

D2 钢系列涂层磨损性能的数值模拟^{*}

王可胜^{1)†} 刘全坤¹⁾ 张德元¹⁾

1) 合肥工业大学材料科学与工程学院, 合肥 230009)

2) 深圳怡景五金制品有限公司, 深圳 518103)

(2009 年 1 月 14 日收到, 2009 年 2 月 7 日收到修改稿)

采用真空离子镀的方式在 AISI D2 钢基体上制备渗 N、TiN 及复合涂层, 并采用模拟和实验的方法研究涂层的磨损性能. 将 Archard 经典粘着磨损模型离散化后用 Fortran 子程序的形式嵌入到商业化的有限元软件中, 以求解接触摩擦过程中接触区每个节点或单元的磨损深度, 定量分析了基体及三种涂层的磨损深度. 研究结果表明, 复合涂层具有最优耐磨性能. 实验结果与模拟结果相符合.

关键词: 磨损, 数值模拟, 渗 N, TiN

PACC: 5275R, 4630P

1. 引 言

随着现代塑性加工技术的进步及航空、航天、汽车工业的飞速发展, 复杂形状零件和难变形材料的塑性加工需求越来越大. 模具的摩擦磨损一直制约着塑性加工的发展, 迫切要求人们研究解决工作在高温、高压、大切应变率下模具的摩擦磨损和润滑问题, 以提高模具的寿命. 在精密冲裁领域, 磨损是影响生产工艺过程中模具寿命的最主要因素之一. 采用表面工程技术在模具表面制作一层或多层复合的减摩抗磨涂层是一个非常有效的途径, 可以弥补模具材料的不足以及液体润滑的失效^[1-5]. 目前, 国内外的一些学者采用涂层技术提高模具的抗磨损能力以提高模具寿命. Shyrokov 等^[6]分析了冲压过程中涂层的抗磨作用. Guler 和 Erdogan^[7,8]分析了梯度涂层与基体的直接接触机制, 并研究不同截面时刚性/弹性冲模的摩擦特性. Hyung 等^[9]根据热弹性接触机制, 研究平面冲模在梯度涂层/基体上滑动时的摩擦生热情况. 刘元富等^[10]利用脉冲高能量密度等离子体技术于室温下在 45 号钢材上制备 TiN 薄膜并研究了其摩擦磨损性能. 邓明等^[11]研究表明, 对精冲模具表面通过扩散、涂覆、浸渗、溅射、硬化等方法, 改变表面成分和组织, 可以提高模具寿命几倍

甚至几十倍. 以上的实验研究需要大量时间, 由于实验设备的精度及工作范围的限制, 在实验状态下较难对各种涂层的磨损性能进行比较. 本文将涂层技术、摩擦磨损实验与有限元模拟技术相结合, 定量地研究分析了 AISI D2 钢基体上的渗 N 层、TiN 及复合涂层的摩擦磨损特性, 说明有限元模拟技术在磨损计算中应用的可行性, 为磨损计算提供一种方法, 同时也为定量地预测及提高模具寿命奠定了基础.

2. 模具磨损模型

2.1. 粘着磨损模型的数学描述

模拟模型基于 Archard 经典(粘着)磨损定律的经验公式. 由于该模拟中采用的是稳态积分过程, 可以将 Archard 经典(粘着)磨损定律以位置相关的形式进行积分表达, 即

$$Z(x) = k \int \frac{p(x, t)^p v(x, t)^q}{H(x, t)} dt, \quad (1)$$

式中, Z 是磨损率, k 是磨损因子, H 是材料硬度, t 是相对运动时间, x 是当前积分点所在位置, dt 是连续的时间增量, p 和 q 分别是对应于当前时间和当前位置的界面法向压力和界面相对滑动速率.

在仿真模型中模具磨损的表现形式可以在几何

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50575097)和安徽省自然科学基金(批准号 070414146)资助的课题.

[†] E-mail: kswong@yuking.com.cn

上通过单元删除和节点收缩移动两种形式进行表示. 在本研究工作中, 采用节点收缩移动形式表示, 即磨损量计算的目标是把指定离散节点以材料磨蚀量进行退化累积并转化为节点位移量, 所以 $Z(x)$ 可以被关联到模型表面节点. 因此 (1) 式可以转化成下列离散化的表达式:

$$Z(i) = \frac{K}{H^c} \sum_{i=1}^n p(x, i\Delta t) v(x, i\Delta t) \Delta t. \quad (2)$$

节点的移动方向通过如图 1 所示的每个相邻的表面节点计算获得. 移动向量 D_i 可以表示为

$$D_i = \frac{-(n_j + n_{j+1})}{|n_j + n_{j+1}|}, \quad (3)$$

式中 n_j, n_{j+1} 分别为节点相连单元边 $j, j+1$ 的法向量. 将 (2) (3) 式以用户子程序的形式嵌入到商业有限元软件中, 以求解每个节点或单元的磨损深度. 用户子程序被用于定义样品接触界面上的网格表面节点在每个迭代步上的退化矢量, 并在每一个收敛步结束. 应用网格光滑技术进行网格的自适应调整来保证模型的内层单元能够与外层单元同时保持良好的网格形状, 不会造成网格畸变和收敛困难.

