

复杂流体壁面滑移特性研究及其测量

冯民权¹, 张丽¹, 张晓斌¹, HANSONG Tang²

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. Dept. of Civil Eng., City College, The City University of New York, New York 10031)

摘要: 壁面滑移是复杂流体流动中的一种普遍现象. 对壁面滑移现象及其机理进行了总结, 并讨论了几种检测滑移的方法. 壁面滑移产生的机理可分为壁面吸附失效与缠结破裂, 其关系十分复杂, 且与流体的性质密切相关, 还需要深入的研究. 检测滑移的方法有标记法、激光—多普勒法、赫磁—共振法等. 还阐述了壁面滑移与临界应力、颗粒浓度的关系以及滑移速度的测定和计算方法. 壁面滑移影响因素十分复杂, 尽管已有一些研究, 但是, 它们之间的关系远未搞清楚, 更缺乏定量的表述.

关键词: 复杂流体; 壁面滑移; 临界应力; 颗粒浓度

中图分类号: X506

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)02-0208-07

1 前言

复杂流体是指聚合物流体以及填充了各种形状固体颗粒的熔体、溶液、泡沫、胶体颗粒、胶束等的多组分液体物质. 总体上说, 复杂流体常含有聚杂物或较高浓度的刚性颗粒, 是具有某特殊性质的非牛顿流体, 其性质之一是固壁滑移现象^[1].

在环境工程中, 复杂流体的流动主要存在于污水处理、剩余污泥的处理、处置以及污泥的运输过程中. 由于造纸工艺中产生的活性污泥以及日益增加的各种垃圾, 使污泥的产量日益增加. 污泥是由各种形状和浓度的颗粒悬浮物和水组成的复杂流体, 具有黏性和弹性, 为非牛顿流体, 有固壁滑移现象^[2]. 长久以来, 污泥的处置一直是制约污水处理厂正常发展的主要问题之一. 污泥的运输是污水处理厂与污泥利用单元之间的重要纽带. 通过对输送方式的比较, 管道运输对当前日益增长的污泥量是比较有利的, 在国内外已受到了很大的关注^[3]. 我国目前没有污泥管道输送实例, 油田输送技术在很早就应用研究^[4]. 目前在试验室已开展了将污泥作为试验对象的研究. 北京中矿机电工程技术研究所实验室对城市污泥(含水率 80%)、造纸废渣污泥(含水率 40%)和煤泥(含水率 30%)三种高浓度黏稠物料进行过输送试验并进行了一些测试研究^[5], 该试验说明了高浓度的污泥管道输送是可行的. 但是, 高浓度污泥的远距离输送是一种新兴的输送方式, 其理论研究需要综合应用颗粒、流变学、摩擦学、浆体管道输送以及机械、自动控制、计算机等学科专业的知识, 已有的成果并不多见.

高浓度污泥的流动结构和阻力特性是污泥管道输送的核心问题, 它由流变特性和滑移特性共同支配, 直接影响污泥输送的特性. 目前对壁面滑移特性的研究还非常有限, 流变特性研究的也很不充分, 生产实践中难免带有盲目性. 因此, 污泥壁面滑移特征及规律的研究, 对于理解污泥处理与传输过程, 科学合理地计算污泥长距离管道输送中的压力损失, 实现输送过程的节能减阻, 具有重要意义.

2 壁面滑移现象

高分子液体在管道、模具或设备内部流动时, 我们通常总是假定最贴近管道壁或流道壁的非常薄的一层物料与管壁之间是相对不运动的. 由于粘附作用, 这层物料的运动速度可以认为等于管壁运动速

收稿日期: 2009-12-28 修改稿日期: 2011-03-12

基金项目: 教育厅重点实验室科学研究计划项目(2009-12)

作者简介: 冯民权(1964-), 男, 山西人, 教授, 博士生导师, 研究方向为环境模拟与污染控制.

