メタクリル樹脂のエロージョン損傷*

北 條 英 光** 津 田 健** カオ・ミン・タイ***

Erosion Damage of Polymethyl Methacrylate

by

Hidemitsu HOJO, Ken TSUDA and Cao MINH THAI

(Department of Chemical Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo)

The sand erosion behavior of polymethyl methacrylate (PMMA) has been studied by the falling particle test. The impact velocity of glass beads (V_p) was varied from 12 to 35 m/sec, and the impact angle was from 20 to 85 deg.

As the result of testing, a unique phenomenon showing two erosion peaks at about 30 and 70 deg. was found. At low impact velocity, the peak of erosion rate at 30 deg. was higher than the other peak at 70 deg. At high impact velocity, on the other hand, the peak at 30 deg. became lower and then disappeared at 25 m/sec. The erosion rate was proportional to V_p^2 at low impact angles but to V_p^5 at high impact angles.

In order to investigate the erosion mechanism at these two angle range, optical microscopic observations were further made. The results showed that the material was removed to form pits at a low impact angle, but was eroded just like spalling from transverse cracks propagated near under the specimen surface at a high impact angle.

In conclusion, PMMA revealed two different erosion behaviors and mechanisms depending upon the impact angle and velocity. (Received Oct. 20, 1979)

キー・ワード：サンドエロージョン，メタクリル樹脂，エロージョン損傷

1 緒 言

粉体の空気輸送，ガスタービンのブレード，石炭転換プラントなどにおいては，流体中に含まれる固体粒子による損傷，いわゆるサンドエロージョンが重要な問題となっている。サンドエロージョンに関する研究は古くから行われてきたが，末だその損傷機構は完全には解明されていない。

損傷機構に関して最初に理論的な取扱いをしたのは Finnie¹⁾ である。彼は，粒子の運動方程式を解き，損傷速度 R を，粒子速度 V_p および衝突角度 α の関数とし， $R = (\text{const})(V_p^2)f(\alpha)$ なる関係を得ている。その後粒子速度の指数は，衝突角度により 2 から 3 まで変化するという修正式を提出している。Finnie の式は，低衝突角度における延性材料に対しよく成立するが，高衝突角度あるいは脆性材料に対しては成立しない。

高角度におけるエロージョン損傷を説明するために，Bitter^{3,4)} は二つの損傷機構を考え理論式を提出した。すなわち，低衝突角度，延性材料で支配的となり，材料

を削り取りながら損傷を生じる cutting wear (切削摩耗) と，高衝突角度・脆性材料で支配的となり，粒子の衝突により材料を圧縮変形し，ついにはき裂を発生して破損を生じる deformation wear (変形摩耗) の二つである。この二つの機構は同一材料で共存し得るが実験結果によれば金属や無機材料などではいずれかの機構が支配的となるため，ある一つの衝突角度で損傷速度が最大となる。Bitter の理論は，多くの材料に対する損傷速度の角度依存性を知るうえで有用であるが，それぞれの損傷機構による材料の挙動に関してはなら明らかにされていない。

さて，実装置において有効かつ経済性のあるエロージョン対策を確立するためには，まず損傷機構を充分に把握する必要がある。さらに，従来の研究はほとんどが金属材料に関するものであり，現在プラスチックのエロージョン性に関する研究はほとんど見られない。

そこで，著者らはプラスチック材料のエロージョン性を明らかにするために研究を行っているが^{5,6)}，本報では損傷挙動を観察しやすい透明な PMMA を用い，材料の損傷機構について実験的に検討した結果について報告する。

* 原稿受理 昭和54年10月20日

** 正 会 員 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山

*** 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山

2 実験方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。ホッパー内の粒子はガラス製の加速管を通り試験片に衝突角度 α で衝突する。衝突した粒子は回収容器にたまり、再びホッパーへもどす。ホッパーは二つの部分、すなわち上部の粒子貯蔵部と、下部の混合部から成っており、貯蔵部内の粒子は孔径 4 mm のオリフィスを通り混合部へ入り、ここでブローアからの空気と混合され、加速管へと落下する。粒子の落下量、衝突速度はバルブ ($V_1 \sim V_3$) により $\Delta P_1 \sim \Delta P_3$ を変化させコントロールする。