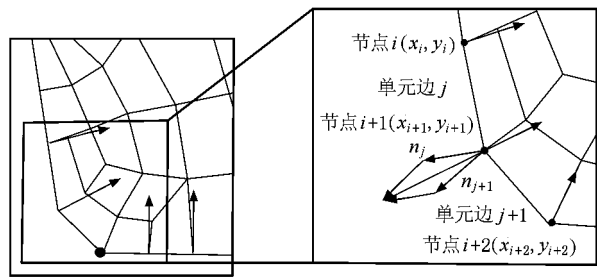


图 1 结点移动方向(磨损方向)

2.2. 磨损过程有限元模型

试样尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 配磨工件材料是 GCr15, 洛氏硬度 $H_R = 60.5$, 试样与配磨工件间的相对运动速度是 0.733 mm/s , 运动时间为 120 min . 其他工艺参数如表 1 所列, 其中 f 为磨损实验测得的摩擦系数, P 为载荷, H_V 为实验测得的威氏硬度. 有限元分析 (FEA) 仿真模型如图 2 所示. 在 FEA 仿真模型中, 因为涂层厚度相对于试样本体非常薄, 所以涂层硬度值作为一个属性值附着在有限元网格模型的表面节点上.

表 1 模拟工艺参数

	f	P/N	H_V
基材	0.09	800	650
渗 N	0.09	800	890
TiN	0.081	2000	2410
复合涂层	0.08	2000	2410

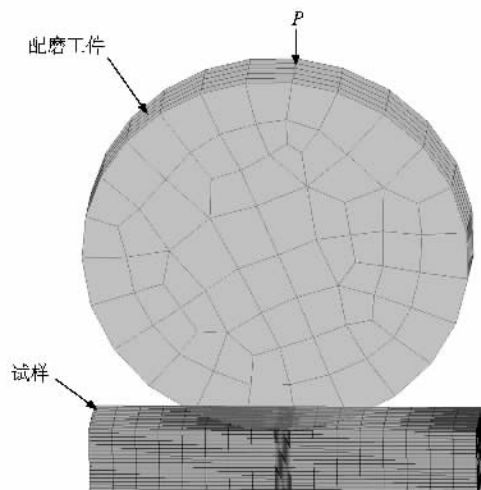


图 2 FEA 仿真模型

3. 数值模拟结果分析与实验验证

3.1. 数值模拟结果分析

不同涂层类型的试样模型的磨损分布如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 磨损区域内部磨损较大, 外部磨损较小. 这是由于在对磨副上施加一个集中载荷 P , 导致接触区域中间的磨损深度为最大, 并由中间向外侧逐渐减小.

剖切截面的磨损深度曲线如图 4 所示. 根据图 4 可知, 基材平均磨损深度大于离子渗 N 的平均磨损深度, 且远大于 TiN 涂层的平均磨损深度和复合涂层的平均磨损深度. 离子渗 N 对于减少磨损的影响并不是很明显, 而 TiN 涂层及复合涂层能够显著减小磨损.

