DOI:10.13732/j.issn.1008-5548.2005.05.009

综　述

低速高能效的浓相气力输送技术

刘宗明[1,2]，段广彬[2]，赵　军[3]

（1.武汉理工大学 材料科学与工程学院，湖北 武汉　430070；2.济南大学 材料科学与工程学院，山东 济南　250022；
3.上海理工大学 动力工程学院，上海　200093）

摘　要：低速浓相输送装置的出现，解决了物料在输送过程中易破碎、堵塞和磨蚀管道等难题，降低了耗气量。本文中综述了低速浓相输送的几种定义和输送过程中的相图、物料流动形态及相应的判定、影响浓相气力输送特性的因素等技术参数，并介绍了输送过程中经常遇到的堵管和磨损现象以及气力输送过程中的检测和自动控制技术，指出了今后的研究方向。

关键词：浓相气力输送；流动模型；长距离输送；测控技术
中图分类号：TH411　　文献标识码：A
文章编号：1008-5548(2005)05-0036-05

Low Speed, High Efficiency Dense Phase Pneumatic Conveying

LIU Zong-ming[1,2], *DUAN Guang-bin*[2], *ZHAO Jun*[3]
(1.School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan　430070; 2.School of Material Science and Engineering, Jinan University, Jinan　250022; 3.School of Power Engineering University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai　200093, China)

Abstract: The low speed, high efficiency dense phase pneumatic conveying equipments can solve the difficulties of the breakage of the materials, the blockage and abrasion of the pipelines and reduce the consumption of gas. The several definitions of dense phase pneumatic conveying and phase-figure of conveying, the influence of flowing mode, the relevant judgments and the factors influencing the pneumatic conveying are reviewed. The appearance of the blockage during the conveying and the abrasion of the pipeline are introduced. Some methods of measurement and autocontrol are mentioned.

Key words: dense phase; pneumatic conveying; flowing model; measurement and controlling methods

气力输送是一项利用气体能量输送固体颗粒的古老而有效的技术，已有100多年的历史[1]。理论与实践都证明粉体的气力输送具有机械输送等其它输送设备所不具备的优越性，如设备简单、布置灵活、易于收尘等等。近几十年，粉体气力输送技术有了突飞猛进的进步。在稀相悬浮式气力输送方面，研究水平已达到较高层次，在某些参数计算及其输送机理方面都已达成了共识。但同时，稀相悬浮式气力输送的不足之处也引起了人们的注意，如所需功率较大、管内料速快、造成管道磨损十分严重、气固分离量大等[1]。这些弊端给气力输送研究人员提供了又一研究课题——开发一种能耗低、固气比大气固分离量小、性能更优越的输送技术，这就是浓相气力输送技术。

浓相气力输送技术[2]主要是指粉料在输送管中以低速、浓相及低动力指数的状态输送。浓相气力输送的两相流体流速很低，一般在7 m/s左右[1~3]，比稀相输送小1倍多，而且输送稳定性好，适合远距离输送，并且随着固气比的提高，气力输送的动力指数显著下降。另外由于材料的磨损与流速的二次方或三次方成正比，因此气流速度的减小大大延缓了材料的磨损，是一种更理想的输送方式[3]。

1　浓相气力输送定义及影响因素

1.1　浓相气力输送的定义

“浓相气力输送”的定义有很多，在已提出的多种定义中，较多采用下面几种[2]：

(1)固气比大于某一数值时，如10，15，25或80；

(2)物料的体积浓度大于40%或50%时；

(3)输送时，物料充满管道的一个或多个断面时[4]；

(4)Dixson等[5]认为：对于水平输送，气体量不足以使所有物料处于悬浮状态时；对于垂直输送，有颗粒回落现象；

(5)使用Zenz相图进行分类。

以上几种方法都不同程度地存在缺陷，其意义只能是相对的。相对来说第四种定义的范围较广，而且所描述的运动状态又非浓相输送所专有。而Zenz相图较准确地描述了气力输送的流动特征[3~5]，在Zenz相图上对气力输送进行分类显得更加明确。

收稿日期：2004-11-26
基金项目：山东自然科学基金项目(编号：Y2003F01)和山东省教育厅科技项目(编号：J01A06)资助。
第一作者简介：刘宗明(1965-)，男，教授，在职博士研究生。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2　影响气力输送的因素

