

风沙冲蚀作用下钢结构涂层的应力 计算与分布特征

蔺鹏臻^a, 魏亚鹏^b, 陈星^b

(兰州交通大学 a.甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室 b.土木工程学院, 兰州 730070)

摘要: **目的** 合理计算风沙冲蚀作用下钢结构涂层的应力, 并客观反映其分布特征。**方法** 基于接触力学和结构动力学理论, 建立风沙侵蚀钢结构涂层时的冲蚀荷载表达式, 利用位势理论推导出在冲蚀荷载作用下钢结构涂层的应力计算公式, 并结合西北地区风沙流特征对钢结构涂层不同位置处的应力分布规律进行分析。**结果** 涂层的面漆和中间漆厚度宜分别取 165~210 μm 和 145~165 μm 。面漆应具有良好的抗拉、抗压和抗剪性能, 以防止发生表面开裂和次表层塑性屈服现象; 中间漆的抗剪和抗压强度应分别不小于 250 kPa 和 800 kPa。钢结构建筑物的最小迎风面积应尽可能垂直于风向, 以降低风沙对钢结构建筑物的冲蚀破坏。**结论** 在风沙冲蚀作用下钢结构涂层宜设置底漆、中间漆和面漆 3 层, 且底漆、中间漆和面漆的厚度应依次增大; 面漆抗压和抗剪强度均要优于中间漆和底漆, 以防止表面开裂和次表层塑性屈服。

关键词: 应力分析; 应力分布; 冲蚀荷载; 涂层; 风沙; 钢结构

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0214-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.018

Stress Calculation and Distribution Characteristics of Steel Structure Coatings under the Action of Sand Erosion

LIN Peng-zhen^a, WEI Ya-peng^b, CHEN Xing^b

(a. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province,

b. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT: In order to reasonably calculate the stress of the steel structure coating under the action of sand erosion, and objectively reflect its distribution characteristics. Based on the theories of contact mechanics and structural dynamics, the expression of the erosion load when the steel structure coating is eroded by wind sand is established, and the stress calculation formula of the steel structure coating under the erosion load is derived by using the potential theory. At the same time, combined with the characteristics of wind-sand flow in the northwest region, the stress distribution law at different positions of the steel structure coating was studied. The research results show that the thickness of the topcoat and intermediate paint of the coating should be within the range of 165-210 μm and 145-165 μm , respectively. The topcoat should have good tensile, compressive and

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-09-12

Received: 2021-04-20; **Revised:** 2021-09-12

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (11790281); 甘肃省交通运输厅科技项目 (甘交科技函 2020-08)

Fund: Major Project of National Natural Science Foundation of China (11790281); Science and Technology Project of Gansu Provincial Department of Transportation (Ganjiiao Science and Technology Letter 2020-08)

作者简介: 蔺鹏臻 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为钢结构理论及应用。

Biography: LIN Peng-zhen (1977-), Male, Doctor, Professor, Research focus: steel structure theory and application research.

引文格式: 蔺鹏臻, 魏亚鹏, 陈星. 风沙冲蚀作用下钢结构涂层的应力计算与分布特征[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 214-220.

LIN Peng-zhen, WEI Ya-peng, CHEN Xing. Stress Calculation and Distribution Characteristics of Steel Structure Coatings under the Action of Sand Erosion[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 214-220.

shear resistance to prevent surface cracking and plastic yielding of the subsurface layer; the shear and compressive strength of the intermediate paint should be no less than 250 kPa and 800 kPa, respectively. The minimum windward area of the steel structure building should be as perpendicular to the wind direction as possible to reduce the erosion damage to the steel structure building. Under the action of wind and sand erosion, the steel structure coating should be set to three layers of primer, intermediate paint and topcoat, and the thickness of the primer, intermediate paint and topcoat should be increased in sequence; the compressive and shear strength of the topcoat both are better than intermediate paint and primer to prevent surface cracking and subsurface plastic yielding.

