

# 考虑热力耦合效应的磨损剥层机理研究与计算分析

高秀坤<sup>1</sup>, 陈俊岭<sup>2</sup>, 张承一<sup>1</sup>

(1. 当阳市住房与城乡建设局, 湖北 当阳 444100; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:** 现有的摩擦磨损机理与计算理论较少涉及滑动摩擦过程中的温度效应, 提出了考虑摩擦温度应力与机械应力耦合情况下的一种摩擦磨损新机理与计算模型。具体地, 首先依据摩擦界面原子受迫振动温升模型与计算理论得到滑动摩擦的界面摩擦热, 应用热传导理论计算了摩擦金属体的温度分布; 然后对单纯摩擦温度应力下金属基体的裂纹开展条件与分布规律进行了分析, 提出了考虑热应力和界面循环剪切应力耦合作用的材料磨损剥层新机理, 建立了该机理下的磨损物理模型, 在合理假设的基础上推导了摩擦磨损计算公式; 最后对一些典型的磨损现象进行了探讨。

**关键词:** 界面原子; 温度; 剥层理论; 滑动摩擦; 磨损

**中图分类号:** TB42 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2015)01-0071-06

## 1 剥层磨损理论及存在的问题

摩擦学研究旨在揭示摩擦磨损形成机理及影响因素, 进而建立物理模型和数学描述, 最终寻求润滑、表面处理等技术, 将摩擦和磨损掌控在人的意志以内<sup>[1]</sup>。摩擦学有着悠久的历史, 从最早的库伦(Coulomb)摩擦定律(1780年)算起到现在已有200多年的历史。摩擦磨损作为摩擦学中的基础性问题, 人们提出了大量描述磨损的物理模型和预测磨损的计算公式, 其中比较有代表性的磨损理论包括<sup>[2]</sup>: 磨粒磨损微切削理论(1960年)、粘着理论(1964年)、疲劳磨损理论(1977年)、能量磨损理论(1973年)和剥层磨损理论(1977年)。很多摩擦学的权威人士认为这五种磨损形式是最基本的机制, 这种观点的形成是摩擦科学中的一个重大进展。

为了解释磨损现象的共同本质, 美国麻省理工学院教授苏(N. P. Suh)于1973年建立了剥层理论(The delamination theory)<sup>[3]</sup>, 以描述在很多中磨损形式中出现的材料剥层现象, 典型的薄层磨损磨屑的几何特征如图1所示<sup>[4]</sup>。

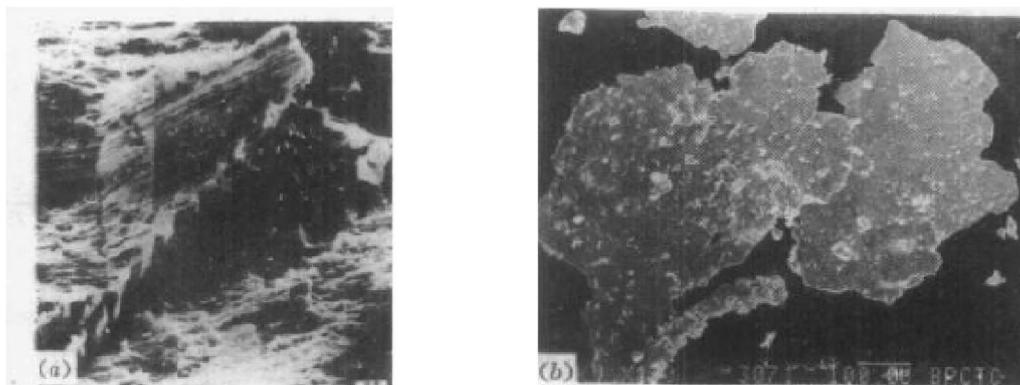


图1 薄片状碎屑的特征

收稿日期: 2013-11-02 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2015.01.15

作者简介: 高秀坤(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事群仓抗震研究。E-mail: 465346670@qq.com

高秀坤, 陈俊岭, 张承一. 考虑热力耦合效应的磨损剥层机理研究与计算分析[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2015, 28(1): 71-76.

