

# 磁头磁盘表面 Zdol 润滑剂转移机理研究

费佳玟, 陈语欣, 杨秀杰, 聂开勋, 唐正强\*

贵州大学机械工程学院, 贵阳 550025

**摘要** 采用粗粒化分子动力学模型研究磁头飞行高度、磁盘速度、头盘界面压强差和润滑剂厚度对 Zdol 润滑剂转移的影响。结果表明, 随着磁头飞行高度的增加, 润滑剂转移量呈先增加后急速增加的趋势; 润滑剂转移量随磁盘速度的增加而增加, 与低飞行高度相比, 高飞行高度下磁盘速度对润滑剂转移量的影响更剧烈; 润滑剂转移量随头盘界面压强差的增大而增大, 与低飞行高度为相比, 高飞行高度下头盘界面压强差对润滑剂转移量的影响最为明显; 润滑剂转移量随润滑剂厚度增加而增加。

**关键词** 分子动力学; 硬盘; Zdol 润滑剂; 润滑剂转移

随着大数据、物联网、人工智能等科学技术的发展, 当今社会已经进入数据时代, 这对数据存储方式及其存储量带来巨大挑战。机械硬盘(HDDs) 因其性价比高、数据存储安全可靠而被广泛使用。然而由于数据量的大幅提升, 低存储量的 HDDs 已经无法满足巨大的数据存储需求。因此, HDDs 迫切需要降低磁头-磁盘间距以提高磁介质存储面密度来提升其存储量。然而, 头盘之间的间距降低引起磁盘表面润滑剂的转移或磁盘表面润滑剂的耗散, 影响磁头的飞行特性, 降低硬盘的使用寿命<sup>[1-2]</sup>。为此, 研究人员对磁盘表面润滑剂的转移

展开一系列的实验研究及分子动力学模拟。

Seo 等<sup>[3]</sup>与 Pan 等<sup>[4]</sup>研究局部压力、磁盘速度、润滑剂结合比、头盘间距和气浮轴承宽度对润滑剂转移量的影响。结果表明, 润滑剂转移量与局部压力、磁盘速度、气轴承宽度呈正相关, 与润滑剂结合比、头盘间距呈负相关。此外, Seo 还发现润滑剂分子键的断裂受温度、局部压强及磁盘速度的影响, 与温度、磁盘速度相比, 局部压力对润滑剂分子键的影响最为明显<sup>[5]</sup>。Song 等<sup>[6]</sup>通过模拟对比了 Zdol、Ztetraol、TA-30 和 ZTMD 这 4 种全氟聚醚(PFPE) 润滑剂对磁盘的影响, 结果表明润滑剂中官能团越

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52165022); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y415)

作者简介: 费佳玟, 硕士研究生, 研究方向为摩擦、润滑及表面工程, 电子信箱: feijiawen88@126.com; 唐正强(通信作者), 教授, 研究方向为摩擦、润滑及表面工程, 电子信箱: zhengqiangtang@126.com

引用格式: 费佳玟, 陈语欣, 杨秀杰, 等. 磁头磁盘表面 Zdol 润滑剂转移机理研究[J]. 科技导报, 2024, 42(11): 92-97;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.01.00111

多,在磁盘表面的铺展性越好,且润滑剂的剪切运动随着官能团数目和极性强度的增加而减小。Li等<sup>[7]</sup>采用实验方法研究磁头磁盘界面临界间隙对润滑剂转移量的影响,结果表明在临界间隙下,润滑剂转移量会急速增加。

为了进一步探明磁头飞行高度、磁盘速度、头盘界面压强差及润滑剂厚度对润滑剂转移量的影响,本研究采用分子动力学方法模拟分析了磁头飞行高度、磁盘速度、头盘界面压强差及润滑剂厚度对Zdol润滑剂<sup>[8-10]</sup>转移量的影响,为磁头磁盘的设计提供理论依据。

## 1 模型和模拟方法

从20世纪80年代初至今,硬盘存储面密度实现从MB到TB的飞跃。磁头灵敏度及磁介质面密度的提升是实现硬盘存储量的主要方法。更高的磁介质面密度则需要灵敏度更好的磁头,这就需要更低的磁头飞行高度。而热控飞高技术(thermal flying control, TFC)<sup>[11]</sup>及热辅助磁记录技术(heat assisted magnetic recording, HAMR)<sup>[12]</sup>的提出将磁介质面密度扩展至每平方英寸1 Tbit甚至更高(1英寸=25.4 mm),而且头盘间距也拓展至几纳米。在这样的纳米间距下,附着在磁盘表面的润滑剂受到分子间的相互作用力而转移至磁头,因此采用分子动力学最为合适。