影响浓相气力输送的因素很多也很复杂，主要有输送物料料性、输送管道特征（长度、倾斜角度、弯头等）、输送压力等。

（1）物料特性对气力输送特性影响[6,7]。物料特性对气力输送特性的影响至关重要。在浓相中这种影响来自料群(团)的性能或流动行为，其涉及范围广且影响大。

（2）输送管道特征的影响。包括输送管道的长度[4~7]、提升高度[8~9]、倾斜角度、弯管[7,9]的数量[7]及弯头角度[16]等，管道的影响是很复杂的，这些方面已经有人做了大量的实验研究，并建立了相对合适的经验关联式，但还不很完善。

（3）输送压力的影响。一般来说，在一定压力范围内，输送压力逐渐增大时，输送能力逐渐增大，输送加速度增大，输送速度也相应增大[10~13]。

由于浓相气力输送规律的复杂性，找到一个通用性很强的反应输送特性和阻力特性的公式很难。对于不同的场合，不同的输送介质，有必要做专门的实验获得相应的规律。另外，对于已经得出的经验公式来说[13,15,17]，精度还有待于提高，对经验公式中的一些重要参数要根据具体的流动特征进行必要的修正[15]。

2　流型分类与流动稳定性判断

2.1　流型分类与分界

澳大利亚学者 Peter W. Wypych 通过大量的实验[4]及理论推导得到了气力输送过程中各流动状态的界限，并对流态进行了细致的定量分析。输送分界线的准确确立对于被输送介质的输送量、空气的质量流率以及管道的最佳布置方式的确定都有重要的作用[17]。

图 1 给出的是粒状颗粒典型性的气力输送曲线(PCC)。该图包括边界 A、B、C 和边界曲线 D，曲线 D 是用来描述当输送粒子开始沉积到管道底部时的状况。若空气的质量流率的值比曲线 D 处的值大时，气固两相流动将会以悬浮流的形式进行。若空气的质量流率处于 A 和 B 之间时，两相流将会以缓慢流动的柱塞的形式流动称之为低速柱塞流（LVSF）。若输送空气质量流率处于 B 和 C 之间时，流动非常不稳定，此时伴随有气压的波动和管道的震动。虽然现在已经有一些关于浓相气力输送压降的预测，但是现

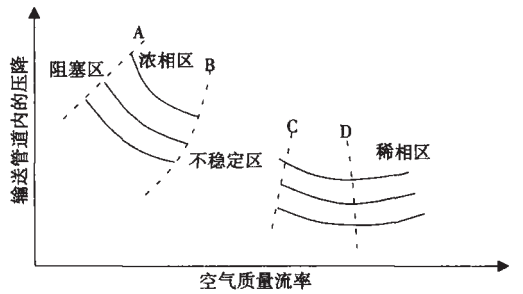

图 1　气力输送分界曲线

在还没有一种比较成熟的理论来准确的表征输送界限。对于曲线中 B 和 C 之间的不稳定区域的研究以及 A 处值的确定还处在理论性和实验性的阶段。

2.2　流型稳定性的判断

气力输送过程中随着输送气流表观气速的降低，管内会依次出现不同的流型[13]。当物料处于间隔运行的不稳定状态时，管内会产生很大的压力脉冲，气力输送处于堵塞的前奏。因而发展浓相低气速气力输送的关键是要解决流动的稳定性问题。

洪江、沈颐身等利用安装在水平输送管内的压力传感器压电陶瓷片感知输送管内的压力波动，用 X-Y 记录仪记录了管内压力波动的变化曲线。对压力波动的振幅和频率进行统计，找到了一种判断流型和稳定性的判据[16]：

$$\frac{\text{最大振幅} - \text{有规则的振幅}}{\text{有规则的振幅}} \geq 50\%$$

$$\frac{\text{大脉冲的频率计数}}{\text{总脉冲的频率计数}} \geq 20\%$$

当以上两式成立时，管内流动为不稳定流动。以此为判据对各种流型和稳定性进行判断，效果很好。

3　相图

通常，相图（或称状态图）是以粒子质量流量 G_s（或 μ）为参数的压力坡度与大气状态下空气表现速度的关系曲线图。相图能较准确地描述气力输送的流动特征。每幅图适用于一种特定物料，或一种管径。典型的相图见图 2 和图 3。相图能用来确定在一组给定条件下管道中物料的流动形态，或对给定的流动形态确定压力坡度和空气流量范围以及相互关系。早在 1949 年由 Zenz 提出，后经许多研究者加以扩展，已有大量图表发表，但也有一些差异或不同的表达形式，有些相图只适于理论分析和研究，在工程设计上难以应用。Mills 在他的图中以空气质量流量