3.2. 涂层的制备及摩擦磨损实验

3.2.1. 涂层的制备

选用 AISI D2 样板(按质量分数, 其化学成分为

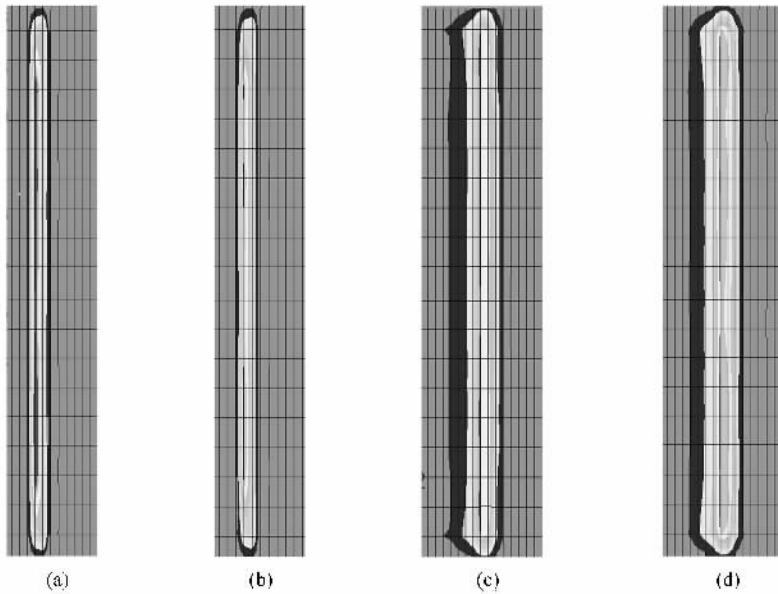


图 3 不同试样的磨损深度分布 (a)基材 ,最浅深度为 0.0118 mm ,最深深度为 0.0946 mm (b)渗 N ,最浅深度为 0.0072 mm ,最深深度为 0.0573 mm (c)TiN ,最浅深度为 0.0007 mm ,最深深度为 0.0054 mm (d)复合涂层 ,最浅深度为 0.0005 mm ,最深深度为 0.0038 mm

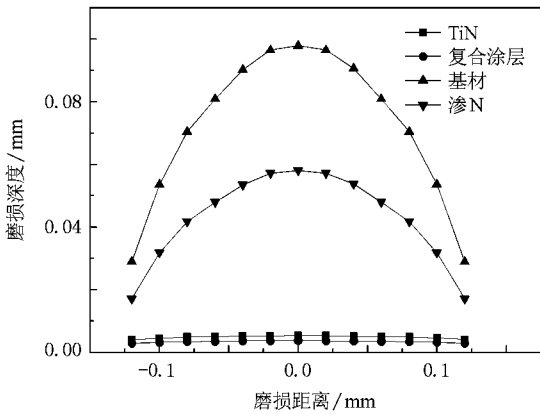


图 4 不同样品的磨损曲线

C 1.45% ,Cr 12.5% ,Mo 0.9% ,N 0.3% ,其余为 Fe) 在 1050 °C 淬火 ,在 450 °C 回火 ,达到威氏硬度 $H_V = 650$.这样的回火温度比通常的冲裁模回火温度偏高 ,其目的是保证模具基材有足够的韧性 .试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 50 mm ,并经精磨、抛光 ,使试样表面粗糙度 $R_a = 0.2 \mu\text{m}$.

等离子渗 N 在 450 °C 下进行 2 h ,在分解氨气中进行 ,工作气压为 250 Pa ,加 700 V 占空比为 50% 的脉冲偏压 .此时在试样表面无化合物层生成 .渗 N 层的威氏硬度 $H_V = 890$,厚度为 0.025 mm .

采用物理气相沉积方法运用多弧离子镀膜机镀

TiN ,镀膜温度为 450 °C .所得 TiN 层的威氏硬度 $H_V = 2410$,厚度为 3 μm .

复合涂层的制作在镀膜机上进行 ,渗 N 阶段与单独渗 N 过程相同 ,然后省略表面轰击清洗过程 ,直接进入伪扩散层镀膜阶段 ,后续过程与镀 TiN 膜相同 .形成的表面层为渗 N 和 TiN 层在空间上的组合 .成分与单独渗 N 或镀膜的成分相同 .

3.2.2. 摩擦磨损实验及结果分析

滑动磨损实验在 MM2000 型环块式磨损试验机上进行 ,配磨材料为 GCr15 ,洛氏硬度 H_R 为 60.5 .按照 GB1444.2-90 标准 ,在充分润滑的条件下 ,样品在配磨材料上以 0.733 m/s 的相对线速度滑动 120 min ,使用安装在磨损试验机上的摩擦功积分器测量出平均摩擦系数 .在基材样品、渗 N 样品、TiN 涂层样品及复合涂层(渗 N 后镀 TiN 涂层)上 ,分别施加 800 800 2000 2000 N 的正压力 ,按上述实验方法及参数 ,分别测量出 4 种样品的平均摩擦系数 .按照时间间隔 ,从磨损试验机中取出样品放入丙酮溶液中用超声波将其清洗干净 ,然后在 80 °C 下干燥 10 min ,再用 GT-2A 分析天平称重并计算出损失的重量 .根据模拟及磨损实验 ,不同样品磨损模拟的重量损失及磨损实验结果列于表 2 ,其中 W_1 为仿真的重量损失 , W_2 为实验的重量损失 .

