Vol 26, No 5 Sep, 2006

表面纹理磁盘滑动接触的温度和应力及 退磁临界条件的研究

刘金依, 刁东风, 谢友柏

(西安交通大学 现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要:采用应力场和温度场耦合的有限元方法,计算磁头,磁盘滑动接触下铝基磁盘磁层内瞬态温度场和应力场及退 磁临界条件,分析接触压力、滑动速度、摩擦系数以及磁盘表面纹理对磁层内最大摩擦温升值和最大应力值的影响.结 果表明:波形纹理表面瞬间滑动接触所产生的温度分布呈波形特征,表面纹理越尖锐,磁层内的温度和应力越大;滑动 速度对磁层内温度的影响大于对应力的影响;当磁层最大应力小于 1.2 GPa时,所对应的速度和压力为安全工况;当 温升大于 180 K时所对应的工况将导致磁盘退磁.

关键词: 硬盘; 磁头 磁盘; 滑动接触; 表面纹理; 退磁中图分类号: TH117. 2文献标识码: A

使磁头与高速旋转磁盘之间的间隙尽可能小.近年 来,硬盘的磁记录密度以每年 60%的速度增长,晶 格介质 (Patterned Media)以及垂直记录技术有望实 现 1 Tb/in² 的面记录密度,将使磁头 磁盘间隙降至 3 nm^[1].在如此小的飞行高度下,磁头和磁盘表面 不可避免会产生冲击接触,导致摩擦热和接触应力 而影响磁信号的存储,严重时将导致磁盘退磁^[2~5]. Kin等^[6]基于 Jaeger^[7]的移动热源基本理论解析计 算磁头磁盘接触界面的瞬态温度分布. Gong等^[8] 基于有限元方法计算多层介质的表面接触温度和应 力场及其对微裂纹萌生的影响,本文作者采用应力 场和温度场耦合的有限元方法计算磁头 磁盘在瞬 态滑动接触下,铝基正弦表面磁盘磁层内的闪温分 布以及应力场,分析不同接触压力、滑动速度、摩擦 系数以及表面纹理对最大摩擦温升值和最大应力的 影响,并提出铝基磁盘的退磁临界条件,以期为减少 磁盘退磁方法提供实验依据.

1 有限元接触模型

磁头 磁盘滑动接触模型采用平面应变假设,几 何形状和有限元网格如图 1所示. 滑块中心的初始 位置 X = -3,滑块和磁盘的界面 Y = 0.磁盘表面

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475092).

收稿日期: 2005-09-21;修回日期: 2006-01-16,联系人刁东风, e-mail: dfdiao@mail xjtu edu cn 作者简介: 刁东风,男, 1961年生,博士,教授,博导,目前主要从事信息机械系统的微纳摩擦学研究.

正弦波形轮廓为规则表面纹理的简单模型,纹理处

文章编号: 1004-0595 (2006) 05-0461-06



理是为了提高存储容量和减小表面粘着力.不同幅 值 与波长 比描述了不同几何的表面纹理.记录 密度 1 Tb/in² 需要的磁介质周期约 25 nm^[9],我们取 = 25 nm, = 0.125~0.500 nm.磁盘简化成 3层各

462

向同性介质构成的半无限体,磁头(滑块)由 2层材 料构成,其属性^[10]和各层厚度见表 1,泊松比 均为

表 1 滑块和磁盘各层介质的厚度及热学和力学性能

Medium	Disk			Slider	
	L ₁ ^(D) (DLC)	$L_2^{(D)}$ (CoPtCr)	$L_3^{(D)}$ (N iP)	$L_1^{(S)}$ (DLC)	$L_2^{(S)} (A l_2 O_3)$
Thickness h/nm	3	10	550	2	60
Young's modulus E/GPa	180	210	130	180	450
Thermal expand coefficient $/10^{-6}$ K ⁻¹	6. 95	12.50	15. 00	6. 95	8.00
Thermal conductivity $k/W \cdot (\mathbf{m} \cdot \mathbf{K})^{-1}$	1. 24	6. 03	9. 30	1. 24	16. 77
Specific heat $c/J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	950	340	490	950	660
Density $/10^3$ kg \cdot m ⁻³	2. 10	12. 67	7. 90	2. 10	4. 22

0.3.采用过渡网格离散接触模型够成 15 000个四 节点四边形单元.由于波峰接触区温度应力场的梯 度较高,采用网格细化使单元边长等于第一层厚度 的 1/20.