度. 这个假定称为“管壁无滑移假定”. 实际上, 此假定有时不能成立. 例如在挤出硬质聚氯乙烯 (R-PVC)、高分子量聚乙烯以及橡胶类材料时, 当物料在流道壁承受的剪切应力超过某一个临界剪切应力 σ_{crit} , 熔体将沿着流道壁发生滑动. 紧贴流道壁的那层物料具有一个有限相对滑动速度 $w_{wall} = v_s$, 这种现象称“管壁滑移现象”^[9].

滑移问题最早是被 Mooney^[7] 提出, 他用了不同半径的毛细管做实验获得流动曲线. 发现一旦应力超过临界值, 流动曲线依赖毛细管半径, 表明壁面滑移发生了. Wang 和 Drda^[8] 首次观察到了 HDPE 熔体在毛细管流变仪中的流动曲线的不连续性 (突变), 意味着熔体在管壁的粘附—滑移转变, 而且发生转变的临界剪切应力与实验温度成正比, 这与 Brochard 和 de Gennes^[9] 提出的分子链解缠模型符合. Kalika 和 Denn^[10] 提出一个幂律模型, 并由斜率的变化计算了滑移速度. 廖华勇和范毓润等^[11] 用旋转流变仪研究了 HDPE 的壁滑行为, 发现在较低的剪切速率下 HDPE 没有表现出明显的壁滑行为. 廖华勇和丁永红^[12] 主要以两种 HDPE 为对象, 将旋转流变仪与毛细管流变仪给出的流动曲线作了对比, 探讨了壁滑外推长度、发生壁滑的临界剪切应力与实验温度的关系. Kaylon 等^[13] 的 HDPE 扭转流动实验给出 HDPE 发生壁面滑移的临界剪切应力值约为 $0.22 \sim 0.23$ MPa. 对于线性聚乙烯和 PDMS 发生壁面滑移的情况, 不同的研究者给出了各种临界剪切应力范围, 甚至有人认为壁面滑移在任何剪切应力下都会发生.

Kaylon^[13] 等用毛细管流变仪观察到高聚物在管壁处的滑移现象 (图 1). 对于含固体颗粒的复杂流体, 壁面滑移可分为两类: 真实滑移和表观滑移. 真实滑移是指液体分子在固体界面上滑动, 流动边界上的速度不为零. 表观滑移是指悬浮物与液体之间的滑移, 或者在靠近固壁处由滑移层导致的大的流速梯度区域. 在该层中几乎没有颗粒物质, 其黏性比其他区域低得多. 如图 2 在半径 R 含有固体颗粒的悬浮液的毛细管中, 当存在有剪切应变速率梯度时, 颗粒会由剪切应变速率大的区域向剪切应变速率梯度小的区域移动, 致使管内壁面处形成了一层浓度很低、粘度显著下降而剪切应变速率很大的薄层, 称为“滑移层^[14]” (用符号 δ 表示). 该层中几乎没有颗粒物质, 液体分子在固体界面上滑动, 流动边界上的速度不为零, 称为真实滑移. 滑移层之外的区域构成了管内主流区, 其中悬浮物与液体之间也存在相对的滑移, 称为表观滑移.

3 壁面滑移机理

关于聚合物液体壁面滑移, 目前流行的理论大致可分为三种^[15], 见图 2^[16] 所示. 第一种是严格意义上的滑移, 即高分子链与固壁的附着-脱离模型. 它适用于表面吸附能较

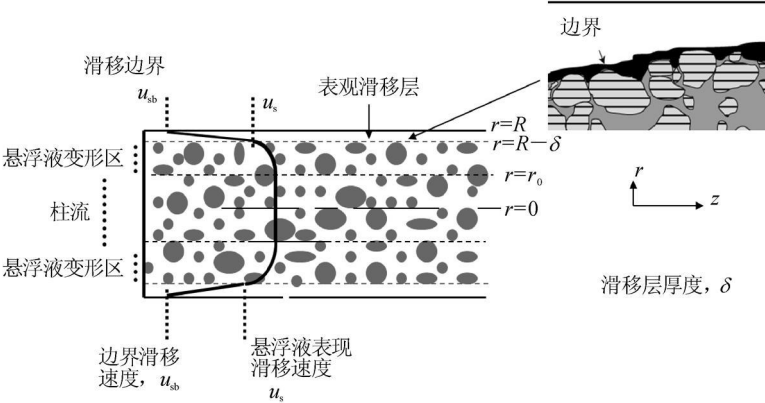


图 1 毛细管流壁面滑移 (半径 R)
Fig. 1 Wall slip phenomena of the capillary flow (radius R)

