

## 三维多粗糙峰涂层等效应力分析与表征

徐中, 王岳峰, 仲强, 王磊, 徐文骥

(大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024)

**[摘要]** 利用有限元方法建立了刚性平面与多粗糙峰涂层的弹性接触模型,研究了刚性平面分别与二维涂层粗糙峰、三维涂层粗糙峰的接触状态,揭示了涂层/基体弹性模量比、涂层厚度、粗糙峰间距、刚性平面压下深度对涂层粗糙峰表面、涂层/基体界面等效应力分布及涂层基体变形的影响规律。计算结果表明:压下深度对涂层粗糙峰表面最大等效米塞斯应力的影响最大,涂层厚度和涂层/基体弹性模量比的影响次之,粗糙峰间距的影响最小;增大涂层厚度,减小压下深度、粗糙峰间距和低弹性模量比,会使得最大等效应力值显著降低。

**[关键词]** 粗糙峰; 等效米塞斯应力; 有限元法; 涂层

**[中图分类号]** TG174.46; O242

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2010)05-0035-04

## Analysis and Characterization of Three-dimensional Multi-asperity Coatings Equivalent Stress

XU Zhong, WANG Yue-feng, ZHONG Qiang, WANG Lei, XU Wen-ji

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**[Abstract]** A finite element method was applied to establish elastic two-dimensional and three-dimensional contact model between rigid surface and asperity on the coating surface. The influences of elastic modulus ratio, coating thickness, spacing of asperity and indentation depth on the stress distribution and total deformation on asperity and coating/substrate interface were revealed. The results show that the influence of indentation depth is greatest on the peak value of equivalent stress. The influence of coating thickness, elastic modulus ratio, spacing of asperity decreases gradually. It is found that the smaller the elastic modulus ratio, indentation depth, spacing of asperity and the larger the coating thickness, the smaller the peak value of equivalent stress.

**[Key words]** asperity; equivalent Von Mises stress; finite element method; coating

分析多粗糙峰涂层表面的应力分布规律对研究涂层的摩擦、磨损、润滑及热应力等有重要意义,而刚性平面与涂层表面粗糙峰的应力分析是接触力学的重要内容<sup>[1-2]</sup>。近年来,国内外学者<sup>[3-7]</sup>研究了具有多粗糙峰的刚性表面与弹性半无限体平面的力学接触问题,而将刚性平面与多粗糙峰表面的接触模型应用到涂层表面进行研究的还较少,且仅限于二维涂层的多粗糙峰接触分析<sup>[8]</sup>。

总体来看,目前对于涂层表面的接触研究主要集中在具有粗糙峰的刚性表面与平面涂层接触的简化应力模型分析,及二维刚性平面与粗糙峰的接触应力分析,而对于刚性平面与具有多粗糙峰涂层的三维接触应力分析还缺乏研究。文中运用有限元分析软件建立刚性平面与多粗糙峰涂层的接触模型,分析涂层弹性

模量、厚度、粗糙峰间距等参数对涂层粗糙峰表面及涂层/基体界面的等效米塞斯应力分布的影响规律。

## 1 有限元接触模型

分别运用 ANSYS10.0, ANSYS Workbench 10.0 软件建立刚性平面与涂层接触的二维有限元模型和三维有限元模型。由于模型几何形状对称,取三维模型的 1/4 建立接触模型,见图 1a;二维模型——粗糙峰接触区域细化网格见图 1b。定义图 1a 中沿  $x$  轴正方向为正向,沿  $y$  轴正方向为法向,通过模型研究涂层中心单个粗糙峰表面正向及涂层/基体界面正向的等效米塞斯应力分布。