剥层机理以金属位错理论为基础,能够分析亚表层金属的塑性变形与断裂行为。大量实验证实,该理论的预测与实验结果在低速滑动下基本一致,能够解释诸如粘着磨损、疲劳磨损和微动腐蚀磨损的许多现象:(1)外界所给能量如何消耗;(2)为什么摩擦系数影响磨损率,其影响规律如何;(3)为什么一些较硬的材料反而比较软的材料磨损得快一些;(4)为什么磨粒尺寸之比远远大于1;(5)为什么产生咬死现象;金属的微观结构对磨损率有什么影响;(6)表面粗糙度的原始状态以及波纹度对磨损现象的影响;表面层的变形、裂纹的形成与扩展、贝氏(Beilby)层的形成,以及润滑剂、滑动速度和复合荷载对磨损的影响等。

剥层理论发表后,得到了各国摩擦学界的积极响应,引起了极大的兴趣。随着实验研究和理论发展的深入,在成功解释前述问题的同时,该理论被发现对于如下磨损问题不能给出满意的解释:(1)不能有效解释在中高速滑动摩擦下的磨损现象;(2)对拉伤等现象完全失效;(3)未考虑摩擦中冲击荷载频率的影响;(4)忽略摩擦热对摩擦界面材料物理性能的影响。上述问题的本质是在摩擦热产生可观效应的情况下(譬如高速冲击、高频冲击等)磨损机理及其计算理论问题,有效地解决这一问题对于促进摩擦磨损机理的进一步发展显得十分重要。

## 2 考虑摩擦热效应的剥层磨损机理的提出

接触面滑动摩擦的效果主要是摩擦热效应和机械作用,当摩擦块在摩擦表面滑动时,基于 Fleischer 的系统能量平衡理论的研究成果表明<sup>[5]</sup>,摩擦功以热量的形式在表面间释放的比例高达近90%,摩擦功的一小部分(占总摩擦功的9%~16%)以潜在的内能形式储存在材料中,它表现为结晶的位错<sup>[6]</sup>,良好的导热性使得摩擦热量透过摩擦界面层材料引起显著升温;另一个就是机械作用,一些表面处理措施(金属抛光、淬火等)或者摩擦时表面的塑性流动将使表面层硬度显著提高,在整个变形层中形成了一个先低后高再下降的硬度梯度。

基于以上分析,为便于推导对摩擦表面引入假设:

①表面硬化层坚硬且导热良好,在摩擦中不会变形破坏;②滑动块相对于无限大基体为点热源,滑动很小一段时间就达到热稳态阶段;③完全接触且摩擦中无粘结,表面层下为理想金属晶体;④摩擦热90%被界面层吸收,不考虑热辐射等散失;⑤相对于四周金属晶体而言,被加热区域的边界被约束且不能任意自由膨胀。

简化的摩擦模型如图2所示。

摩擦热在滑动摩擦中对摩擦参数和磨损的影响是十分显著的,考虑到现有的磨损机理很少考虑摩擦的热效应,基于以上假设本文提出了基于热力耦合的摩擦剥层的磨损机理:

(1)界面相对滑动产生的大量摩擦热堆积在摩擦表面硬化层上,并使之温度升高,摩擦热透过导热性能良好的表面层向基体深度热传导,形成一定的温度梯度。

(2)硬化层层下的金属晶体发生膨胀,膨胀的幅度随深度逐渐减弱;由于硬化层的约束,上部膨胀被限制,处于整体受压状态,由于加热区域被四周低温金属包围,处于非自由膨胀状态,边界可发生有限的小位移,裂缝出现在膨胀应力超过金属晶体的极限强度的基体深度范围。

(3)滑动块(点热源)下层的基体研究区域将双向开展相应间距的裂缝,裂缝方向垂直于摩擦表面,开裂体近似于“短柱”(图3所示),其高度由金属基体的临界开裂温度决定,裂纹发生的最低处为温度界限处。

(4)裂纹开展后,在表面反复滑动摩擦力的作用下,数量众多的“柱体”根部在反复应力冲击下发生损伤并积累,塑性损伤累积至材料的塑性变形极限导致裂纹,分布的“柱子”逐渐发生弹性或塑性断裂,表面产生片状的剥层。