### 1.1 模型

Zdol是PFPE润滑剂的一种,分子量2000 g/mol,含有2个羟基(-OH),其粗粒化模型如图1所示,简化为2个端基粒子(end beads)和8个中间粒子

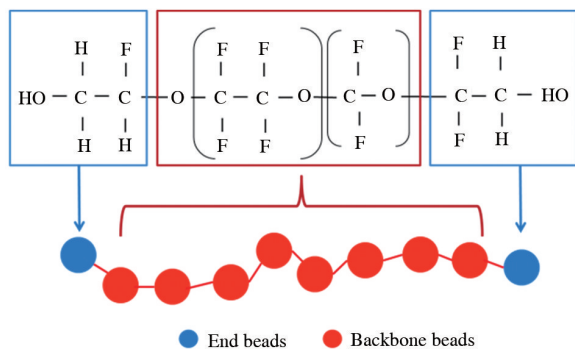


图1 Zdol润滑剂的粗粒化模型

(backbone beads)。在磁盘空间,Zdol主要通过范德华力与化学键吸附2种方式,与磁头和磁盘表面结合。其中,范德华力主要体现在Zdol润滑剂与磁头磁盘表面非官能团之间的吸附,化学键吸附则体现在Zdol末端粒子与磁头磁盘中存在的官能团形成的化学键。因此,在模型中,采用LJ(Lennard-Jones)、FENE(finitely extensible nonlinear elastic)、EXP(short-range attractive polar function)3种势函数模拟Zdol润滑剂与磁头磁盘表面之间的相互作用<sup>[6]</sup>,如图2所示。

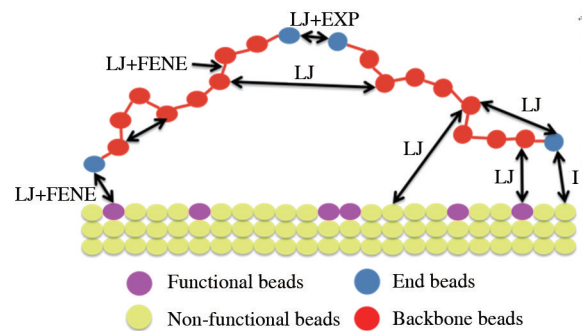


图2 Zdol润滑剂与磁盘表面碳保护层相互作用的粗粒化模型

图3展示了磁头磁盘界面空间Zdol润滑剂转移的分子动力学粗粒化模型<sup>[6]</sup>。图中,磁盘与磁头表面碳保护层(DLC)简化为功能粒子(functional beads)与非功能粒子(non-functional beads),DLC的厚度 $L_{DLC}=3\sigma$ ,润滑剂厚度 $L_{Zdol}=2\sigma\sim 4\sigma$ ,磁头飞行高度 $FH=1.5\sigma\sim 10\sigma$ ,磁盘总长度 $L=230\sigma$ ,总宽度 $B=110\sigma$ ,磁盘速度 $U=0.5\sigma/\tau\sim 6.5\sigma/\tau$ ,磁头凸起角度为 $90^\circ$ ,磁头凸起长度为 $L_s=110\sigma$ 。该模型采用分子动力学中的LJ单位制, $\sigma$ 是原子间相互作用的范畴,且 $\sigma=0.7$  nm,其他单位与国际单位的换算参照文献[4],如表1 LJ单位与国际单位换算所示。磁头凸起表面与磁盘表面空间中的润滑剂始终受到高压强作用,两边的磁头表面与磁盘表面空间的润滑剂始终受到低压强作用。

### 1.2 模拟方法

整个模拟环境的X、Y方向采用周期边界,Z方向采用自由边界。首先,在正则系综(Canonical Ensemble,简称NVT系综)下,只考虑LJ势和FENE势能,截断半径 $r_c=2^{1/6}\sigma$ ,时间步长设置为 $0.005\tau$ ,温