假设涂层表面粗糙峰的半径为  $R$ 、高度为  $h$ 、间距

**[收稿日期]** 2010-06-20; **[修回日期]** 2010-07-24

**[基金项目]** 国家自然科学基金重大研究计划项目(90923022);大连市科技计划项目(2008A14GX242)

**[作者简介]** 徐中(1963—),男,辽宁大连人,副教授,主要研究方向为表面工程及微细加工。

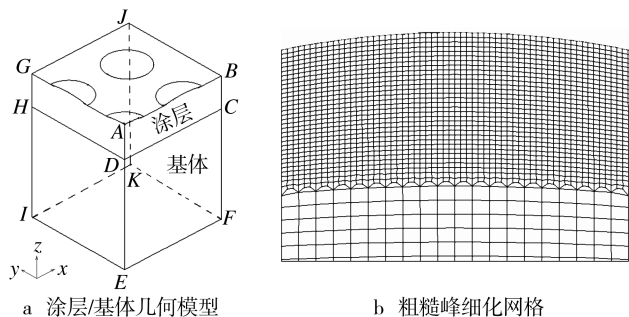


图1 基体与多粗糙峰涂层的接触模型

Fig. 1 Contact model of a substrate and a multi-asperity coating

为 $L$ ,刚性平面压下深度为 $d$ 。则可用不同的 $L/R$ 模拟不同的表面粗糙度: $L/R$ 较大值模拟较大的粗糙度, $L/R$ 较小值模拟较小的粗糙度<sup>[7]</sup>;通过刚性平面对涂层施加 $z$ 方向的负位移 $d/h$ ,则不同的 $d/h$ 值表示不同的压下深度。模型中选取 $R=100\ \mu\text{m}$ , $h=2\ \mu\text{m}$ ,图1a中的 $EF=IE=100\ \mu\text{m}$ ,涂层厚度 $H_c$ 为 $20\sim 40\ \mu\text{m}$ ,基体厚度 $H_s=100\ \mu\text{m}$ 。粗糙峰模型采用正方形排列方式,顶点A处的粗糙峰位置在模型中心保持不变,则 $L$ 为中心粗糙峰与正向和法向粗糙峰的距离。对涂层表面粗糙峰进行网格细化,二维模型的单元结点为10 935个;三维多粗糙峰模型的结点为20 279个,单粗糙峰模型的结点为16 958个。

涂层材料与基体材料的性能参数见表1。

表1 涂层与基体材料的性能参数

Tab.1 Performance parameters of coating and substrate

材料	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	切向模量(硬化 模量) $E_T/\text{MPa}$	屈服应力 $k/\text{MPa}$
$\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷涂层	310	0.3		
TiN 陶瓷涂层	590	0.21		
Q235 钢	200	0.3	0	235

定义 $E_c$ 为涂层弹性模量, $E_s$ 为基体弹性模量,则 $E_c/E_s$ 为涂层/基体的弹性模量比。该有限元分析中, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 和TiN陶瓷涂层的硬度很大,可定义为弹性材料;基体材料为普通碳素钢Q235,可假定基体为弹性理想塑性材料,即 $E_T=0$ ,其中 $E_T$ 为度量应变硬化程度的弹塑性切向模量<sup>[9]</sup>。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 二维模型与三维模型计算的应力分布

分别采用二维模型( $D=2$ )和三维模型( $D=3$ )分析刚性平面压下深度不同时, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷涂层多粗糙峰表面正向的等效米塞斯应力分布,结果见图2a(图2a及后文应力分布图上,横坐标 $x/h$ 为涂层正向表面离A点的距离 $x$ 与粗糙峰高度 $h$ 的比值,表明单粗糙

峰表面的应力分布;纵坐标 $p/k$ 为涂层表面结点的应力值与基体材料屈服极限之比,表明涂层表面屈服极限的变化情况),其中, $E_c/E_s=1.55$ , $L/R=0.6$ , $H_c=30\ \mu\text{m}$ 。从图2a可以看出:二维与三维涂层粗糙峰表面的米塞斯应力分布均符合弹性赫兹分布规律;随着 $d/h$ 的增大, $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷涂层粗糙峰表面正向米塞斯应力也逐渐增大,并且临近粗糙峰中心的地方,应力变化梯度大;在压下深度相同的条件下,三维模型有限元分析的最大等效米塞斯应力大于二维有限元分析的结果,这是因为三维模型分析不仅考虑到正向粗糙峰之间应力的相互叠加作用,同时还考虑到整个涂层平面的其余粗糙峰对中心粗糙峰的作用。

图2b对比了二维与三维模型分析的2种涂层多粗糙峰表面正向等效米塞斯应力的分布,其中, $d/h=0.3$ , $L/R=0.6$ , $H_c=30\ \mu\text{m}$ 。从图2b可以看出:三维模型的分析结果表明, $E_c/E_s$ 较大,则二维涂层粗糙峰表面各点的等效应力均较大,这一应力变化规律也同样适用于三维涂层;三维模型分析出的 $E_c/E_s=1.55$ 涂层粗糙峰表面的等效应力,远大于二维模型分析出的 $E_c/E_s=2.95$ 涂层粗糙峰表面的等效应力,这主要是由于涂层表面粗糙峰之间的相互叠加作用引起的。