## 3 基于上述剥层磨损理论的计算理论

### 3.1 物理模型的提出

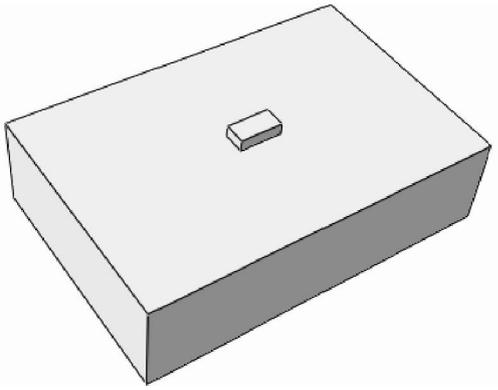


图 2 摩擦滑动模型

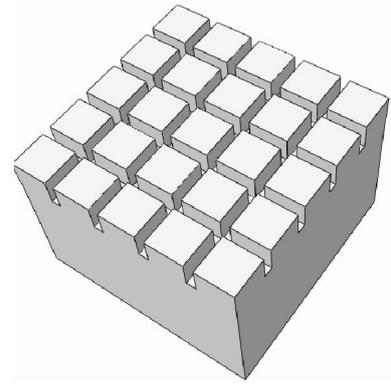


图 3 表面层下开裂单元体

根据磨损机理(2), 考虑到热传导理论可知, 表面硬化层下的基体温度分布是不均匀的, 基于温度应力的裂缝分布密度也是不同的, 同一深度裂缝密度相同; 随深度增加, 温度非线性降低, 竖向裂缝密度间距逐渐增大以至不产生, 由于开裂层很薄, 近似认为裂缝在硬化层以下双向展开的间距相同。由于表面硬化层的三向挤压效应, 其附近的基体处于三向受压状态, 温度应力导致的裂缝无法在此开展, 这样实际裂缝为无头裂纹。裂缝开展后, 由于开裂体的释放储存的弹性能发生回缩, 而“柱子”的上下被约束住, 这样裂缝在空间上类似“橄榄球”, 裂纹平面内为椭圆, 鉴于裂纹尺寸极小计算中假设裂纹为直线。设裂缝开展的间距为  $B$ , 高度为  $h_2$ , 这样就提出了如下计算模型, 磨损厚度  $H$  是“柱子”高度和表面硬化层厚度加和。图 3 为去掉硬化层的开裂表面单元图。

### 3.2 表面温升的计算与温度分布规律

(1) 摩擦表面温升的计算。摩擦表面的温度依据磨损机理的理论基础<sup>[7]</sup>, 在相对滑动中, 一方面因接触界面势能场周期性的变化, 使界面势能场内的原子处于受迫振动状态, 另一方面, 原子从一种平衡态跳跃到另一种平衡态时, 激发原子以振子固有频率进行自激振荡。因此界面原子的温升是上述两种热振动叠加的结果。基于复合振子理论, 假设受迫振动只发生在一个方向, 考虑到假设磨损机理假设(4) 不考虑其它形式能量(如声能、光能)耗散的情况下, 可以认为界面势能减小部分全部转化为界面层原子的热能, 则受迫振动产生的能量与原子因受迫振动而导致的摩擦热  $Q_p$  (数值上等于  $k\Delta T$ ) 满足下列关系式

$$k\Delta T = \frac{2}{m} \left( \frac{\pi a v H_0}{a^2 \omega_n^2 - 4\pi^2 v^2} \right)^2 \quad (1)$$

式中,  $m$  为界面原子质量;  $a$  为界面材料的晶格常数;  $v$  为界面的相对滑动速度;  $\omega_n$  为界面原子的固有频率;  $H_0$  为界面激励力幅;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $\Delta T$  为摩擦表面温升量。为扩展该公式的适应范围, 界面激励力可以应用傅立叶变化为一组不同频率分布的正弦和余弦函数之和。

(2) 摩擦表面下温度分布规律。滑动块看作为移动点热源, 它将在物体中引起导热, 热量在这些实际面积上产生, 然后扩散到周围。当滑动速度足够, 一段时间达到传热的稳定状态, 则整个界面的温度保持不变。假定滑动平面无限大, 初始温度为  $t_i$ , 在点  $(x, y, z)$  处的点热源从时间  $\tau = 0$  起持续地释放热量, 发热率为  $Q_p(\tau)$ , 于是物体中将发生非稳态传热, 把  $0 \sim \tau$  的整个时间过程分割成无数个微小的时间间隔, 则持续点热源可看作在不同时刻  $\tau_i$  的  $d\tau_i$  瞬间释放热量  $Q_p(\tau_i) d\tau_i$  的无穷多个顺序排列的瞬时点热源的集合。取  $\tau'$  时刻的瞬间  $d\tau'$  进行分析, 经计算得到物体中引起微小温度变化的表达式

$$dT = \frac{Q_p(\tau') d\tau'}{8\rho c (\pi\alpha)^{3/2} (\tau - \tau')^{3/2} \exp[-R^2/4\alpha(\tau - \tau')]} \quad (2)$$