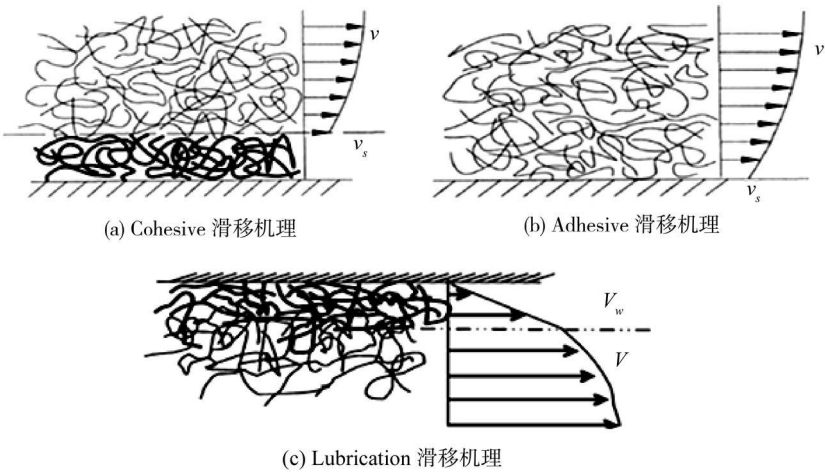


图 2 壁面滑移机理
Fig. 2 Mechanism of a wall slip

弱的情形;第二种是壁面附近的分子链与固定在壁面上的分子链的缠结—脱结模型,是由 Brochard 和 de Gennes 等^[9] 开创和发展起来的,这种滑移的一个特征是:超过一定的临界剪切应力/速率时才会发生,该临界值依赖于本体材料的特性;第三种是界面润滑模型,指由于乳胶、大分子等的迁移使界面层稀薄化的情形.润滑滑移起源于界面处低粘度液体层的积聚,使本体中的高粘度流体受到润滑.除了在乳浊液和悬浮液中发生这种滑移,在聚合物液体中也可能发生润滑滑移,例如若聚合物溶液的溶剂对边界基质有较强的亲和力,流体/固体界面上会积聚一层低粘度溶剂层.在刚性表面附近聚合物链较低的位形熵也能耗散界面处的高分子量的聚合物链.在聚合物溶液中,这个耗散过程在流体/固体界面处产生溶剂层;对于多分散性聚合物熔体,耗散过程在界面处产生低分子聚合物层.无论哪一种情形,若低粘度流体层的厚度为 Δ 流动中两种流体保持分层,即使低黏度流体满足非滑移边界条件,本体也会表现出滑移.这三种机理有各自的应用范围,并都得到了实验的支持.

4 壁面滑移的检测及速度的计算

4.1 检测滑移发生的方法

(1)标记技术显示法

是检测滑移的最直接的方法, Kaylon 和 Gevgilili^[17] 首次在阶跃应变和稳态剪切流中用直线标记技术检测到,当应变值较大时,样品与夹具壁面之间有滑移发生.用标记法检测壁面滑移是受限制的,只能显示测试之初的表面流动情况,平行板转过的角度不能太大,一般为圆周的 1/3,在其他部分作标一记和拍照都很困难(被流变仪挡住).标记显示的是实验结束后的流动情况,若要记录流动随时间的变化,则需要借助高速摄像机.由于样品表面受表面张力、表面平滑程度等因素的影响,标记只能粗略反映表面某一小部分的流动,所以这种方法的使用并不普及.如图 3 所示为直线标记法,是我们采用平行板流变仪对样品污泥(含水率 80%)做的流变实验,验证滑移现象存在(图 3(a))观察壁面滑移现象(图 3(b)).