KEY WORDS: stress analysis; stress distribution; erosion load; coating; sandstorm; steel structure

我国西北、华北地区常年遭受严重的风沙灾害, 并且随着环境的恶化呈现逐渐增加的态势^[1]。钢结构涂层在风沙的冲蚀磨损等物理腐蚀作用下产生的应力问题逐渐成为涂层耐久性研究的热点内容之一。目前国内外学者大多数采用试验和数值模拟的方法来研究涂层应力问题。文献[2-4]利用光弹试验并结合数字图像采集技术分析了涂层/基体的应力分布, 研究发现最大剪应力出现在环氧树脂涂层的次表层, 且最大剪应力随着荷载的增大而逐渐向聚碳酸酯板基体扩展。张永康等^[5-6]采用激光划痕技术和弯曲应力理论研究了结合界面强度和应力产生的机理, 并利用 X 射线衍射技术测试了涂层与基体的应力变化规律, 研究发现涂层内部的正应力与涂层、基体的厚度和弹性模量均无关, 界面剪应力与涂层厚度正相关, 并且由三者共同决定。Panich 等^[7]采用基于弹塑性力学原理的有限元模型分析了软涂层/硬基体中压头半径和屈服强度比对压痕深度的影响。庄蔚敏等^[8]利用 ABAQUS 建立了基于损伤力学的有限元模型, 研究了在荷载作用下涂层损伤特征、反力与涂层厚度的关系, 并且首次采用压头反力来定量表征涂层的承载力。Ahrens 等^[9]通过试验观测与有限元分析相结合的方法, 研究了热循环加载过程中等离子喷涂热障涂层与基体的界面应力分布特征, 并讨论了界面应力与界面粗糙度和氧化皮厚度的关系。在理论研究方面, 刘铁军等^[10]在 Hertz 理论^[11]的基础上, 求解了功能梯度涂层的无摩擦轴对称接触问题, 并计算了接触半径、法向最大压缩变形量与接触应力的关系。杨万友等^[12-14]探究了在接触荷载作用下分布杂质对非均质材料应力集中的影响, 研究发现基体表面应力集中与杂质单元 x 方向坐标值正相关, 与 y 方向坐标值负相关。Oliveira 等^[15]研究了在圆柱形压头作用下弹性薄涂层的脱落断裂机理。文献[16]和文献[17-18]分别利用弹性理论和镜像点法推导出了涂层界面应力的解析解。Jaccodine 等^[19]推导出了计算涂层残余应力的 Stoney 公式, 并用此公式计算了电沉积镍薄膜的残余应力。基于 Stoney 公式的适用性分析, 刘兆月等^[20]给出了硅钢绝缘涂层张应力计算公式, 研究发现张应力随胶体二氧化硅绝缘涂层厚度的增大而增大, 当胶体二氧化硅绝缘涂层厚度为 1~2 μm 时, 基于 Stoney 公式的

张应力计算值为 4~11 MPa, 并且胶体二氧化硅绝缘涂层张应力的增大将会促使取向硅钢基体的铁损降低。

综上所述, 国内外学者对涂层的应力问题做了较多工作, 但对于在风沙粒子的弹性撞击过程中涂层应力的理论和数值研究还相对较少。为此, 本文首先利用接触力学和结构动力学原理, 建立了风沙侵蚀涂层的冲蚀荷载表达式, 然后基于位势理论推导出了在冲蚀荷载作用下涂层的应力计算公式, 并结合西北地区的风沙特征探究了钢结构涂层表面、内部以及沿厚度方向的应力分布规律。所得到的结论可以概括不同风沙冲蚀角度下钢结构涂层的面漆和中间漆的厚度取值范围和力学性能, 对涂层在物理腐蚀下的耐久性研究具有重要意义。

1 基于接触理论的冲蚀荷载分析

为了对钢结构涂层的受力及变形进行分析, 依据接触力学理论将风沙冲蚀钢结构涂层问题简化成准静态碰撞模型, 如图 1 所示。图中涂层厚度为 h , 沙粒冲蚀角度为 θ 。根据文献[21], 将沙粒形状近似成球体, 粒径为 R 。由于该碰撞一般为斜碰撞, 则任意时刻 t 沙粒的冲蚀荷载 P 可以分解为法向冲蚀力 P_z 和切向冲蚀力 P_x , 冲蚀速度为 V , 与涂层的接触半径为 a , 涂层的法向压缩变形量为 δ , 最大接触半径为 a_{\max} , 最大法向压缩变形量为 δ_{\max} 。