式中,  $T = t - t_i$ ;  $\rho$  为材料密度;  $c$  为比热容;  $\alpha$  为材料的热扩散率;  $R$  是任意点  $M(x, y, z)$  与热源之间的距离。

持续点热源在物体内造成的温度场是  $0 \sim \tau$  时间顺序发热的无穷多个瞬时点热源共同作用的结果, 对时间积分得

$$T(R, \tau) = \frac{1}{8(\pi\alpha)^{3/2}} \int_0^\tau \frac{\varphi_p(\tau')}{(\tau - \tau')^{3/2}} \exp[-R^2/4\alpha(\tau - \tau')] d\tau' \quad (3)$$

式中,  $\varphi_p(\tau') = Q_p(\tau')/\rho c$ 。

点热源为固定功率且长时间后温度达到稳态后, 简化后得到

$$T(R) = Q_p/4\pi\lambda R \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为导热系数。

在微元体在单位时间的散热计算看作点热源, 对其进行坐标积分得到线热源的温度分布, 对线热源坐标积分得到面热源的温度分布, 持续作用的热源可以看作是瞬时热源在时间上的延续, 以瞬时热源函数为基础, 通过对时间变量积分, 即可得到持续热源引起的导热问题的解。

### 3.3 裂缝的间距与高度计算

根据磨损机理(2), 裂缝产生的根本原因是金属基体不能自由膨胀, 中心应力远高于四周, 裂缝分布不均匀。具体地对于本研究, 对于滑块下的金属导体温度分布为立体对称球形, 在特定的深度处温度应力造成的金属内膨胀应力恰好等于其强度极限, 称之为温度界限面, 温度界限面切割温度分布球体, 以切割得到的平行于滑动摩擦面的圆向摩擦面投影, 得到一个圆柱体, 为简化计算, 认为圆柱体内各层温度相等, 深度方向切割面如图 4 所示( $h_1$  为形变和硬化层,  $h_2$  为裂缝开展区域)。

设距离表面硬层距离  $h_1$  的温度为  $t_1$ , 假设温度在  $H$  处发生金属晶体的膨胀弹性断裂, 断裂高度可以计算为两者的高度差。假设晶体的极限强度是  $\sigma_y$ , 温度应力计算为

$$\sigma_t = \alpha E \Delta T \quad (5)$$

当材料某点温度应力大于材料的极限强度时, 裂纹就会在这个深度开始展开, 依据式(5)可以求出裂纹出现需要的温度。

Rabinowicz(1965年)从能量的观点来分析粘着磨损中的磨屑形成的条件, 即认为裂缝形成的条件应是分离前所储存的变形能必须大于分离后新生成的表面的表面能, 这里我们采用这一理论分析裂缝开展的条件。假设摩擦时两界面紧密结合, 摩擦副不能自由膨胀, 弹性势能储存在体内, 摩擦体远比摩擦块大, 使得摩擦体被摩擦处的区域相当于绝热体, 热量封闭在基体内, 可以发生变形。由为简化计算, 摩擦层内裂缝开展处温度设为  $t$ , 应力为  $\sigma = \alpha Et$ , 应变能为  $\sigma^2 B^2 h_2 / 2E$ , 表面能为  $4Bh_2\gamma$ , 计算得到裂纹开展的条件为  $\sigma^2 B^2 h_2 / 2E > 4Bh_2\gamma$ , 即  $B > 8\gamma E / \sigma^2$ , 临界条件为  $B = 8\gamma E / \sigma^2$ 。可以看出, 裂缝间距与应力的平方成反比, 裂缝间距不是恒定不变的, 当摩擦速度加快时, 裂纹间距以平方的速度减小间距。当  $\sigma_t = \sigma_y$  时, 可以求得临界的裂缝深度, 由  $\Delta T = \sigma_y / \alpha E$ ,  $\theta(R) = Q_p / 4\pi\lambda R$ , 得到临界的裂缝深度  $R = Q_p \alpha E / 4\pi\lambda \sigma_y$ 。