在磁盘和滑块表面间的滑动接触中,热量通过 界面处的摩擦按以下速率流入磁盘:

 $q = F_f F_w \, \mu PV \tag{1}$

式中: q为热流密度, F_f 为摩擦功率转化成热流密度 的比例, F_w 为分配到磁盘的热流比例, μ 为摩擦系 数, P为接触压力, v为滑动速度. 假设摩擦功全部 转化为被表面吸收的热能, 即 $F_f = 1$. 界面所产生的 热量按照热流分配系数流入磁盘和滑块, 假设 F_w 在滑动过程中不变, B bk假设 2个滑动接触表面的 最高温度相等, 因此 F_w 可以简化为^[11]:

$$F_w = \frac{T_{\max}^s}{T_{\max}^d + T_{\max}^s}$$
(2)

式中: $T_{max}^{(a)}$ 和 $T_{max}^{(s)}$ 为假设产生的所有摩擦热量流入磁 盘 (d)或滑块 (s)时最高表面温度.

计算工况为:滑块压力 $P_0 = 10 \sim 1000$ MPa,滑 动速度 $V = 30 \sim 120$ m/s,摩擦系数 $\mu = 0.05 \sim 0.20$ 模型边界 AD和 BC边各个节点 X方向位移为 0, CD 边各个节点 Y方向位移为 0, FG边各个节点 X方向 位移为 5 (滑块长度 EF为 4),在 EF边施加均匀 压力 P_0 .我们考虑瞬间温度,摩擦热主要被磁盘热 传导消耗,忽略磁盘表面和空气的对流换热,即边界 AD、BC和 CD均为绝热.采用 ANSYS7.1温度应力 场耦合方法,采用 HP1120工作站计算(共 144组).

2 结果及分析

2.1 温度和应力的变化情况

图 2(a)所示为当滑块压力 $P_0 = 500$ MPa,滑动

速度 V = 60 m/s,表面纹理 / = 0 010, $\mu = 0.20$ 时,磁盘 DLC层 Y = 0的温度分布情况,图 2(b)为



磁盘磁层 Y = -3 nm的温度分布.图中滑块位置 X和滑动距离 S用表面波长 无量纲化表示,滑动速度用 $/_{M}$ 无量纲化表示,温度用 $k_{M}V/2q_{0}M$ 无量纲化表示.其中 M和 k_{M} 为磁层材料的热扩散系数和热传导系数, q_{0} 为接触表面的平均热流密度.

波形表面滑动接触所产生的摩擦温度呈现波形特征,这种分布特征与 Johnson的结果一致^[12].表面 摩擦温度的最大值始终出现在滑块运动的尾部.比 较图 2(a和 b)可见,磁层温度分布起伏小于表面温 度起伏,表明瞬态滑动中磁盘 DLC膜对磁层有明显的保护作用.