表 2 不同样品的磨损模拟及滑动磨损实验结果

样品	f	P/N	$W_1/10^{-5}g$	$W_2/10^{-5}g$	相对误差/%
基材	0.090	800	156.5	160	2.2
渗 N	0.090	800	86.8	91	4.6
TiN	0.081	2000	10.0	10	0.0
复合涂层	0.080	2000	7.0	9	22.2

由表 2 可知,磨损实验中 TiN 和复合涂层的重量损失几乎相等,并且模拟中复合涂层的磨损重量损失 W_1 与磨损实验中的重量损失 W_2 相对误差为 22.2%。磨损实验所用的 MM2000 型磨损试验机的上限速度为 0.733 m/s,上限载荷为 2000 N,即使加载到上限载荷,也很难用分析天平精确地测量出重量损失。因此,磨损实验中仪器精度及测量误差是造成上述相对误差偏大的主要原因,然而仿真可以定量地给出 TiN 的重量损失为复合涂层的 1.4 倍。从表 2 可以看出,排除分析天平的精度限制造成的测量误差外,仿真结果与实验结果基本符合。仿真结果

及实验结果表明,TiN 及复合涂层的抗滑动磨损能力明显提高且复合涂层的抗滑动磨损能力最强。

4. 结 论

采用真空离子镀的方法在 AISI D2 钢基材上制备了渗 N、TiN 及复合涂层,并采用模拟和实验的方法研究涂层的耐磨性能。将 Archard 经典粘着磨损模型离散化后用 Fortran 子程序嵌入到商业化的有限元软件中,以求解接触摩擦过程中接触区每个节点或单元的磨损深度。采用上述方法,进行有限元模拟定量地分析了基材及 3 种涂层的磨损深度。仿真结果及实验结果表明:相对于无涂层试件而言,TiN 及复合涂层的抗滑动磨损能力明显提高,复合涂层具有最优的抗磨损性能。模拟结果与实验结果相符。这说明数值模拟技术在磨损计算中应用的可行性,为磨损计算提供了一种方法,同时也为预测及提高模具寿命奠定了基础。

[1] Schulz A, Stock H R, Mayr P, Staevs J, Schmoeckel D 1997 *Surf. Coat. Technol.* **94—95** 446
 [2] Ezugwu E O, Okeke C I 2001 *J. Mater. Process. Technol.* **116** 10
 [3] Lim C Y H, Lim S C, Lee K S 2000 *Surf. Eng.* **16** 253
 [4] Berg M, Budtz-Jørgensen C V, Reitz H, Schweitz K O, Chevallier J, Kringhøj P, Röttiger J 2000 *Surf. Coat. Technol.* **124** 25
 [5] Wilson S, Alpas A T 1998 *Surf. Coat. Technol.* **108—109** 369
 [6] Shyrovkov V, Maksymuk A, Vasylyv C 2005 *Tribol. Int.* **38** 179
 [7] Guler M A, Erdogan F 2004 *Int. J. Solids Struct.* **41** 3865

[8] Guler M A, Erdogan F 2006 *Mech. Mater.* **38** 633
 [9] Hyung J C, Glaucio H P 2008 *J. Mech. Phys. Solids* **56** 1673
 [10] Liu Y F, Zhang G L, Wang J L, Liu C Z, Yang S Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 503 (in Chinese) [刘元富、张谷令、王久丽、刘赤子、杨思泽 2004 物理学报 **53** 503]
 [11] Deng M, Peng C Y, Huang W J 2002 *Mach. Des. Manu. Eng.* **4** 67 (in Chinese) [邓明、彭成允、黄伟九 2002 机械设计与制造工程 **4** 67]

Numerical simulation of the tribological behaviour of the serial coatings of D2 steel^{*}

Wang Ke-Sheng^{1,2)†} Liu Quan-Kun¹⁾ Zhang De-Yuan¹⁾

¹ *School of Materials Science and Engineering , Hefei University of Technology , Hefei 230009 ,China)*

² *Yu King (Shenzhen) Metal Manufacturing Co. , Ltd , Shenzhen 518103 ,China)*

(Received 14 January 2009 ; revised manuscript received 7 February 2009)

Abstract

By using the vacuum ion plating technique , nitriding , titanium nitride and their complex coatings are plated on AISI D2 steel , and the finite element analysis (FEA) and experiments are employed to investigate their wear resistance . Archard adhesive wear law based on classic model is embedded into the commercial FEA software in the manner of Fortran subroutine , thereby calculating the wear depth of each node during the contact friction process . The wear depths of substrate and three kinds of coatings are quantitatively analyzed . It is shown that duplex treatment has an optimal wear resistance , and the simulation results are in good agreement with experimental measurements .

Keywords : wear , numerical simulation , nitriding , titanium nitride

PACC : 5275R , 4630P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50575097) and the Natural Science Foundation of Anhui Province , China (Grant No. 070414146) .

[†] E-mail : kswong@yuking.com.cn