## 4 考虑摩擦应力下的裂缝开展及磨损量计算

### 4.1 裂缝开展条件及开裂状态

为了使开裂的基体条与基体材料分离, 裂缝的发展方向与微观计算, 取裂纹开展区域一微单元体, 进行分析, 单元体受到剪力和热拉应力的复合作用, 微元体如图 5 所示。

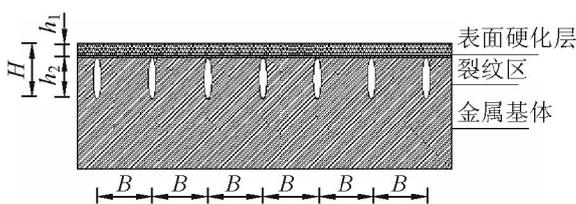


图 4 裂缝开展的计算简图

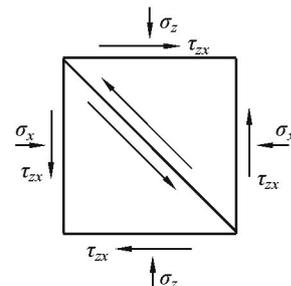


图 5 微元体应力图

考虑基体收到摩擦应力、顶部压力和温度应力下的弹性势能, 基于复合应力的磨损计算假设与计算公式推导应用能量原理: 当弹性体内的势能大于新产生的表面能时, 基体开裂, 基体内的微元体受到三个

力作用, 表面剪切应力、温度应力和压应力, 处于三向受力的复杂状态, 假设基体属于弹性断裂, 则推导如下:

储存的弹性能

$$A = (\sigma_p^2/2E + \sigma_t^2/2E + \tau^2/2G) B^2 h_2 \quad (6)$$

式中,  $\sigma_p$  是接触压力产生的应力;  $\sigma_t$  是温度产生应力;  $\tau$  是摩擦力产生的剪应力。

表面能

$$S = 4Bh_2\gamma \quad (7)$$

临界状态

$$B = 8\gamma/(\sigma_p^2/E + \sigma_t^2/E + \tau^2/G) \quad (8)$$

#### 4.2 基于开裂理论的磨损计算

磨损体积为开裂体面积与高度的乘积, 假设磨损高度与裂缝间距成一定指数关系, 设为  $h = K_0 B^{-K_1}$  ( $K_0$  为比例系数,  $K_1$  为裂缝出现的概率, 与基体应力状态和接触表面材料特性相关), 当  $K_1 = 3$  时, 可以推导得到如下的关系式

(1) 压力起主导作用时

$$B = 8\gamma E/\sigma_p^2, V = KSP^2/\gamma E \quad (9)$$

实验研究表明<sup>[8]</sup>: 磨损量与滑动距离成正比的结论基本适合于各种磨损条件, 而磨损量与荷载的正比关系只适合于一定的荷载范围。例如钢对钢的摩擦时, 当荷载超过  $H/3$  时, 磨损量将随荷载以指数形式增加。磨损量与材料硬度成反比的关系已被许多实验所证实。

(2) 温度应力起主导时

$$B = 8\gamma/E\alpha^2 t^2, V = KSE\alpha^2 t^2/\gamma \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 磨损量与刚度成正比, 这可以理解为刚度大的材料更容易受温度应力影响, 材料越硬, 裂缝间距越小, 对应的磨屑尺寸将越小。

(3) 当摩擦剪应力起主导时

$$B = 8\gamma G/\tau^2, V = KS\tau^2/\gamma G \quad (11)$$

当滑块滑动速度很大以致产生的温度使表面硬化层刚性的假设失效时, 此时较软金属接近熔化温度, 在摩擦表面形成一层润滑金属膜, 摩擦系数大幅降低, 磨损显著降低, 表面润滑层的下部仍然会形成双向开裂体, 形成力学上的悬臂短柱形式; 表面开裂, 摩擦系数降低, 但摩擦系数小幅振荡, 类似于微观层次上的振子振动跨越。

## 5 结语

新的磨损剥层机理考虑了温度应力与机械应力耦合作用下的磨损状态, 它能够对一些存在的磨损现象给出很好的解释, 以下是几个尝试:

(1) 开始时磨损随着滑动速度和接触压力的增加而近似比例增大, 当继续增大压力或提高滑动速度, 摩擦热产生的温度应力导致裂缝产生, 磨损机理发生变化时磨损量呈现非线性的显著增长。