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

取代气速，可以不受在管道上测量位置的影响，将输送试验结果绘成特性曲线图，可供实际设计应用[1,20]。

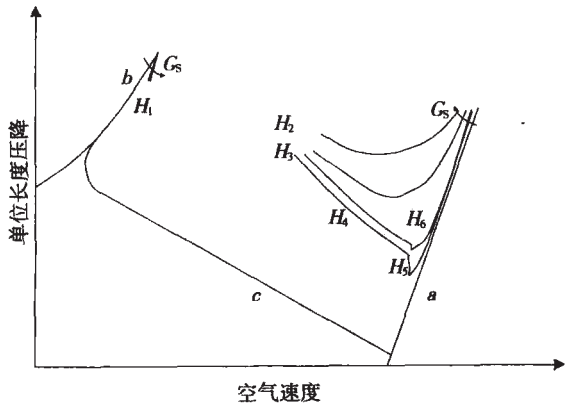

图 2　水平管内气力输送相图

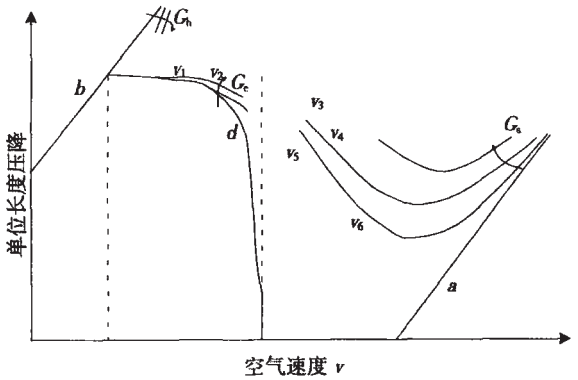

图 3　垂直管内气力输送相图

4　流动模型及机理

从流动形式来分，浓相气力输送可分为栓塞式气力输送及非栓塞式浓相气力输送两种[2,3,5,20]。非栓塞式浓相气力输送主要是浓相动压输送，物料在管道内成密集状态，但管道并未被堵塞，仍然是靠空气动能来输送。栓塞式气流输送一般是浓相静压输送，是指物料在输送管道内堆集成料栓。料栓之间充满了空气，完全依靠两端的静压差推动前进。

4.1　非栓塞式密相气力输送的流动模型

大部分理论和实验对非栓塞密相气力输送考虑的是完全悬浮流，但 Myler 和 Klinizing 的实验发现，即使在稳定的水平管稀相流动时，上层固体质量流率与下层相比也不应忽略。而且 Konard 与洪江等发现，输送管道内存在着滑动床与悬浮层，并建立了水平气固分层流动模型，如图 4 所示。并认为，稳定分层流动时，悬浮颗粒易集中于滑动床表面，层间剪切

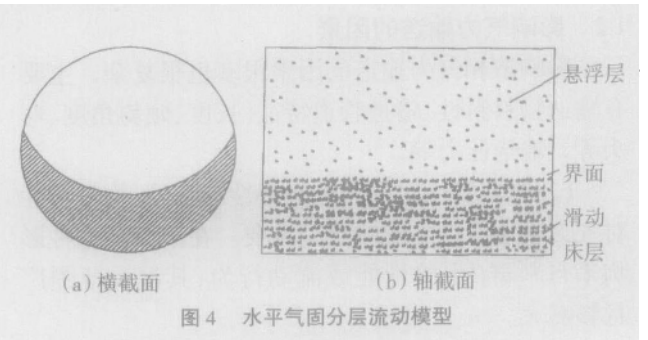

图 4　水平气固分层流动模型

力是滑动床移动的主要驱动力。

4.2　栓塞式密相气力输送的流动模型及机理

K Komard、Davison 及富田上潼研究了典型栓流的流动机理，建立了流动模型。森川和迁裕等则对内重管式栓流即非典型栓流的流动机理提出了自己的见解，并建立了重管栓流的流动模型。在水平管密相输送的流动模型及机理研究上达成如下几点共识（如图 5）[21,22]：