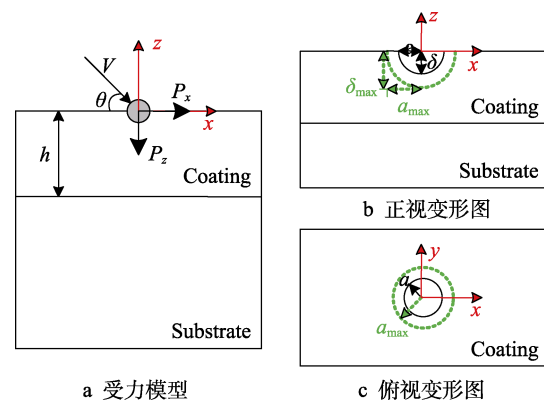


图 1 钢结构涂层受力及变形图
Fig.1 Force and deformation diagram of steel structure coating: a) force model; b) front view deformation map; c) top view deformation map

1.1 法向冲蚀荷载分析

以沙粒为研究对象,任意时刻 t 沙粒的法向动力微分方程为:

$$P_z' = m \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (1)$$

式中: m 为沙粒质量; P_z' 为沙粒受到的法向反作用力 ($P_z' = -P_z$)。

以涂层为研究对象,依据接触力学理论,法向冲蚀力 P_z 与法向压缩变形量 δ 之间满足的关系式^[11]为:

$$P_z = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中: R 为沙粒半径 (在此模型中,沙粒半径与接理论中的相对曲率半径相等); E^* 为等效弹性模量, $1/E^* = (1-\nu^2)/E + (1-\nu_1^2)/E_1$, 其中 E 、 ν 分别为沙粒的弹性模量和泊松比, E_1 、 ν_1 分别为涂层的弹性模型和泊松比。

联立式 (1) 和式 (2), 可得:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = -\frac{4}{3} \frac{E^* R^{\frac{1}{2}}}{m} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

对式 (3) 进行积分,并代入初始条件:沙粒与涂层开始接触时刻 ($t=0$) 涂层的法向变形量 $\delta=0$,

$\frac{d\delta}{dz}|_{t=0} = V_0 \sin \theta$, 其中 V_0 为沙粒与涂层开始接触时刻 ($t=0$) 沙粒的速度, 可得:

$$\frac{1}{2} \left[(V_0 \sin \theta)^2 - \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{8}{15} \frac{E^* R^{\frac{1}{2}}}{m} \delta^{\frac{5}{2}} \quad (4)$$

当 $\frac{d\delta}{dt} = 0$ 时,涂层的法向压缩变形量达到最大值 δ_{\max} , 见式 (5)。将式 (5) 代入式 (2), 可得最大法向冲蚀力 $P_{z,\max}$ 的表达式见式 (6)。

$$\delta_{\max} = \left(\frac{15mV_0^2 \sin^2 \theta}{16E^* R^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (5)$$

$$P_{z,\max} = \left(\frac{125}{36} m^3 E^{*2} R V_0^6 \sin \theta \right)^{\frac{1}{5}} \sin \theta \quad (6)$$

1.2 切向冲蚀荷载分析

当切向冲蚀力 P_x 单独作用时,在半径为 a 的圆形接触域上引入沿 x 轴的切应力函数见式 (7)^[22]。

$$\tau(x) = \frac{P_x}{2\pi a^2} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

法向冲蚀力 P_z 与接触区域半径 a 可按接触力学公式^[11]表达为:

$$a = \left(\frac{3P_z R}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

将式 (8) 两边微分,并同时结合静摩擦原理

$dP_x = dP_z \cot \theta$, 可得切向冲蚀力增量 dP_x 为:

$$dP_x = \frac{4E^* a^2 \cot \theta}{R} da \quad (9)$$

将式 (7) 两边微分,并同时结合式 (9), 可得出在接触区域内任一点的切应力增量 $d\tau(x)$ 的表达式为:

$$d\tau(x) = \frac{2E^* \cot \theta}{\pi R} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} da \quad (10)$$

