从摩擦学的角度探讨提高挤出机生产能力的途径

李 勇

（青岛化工学院高分子材料加工机械研究所 266042）

摘要 根据建立的混合模型讨论摩擦力的影响因素，提出提高挤出机生产能力的新途径：（1）挤出机温度控制装置采用温水冷却，使挤出机处于最佳工作状态；（2）通过提高挤出压力，使实际接触面积趋于轮廓接触面积，从而使粘附摩擦力增大并趋于稳定；（3）机筒内壁开槽或刻花纹，方向垂直于螺纹输送角，以浅细的多头螺纹为宜。

关键词 挤出机，摩擦学，粘弹性，生产能力

Darnell 和 Mol 提出的螺杆挤出机固体输送理论，Tedder 提出的能量平衡理论以及后来修正的 Darnell 理论均明确指出：在挤出机喂料段，物料对机筒内壁的摩擦因数（μ_b）大于物料对螺槽表面的摩擦因数（μ_s）时，输送能力增大，差值越大输送能力越强。这个结论为改善高分子材料加工性能，提高挤出机生产能力开辟了一条崭新的途径，也揭开了这方面研究工作的序幕。

Evans 根据 Darnell 理论，对物料与机筒内壁及螺槽表面的摩擦因数与挤出机输送能力之关系进行了理论计算，结果示于图 1。从图 1 可见，在不改变螺杆几何参数的条件下，仅通过控制物料与机筒内壁及螺槽表面的摩擦因数，挤出机的生产能力会成倍提高。

Hassam Helmy 在生产机台上进行实验，验证了固体输送理论的正确性。发现加工高相对分子质量高密度聚乙烯（HMWHDPE）时，通过在挤出机喂料段机筒内壁开槽并强制冷却机筒以增大 HMWHDPE 与机筒内壁的摩擦因数，生产能力可提高80％，并且螺槽中物料的压力峰值由普通挤出机机头处移向喂料段附近。同时还发现尽管强制冷却机筒需要额外能量，但总能耗比一般挤出机低。

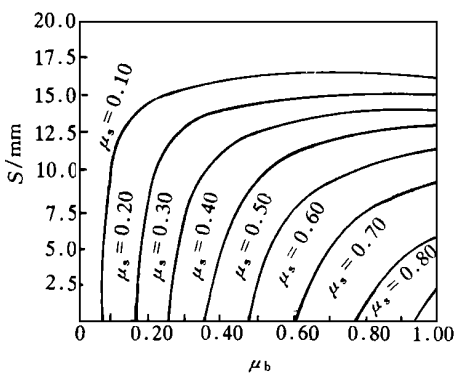

图 1 物料与机筒内壁及螺槽表面的摩擦因数对生产能力的影响

S—螺杆转一周固体塞的位移

本文结合高分子材料流变学及摩擦学这两门学科的研究成果，考虑到高分子材料的特点，提出了一种新的粘附摩擦机理，并在此基础上建立了理论模型，以证实高分子材料摩擦性能和粘弹性的相关性，证明了摩擦过程中的时（滑动速度）-温等效性。

1 理论模型的建立

假定高分子材料为线形弹性体，认为高

作者简介 李勇，男，34岁。1987年毕业于华南工学院（现华南理工大学）橡胶机械专业，获硕士学位。主要从事高分子材料流变学及摩擦学的研究。有多项成果获省部级奖。已发表论文近10篇。

分子材料在光滑刚性表面上的摩擦起因于界面层高分子材料分子链与金属表面的粘附-蠕变-回复准周期的变形过程，采用 Kelvin 力学模型、Boltzman 叠加原理和 W. L. F. 方程，从微观及唯象分析出发，应用能量守恒定律，建立一个包括微观参数、粘弹参数及工艺参数在内的理论混合模型：

$$F_a=\frac{\frac{\pi}{2}\sigma_0^2 R_F \rho \tan\delta}{E' v a_\theta \tau_s \ln\left[\left(\frac{R_F\sigma_0}{v a_\theta \tau_s E'}-1\right)\frac{E_\infty}{E_0}\right]} S_{out}\left[1-\exp\left(-\frac{\beta P}{E'}\right)\right] \quad (1)$$

式中　F_a——粘附摩擦力；

R_F——分子链 Flory 半径；

$\tan\delta$——高分子材料损耗因子；

E'——高分子材料贮存模量；

E_∞，E_0——变形频率趋于无穷和零时的高分子材料弹性模量；

a_θ——W. L. F. 方程中的平移因子；

τ_s——在温度 θ_s（$\theta_s=T_g+50$）下的推迟时间；

v——高分子材料与刚性表面相对滑动速度；

P——正压力；

S_{out}——刚性表面的轮廓接触面积；

β——刚性表面的几何特性参数；

σ_0——分子链的粘附应力（chain adhension），反应了高分子材料与金属表面的粘附强度的大小；

ρ——系数，根据胶料配方而定。

2　摩擦力的影响因素

2.1　温度和速度的影响——温度和速度的等效性

分析式（1）发现，粘附摩擦力 $F_a=f(va_\theta, E', \tan\delta)$，即高分子材料的粘附摩擦力满足温度和速度的等效性。对于无定型材料，a_θ 满足 W. L. F. 方程。