图 3(a)示出了当滑块压力 $P_0 / E_M = 0.0024$,滑动速度 V / M = 1.07,表面纹理 / =0.010,摩擦



Fig 3 Maximum T (a) and maximum x (b) in DLC and magnetic layer versus sliding distance 图 3 磁盘 DLC和磁层内最高温度和最大 x应力随滑动距离的变化情况

系数 $\mu = 0.20 \text{ 时}$,磁盘 DLC和磁层内的最高温度在 滑块滑动过程中的变化情况,图 3(b)为 x最大应力 值的变化情况.温度和应力最大值在滑动过程中表 现为近波形变化,当滑块移动至 0.5、1.5、2.5、 3.5 和 4.5 时,承载滑块的波峰从 4个增至 5个, 所以磁盘表面温度和 x应力最大值在此位置均出 现低值.当摩擦热量经过 3 nm的保护层传到达磁层 时,温度起伏明显低于表面.DLC层内温度和应力 最大值约为磁层内最大值的 3~4倍,具有较好的保 护作用.滑块移动到 5 时,磁层内温度最大值比 4 增加了 2 6%,可认为准稳态平衡.由于我们主要分 析温度和应力最大值对退磁的影响,因此对各种工 况和表面状况进行计算并提取滑动 5 时磁层内的 最大值进行分析.在水平记录磁盘中,对退磁产生影 响的力主要为平行于磁记录方向的应力,该方向的 应力导致磁致伸缩效应,为应力退磁的主要机 理^[13],所以我们考虑 *x* 应力.

2.2 表面纹理对最高温度和应力的影响

图 4所示为当摩擦系数 µ = 0.05,滑动速度 V / _M = 1.07,压力 P₀ / E_M 分别为 0.0024, 0.0036以及



图 4 磁层内最高温度和最大 X应力随 / 的变化情况

0.0048时,磁层内最高温度和最大应力随表面纹理 / 的变化情况,其中 3组压力采用不同的线形表 示,最高温度 *T*_{max}和最大应力 max分别用退磁温度 *T*_b和退磁应力 p的无量纲化表示.可见,温度和应 力均随 / 和 P₀ / E₄ 增加而增大.表面纹理越尖 锐,所引起的磁层内温度和应力变化越大.当压力 P₀ / E₄ 较小时,表面纹理 / 达到 0.010后尖锐程 度对温度和应力的影响逐渐减小,表明此时表面尖 锐所引起的温度和应力的不均匀已被保护膜承担.

2.3 滑动速度和压力对最高温度和应力的影响

图 5(a)所示为当 / =0.02, P_0 / E_M =0.0024,

μ = 0.05和 0.20时,磁层内最高温度和最大应力随 滑动速度 V / "变化的情况.可见,温度和应力均 随 V / "和 μ增加而增大,但应力增大较缓慢,表



Fig 5 Maximum *T* and maximum _x in the magnetic layer versus $V / _M$ (a) and P_0 / E_M (b) 图 5 磁层内最高温度和最大 X应力随 $V / _M$ (a)和 P_0 / E_M (b)变化的情况

明速度对温度的影响较大,而对应力的影响较小.速 度越大,所产生的摩擦热流密度越大,磁层的温度也 越大,在温度场和应力场耦合分析中,磁层X应力 是热应力与机械应力的和.由于滑动摩擦在磁盘前 缘所产生 X方向压应力远大于在后缘 X方向拉应 力,这里取 X应力最大值均为压应力.图 5(b)示出 了当 µ = 0.05, / = 0.005时,磁层内最高温度和最 大应力随压力 P₀ /E₄ 变化的情况. 对于所有 V / M,最高温度和应力均随压力 P₀ / E_M 的增加而单调 增大,且滑动速度越大其值增大越快.最高温度随 P₀ /E₄ 近似呈线性增加,最大应力随 P₀ /E₄ 呈非线 性增加.根据不同的摩擦系数 $(\mu = 0.05, 0.20)$ 和表 面纹理 (/ =0.000,0.005,0.010,0.020),共得到 8组类似图形.采用数值拟合分别得到 T_{max} / T_D 和 max / p与压力 P_0 / E_M 和滑动速度 V / p 的关系 式.