粒子の衝突速度は Ruff らの回転円板法により測定し、その結果を Fig. 2 に示した。同図の結果は、粒子濃度が 0.5~12 g/l の範囲での結果であるが、すべて一本の直線でまとめられることから粒子速度は粒子濃度に関係なく、空気速度に比例することがわかる。ここで粒子濃度とは、単位時間当りの粒子落下量 (g) と空気流量 (l) の比と定義した。

使用した粒子は平均直径 170 μm のガラスビーズである。また実験に使用した材料は、重合度が約 5930 のメタクリル樹脂 (PMMA) の注型板で引張強さは 586 kg/cm²、ロックウェル硬さ (Mスケール) は 100 である。この透明な注型板より 30×20×3 mm の大き

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 2. Relationship between particle velocity and air velocity for various concentrations of particle.

さの試験片を切り出し実験に供した。

実験はすべて室温で行い、粒子濃度は 5.5 g/l の一定とし、衝突速度を 12 から 35 m/sec, 衝突角度は 20 から 85° の範囲に変化させた。任意の量のガラスビーズを試験片に衝突させた後、てんびん (感度 0.01 mg) により損傷量を求めた。

なお、何回かの試験後にガラスビーズの形状を万能投影器により観察したが、試験前と比べて破碎などによる形状の変化は認められなかった。

3 損傷過程と損傷速度

(1) 損傷曲線 試験片の損傷量を衝突粒子量に対してプロットした代表的な損傷曲線の例を Fig. 3 に示す。この図より、損傷過程は、潜伏期と定常損傷期の二つの過程からなっているのがわかる。

潜伏期は重量減少を生じない期間に相当するが、図ではわずかな重量増加がみられる。このような実験初期の重量増加は、エロージョンにおいて一般的に認められる現象で、粒子の破片が試験片に突きささるのが原因である。⁸⁾⁹⁾ しかしながら、本実験では顕微鏡による表面観察の結果からもそのような粒子の破片は認められなかった。したがって本実験で認められた重量増加は、粒子の衝突で生じた静電気により微細な粉じんが表面に付着したためと考えられる。

定常損傷期においては、損傷量は衝突粒子量に比例して増大する。

(2) 損傷開始粒子量 Fig. 3 において、潜伏期の終点すなわち I 点までに衝突した粒子量 M_0 は、またエロージョン損傷の開始に必要な粒子量とみなすことができる。この M_0 の値はレインエロージョンで耐エロージョン性を示す一つの指標として扱われている。¹⁰⁾ しかし、サンドエロージョンにおいては、潜伏期の存在は広く知られているにもかかわらず、いまだに詳細な検討はなされていない。

そこで、この損傷開始粒子量に及ぼす衝突速度および衝突角度の影響について検討を行った。その結果を

Fig. 3. Typical erosion-time curve.

Fig. 4. Effect of impact angle on amount of falling particle during incubation period at various impact velocities.

Fig. 5. Effect of impact velocity on amount of falling particle during incubation period at high impact angles.

Fig. 4 に示す。縦軸には、単位面積当りの損傷開始粒子量として $M_0 \sin \alpha / A_0$ をとってある。ここで A_0 はノズルの断面積である。低衝突角度側においては何等顕著な傾向は認められないのに対し、高衝突角度側では、 $M_0 \sin \alpha / A_0$ は衝突速度の増加とともに減少するという明らかな傾向が認められ、角度による損傷機構の差が予想される。Fig. 5 に高角度 ($\alpha = 70^\circ, 80^\circ$) における $M_0 \sin \alpha / A_0$ と衝突速度の関係を示すが、この図より両者の間には

$$M_0 \sin \alpha / A_0 \propto V^{-3.3} \quad (1)$$

なる関係が成立することがわかる。

(3) 定常損傷速度 Fig. 3 に示した定常損傷期における直線の傾き、すなわち単位衝突粒子量当りの損傷量 (以下損傷速度という) を求め、衝突角度に対してプロットする Fig. 6 が得られる。従来の金属や無機材料における研究では、損傷速度はある一つの衝突角度においてのみ最大となることが知られている。そ

Fig. 6. Effect of impact angle on erosion rate for various impact velocities.

Fig. 7. Effect of impact velocity on erosion rate at $\alpha = 30$ and 70 degrees.