(1)料栓前面的空气栓里，上层是分散的颗粒，下层是静止的料层。

(2)料栓向前移动时，堆起前面的静止料层，同时又在其后留下一定量的物料。当料栓堆起的物料等于留下的物料时，料栓稳定输送；当这种平衡被破坏时，便可能形成长料栓或料栓破坏。

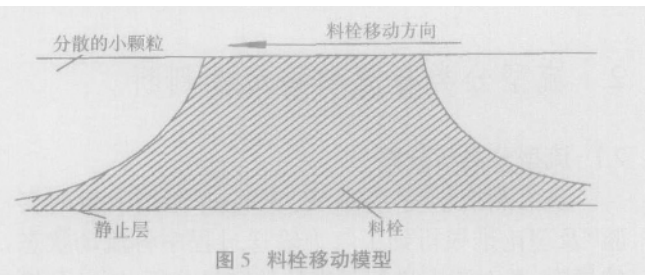

图 5　料栓移动模型

5　输送过程中常见问题及对策

5.1　堵管现象及对策

在输送过程中经常会出现管道堵塞现象，这给浓相气力输送的应用带来了诸多不便，其原因主要有：系统参数设定的影响、气源的影响、被输送介质的影响、管道泄漏的影响、其它方面影响（如管道设计不合理等）。

为了防止堵管，要充分考虑各种因素对输送性能的影响，保证输送系统的最佳工作参数；输送气体做到清洁、干燥；定时清理输送装置和管道，定期进行管道的修理，防止发生渗漏等[22]。一旦发现堵管现象可立即采用“反抽”的方法进行排堵[21]。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5.2　输送管道的磨损及对策

浓相气力输送管道内的输送压力很高，但因管道内固气混合物的流速较低，直管段内的磨损很轻，易磨损部位主要发生在管道转弯处，特别是固体颗粒冲击管道转弯的外侧[23]。

气固两相流动过程中，磨损虽然难免，但可以设法延长磨损时间或避免磨损，下面介绍几种弯头（见图 6）延长磨损时间和避免磨损的方法。

（1）在弯管外侧加外包。外包可装耐磨石子的混凝土，也可以用厚钢板焊在外侧，可以延长使用寿命。

（2）内衬耐磨陶瓷的钢弯头。用自蔓延高温合成 - 离心法技术制造的陶瓷钢弯头，其寿命比铸石弯头高 10 倍，而且价格便宜。

（3）椭圆形弯头。由介质流线分布图可知，两相流混合物流经突然放大的空间时，先扩散后收缩，在椭圆形弯头外侧和内侧各形成一个流动死区，使流经的混合物不直接与壁面接触，从而保证不被磨损。

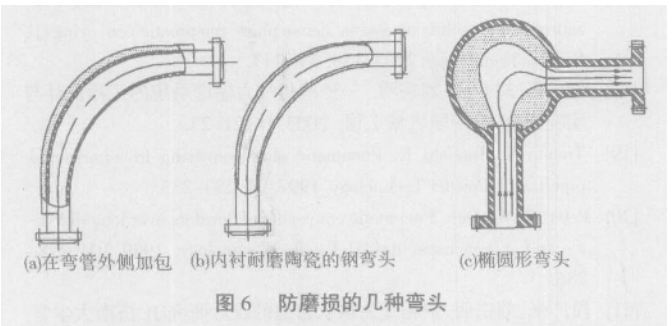

图 6　防磨损的几种弯头

6　浓相气力输送中的测控技术

6.1　测量技术

气力输送是属于气固两相流动的范畴，由于气固两相流动的复杂性，如浓度分布不均、流动结构多样化、速度变化大、管道的非透明性、干扰流场的侵入式测量等，使得测量技术面临着不少困难[24~26]。