2.4 退磁临界条件

退磁是由于在界面产生热和应力作用下,磁头/ 磁盘瞬间导致的一种性能失效形式.目前退磁研究 以实验为主并有人观察到退磁温度,Suk等^[2]用恒 温热源在磁盘表面移动,观察到发生玻璃盘退磁的 表面温度为 315~420 .Yuan等^[3]通过有限元分 析和微磁学模拟得到退磁温度为 673 K (400), 在该温度下磁层的热应力超过 1.2 GPa 根据文献 中提供的材料属性和工况,假设环境温度为 30 , 用有限元法计算退磁发生的表面温升为 285 K,磁 层的温升为 180 K 我们分析磁头 磁盘接触时,当 退磁温度 T_p = 180 K和退磁应力 p = 1.2 GPa下的 退磁情况.

结合以上有限元数据 (Tmax和 max)和实验的退 磁应力 $_{D}$ 和退磁温度 T_{D} ,根据 $T_{max}/T_{D} = 1$ 和 $_{max}/$ p = 1得到导致退磁的临界工况条件.图 6为退磁 临界时压力载荷 P_0 / E_M 和滑动速度 V / M 的关系 曲线,其中图 6(a和 b)分别为 µ = 0.05和 0.20时 的热退磁曲线,曲线的左下方为安全工作条件,右上 方为退磁条件. 可见, 表面纹理 / 减小了退磁的 安全区域,但纹理的尖锐程度对安全区域面积的影 响较小.摩擦系数较小,相同速度下所需退磁压力 P_0 / E_M 较大.图 6(c和 d)分别为 $\mu = 0.05$ 和 0.20 时的应力退磁曲线,在相同速度范围内,应力退磁需 要的压力范围远小于热退磁条件.可见:在磁层最大 应力小于 1.2 GPa时,所对应的速度和压力为安全 工作条件;当温升大于 180 K时所对应的速度和压 力为导致退磁的工作条件;在 1.2 GPa和 180 K之 间所对应的工况为过渡区.

若 3.5 in的磁盘受到的垂向冲击力为 100 mN (即 $P_0 / E_M = 0.0048$),旋转速度 10 000 r/m in (表面 纹理周期 = 25 mm则 $V / _M = 1.07$),根据退磁曲 线可见,µ值在 0.05~0.20之间所产生的温度没有 导致退磁,而应力则大于退磁应力.所以铝基磁盘的 设计应该重点考虑应力的影响.需要指出的是,退磁 温度和应力与磁层厚度、材料及磁粒子大小等因素 有关,本文的退磁临界有特定的应用条件.

3 结论

а

波形纹理表面瞬间滑动接触所产生的温度



1 图 6 Thessure back P_0 / E_M as a function of shelling velocity V / M with (a) $T_{max} / T_D = 1$ and $\mu = 0.05$, (b) $T_{max} / T_D = 1$ and $\mu = 0.20$, (c) $x^{max} / D = 1$ and $\mu = 0.20$, and (d) $x^{max} / D = 1$ and $\mu = 0.20$ 图 6 (a) $T_{max} / T_D = 1, \mu = 0.05$, (b) $T_{max} / T_D = 1, \mu = 0.20$, (c) $x^{max} / D = 1, \mu = 0.05$, (d) $x^{max} / D = 1, \mu = 0.20$ 时 压力载荷 P_0 / E_M 和滑动速度 V / M的关系

分布在磁盘表面和 DLC磁层界面均呈波形特征.

b. 表面纹理越尖锐,滑动接触所引起的磁层 内温度和应力越大.

c 滑动速度对磁层内温度的影响较大,而对磁层内应力的影响较小.

d 当磁层的最大应力小于 1.2 GPa时,所对 应的速度和压力为安全的工作条件;而当温升大于 180 K时,所对应的速度和压力将导致磁盘退磁;在 1.2 GPa和 180 K之间所对应的工况为过渡区.