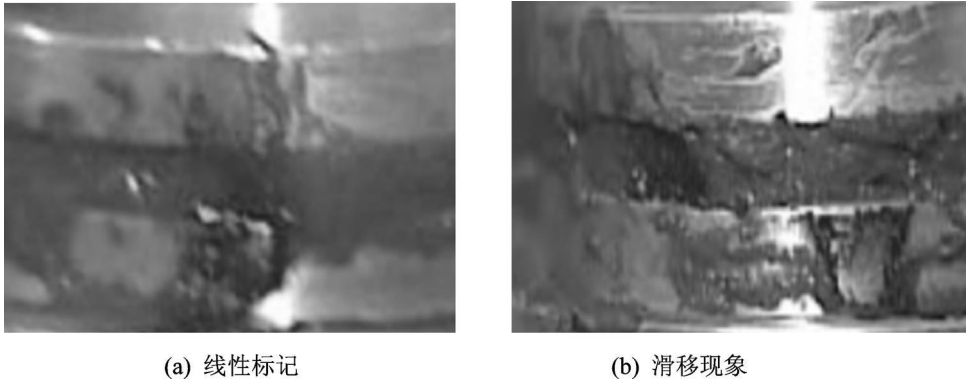


图 3 直线标记法 滑移现象

Fig. 3 Wall slip shown by a straight line marker technique (straight line marker(a), wall-slip phenomena(b))

(2)依赖于间距的表观剪切速率

是检测壁面滑移发生的间接方法,即从流变仪不同间距下的流动曲线(剪切应力对剪切速率)计算滑移速度的大小^[18-20].如果滑移发生了,滑移速度 $v_s(\sigma)$ 依赖于剪切应力 σ ,不依赖于间距 h .如果流体在同轴圆筒之间受到剪切,一圆筒静止另一圆筒旋转,剪切应力 σ 保持不变,而改变间距 h ,在流体和两圆筒之一的界面间会发生速度跃迁即产生滑移速 $v_s(\sigma)$.在流体本体中也会存在速度 $\dot{\gamma}(\sigma)$;因而运动的表面速度 $v=2v_s(\sigma)+\dot{\gamma}(\sigma)h$ 表观剪切速率 $\dot{\gamma}_{ar}=\dot{\gamma}_R(\tau_R)+\frac{2v_s(\tau_R)}{H}$, $\dot{\gamma}_{ar}-1/H$ 曲线在纵坐标上的截据即为实际剪切速率,斜率为 $2v_s$.

(3)粒子示踪法

是直接观察滑移的可视化方法,在固体表面附近的流体中植入粒子,粒子的尺寸要适中,在粒子浓

度较稀时不会显著破坏流动, 而且要能用光学显微镜观察到. 粒子大小为微米级或更大(除非使用荧光粒子)便于观察, 流体粘度适中(不小于 $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$). 通过观察在固体边界上的或邻近的粒子运动, 能判断壁面上或流体层(厚度不大于粒子的直径)内滑移的存在. Archer^[21] 等使用了较小的粒子($1.5 \mu\text{m}$)判断缠结聚合物溶液在两玻璃板之间受到剪切时壁面滑移的存在. 他们观察到溶液弹性增加时(通过增加聚合物浓度或分子量)滑移迅速增加.

(4) 激光-多普勒法

Muller-Mohnssen 等应用激光-多普勒测速法测量了在管道中流动的聚酰胺溶液中示踪粒子(直径)距管壁不同径向位置上的速度. 测量的速度分布显示, 管壁上明显存在一定的滑移速度. 应用全反射显微测速技术(一种隐失波谱), 测量了距管壁处示踪粒子的速度. 这些高精度(精度为)的测量显示, 表观滑移是由一较薄的流体壁面层引起, 薄层中的速度梯度比本体中的大很多. 该高剪切薄层使得本体中的速度梯度延伸到壁面上后获得一非零值. 聚合物为高分子电解质, 其电荷为壁面所排斥, 产生了一个邻近壁面的去除了聚合物的薄层, 因而具有较低的粘度. 这个低粘度层产生的速度梯度较本体中的高, 起到润滑层的作用, 形成表观壁面滑移. 此前是 Cohen 和 Metzner^[22] 指出这一去除了聚合物的薄层是引起滑移的原因.