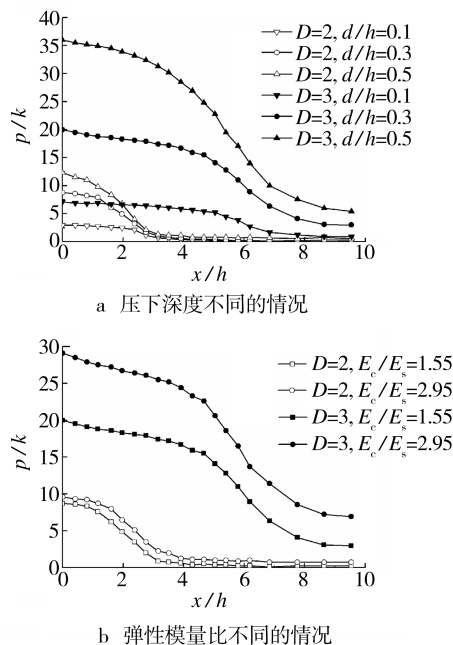
图2 多粗糙峰表面等效米塞斯应力分布( $D=2,3$ )

Fig. 2 Von mises equivalent stress of asperity surface( $D=2,3$ )

### 2.2 弹性模量的影响

图3为单粗糙峰涂层与多粗糙峰涂层在 $d/h=0.3$ , $H_c=30\ \mu\text{m}$ , $L/R=0.6$ 时,三维涂层粗糙峰表面等效米塞斯应力的对比。从图3中可以看出: $E_c/E_s$ 较大,单粗糙峰各点的等效米塞斯应力则均较大,这一规律同样适用于多粗糙峰表面应力的分布。原因在

于:弹性模量越大,涂层受力后的变形越小,其表面等效应力加强。 $E_c/E_s$  相同时,单粗糙峰表面各点的等效应力要大于多粗糙峰表面对应各点的等效应力,这主要是由于单粗糙峰没有临近粗糙峰的应力叠加作用。

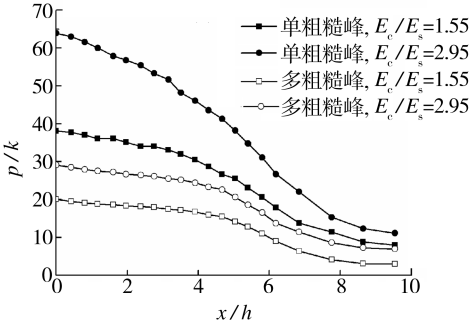


图 3 粗糙峰表面等效米塞斯应力分布(弹性模量比不同)  
Fig. 3 Von Mises equivalent stress of asperity surface  
(difference of elastic modulus ratio)

图 4 为涂层/基体界面正向等效米塞斯应力分布图。从图 4 可以看出:单粗糙峰时,涂层/基体界面的应力在中心  $x/h=0$  处(即单峰中心正下方)最大,越偏离中心,等效应力值越小;而多粗糙峰涂层/基体界面的局部最大等效应力分布在对应粗糙峰的正下方,越偏离此处,等效应力值越小,并且粗糙峰之间区域的极小应力值要大于界面边缘处( $x/h=50$ )的极小等效应力值;此外, $E_c/E_s$  增大,单粗糙峰和多粗糙峰各点的等效应力均增大,并且单粗糙峰的应力增长率大于多粗糙峰,这与图 3 的应力变化规律是一致的。

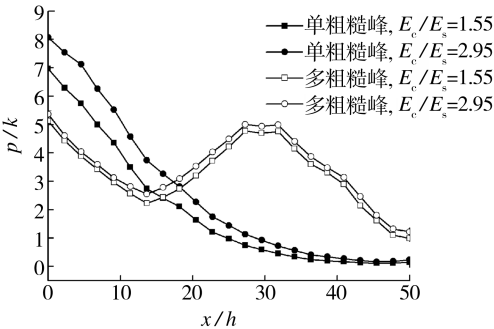


图 4 涂层/基体界面等效米塞斯应力分布(弹性模量比不同)  
Fig. 4 Von Mises equivalent stress of coating/substrate interface  
(difference of elastic modulus ratio)

2.3 涂层厚度的影响

图 5 和图 6 分别为三维涂层多粗糙峰表面正向与涂层/基体界面正向等效米塞斯应力分布图,其中  $E_c/E_s=2.95, d/h=0.3, L/R=0.6$ , 涂层厚度  $H_c$  分别为 20, 30, 40  $\mu\text{m}$ 。从图 5 可以看出:粗糙峰表面的等效米塞斯应力,在峰顶处为最大值,越偏离中心越小; $H_c$  减小,涂层表面各点的应力值增加,且最大应力值的增