由式 (10) 可知,当接触区域半径 a 从任意一点 x ($0 \leq x \leq a_{\max}$) 变到 a_{\max} 时,切应力的分布形式变为:

$$\tau(x) = \int_x^{a_{\max}} d\tau(x) = \frac{2E^* \cot \theta}{\pi R} (a_{\max}^2 - x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

因此,最大切向冲蚀力 $P_{x,\max}$ 可按式 (12) 计算。

$$P_{x,\max} = \int_0^{a_{\max}} 2\pi x \tau(x) dx = \frac{4E^* \cot \theta}{3R} a_{\max}^3 \quad (12)$$

由式 (8) 可知,最大接触区域半径 a_{\max} 为:

$$a_{\max} = \left(\frac{3P_{z,\max} R}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

将式 (13) 和式 (6) 代入式 (12), 则最大切向冲蚀力 $P_{x,\max}$ 可进一步表达为:

$$P_{x,\max} = \left(\frac{125}{36} m^3 E^{*2} R V_0^6 \sin \theta \right)^{\frac{1}{5}} \cos \theta \quad (14)$$

由式 (6) 和式 (14) 可知,最大法向冲蚀力 $P_{z,\max}$ 和最大切向冲蚀力 $P_{x,\max}$ 满足关系式 $P_{x,\max} = P_{z,\max} \cot \theta$, 这也说明了公式的正确性。

2 基于位势理论的应力分析

取坐标原点 O 为最大冲蚀力 $P_{z,\max}$ 和 $P_{x,\max}$ 的加载点, $A(x,y,z)$ 为涂层内任意一点,则 OA 之间的距离 ρ 为:

$$\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

定义满足 Laplace 方程的以下势函数:

$$H_1 = P_{z,\max} [z \ln(\rho + z) - \rho], H = \frac{\partial H_1}{\partial z} \quad (16)$$

$$F_1 = P_{x,\max} [z \ln(\rho + z) - \rho], F = \frac{\partial F_1}{\partial z} \quad (17)$$

令调和函数 ψ_1 和 ψ 分别为:

$$\psi_1 = \frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial H_1}{\partial z}, \psi = \frac{\partial \psi_1}{\partial z} = \frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\partial H}{\partial z} \quad (18)$$

利用位势理论推导出弹性半空间体在表面力作用下的位移 u_x 、 u_y 和 u_z 的表达式^[11]为:

$$\begin{cases} u_x = \frac{1}{4\pi G_1} \left(2 \frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\partial H}{\partial x} + 2\nu_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial x} - z \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \\ u_y = \frac{1}{4\pi G_1} \left(-\frac{\partial H}{\partial y} + 2\nu_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial y} - z \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \\ u_z = \frac{1}{4\pi G_1} \left[\frac{\partial H}{\partial z} + (1-2\nu_1) \psi - z \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \end{cases} \quad (19)$$

式中: G_1 、 ν_1 分别为涂层的剪切弹性模量和泊松比。

2.1 法向冲蚀荷载作用下的应力分析

在最大法向冲蚀力 $P_{z,\max}$ 单独作用下, 有:

$$\begin{cases} F_1 = F = 0 \\ \psi_1 = \frac{\partial H_1}{\partial z}, \quad \psi = \frac{\partial H}{\partial z} \end{cases} \quad (20)$$

将式 (15)、式 (16) 和式 (20) 代入式 (19) 中, 得出在最大法向冲蚀力 $P_{z,\max}$ 单独作用下涂层内任意一点的弹性位移 u_{x1} 、 u_{y1} 和 u_{z1} 的表达式为:

$$\begin{cases} u_{x1} = \frac{P_{z,\max}}{4\pi G_1} \left[\frac{xz}{\rho^3} - (1-2\nu_1) \frac{x}{\rho(\rho+z)} \right] \\ u_{y1} = \frac{P_{z,\max}}{4\pi G_1} \left[\frac{yz}{\rho^3} - (1-2\nu_1) \frac{y}{\rho(\rho+z)} \right] \\ u_{z1} = \frac{P_{z,\max}}{4\pi G_1} \left[\frac{z^2}{\rho^3} + \frac{2(1-\nu_1)}{\rho} \right] \end{cases} \quad (21)$$