(5) 赫磁-共振法

对于不透明样品流体, 邻近壁面的速度可以通过核磁共振速度成像法测量, 而不使用示踪粒子. 应用流变-核磁共振法可以测到离壁面 $10 \mu\text{m}$ 处流体的滑移速度, 还能检测到样品流体的屈服表面和剪切带. 该技术对于软固体如食物等特别有用, 此时均匀剪切的假设不再成立. 在这些情况下, 如果不借助速度成像技术, 仅使用通常的流变测试数据将会产生较大误差.

4.2 壁面滑移速度的计算

研究壁面滑移发生的位置和速度, 比较直观的方法是采用可视化技术观测示踪粒子的运动轨迹, 但由于设备昂贵, 实际应用并不多. 下面介绍几种壁面滑移速度的测定方法:

在实际问题中, 通常采用 Mooney^[23] 方法, 由幂律公式计算固壁滑移速度

$$v_s = \beta \tau_w^\alpha \quad (1)$$

式中: v_s 为固壁滑移速度; τ_w 为固壁切应力; β, α 为常数.

进一步的研究表明, 滑移速度也是许多其他变量包括温度和压力的函数. 研究发现, 存在临界切应力, 当切应力小于临界值时滑移为 0 或很弱, 当切应力大于临界值时滑移是显著的.

Tang 等^[24] 给出了等温条件下确定 Herschel-Bulkley 流体和固壁滑移速度与切应力关系参数的反问题求解方法, 当有 2-3 个未知数时容易得到唯一解. 当未知参数多于 3 个时, 有必要特殊处理以确保得到唯一解. 基于理论分析与实验数据, Tang 与 Kalyon^[25] 提出了下列壁面滑移公式:

$$u_s = \beta_0 \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\kappa(\phi)} \tau_w^\alpha (0.5 + 0.5 \lg h(\alpha(\tau_w - \tau_c))) + \frac{D_p}{m^{\frac{1}{\phi}}} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right) \tau_w^\alpha \quad (2)$$

式中: u_s 为固壁滑移速度; τ_w 为固壁切应力; τ_c 为临界剪切应力; β_0, α 为常数.

根据壁面滑移时熔体与流道壁面的黏附失效理论, 利用黏弹性移动因子对温度和压力的依赖性, 在低于聚合物加工温度情况下进行剥离试验, 得出壁面滑移速度. Hill 等^[26] 据此导出了壁面滑移速度 v_s 的表达式:

$$v_s = k \alpha_T^{-1} \tau_w \exp(-4\beta \tau_w L/D) \quad (3)$$

式中: α_T 为温度依赖性因子; τ_w 为壁面切应力; L/D 为毛细管长径比; β 为黏度的压力系数; m 为开裂速度的幂律指数; k 为系数.

梁基照^[27] 认为壁面滑移发生在挤出口模的出口处附近, 并推导出估算壁面滑移时的距离公式:

$$Z = L + (R/2\mu) \ln(\Delta p_z / \Delta p_L) \quad (4)$$

式中: Z 为从入口到发生壁面滑移的距离; L 为口模长度; R 为口模半径; μ 为熔体与口模壁面的摩擦系数; $\Delta p_z, \Delta p_L$ 为发生壁面滑移处和出口处的压强.