长梯度增大。从图 6 可以发现:随着  $H_c$  减小,在粗糙峰正下方处,涂层/基体界面的等效应力逐渐增大,且变化梯度也增大;粗糙峰之间区域的应力值要大于边缘应力值,这主要是由于接触区的应力受临近粗糙峰的影响。

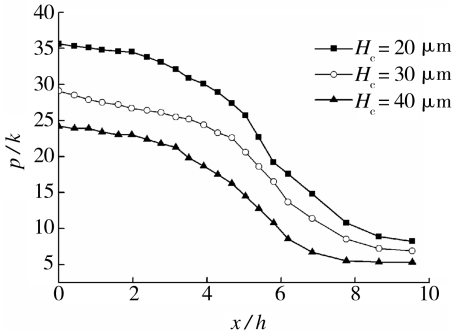


图 5 粗糙峰表面等效米塞斯应力分布(涂层厚度不同)  
Fig. 5 Von Mises equivalent stress of  
asperity surface(difference of coating thickness)

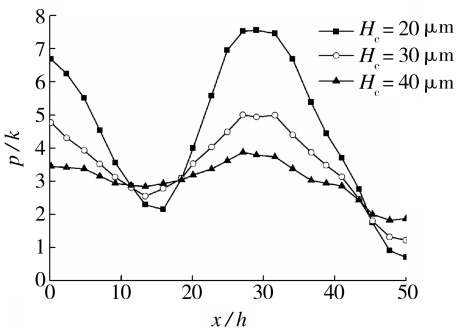


图 6 涂层/基体界面等效米塞斯应力分布(涂层厚度不同)  
Fig. 6 Von Mises equivalent stress of coating/substrate interface  
(difference of coating thickness)

2.4 涂层粗糙峰间距的影响

图 7、图 8 分别示出了涂层最大等效米塞斯应力、涂层承受载荷与粗糙峰间距的关系曲线,其中  $E_c/E_s=2.95, d/h=0.3, H_c=30 \mu\text{m}$ 。图 7 纵坐标为三维多粗糙峰涂层表面的最大米塞斯应力与三维单个粗糙峰的最大米塞斯应力之比,从图中可以看出,随着  $L/R$

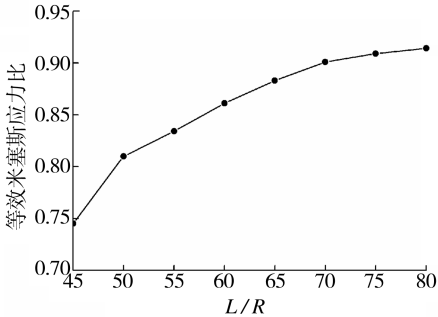


图 7 涂层最大等效米塞斯应力与粗糙峰间距的关系  
Fig. 7 Maximum equivalent Von Mises  
stress versus asperity distance

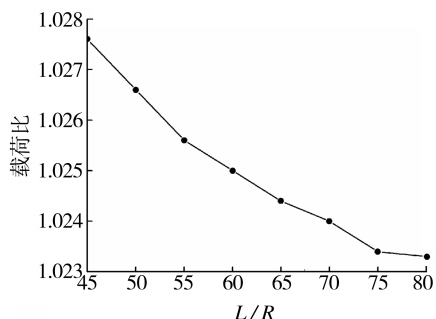


图8 涂层承受载荷与粗糙峰间距的关系

Fig. 8 Coating load versus asperity distance

增大,涂层表面的最大等效米塞斯应力逐渐变大。这是因为  $L/R$  增大,涂层粗糙峰之间的应力相互影响程度减小。图8纵坐标为三维多粗糙峰涂层承受载荷与三维单粗糙峰涂层承受载荷之比,从图中可以看出,随着  $L/R$  增大,涂层承受载荷的能力只略微降低,说明粗糙峰间距对涂层承载能力的影响较小。

## 2.5 粗糙峰表面最大等效米塞斯应力的表征

由图2、图3、图5及图7可得涂层粗糙峰表面最大等效米塞斯应力  $\sigma$  的多元线性回归方程:

$$\sigma = 434.4149 \cdot (E_c/E_s)^{0.4860} \cdot H_c^{-0.5531} \cdot (L/R)^{0.3174} \cdot (d/h)^{0.9991} \quad (2)$$