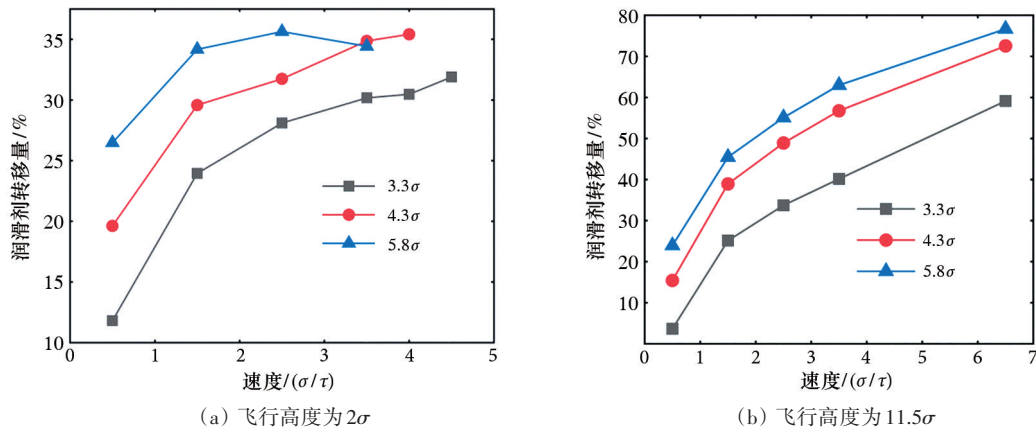


图5 磁盘速度对润滑剂转移量的影响

头表面间的结合力减弱,故引起了润滑剂转移量减缓。图5(b)中,与图5(a)相比,其润滑剂转移量更大,这是因为 $11.5\sigma$ 飞行高度下形成的润滑剂桥链将磁头和磁盘结合得更加紧密,当磁盘速度增加后,更容易造成更多的润滑剂转移到磁头表面。

### 2.3 头盘界面空间压强差对润滑剂转移量的影响

图6展示了头盘界面空间压强差对润滑剂转移量的影响。图中,润滑剂转移量随头盘空间压强差的增加而增加。然而,飞行高度降到 $2\sigma$ 时,压强差从 $15\epsilon/\sigma^2$ 增加到 $35\epsilon/\sigma^2$ ,其增加量约为8%,而飞

行高度为 $10\sigma$ 时,其增加量约为100%,即 $10\sigma$ 飞行高度下头盘空间压强差对润滑剂转移量的影响更大。磁盘界面空间压强差是磁头在高速旋转的磁盘表面读写数据时,由界面空间高速流动的流体而引起的,它的值越大,所引起的润滑剂转移量就越大。此外,与 $2\sigma$ 飞行高度相比,飞行高度为 $10\sigma$ 时,界面空间压强差影响下形成的润滑剂桥链更容易致使润滑剂急速转移到磁头,引起润滑剂转移量的急速增加,因此导致图6(b)的润滑剂转移量大于图6(a)。

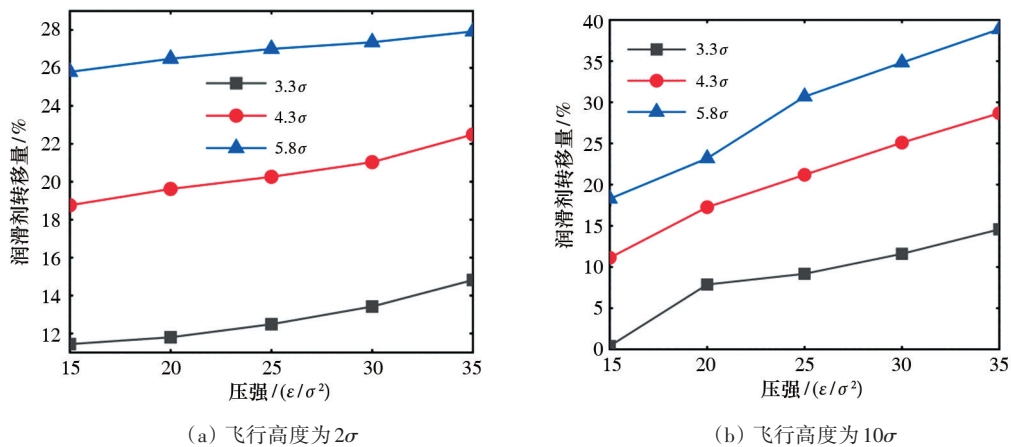


图6 头盘界面空间压强差对润滑剂转移量的影响

## 3 结论

采用粗粒化分子动力学模型分析飞行高度、润滑剂厚度、磁盘速度及头盘界面空间压强差对润滑剂转移量的影响规律及机理,结论如下。

1) 临界间隙的出现,导致润滑剂转移量随飞行高度降低呈先增加后急速增加的趋势。此外,润滑剂厚度的增大一定程度上也加剧了润滑剂的转移。

2) 润滑剂转移量随磁盘速度的增加而增加,且与 $2\sigma$ 飞行高度相比, $11.5\sigma$ 飞行高度下,磁盘速

度对润滑剂的转移影响更剧烈。

3) 润滑剂转移量随头盘空间压强差的增大而增大,且当飞行高度为 $2\sigma$ 时,头盘空间压强差对润滑剂转移量的影响较小;而当飞行高度为 $11.5\sigma$ 时,头盘空间压强差对润滑剂转移量的影响最为明显。