5 固壁滑移与切应力的关系

在很多流变学文献中,常采用临界剪切应力作为壁面滑移发生的判据.对不同的聚合物熔体,存在各种不同的临界剪切应力值. ElKissi 等^[28]用示踪粒子做了可视化实验后报道的 PDMS 发生壁面滑移的临界剪切应力值为 0.05 ~ 0.07 MPa; Benlow 等^[29]报道的 PDMS 发生壁面滑移的临界剪切应力值为 0.07 MPa; Hatzikiriakos 等^[30]用滑移板流变仪研究了高密度聚乙烯(HDPE)在大振幅剪切流中的壁面滑移,给出 HDPE 发生壁面滑移的临界剪切应力值为 0.09 MPa,这与他们在稳态剪切实验中得出的临界剪切应力值一致; Kaylon 等^[31]的 HDPE 扭转流动实验给出 HDPE 发生壁面滑移的临界剪切应力值约 $0.22 \sim 0.23$ MPa. 对于线性聚乙烯和 PDMS 发生壁面滑移的情况,不同的研究者给出了各种临界剪切应力范围,甚至有人认为壁面滑移在任何剪切应力下都会发生.这种差异可能是由于实验方法的不同及所研究的聚合物分子特性不同,另一个可能的原因是对界面条件的控制不好. Migler 等^[32]对距离固液界面 100 nm 处局部速度进行了直接测量,当剪切速率足够大时,观察到了 PDMS 弱滑移和强滑移之间的明显过渡;廖华勇^[12]对 PMVS 用平行板流变仪做了三种间距下的稳态剪切实验,发现表观剪切速率曲线在很小的剪切应力下仍然依赖于间距,表明 PMVS 似乎没有发生壁面滑移的临界剪切应力值.

6 固壁滑移与颗粒浓度的关系

Jana 等^[33]在窄间隙的 Couette 装置中,实验测定了 90 μm 聚甲基丙烯酸甲酯的单分散性颗粒的黏性牛顿流体的表观固壁滑移. 结果发现,当颗粒浓度 φ 在 0.45 ~ 0.52 之间时,滑移系数近似等于 $\lambda/8$, 式中 λ 为悬浮物与流体的黏性系数之比值. Lam 等^[34]研究了毛细管流中的浓悬浮液的壁面滑移现象. 实验结果表明,在同一实验温度下,当颗粒体积比分别为 35%、40% 以及 45% 时,滑移速度 v_s 随着颗粒浓度的增加而增加. 得出滑移速度 $v_s = \beta(\tau_w \sqrt{\varphi})^\alpha$, 式中 φ 为颗粒体积比浓度. 陈良勇等^[35]利用试验装置考察了浓度对水煤浆壁面滑移特性的影响. 结果表明:仅当壁面切应力大于临界切应力时才出现滑移,在低浓度区,滑移速度随浓度增加而增加;在高浓度区,滑移速度随浓度增加而降低. 孟令杰等^[14]分析了“滑移层”的存在对水煤浆管内流动特性的影响,提出了一种用管流法确定水煤浆的真实本构关系的滑移修正方法. 研究发现,浓度相同但管径不同,滑移影响程度不同.

然而,浓度对壁面滑移的影响,尤其是对流动不稳定性的影响至今尚不清楚. 普遍认为,在无/弱滑移区和强滑移区之间由一个过渡区相连接,这与简单聚合流体的滑移或黏滞现象一致. 对于加入刚性颗粒物的聚合流体,实验数据表明:悬浮物浓度对壁面滑移有很大的影响,在特定条件下,复杂流体中颗粒物的存在可能会控制流动的不稳定性. 然而,浓度为什么会影响以及如何影响壁面滑移尚不清楚.

7 结论与展望

(1)对壁面滑移产生的机理有不同的解释,但对不同加工应采用那一种机理解释还不十分清楚. 建议使用光学流变学方法和示踪粒子作微观探测,直接揭示聚合物熔体或溶液的流动规律,有利于与理论比较分析,使研究更深入.

(2)在可查到的固壁滑移速度和临界切应力的文献中,尚没有成熟的综合考虑浓度、压力、压缩性等因素. 虽然壁面滑移速度有不同的计算模型等,但在实际应用中具体采用那一种模型来计算还没有具体的研究.

(3)临界剪切应力的计算还不成熟,已有文献对临界切应力主要采用实验估计,但因其值随情况而变化(例如,浓度、材料等),实际应用是不方便的. 所以此现象有待进一步研究,从而才能为生产实践提供指导.