通过对国外资料中的试验数据进行重新回归分析（见图 2～4），证实了理论预测的正确性。

从图 2～4 可以看出，高分子材料的粘附摩擦力存在峰值，且对应于摩擦界面层物料中的玻璃化转变点。尽管此时基体材料不一

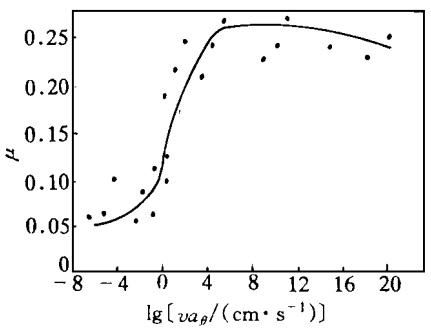

图 2　未填充的 **NBR** 在 **11 MPa** 压力下与钢的摩擦因数主曲线

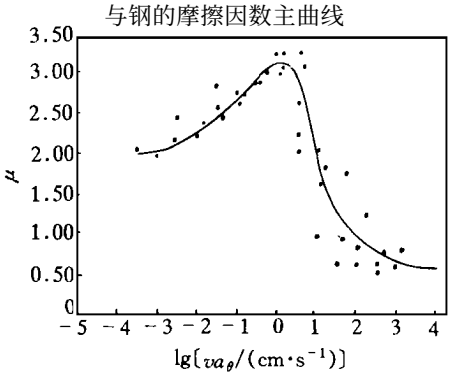

图 3　半玻璃球在清洁 **NBR** 表面上的摩擦因数主曲线

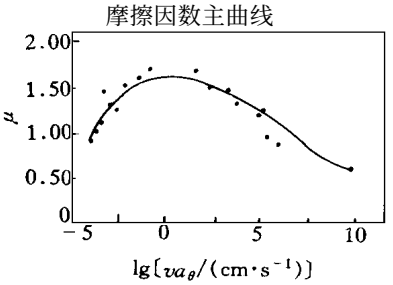

图 4　**SBR** 在 **65 kPa** 压力下与玻璃的摩擦因数主曲线

定发生玻璃化转变，但由于界面层分子链受到强烈的剪切变形及摩擦生热，表现出的性能类似于发生该转变。低于临界点，即变形频率低(速率小)或温度高，界面层物料处于高弹态，粘附摩擦力随 va_θ 增大而增大。高于临界点，即变形频率高(速率大)或温度低，界面层物料处于玻璃态，粘附摩擦力随 va_θ 增大而减小。

2.2 压力

将式(1)简化为

$$F_a = A'[1-\exp(-\frac{\beta P}{E'})] \qquad (2)$$

从式(2)中可以看出，粘附摩擦力随压力升高而增大。这是由于压力增大，实际接触面积增大，当压力增到一定数值后，实际接触面积趋于轮廓接触面积，从而使粘附摩擦力增大并趋于稳定。

2.3 材料表面能的影响

材料表面能大，意味着高分子材料与刚性表面的引力大，即 σ_0 值大。

从式(1)中分析发现，σ_0 不仅影响粘附摩擦力的峰值，同时也影响分子链的变形频率，从而也影响粘弹参数 $\tan\delta$ 和 E'，即影响着粘附摩擦曲线的形状。一般 σ_0 值越大，即材料表面能越大，粘附摩擦力的峰值越大。但 σ_0 值大时，F_a 峰值向高速或低温方向移动，可能会出现在界面层分子链处于高弹态时，材料表面能、粘附摩擦力反而小的奇异现象。

3 结论

(1)提出了一种崭新的高分子材料的粘附摩擦机理，并导出了估测高分子材料在刚性表面粘附摩擦的混合模型。理论表明，影响高分子材料摩擦性能的因素不是独立的参数，试验条件对其影响是非常显著的，也是极其复杂的。试验条件的微小变化，有时会引起摩擦力的急剧变化，甚至变化的趋势也不相同。

(2)根据理论分析，粘附摩擦因数是由内耗引起的，与高分子材料的粘弹性能密切相关，服从时-温等效原理。从理论和试验两方面证实了最大摩擦因数的存在，即高分子材料挤出加工工艺控制存在最佳值。也就是说，对于提高机筒喂料段摩擦因数，改变温度(a_θ 值)和改变螺杆转速(v 值)具有等效性。当螺杆转速较大时，应提高机筒喂料段冷却水温度。当螺杆转速较小时，应降低机筒喂料段冷却水温度，以保证挤出机处于最佳工作状态。这也为橡胶挤出机温控装置采用冷却水冷却来提高挤出机生产能力提供了理论依据。

(3)实际接触面积受接触压力、界面层物料贮存模量 E' 及刚性表面几何特征的影响。刚性表面的几何形状一方面影响轮廓接触面积，另一方面控制着参数 β 值的大小，因此推测在低压、低温和高速，或者高分子材料模量大的条件下，由于实际接触面积的减小，高分子材料摩擦力会出现随表面粗糙度的增大而减小的特殊现象。这与上面提到的 Evans 实验完全符合。

(4)在有强制喂料的挤出机中，对于粘性较大的物料或较软的物料，由于压力增大，如果在挤出机喂料段机筒内壁开槽或刻花纹，以增大轮廓接触面积，进而增大实际接触面积，可以提高挤出机生产能力。但开槽或刻花纹不应与机筒轴线方向一致，应垂直于螺纹输送角，并且以浅细的多头螺纹为宜。此时同时增大了高分子材料的滞后摩擦分量，并且沿机筒轴向向机头方向的槽深应逐渐变深。槽的形状应光滑，以防止积料。

收稿日期 1997-10-04