Experimental Study of Pneumatic Conveying in a Dune Pipeline

○ 柳田幸司 (山形大学) 早坂信洋 (三和工機)

正 李鹿輝 (山形大学)

Koji YANAGIDA¹, Nobuhiro HAYASAKA² and Akira RINOSHIKA¹

¹ Department of Mechanical Systems Engineering, Yamagata University
4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata 992-8510, JAPAN

² SANWAKOKI, JAPAN

Key Words : Gas-solid two-phase, Dune, Pneumatic conveying, Flow visualization

1. 緒 論

各種工業材料の輸送手段として、自動化、省スペース化に優れ、さらに衛生管理の容易さ、地球環境への負担が少ないというなどの利点から、近年、空気輸送が多く利用されている。空気輸送では輸送動力の効率化と被輸送物の破損及び管壁との摩擦の低減化という観点から、一般に低速での輸送が最適輸送とされている。しかし、このような最適輸送では輸送停止、すなわち管路閉塞が生じてしまう恐れがある。そのため、実際にはかなり大きい空気速度で輸送を行っている。

そこで、本研究では最適輸送速度の減少、輸送の安定性などの観点から、デューン(砂丘)機能性輸送管を備えた(輸送管にデューンを装着した)空気輸送システムを取り上げ、輸送の全圧損失と動力係数の変化を計測し、粒子の流動状態を可視化する。

2. 実験装置と測定方法

2.1 実験装置

本研究に使用した実験装置を Fig.1 に示す。空気源には遠心送風機を使用し、圧送式空気輸送システムを採用した。送風機 A から空気は、鎮静管⑧を通過し輸送管③に入る。被輸送物は粒子供給タンク⑥から供給され、バルブ⑤によって供給量を調節する。輸送管は内径 80mm のアクリルパイプから成り、全長は 4.6m である。輸送管内の空気速度は鎮静管に取り付けた全圧管⑦と壁面静圧孔から、ゲッチング⑨を用いて測定し、これから平均空気速度を算出した。管内の全圧損失は全圧管からマンローメーター⑩で測定した。被輸送物の質量流量は、被輸送物の質量と輸送時間より算出した。なお、粒子回収タンク②に回収された被輸送物は、送風機 B①により回収管④を通り粒子供給タンクに返送される。

2.2 デューンのモデル

本研究では自然界に見られるバルハン砂丘を参考にして、3種類のデューンを作成した。モデル1は高さ 30mm、長さ 81mm、幅 61mm、管断面閉塞率 35%、モデル2は高さ 40mm、長さ 108mm、幅 65mm、管断面閉塞率 51%、モデル3は高さ 50mm、長さ 130mm、幅 70mm、管断面閉塞率 64%、となる(管断面閉塞率はデューンと管の断面面積の比率を表す)。デューンの大きさは、通常の空気輸送の実験時の堆積の大きさから決定している。デューンは紙粘土から成形しており、表面をアクリルのスプレーラッカーでコーティングを施した。デューンは Fig.1 に示される Dune Position に固定する。

2.3 実験方法

実験は粒子質量流量 G_s を一定に保って空気速度を大きい方から小さい方に変えて行う。 G_s は 0.08, 0.22, 0.39kg/s の

3種類である。被輸送物として平均粒径 3.1mm、真密度 952kg/m³、浮遊速度 8.57m/s の球形のポリエチレンペレットを使用した。なお、本研究が最適輸送速度の減少を目的としているので、デューンを装着時の実験は低速域で行う。

2.4 可視化方法

輸送管内での被輸送物の流動状態を、デジタル一眼レフレックスカメラを用いて撮影した。撮影は、粒子質量流量を 0.22kg/s、シャッター速度を 1/2000s に設定して行った。

3. 実験結果と考察

3.1 全圧損失

直線流空気輸送との比較のため、デューンによる圧力損失を含めた全圧損失 ΔP_t を考える。

そこで、鎮静管に取り付けた全圧管から管路出口までの距離をとり、輸送管内の空気を非圧縮とし、管路内の流れを定常一次元流れとすれば、 ΔP_t は次式で与えられる。

$$\Delta P_t = \Delta P_s + \frac{1}{2} \rho_a (U_s^2 - U_a^2) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ΔP_s は鎮静管の壁面静圧(ゲージ圧)、 ρ_a は空気密度、 U_s は鎮静管内流量平均空気速度、 U_a は輸送管内流量平均空気速度である。