参考文献 References

[1] Denn M M. Extrusion Instabilities and Wall Slip [J]. Ann. Rev. Fluid Mech., 2001, 265 (33): 265-87.

- [2] Baudez J C, Coussot P. Rheology of aging, concentrated polymeric suspensions: application to pasty sewage sludges [J]. J Rheol, 2001, 45: 1123-1139.
- [3] 刘 弦. 城市污水处理厂污泥管道输送阻力特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
LIU Xue. The Research of the Resistance Characteristics about Pipeline Transportation for Sludge in City's Waste Water Treatment Plant [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [4] 邵必林, 马维平. 基于模糊指数法的油气管道风险评价研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(6): 804-808.
SHAO Bi-lin, MA Wei-ping. Study on the oil & gas pipeline risk-assessment based on fuzzy index method [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2006 38(6): 804-808.
- [5] 日本浆体输送研究会. 浆体与密封容器输送技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
Research Association of Japan slurry transportation. Paste and sealed container transport technical manuals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
- [6] 吴其晔, 巫静安. 高分子材料流变学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
WU Qi-ye, WU Jing-an. Polymer material Rheology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [7] Mooney M. Explicit formulas for slip and fluidity [J]. J Rheol, 1931(2): 210-223.
- [8] Wang S Q, Drda P A. Superfluidlike stick-slip transition in capillary flow of linear polyethylene melts 1: General features [J]. Macromolecules, 1996, 29 (6): 2627 - 2632.
- [9] Brochard F, de Gennes P G. Shear-dependent slippage at a polymer/ solid interface [J]. Langmuir, 1992, 8(12): 3033-3037.
- [10] Kalika D S, Denn M M. Wall slip and extrudate distortion in linear low-density polyethylene [J]. J Rheol, 1987, 31(8): 815-834.
- [11] 廖华勇, 范毓润. 聚合物熔体壁面滑移的流变研究[J]. 高等化学学报, 2006, 27(9): 1755-1761.
LIAO Hua-yong, FANG Yu-run. A Rheological Study on Wall Slip of Polymer Melts [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2006, 27(9): 1775-1761
- [12] 廖华勇, 丁永红. 高密度聚乙烯的壁面滑移行为[J]. 塑料, 2008, 37(6): 45-47.
LIAO Hua-yong, DING Yong-hong. A Rheological Study on Wall Slip Behavior of HDPE [J]. Plastics, 2008, 37 (6): 45-47.
- [13] Kalyon D M, Gevgilili H. J. Rheol [J]. 2003, 47(3): 683-699.
- [14] 孟令杰, 章名耀. 高浓度水煤浆流动的滑移现象及其对管内流动特性的影响 [J]. 热能动力工程, 1996, 11(2): 85-88.
MENG Ling-jie, ZHANG Ming-yao. The slip phenomenon of coal water mixture of high concentration and its effect on flow characteristics in pipes [J]. Journal of engineering for thermal energy and power, 1996, 11(2): 85-88.
- [15] Javier S R, Lynden A A. Interfacial slip violations in polymer solutions: Role of microscale surface roughness [J]. Langmuir, 2003, 19(8): 3304-3312.
- [16] 王克俭, 周持兴. 考虑壁面滑移的 $Z-W$ 流变模型及其应用 [J]. 高分子通报, 2003(1): 8-17.
WANG Ke-jian, ZHOU Chi-xing. $Z-W$ Rheological Model for Polymer Melt Considering Wall Slip and its Application [J]. polymer bulletin, 2003(1): 8-17.
- [17] Gevgilili H, Kalyon D M. Step strain flow: Wall slip effect and other error Sources [J]. Rheol, 2001, 45(2): 467-475.
- [18] Burton R H, Folkes M J. Spatial variation in viscosity in sheared polymer melts [J]. J. Mater. Sci, 1983, 18: 315-320.
- [19] Yoshimura A, Prud'homme R K. Wall slip corrections for coquette and parallel disk Viscometers [J]. J. Rheol, 1988, 32(1): 53-67.
- [20] Henson D J, Mackay M E. Effect of gap on the viscosity of monodisperse polystyrene melts: slip effects [J]. J. Rheol, 1995, 39(2): 359-373.
- [21] Archer L A, Chen Y L, Larson R G. Delayed slip after strains in highly Entangled Polystyrene solutions [J]. Rheol, 1995, 39(3): 519.