の角度は材料によって異なるが、例えば Al では約 14° 、ガラスでは 90° 、また鋼では約 20° である^{3,4)}。しかし、PMMA では従来の報告と異り、Fig. 6 に示すように約 30° と 70° に二つの極大点が認められた。すなわち、低衝突速度においては、 30° の損傷ピークが顕著に現れ、 70° のものより高い値を示すが、衝突速度が大きくなると 70° のピークの方が高くなり、25 m/sec では、もはや 30° におけるピークは見られなくなる。高角度 (70°) および低角度 (30°) において定常損傷速度 (R) を衝突速度 (V_p) に対してプロットしたのが Fig. 7 である。いずれの角度においても $R \propto V_p^m$ なる関係が成立する。しかし、指数 m の値は衝突角度により異り $\alpha = 30^\circ$ では 2、 70° では 4.9 が得られた。他の衝突角度においても m の値を求め、整理したのが Fig. 8 である。 m の値は 30° 以下ではほぼ 2 であるが、 60° 以上の高衝突角度では 5 に近い値をとり、 $30^\circ \sim 60^\circ$ で

Fig. 8. Variation of velocity exponent m with impact angle.

は、2から5まで急激に変化する。 $R \propto V_p^m$ なる関係は従来から報告されているが、Fig. 8に示すように、一つの材料で m が2から5と大きく変化する例は報告されていない。

前節において、高衝突角度と低衝突角度では潜伏期の挙動に違いがあることから損傷機構に差のあることを指摘したが、Fig. 6の二つの損傷ピークの存在およびFig. 8に示した m の変化は、この推察を一層裏付けるものである。

4 顕微鏡による損傷表面の観察

低衝突角度および高衝突角度における損傷機構の差を明らかにするため、光学顕微鏡を用いて損傷表面の観察を行った。

Fig. 9は低衝突角度、低衝突速度 (30° , 11 m/sec) における損傷表面で (a) は衝突粒子量が 290 g, (b) は

(a) $t=1.5$ min ($M=290$ g)

(b) $t=40$ min ($M=7.7$ kg)

Fig. 9. Optical micrographs of eroded surface at low impact angle of 30° and low impact velocity of 11 m/sec.

(a) $t=25$ sec ($M=170$ g)

(b) $t=2.5$ min ($M=1.02$ kg)

(c) $t=4$ min ($M=1.64$ kg)

Fig. 10. Optical micrographs of eroded surface at high impact angle of 80° and high impact velocity of 23 m/sec.

Fig. 11. Cross sectional view of eroded specimen by optical microscopy at $\alpha=80^\circ$ and 35 m/sec.

7.7 kg のときのものである。衝突初期に小さなピットを生じ、衝突粒子量が増すとともにその数を増して行く。そして材料はこれらのピットを中心にして取り去られて行くため、その大きさもしだいに大となる。

Fig. 10には高衝突角度、高衝突速度 (80° , 23 m/sec) の場合の例を示す。(a)~(c)はそれぞれ 170 g, 1.02 kg, 1.64 kg の粒子が衝突した後の損傷表面である。この場合にはピットの発生はみられず衝突初期 (Fig. 10 (a)) には多数の大きな弓形のクラックが発生する。このクラックは円の一部であり、ガラスビーズの衝突に起因するヘルツ応力により生じたことがわか

る。粒子が多数衝突した後の表面(Fig.10 (b), (c))は、かなり凹凸が激しく、材料も広い範囲にわたって取り去られている。Fig. 11 には、約 200 g の粒子が衝突した後の損傷部の断面の観察結果を示す。この図をみると、Fig. 10 (a) に示したクラックに相当するもの(Fig. 11 (a), ④部、これを縦クラックと呼ぶ)も認められるが、さらに顕著な点は、表面下数ミクロン程度の場所に、表面にはほぼ平行に生じたかなりの長さのクラック(横クラックと呼ぶ)が存在することである。そしてこの横クラックは縦クラックの間をつなぐように進展し、ついには同図(b)に示すように丁度スポーリングのごとくこの部分の材料が脱落していくのがわかる。