（1）现阶段的测量方法。按原理可分为光学法、过程层析成像法、射线法、相关法、微波法、核磁共振法和超声波法等。

①光学法。这种基于多普勒效应激光入射运动颗粒产生的散射光的频率与入射光频率的差值和颗粒的运动速度成正比而发展起来的测速技术在许多复杂流动中已有应用；随后发展的相位多普勒技术除了能测量流体速度，更能同时获得颗粒尺寸的信息。不少学者或改进理论模型或改变测量方法得到新的测试技术，如相位多普勒技术等，但此技术只获得空间单点的流体信息。为此，又有颗粒成像测速法[25,27](PIV 技术)的兴起，这种方式近年来在多相流领域中得到了广泛的应用。

②过程层析成像法。过程层析成像法亦称为 PT 技术，是用于以两相流或多相流为主要对象的过程参数分布状况的在线实时检测技术[26]。如电阻成像(ERT)、电容成像(ECT)等形式。其中以测量介电常数分布的 ECT 技术测量范围最广[27]。

PT 技术属于非侵入式测量，其处理方法都是将非线性简化成线性，这会造成图像重建时的数据误差。为了克服这些误差，于是就出现了人工神经网络法，有学者还利用人工神经网络[28]的智能模式识别功能判别受众多因素影响而呈非线性状态的流型。

③其他测量方法。其他测量方法包括：声波法、微波法[29]、射线法、相关法、核磁共振法[30]等。这几种方法是近年来兴起的测量技术。

（2）测量方法展望。

①将成熟的单相流参数测试技术与测量仪表应用于多相流检测。

②采用多传感器组合，进行多参数组合确定被测参数。若直接测量某参数有难度，可采用先测量确定这一参数的若干较易测得的量然后进行处理的测量方法。

③借助各种新技术（激光、微波技术等），研制高灵敏度、高精确度和高可靠性的多相流传感器和参数检测表。

④应用多媒体和图像处理技术，对多相流空间区域进行直观瞬态的测量。

⑤结合被观测对象的专业领域知识进行新型测量技术的探索。

6.2　自动控制技术

随着现代化工业的发展，在气力输送过程中，更多的是通过自动化仪表和装置对整个输送过程进行全面的监视，控制和管理。

气力输送装置自控系统的特点：扩大气力输送装置的输送对象；降低输送过程的动力损耗；响应快，控制精度高；可以方便的与整个生产控制系统相联接。

气力输送系统的自动控制[13,18]常用可编程控制器(PLC)作为控制核心，一般是由计算机、MCGS 组态软件、可编程控制器 PLC、模拟量输入模块、电磁

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

阀、压力传感器以及各执行阀件等控制模块组成。

自动控制系统不但可以对整个输送系统的阀门进行控制，而且可以判断管道在输送过程中是否堵塞，并能够自动消除堵塞，同时可以随时对必要的参数进行调整，以获得最佳效果，提高输送效率[18]。

7　结束语

尽管浓相气力输送系统理论和装置方面都有了新的更大的发展，但有关其输送机理和物理模型仍然远不如稀相输送的成熟。这主要是由于物料种类繁多而物料料性影响又太大，且输送形态复杂、不稳定又多变的原因。而且应用最多的流动形态恰好处于不连续相区，且由单个料栓物理模型导出的计算公式并不完全符合实际情况。目前有关浓相输送的计算方法大多只是概略估算，公式中确定的系数大多来自各研究者的经验和实验，所以今后的科研工作者还应致力于：

(1) 浓相气力输送的理论研究有待进一步开展，以指导设备开发，尤其在理论参数的计算方面，定量关系式有待进一步给出；

(2)气力输送技术应充分利用其他相关的先进技术，如自动控制技术、测量技术等。

(3) 材料物性对输送参数的影响研究也应加强。

(4)此外，当前低速浓相气力输送还正朝大容量、长距离和更节能的方向发展，还要做到精确控制、高质量、多用途和更可靠。所有这些都是我们面临的困难和课题。

参考文献：

[1] 程克勤.气力输送技术的若干新进展[J]. 硫磷设计与粉体工程，2001,(5):15-24.

[2] 程克勤. 低速密相气力输送综述[J]. 硫磷设计与粉体工程,2001,(2):22-27.

[3] Bradley M S A ,Burnett A J , Woodhead S R . Measurement of press profiles in pneumatic conveying pipelines [J]. Powder Technology, 2002,122:77-99.

[4] Peter W Wypych, Jianglin Yi. Minimum transport boundary for horizontal dense-phase pneumatic conveying of granular materials [J]. Powder Technology,2003,129:111 - 121.