式中:  $E_c/E_s$  为涂层/基体弹性模量比;  $H_c$  为涂层厚度;  $L/R$  为粗糙峰间距与粗糙峰半径的比值;  $d/h$  为刚性平面压下深度与粗糙峰高度的比值。经F法检验,公式(2)是高度显著的。为排除随机误差的影响,文中对其进行了方差分析,认为:  $d/h$  对涂层粗糙峰表面最大等效米塞斯应力的影响最大,  $H_c$  和  $E_c/E_s$  的影响次之,  $L/R$  的影响最小。

## 2.6 涂层/基体总体变形分布

图9是  $E_c/E_s$  为1.55, 2.95时的涂层/基体总体变形分布图,其中  $L/R=0.6$ ,  $d/h=0.1$ 。从图9可以发现,  $E_c/E_s$  较大,则涂层的变形量较小。这主要是由于涂层的弹性模量较大时,其抵抗变形的能力增强。

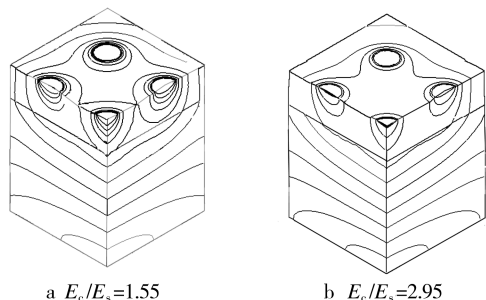
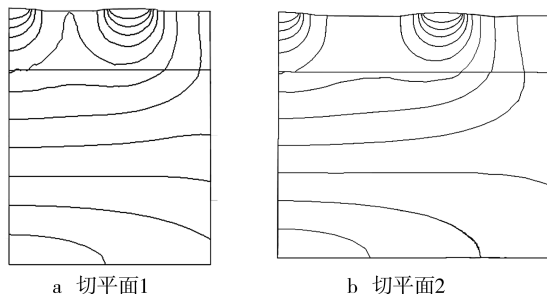


图9 涂层/基体总体变形分布

Fig. 9 The coating/substrate total deformation distribution

体总体变形分布图,“切平面1”为图1a中的ABFE平面,“切平面2”为图1a中的AJKE平面。由图10可以看出:不同切平面的粗糙峰间区域的变形不同,图10a中由于粗糙峰间距较近,变形区域的变形量较大,而图10b中恰好相反;此外,中心粗糙峰正下方的涂层变形量要大于临近粗糙峰,这主要是由于中心粗糙峰受到了四周粗糙峰的变形叠加作用。



a 切平面1

b 切平面2

图10 不同切平面的涂层/基体总体变形分布

Fig. 10 The coating/substrate total deformation distribution of different cutting planes

## 3 结论

1) 与二维涂层粗糙峰模型相比,改变压下深度及弹性模量,三维涂层粗糙峰模型由于受到涂层表面所有粗糙峰的作用,使得其分析得出的等效米塞斯应力要远大于二维模型分析结果。

2) 粗糙峰的间距对涂层最大等效米塞斯应力影响不大,对涂层承载能力影响也较小。增大粗糙峰间距可以减小粗糙峰之间的相互作用,从而增大涂层粗糙峰表面最大等效米塞斯应力,这与文献[7]所报导的多粗糙峰刚性面挤压弹塑性半无限体的影响规律一致。

3) 涂层厚度增大,同时减小刚性平面压下深度、粗糙峰间距和涂层/基体弹性模量比,会使得最大等效米塞斯应力值明显降低。

## 【参考文献】

- [1] Ioannides E, Kuijpers J C. Elastic Stresses below Asperities in Lubricated Contacts[J]. ASME Journal of Tribology, 1986, 108: 394-402.
- [2] Komvopoulos K. Finite Element Analysis of a Layered Elastic Solid in Normal Contact with a Rigid Surface[J]. ASME Journal of Tribology, 1988, 110: 477-485.
- [3] Komvopoulos K, Choi D H. Elastic Finite Element Analysis of Multi-Asperity Contacts [J]. ASME Journal of Tribology, 1992, 114: 823-831.