- [22] Cohen Y. Apparent Slip Flow of Polymer Solutions[J] . Rheol, 1985, 29(1): 67-102.
 - [23] Mooney M. Explicit formulas for slip and fluidity[J] . J. Rheol, 1931(2) : 210 - 223.
 - [24] H. S. Tang, D M Kalyon. Estimation of the parameters of Herschel – Bulkley fluid under wall slip using a combination of capillary and squeeze flow viscometers [J] . Rheologica Acta, 2004, 43: 80-88.
 - [25] Tang H S, Kalyon D M. Time-dependent tube flow of compressible suspensions subject to pressure dependent wall slip: Ramifications on development of flow instabilities[J] . J. Rheol, 2008, 52: 1069-1090.
 - [26] Hill D A, Hasegawa T. On the Apparent Relation Between Adhesive Failure and Melt Fracture[J] . J. Rheol, 1990, 34 : 891-897.
 - [27] Den Doelder C F J, Koopmans R J, Molenaar J, et al. Comparing the Wall Slip and the Constitutive Approach for Modeling Spurt Instabilities in Polymer Melt Flows [J] . J. Non-Newtonian Fluid Mech. , 1998, 75 : 25-41.
 - [28] El Kissi N., Piau J M. J. Non-Newtonian Fluid Mech [J] . 1990, 37: 55-94.
 - [29] Benbow J J, Lamb P. SPE Trans[J] . 1963, 3: 7-17.
 - [30] Hatzikiriakos S G, Dealy J M. J. Rheol [J] . 1991, 35(4): 497-523.
 - [31] Kalyon D M, Gevgilili H. J. Rheol [J] . 2003, 47(3): 683-699.
 - [32] Migler K B, Hervet H, Leger L. Physical Review Letters [J] . 1993, 70(3): 287-290.
 - [33] Jana S C, Kapoor B, Acrivos A. Apparent wall slip velocity coefficients in concentrated suspensions of noncolloidal particles [J] . Journal of Rheology 1995, 39: 1123-1132.
 - [34] LAM Y C, WANG Z Y, CHEN X, et al. Wall slip of concentrated suspension melts in capillary flows [J] . Powder Technology, 2007, 177: 162-169.
 - [35] 陈良勇, 段钰锋. 温度和固相粒径与浓度对水煤浆壁面滑移和流变特性的影响[J] . 中国电机工程学报, 2008, 28 (20): 48-54.
- CHENG Liang-yong, DUAN Yu-feng. Effects of temperature, solid particle size and concentration on wall slip behavior of coal-water slurry in pipelines [J] . Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 28(20): 48-54.

Wall slip of complex fluids and its measurement

FENG Min-quan¹, ZHANG Li¹, ZHANG Xiao-bin¹, HANSONG Tang²

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology of Education Ministry Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Dept. of Civil Eng., City College, The City University of New York, New York 10031)

Abstract Wall slip is a commonly recognized phenomenon in flows of complex fluids. This paper presents a review on the existing research of wall slip and methods for its measurement. The mechanism of wall slip is classified into two categories: bonding-debonding, entanglement-disentanglement, both of which depend on the nature of the die material and the polymer melt. As the relationship is very complex, it requires further studies. So methodologies for detection of wall slip are discussed, including straight line marker technique, Laser-Doppler velocimetry, and RHEO-NMR. Relationship between wall slip and its affecting factors such as critical stresses and particle concentrations are described, and the methods for evaluation of slipping velocity are discussed. Wall slip factors are very complex, although there have been some studies, their relationship is far from clear and the of quantitative expression is obvious.

Key words: complex fluid; wall ship; critical stress; particle concentration