5 損傷機構に対する考察

以上述べたように、低衝突速度・低衝突角度と高衝突速度・高衝突角度では損傷機構が異なる。いま便宜上前者における機構をタイプⅠ、後者におけるそれをタイプⅡと呼ぶことにする。

タイプⅠにおいては、Fig. 9 に示したように材料は小さなピットを生じながら損傷し、一方タイプⅡでは、表面に平行なクラックにより損傷が進行する。

タイプⅡで見られたクラックは、ギアやローラー等に観察されている、いわゆるスポーリングによるクラック¹¹⁾¹²⁾と類似している。スポーリングクラックの発生機構としては、二つのギアあるいはローラーの接触の結果生じたせん断応力が主因であると説明されている。本実験で見られた横クラックも、同様にせん断応力によるものと考えられる。すなわち、粒子の衝突によりまず Fig. 10 (a) のような縦クラックが発生し、その先端には応力集中を生じその結果横クラックが成長することになる。

タイプⅠの損傷機構は、Fig. 4 に示す損傷開始粒子量の挙動にも見られるようにタイプⅡのそれに比べより複雑である。この場合は、低衝突角度、低衝突速度であるため、速度の垂直成分が小さく、衝突の結果生じる応力も小さい。したがって、タイプⅡに見られるような横クラックは発生せず、Fig. 9 に示したように小さなピットを生じるのみである。そして主として速度の水平成分(試験片表面に平行な成分)により、ピットの周囲が削り取られて行くものと考えられる。

Fig. 6 において損傷速度に二つのピークが認められたが、これは、低衝突角度ではタイプⅠ、また高衝突角度ではタイプⅡの損傷機構が支配的となり、しかも両者による損傷速度がほぼ同程度であるためである。損傷速度を衝突角度に対してプロットしたとき二つの

ピークが現れることは、Bitter が提案した切削摩耗と変形摩耗の二つの機構がほぼ同程度に関与していると考えることによっても一応の説明はできる。しかし、本実験で明らかにしたように、タイプⅡではとくに横クラックの存在が大きな意味を持っており、本実験条件における損傷挙動を説明するには、圧縮変形のみを考えている Bitter の機構では不十分と言える。

6 結 論

試験材料として PMMA、粒子としてガラスビーズを用い、衝突角度 20~85°、衝突速度 12~35 m/sec の範囲でエロージョン試験を行い次の結果を得た。

PMMA においては、金属、無機材料にはみられない二つの損傷ピークの存在することが認められた。すなわち、損傷速度は、二つの衝突角度(約 30° および 70°)で極大値をとり、低衝突速度では 30° で、また高衝突速度では 70° の値が最大となることを明らかにした。また、高角度と低角度では損傷速度の衝突速度依存性が異なり、前者は V_p^5 、後者は V_p^2 に比例する結果を得た。

これらの結果から、低衝突角度・低衝突速度と高衝突角度・高衝突速度においては損傷機構が異なることを指摘した。そして、それぞれの機構につき顕微鏡観察による検討を加え、従来考えられているエロージョン損傷機構では充分でないことを示した。

なお、本研究を行うにあたり、一部河上記念財団の援助を受けた。記して感謝の意を表する。

(昭和54年10月4日 第23回材料研究連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Finnie, I., Proc. 3rd U. S. National Congress of Applied Mech., 527 (1958).
- 2) Finnie, I., and D. H. McFadden, Wear, **48**, 181 (1978).
- 3) Bitter, J. B. A., Wear, **6**, 5 (1963).
- 4) Bitter, J. B. A., Wear, **6**, 169 (1963).
- 5) 北条英光, 津田 健, 材料科学, **14**, 206 (1977).
- 6) 北条英光, 津田 健, カオ・ミン・タイ, 化学工学協会, 浜松大会講演要旨集, 52 (1978).
- 7) Ruff, A. W., and L. K. Ives, Wear, **35**, 206 (1975).
- 8) Edington, J. W., Wear, **48**, 131 (1978).
- 9) Tilly, G. P., Wear, **14**, 63 (1969).
- 10) Springer, G. S., "Erosion by Liquid Impact", p. 38 (1976) John Wiley & Sons, New York
- 11) Pedersen, R., and S. L. Rice, SAE Trans., **69**, 370 (1961).
- 12) Fujita, K., and A. Yoshida, Wear, **53**, 61 (1979).