图10为  $E_c/E_s=1.55$  时,不同切平面的涂层/基

(下转第44页)

表 2 抗滑移系数试验测试结果

Tab.2 Testing result of anti-slipping coefficient examination

组别	螺栓预拉力/kN			滑动载荷 /kN	抗滑移 系数 $f$	$f$ 平均值
	1	2	合计			
第 1 组	1	227	234	461	636	0.69
		225	227	452	696	0.77
	2	232	233	465	624	0.67
		231	233	464	668	0.72
	3	230	232	462	666	0.72
		234	232	466	689	0.74
	4	234	230	464	632	0.68
		231	232	463	675	0.73
第 2 组	1	238	236	474	820	0.86
		240	230	470	738	0.79
	2	235	233	468	800	0.85
		234	231	465	782	0.84
	3	237	232	469	880	0.94
		227	232	457	840	0.92
	4	241	227	468	838	0.90
		230	232	462	792	0.86
第 3 组	1	232	223	455	537	0.59
		228	235	453	535	0.59
	2	230	232	462	536	0.58
		227	233	459	532	0.58
	3	229	238	467	626	0.67
		232	232	464	631	0.68
	4	235	232	467	607	0.65
		231	234	465	623	0.67

中的 O<sub>2</sub> 氧化,形成自然封闭,因此涂层耐候性较好。

在电弧喷涂涂层上采用无机富锌防锈防滑涂料进行封闭,填补金属涂层上的孔隙,可以避免金属涂层出现返锈现象,较单一的电弧喷涂涂层耐候性能更好。

### 3.4 防腐蚀寿命分析

无机富锌防锈防滑涂料涂层在太阳光、大气和雨水作用下会老化,水分通过针孔到达漆膜-钢铁交界

面,引起金属腐蚀并使涂层体积膨胀(电弧喷涂涂层无此现象),从而导致漆膜鼓泡开裂或局部整体脱壳,涂层防腐失效<sup>[5]</sup>。无机富锌底漆涂层的耐腐蚀寿命一般为 12~25 a<sup>[6]</sup>。

采用单一的电弧喷涂涂层,其防腐寿命可达 50 a 以上,钢桥在 30 a 内无需维护<sup>[3]</sup>。而在电弧喷涂涂层上采用无机富锌防锈防滑涂料进行封闭处理,可产生协同效应,复合涂层的防腐寿命是单一电弧喷涂涂层的 1.5~2.3 倍<sup>[6]</sup>。

## 4 结论

电弧喷涂涂层+无机富锌防锈防滑涂层的复合涂层,其防腐蚀寿命较单一的无机富锌防锈防滑涂层和单一的电弧喷涂涂层要长,从而可延长桥梁的使用寿命,且该复合涂层的抗滑移性能、耐候性及结合强度均能达到该类桥梁摩擦面的设计要求,因此可广泛应用在钢桁架式桥梁结构杆件摩擦面的防腐中。

[参 考 文 献]

[1] TB/T 2137—90,铁路钢桥栓接面抗滑移系数试验方法[S].

[2] TB/T 1527—2004,铁路钢桥保护涂装[S].

[3] 任必年.公路桥梁腐蚀与防护[M].北京:人民交通出版社,2002:69,80.

[4] 刘新.桥梁涂装工程[M].北京:化学工业出版社,2009:223.

[5] 王延东,杨笑宇,洪伟,等.荆岳大桥钢箱梁油漆与电弧喷铝涂装方案对比[J].表面技术,2009,38(1):81—83.

[6] 何丽芳,郭忠诚.水性无机富锌涂料的应用研究[J].表面技术,2006,35(2):55—59.

(上接第 38 页)

[4] Kogut L, Etsion I. Elastic-Plastic Contact Analysis of a Sphere and a Rigid Flat[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002, 69: 657—662.

[5] Lin L P, Lin J F. A New Method for Elastic-Plastic Contact Analysis of a Deformable Sphere and a Rigid Flat[J]. Journal of Tribology, 2006, 128: 221—229.

[6] Reedy J. Thin-coating Contact Mechanics with Adhesion [J]. Journal of Materials Research, 2006, 21(10): 2660—

2668.

[7] 杨楠,陈大融,孔宪梅.多粗糙峰弹塑性接触的有限元分析[J].摩擦学学报,2000,20(3):202—206.

[8] 佟瑞庭,刘更,刘天祥.二维多粗糙峰涂层表面的弹塑性接触力学分析[J].机械科学与技术,2007,26(1):21—24.

[9] Liu G, Zhu J, Yu L, et al. Elasto-Plastic Contact of Rough Surfaces[J]. STLE Tribology Transactions, 2001, 44: 437—443.