることがわかつたが、それではどの程度の細かさにしたら、最も経済的であるかについて検討している。

水力輸送設備および粉砕機に要する総電力消費率を最低にする条件というのが、この場合の主眼となる。まず水力輸送に要する電力についてみると、これをズリの平均寸法との関係においてみることは正しくない。というのは、水力抵抗は、主としてズリのなかの 0~2mm 粒度の百分率によつて変化するもので、それ以上の粒度、すなわち 3mm から 180mm までの範囲をとつてみると、この間に粒度の変化があつても、それは水力損失にあまり大きい影響を与えることがないからである。すなわち限界値に近い速度で、水力抵抗 i は、0~2mm 粒度の百分率 k その他

のパラメータとの関係において、次のように求められる。

$$i = \frac{1.25(-0.0831g D_p + 0.5\gamma_p - 0.27)}{1 + 0.146k^{0.76}(\gamma_p - 0.925)} \quad \text{m.WG/m}$$

ここで

D_p : パルプ輸送管の直径, mm

γ_p : パルプの比重重量, t/m³

このほかに、粉砕機の所要仕事量から、電力消費量(A)を割り出し、輸送距離(L)、輸送管径(D_p)および粉砕度(Z —粉砕前後の平均粒径比率)を一定とした場合の、総電力消費率($u=i+A$)が、粉砕後の平均粒径(d_{av})および γ_p との関係において、極小となる点を求めることで、最適ズリ粒度が得られる。

基岩盤の場合、 γ_p の最大値を 1.35 t/m³ とし、 L, D_p および Z のそれぞれの条件を与えられることによつて、最適平均粒度、ないし 0~2mm 粒度の最適百分率が違つて現われてくる。しかしこれは、輸送高さとは関係がない。

このようにして計算すると、吸上ポンプによる水力輸送方式では、輸送管が 1,500~2,000m にまで延びると、ズリの最適平均粒径は最小範囲(0~2mm)になる。したがつて、輸送管の長さが長いほど、ズリを最大限にできるだけ微粉砕して流すようにするのがより経済的であることがわかる。

一方、輸送管の直径が 200mm から 900mm というように、大きく変つても、最適ズリ粒度の大きさには、それほどの変化は認められない。ただしフィーダ装置による水力輸送方式での 1,000m 以下の近距離輸送の場合や、粉砕度が大きい場合($Z=100\sim 75$)は、この限りでない。

Б. Н. Чаолин, Н. Н. Медников: Оптимальная крупность дробления при гидравлическом транспорте коренных пород на карьерах, Горный Журнал, май 1964 С. 22~25 より……(黒岩忠春)