[5] Ali Yilmaz, Edward K Levy. Formation and dispersion of ropes in pneumatic conveying[J]. Powder Technology,2001,114:168-185.

[6] Guiney P,Pan R,Chambers J A .Scale-up technology in low-velocity slug-flow pneumatic conveying[J]. Powder Technology , 2002,122: 34-45.

[7] 赵　军,刘宗明,陆海东,等.粉煤灰浓相气力输送研究与应用[J]. 上海理工大学学报,2003,25(2):151-154.

[8] 邱朋华,陈力哲,王　宏,等.水平管道细粉高浓度分层流动阻力特性的试验研究[J].热能动力工程,2001,16(91):23-27.

[9] Schallert R ,Levy E .Effect of a combination of two elbows on particle roping in pneumatic conveying [J]. Powder Technology,2000,107: 226-233.

[10] 刘宗明,王振远,刘福国,等. 气相有明显压缩性的密相输送的研究[J].杭州应用工程技术学院学报,1999,6:49-53.

[11] Liu Zongming,Yue Yunlong,Lu Haidong.An experimental study on fly ash removal by dense phase pneumatic conveying[A].Energy and the Environment-Proceeding of the International Conference on Energy and Environment[C],1288-1291.

[12] 吴慧英,周强泰.煤粉高浓度输送阻力特性的试验研究[J].热能动力工程,1997,12(3):189-192.

[13] 刘宗明,赵　军,岳云龙,等. 浓相气力输送粉煤灰的实验研究[J]. 济南大学学报(自然科学版),2002,16(1):53-55.

[14] 高敬国，徐德龙，赵江平. 粉体密相气力输送理论与技术进展[J].中国粉体技术,1999,5(5):35-38.

[15] 刘宗明，张学旭,于荣宪. 挤压流型气力输送的阻力特性[J].东南大学学报,1998,28:24-28.

[16] 邱朋华,陈力哲,王　宏,等.临界状态下弯管段浓相气力输送的两相速度分布[J].燃烧科学与技术,2003,9(1):58-63.

[17] Luis Sanchez,Nestor Vasquez,George E Klinzing,et al.Characterization of bulk solids to assess dense phase pneumatic conveying [J]. Powder Technology,2003,138:93- 117.

[18] 赵　军,胡寿根,刘宗明. 一种浓相气力输送系统的工程设计与实验研究[J].中国机械工程, 2003,14:21-23.

[19] Tomita Y, Tateishi K. Pneumatic slug conveying in a horizontal pipeline[J]. Powder Technology,1997,94:229-233.

[20] Peter W Wypych.Pneumatic conveying of powders over long distances and at large capacities [J]. Powder Technology, 1999,104:278-286.

[21] 段广彬,刘宗明.浓相气力输灰管道的设计研究[J].济南大学学报(自然科学版),2003,10(1):25-28.

[22] Levy A.Two-fluid approach for plug flow simulations in horizontal pneumatic conveying[J]. Powder Technology,2000,112:263-272.

[23] 毛靖儒,柳成文,俞茂铮.弯管内气动防磨方法的数值检验及其应用[J].西安交通大学学报,2000,34(3):17-21.

[24] Yang W Q , Liu S. Role of tomography in gas/solids Flow measurement[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2000,11:273-244.

[25] 石惠娴,王勤辉,骆仲泱, 等. PIV 应用于气固多相流动的研究现状[J].动力工程,2002,2:1589-1593.

[26] 刘　石,王海刚,姜　凡,等. 循环流化床固体分布的层析成像测量[J].工程热物理学报,2001,(9):645-648.

[27] 徐苓安,张宝芬.迅速发展中的过程层析成像技术[A]. 见:全国计量测试学术大会论文集[C].计量学报期刊社,1998.

[28] 王妍凡,林宗虎.改进 BP 神经网络在流型判别中的应用[J].热能动力工程,2001,(1):63-65.

[29] Millen M J,Sowerby B D,Coghill P J,et al. Plant tests of an online multiple-pipe pulverised coal mass flow measuring system [J]. Flow Measurement and Instrumentation,2000,(11):153-158.

[30] Barrantt L R .Yan Y,Byme B,et al.Mass flow measurement of pneumatically conveyed solids using radiometric sensors[J].Flow Measurement and Instrumentation,2000,(11):233-235.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net