Fig. 2 は G_s が 0.22kg/s のときに、デューンモデル 1, 2 を装着した際の ΔP_t と U_a の関係を示したものである。

各モデルの ΔP_t が最小となる U_a を最小速度と呼び、低速になると粒子は管底に堆積し、管断面面積の減少などにより、再び損失が増加するといわれている。Fig. 2 の U_a が最小の実験点は各モデルの輸送限界である。

モデル1は通常の空気輸送(No Dune)より ΔP_t が下がっているが、流れが安定していない。これはデューンが小さいために、通常の空気輸送の流動状態とほぼ同じ(デューンが粒子に埋もれた状態)になり、堆積ができてしまったためである。そのため空気速度も安定せず変動したと考えられる。モデル2はモデル1と比べて、 ΔP_t が U_a の低下と

Fig.1 Experimental Setup

ともに、確実に下がっているのが見られる。実験ではモデル2を装着した際、通常の空気輸送やモデル1で見られるような堆積が、閉塞するまで出現しなかった。そのため、堆積などによる損失がなく U_a の低下とともに ΔP_t が小さくなることがわかる。モデル3は管断面閉塞率が64%と大きいため、損失が大きく実験点を観測する前に閉塞してしまっ

った。閉塞時の堆積の形成も変化することが確認できた。通常の空気輸送とモデル1では堆積が管の両端から始まるが、モデル2では管内に多数のこぶのような堆積ができて、それらが繋がり大きな堆積となって閉塞した。これはデューンによって粒子供給部付近の空気速度が大きくなったため、堆積による圧力損失の影響が軽減されている。

3.2 動力係数

動力消費率を次式の無次元動力係数 $E^{1)}$ によって調べる。

$$E = \frac{\Delta P_t Q_a}{g G_s L} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 L は輸送管全長、 Q_a は空気の体積流量、 g は重力加速度である。 E は輸送した粒子の輸送距離と重量あたりの消費動力と考えることができる。

Fig. 3は G_s が0.22kg/s時に、デューンモデル1、2を装着した際の E と U_a の関係を示したものである。

E が、 U_a が下がるほど小さくなるのは ΔP_t が低くなるためである。 G_s が大きいほど E は小さくなるので消費動力は小さい。

Fig. 3からモデル1、モデル2ともに通常の空気輸送より E が小さくなっている。これは通常の空気輸送より ΔP_t が低いためである。デューンの通常輸送に対する消費動力の減少率は、モデル1が8.8~15%、モデル2が9.8~11%となった。 $G_s=0.39\text{kg/s}$ 時はモデル1が4.8~9.5%、モデル2が10~13%。 $G_s=0.08\text{kg/s}$ 時はモデル1が18%、モデル2が19~23%となる。

このことから、デューンは消費動力を低減することができ、モデル2の方が消費動力をより低くすることが可能であるといえる。

3.3 粒子の流動様式

デューン機能性輸送管の流動機構の分析のため、デューンを装着したものと通常の空気輸送の流動状態を写真撮影¹⁾した。

Fig. 4は粒子質量流量 G_s を0.22kg/sに保った、供給部付近の粒子の流動状態の写真である。

写真(a), (b), (c)は堆積が発生する直前の流動状態である。デューンを設置することにより、通常の空気輸送で堆積が発生する空気速度を減少させることができる。モデル2の方は、モデル1よりさらに空気速度が下がる。

4. 結論

デューン機能性輸送管では、 ΔP_t 及び E が最小速度付近およびそれ以下の低速度域では、通常の空気輸送の場合より小さく、 E をモデル1では4.8~18%、モデル2では9.8~23%低減できる。さらにモデル2では、粒子を浮遊させるため、低速輸送時に供給部付近で発生する堆積が改善でき、閉塞時の流動状態を変化させることができる。

参考文献

- 1) Hui Li and Y. Tomita, "An Experimental Study of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Horizontal Pipeline" *Transaction of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol.118(1996), No.3, pp.526-530

Fig. 2 Comparison of total pressure drop ($G_s=0.22$ kg/s)

Fig. 3 Coefficient of power consumption ($G_s=0.22$ kg/s)

Fig. 4 Particle flow patterns