飞行高度、润滑剂厚度、磁盘速度及头盘空间压强差对润滑剂转移量的影响规律与Pan等<sup>[4]</sup>、Seo等<sup>[5]</sup>、Wong等<sup>[13]</sup>得到的结论一致。较大的磁盘速度、头盘界面空间压强差、润滑剂厚度,以及较小的飞行高度都会造成润滑剂转移量增多。因此,在硬盘设计的过程中,只有合理调控这些影响参数才能有效控制润滑剂的转移,防止转移后的润滑剂污染磁头,进而造成硬盘使用性能下降。

#### 参考文献(References)

- [1] Marchon B, Pitchford T, Hsia Y T, et al. The head-disk interface roadmap to an areal density of Tbit/in<sup>2</sup>[J]. *Advances in Tribology*, 2013: 521086. <https://doi.org/10.1155/2013/521086>.
- [2] Rottmayer R E, Batra S, Buechel D, et al. Heat-assisted magnetic recording[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(10): 2417-2421.
- [3] Seo Y W, Pan D, Ovcharenko A, et al. Molecular dynamics simulation of lubricant transfer at the head-disk interface[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50(11): 3302904.
- [4] Pan D, Ovcharenko A, Tangaraj R, et al. Investigation of lubricant transfer between slider and disk using molecular dynamics simulation[J]. *Tribology Letters*, 2014, 53(1): 373-381.
- [5] Seo Y W, Rosenkranz A, Talke F E. Investigation of lubricant transfer and lubricant fragmentation in a hard disk drive[J]. *Tribology Letters*, 2018, 66: 1-6.
- [6] Song J, Talukder S, Rahman S M, et al. Comparison study on surface and thermo-chemical properties of PFPE lubricants on DLC film through MD simulations[J]. *Tribology International*, 2021, 156: 106835.
- [7] Li N, Meng Y G, Bogy D B. Effects of PFPE lubricant properties on the critical clearance and rate of the lubricant transfer from disk surface to slider[J]. *Tribology Letters*, 2011, 43(3): 275-286.
- [8] Chung P S, Jhon M S, Choi H. Molecularly thin fluoropolymeric nanolubricant films: Tribology, rheology, morphology, and applications[J]. *Soft Matter*, 2016, 12(11): 2816-2825.
- [9] Jhon M S, Chung P S, Smith R L, et al. A description of multiscale modeling for the head-disk interface focusing on bottom-level lubricant and carbon overcoat models[J]. *Advances in Tribology*, 2013(47): 794151.
- [10] 程艳, 吴岩. 全氟聚醚润滑剂的研究进展[J]. *科学时代*, 2014, 000(13): 38-39.
- [11] 郭凯. TFC磁头磁盘界面传热特性研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [12] Wang Y, Maletzky T, Jin E X, et al. Pulsed thermally assisted magnetic recording[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(2): 739-743.
- [13] Wong C H, Li B, Yu S K, et al. Molecular dynamics simulation of lubricant redistribution and transfer at near-contact head-disk interface[J]. *Tribology Letters*, 2011, 43(1): 89-99.

## Study on transfer mechanism of Zdol lubricant on surface of head/disk

FEI Jiawen, CHEN Yuxin, YANG Xiujie, NIE Kaixun, TANG Zhengqiang\*

School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

**Abstract** The effects of the flight height of the head, disk speed, pressure difference of the head/disk interface, and lubricant thickness on Zdol lubricant transfer were studied by using the coarse-grained molecular dynamics model. The results showed that with the increase of head flight height, lubricant transfer increased first and then increased rapidly. Lubricant transfer increased with an increase in disk speed. And compared with low flight height, the impact of disk speed on lubricant transfer at high flight height was more severe. Furthermore, lubricant transfer also increased with the increase of the pressure difference at the head/disk interface. And compared with the low flight height, the pressure difference had the most obvious effect on lubricant transfer at the high flight height. What's more, lubricant transfer increased with the increase of lubricant thickness as well.

**Keywords** molecular dynamics; the hard/disk; Zdol lubricant; lubricant transfer ●



(责任编辑 王志敏)