参考文献:

- 张会臣,維建斌.硬盘润滑剂性能及其对磁记录系统动力学特性的影响研究进展[J].摩擦学学报,2004,24 (5):476-482
 Zhang H C, Luo J B. Performances of lubricants in hard disk and their influences on dynamic characteristics of magnetic recording system[J]. Tribo bgy, 2004, 24 (5):476-482.
- [2] Suk M, Dennig P, Gillis D. Magnetic erasures due to impact induced interfacial heating and magnetostriction [J]. Journal of Tribology, 2000, 122(1): 264-268.
- [3] Yuan ZM, Liu B, Wang JW. Flash temperature induced magnetic degradation in high density magnetic recording [J]. Journal of

Applied Physics, 2000, 87(9): 6 158-6 160.

- [4] Liu J Y, Diao D F. Finite element analysis on critical conditions for heat-induced demagnetization in head/disk sliding continuous contact[C]. Symposium on Frontiers of Magnetic Hard Disk Drive Technology and Tribology, World Tribology Congress III, Washington, D C, 2005.
- [5] 刘金依, 刁东风, 谢友柏. 磁头 磁盘滑动接触下磁盘的温度及 热退磁临界条件的研究 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25 (5): 451-455.

Liu J Y, Diao D F, Xie Y B. Temperature of hard disk and critical condition for heat-induced demagnetization in head/disk continuous sliding contact[J]. Tribology, 2005, 25 (5): 451-455.

- [6] Kim J H, Shin K H. A numerical model incorporating friction induced temperatures for contact recording applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36 (5): 2 692-2 695.
- [7] Jaeger J C. Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts[C]. Proceedings of the Royal Society of New South Wales, 1943, 76: 203-224.
- [8] Gong Z Q, Konvopoulos K Mechanical and themomechanical elastic-plastic contact analysis of layered media with patterned surfaces[J]. Journal of Tribology, 2004, 126 (1): 9-17.
- [9] Ross C A. Patterned magnetic recording media [J]. Annual Review of Materials Science, 2001, 31: 203-235.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- Bhushan B. Tribology and mechanics of magnetic storage devices
 [M]. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [11] Komanduri R, Hou Z B. Analysis of heat partition and temperature distribution in sliding systems [J]. Wear, 2001, 251 (11): 925-938.
- [12] Johnson K L. Contact mechanics [M]. Cambridge University Press, 1985.
- [13] Jeong T G, Bogy D B. Dynamic loading impact-induced demagnetization in thin film media[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29 (6): 3 903-3 905.

Coupled Temperature-displacement Finite Element Analysis of a Slider Sliding Contact with a Textured Disk Surface and the Critical Condition for Demagnetization

L U Jin-yi, D AO Dong-feng, X E You-bai

(Key Laboratory of Education M inistry for M odem Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to develop the critical operating conditions for demagnetization of the disk, a coupled temperature-displacement finite element analysis of a slider sliding contact with a textured disk surface was performed, so as to investigate simultaneously the stress and temperature distributions in the magnetic layer. The flash temperature increasing with sliding distance was presented. The maximum magnitude of interior stress and temperature in the magnetic layer were responsible for the occurrence of demagnetization. The influences on the maximum temperature rise and stress due to the sliding velocity, contact pressure, frictional coefficient, and surface texture were examined. From the simulation results and the demagnetization temperature / stress available, the critical condition for demagnetization in magnetic recording disks was deduced. Sinusoidal surface texture produces a sinusoidal temperature distribution in transient sliding contact. Sharper texture produces larger temperature rise and stress in the magnetic layer. Effect of sliding velocity on the temperature rise is larger than that on the stress. Sliding velocity and slider pressure with maximum stress of the magnetic layer smaller than 1. 2 GPa is the safe operating condition for the magnetic disk, but the maximum temperature of the magnetic layer higher than 180 K would lead to demagnetization.

Key words: hard disk, head/disk, sliding contact, surface texture, demagnetization

Author: D AO Dong-feng, male, bom in 1961, Ph D., Professor, e-mail: dfdiao@mail xjtu edu cn