(2) 表面热传导系数差的材料不易发生剥层破坏。

(3) 荷载冲击频率越大, 剥层厚度越大, 磨损量越大<sup>[9]</sup>, 这可以由公式(1)得到解释。

(4) 传统的观点认为在表面覆盖硬化层能有效减小磨损, 根据新的磨损剥层机理, 对于热传导系数小的覆盖层是有效的; 反之, 反而加快表面覆盖层的脱落。

(5) Sproles et al<sup>[10]</sup> 在解释微动磨损稳态阶段的主要机理时用 4130 钢进行了微动实验, 对所产生的片状磨屑的观察表明: 薄片是由金属破裂在原位形成; 表面光滑的薄片反面存在较多的浮雕状屑, 依据新磨损机理可以解释为浮雕是被剪断的“短柱子”。

摩擦条件下的磨损是一个复杂的系统问题, 新的磨损剥层机理与计算模型能够解释一些现有磨损机

理不能很好解释的现象。本文在前人假说的理论的基础上试图把握摩擦磨损下的内在规律性,为磨损剥层的预测提供新的思路。

## 参 考 文 献

- [1] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.  
 [2] 温诗铸. 材料磨损研究的进展与思考[J]. 摩擦学学报 2008 28(1): 2.  
 [3] Suh N P. The delamination theory of wear[J]. Wear, 1973 25(1): 111-124.  
 [4] 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.  
 [5] 张剑锋, 周志芳. 摩擦磨损与抗磨技术[M]. 天津: 天津科技翻译出版公司, 1993.  
 [6] 张克从. 近代晶体学基础(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
 [7] 龚中良, 丁凌云, 黄平. 摩擦界面原子受迫振动温升模型及计算研究[J]. 摩擦学学报 2008 28(4): 323-324.  
 [8] 余俊, 徐真等. 摩擦学[M]. 湖南: 湖南科学技术出版社, 1984.  
 [9] 魏勇强, 王黎钦. 20CrNiMo 钢在冲击滑动耦合作用下的磨损特性研究[J]. 摩擦学学报 2008 28(4): 262-263  
 [10] Sproles, Jr E S, Gaul, D J, et al. Fundamentals of tribology[M]. London: Ed. Suh N. P. and Saka, N., MIT Press, 1981: 588.

### Study and Analysis of the Delamination Theory Based on the Coupling Effect Between Thermal Stress and Circular Shear Stress

Gao Xiukun<sup>1</sup>, Chen Junling<sup>2</sup>, Zhang Chengyi<sup>1</sup>

(1. Bureau of Housing and Urban-Rural Development of Danyang, Danyang 444100;

2. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The effect of temperature is not frequently involved in the current mechanism study of wear and calculation theory. A new mechanism of wear is proposed under the consideration of coupling effect between thermal stress and circular shear stress. Concretely speaking, the friction heat between metal sliding interfaces is obtained according to the rising model and calculation theory of forced vibration of interface atoms, and the distribution of temperature of inner body is gained by heat conduction theory, and then the development and distribution pattern of crack is studied. A new delamination theory is put forward, and the physical model and method of calculation are established based on reasonable assumptions. Finally, some typical phenomena are analyzed using the new delamination theory.

**Key words:** interface atom; temperature; delamination theory; sliding friction; wear

(上接第 65 页)

### Analysis and Calculation of Slope Reliability and Sensitivity Factors

Zhang Yunqing<sup>1</sup>, Li Weizhen<sup>2</sup>, Yan Jingchang<sup>1</sup>, Lin Chuanchuan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. High School of Hebei Hengshui, Hengshui 053000, China)

**Abstract:** The limit state design method will be used in Chinese Railway Standard to replace the allowable stress design. Some research results are provided in this paper. Firstly, the formula of limit state equation and the reliability index of cutting slope is derived; secondly, with JC method, the reliability index of slope is calculated to be about 2.5, and the probability of failure is about 0.62%; In the end, the calculation and influence analysis of soil parameters in the gamma value variation, C value variation and  $\phi$  value variation to the value of reliability index are given. From the calculated result, gamma value and train load variability have little effect on the reliability index while the effects of C value variation and the  $\phi$  value variation to the reliability index is bigger.

**Key words:** transition of railway specification; limit state equation; reliability index; effect analysis