首先由式 (21) 求出涂层内任意一点的应变, 然后再由 Hooke 定理推导出在最大法向冲蚀力 $P_{z,\max}$ 单独作用下涂层内任意一点应力 σ_{x1} 、 σ_{z1} 和 $\tau_{zx,1}$ 的表达式, 其结果为:

$$\begin{cases} \sigma_{x1} = \frac{P_{z,\max}}{2\pi} \left\{ \frac{1-2\nu_1}{r^2} \left[\left(1 - \frac{z}{\rho} \right) \frac{x^2 - y^2}{r^2} + \frac{zy^2}{\rho^3} \right] - \frac{3zx^2}{\rho^5} \right\} \\ \sigma_{z1} = -\frac{3P_{z,\max}}{2\pi} \frac{z^3}{\rho^5} \\ \tau_{zx,1} = -\frac{3P_{z,\max}}{2\pi} \frac{xz^2}{\rho^5} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $r^2 = x^2 + y^2$ 。

2.2 切向冲蚀荷载作用下的应力分析

在最大切向冲蚀力 $P_{x,\max}$ 单独作用下, 有:

$$\begin{cases} H_1 = H = 0 \\ \psi_1 = \frac{\partial F_1}{\partial x}, \quad \psi = \frac{\partial F}{\partial x} \end{cases} \quad (23)$$

将式 (15)、式 (17) 和式 (23) 代入式 (19) 中, 得出在最大切向冲蚀力 $P_{x,\max}$ 作用下涂层内任意一点的弹性位移 u_{x2} 、 u_{y2} 和 u_{z2} 的表达式为:

$$\begin{cases} u_{x2} = \frac{P_{x,\max}}{4\pi G_1} \left\{ \frac{1}{\rho} + \frac{x^2}{\rho^3} + (1-2\nu_1) \left[\frac{1}{\rho+z} - \frac{x^2}{\rho(\rho+z)^2} \right] \right\} \\ u_{y2} = \frac{P_{x,\max}}{4\pi G_1} \left[\frac{xy}{\rho^3} - (1-2\nu_1) \frac{xy}{\rho(\rho+z)^2} \right] \\ u_{z2} = \frac{P_{x,\max}}{4\pi G_1} \left[\frac{xz}{\rho^3} + (1-2\nu_1) \frac{x}{\rho(\rho+z)} \right] \end{cases} \quad (24)$$

对式 (24) 微分求出应变分量, 进一步可求出在最大切向冲蚀力 $P_{x,\max}$ 单独作用下涂层内任意一点应

力 σ_{x2} 、 σ_{z2} 和 $\tau_{zx,2}$ 的表达式, 其结果为:

$$\begin{cases} \sigma_{x2} = \frac{P_{x,\max}}{2\pi} \left\{ -\frac{3x^3}{\rho^5} + (1-2\nu_1) \left[\frac{x}{\rho^3} - \frac{3x}{\rho(\rho+z)^2} + \frac{x^3}{\rho^3(\rho+z)^2} + \frac{2x^3}{\rho^2(\rho+z)^3} \right] \right\} \\ \sigma_{z2} = -\frac{P_{x,\max}}{2\pi} \frac{3xz^2}{\rho^5} \\ \tau_{zx,2} = -\frac{P_{x,\max}}{2\pi} \frac{3x^2z}{\rho^5} \end{cases} \quad (25)$$

由式 (22) 和式 (25) 可知, 通过叠加原理可以求出沙粒以任意角度 θ 冲蚀钢结构涂层时涂层内部任意一点 (除坐标原点外) 的应力。

3 理论验证与应力分布特征

以某波形钢腹板混凝土组合桥梁^[23]为例, 波形钢腹板桥梁涂装层采取单一涂装体系, 且其厚度 h 取 1.0 mm, 弹性模量 E_1 取 770 MPa, 泊松比 ν_1 取 0.4。根据文献[24], 西北戈壁地区沙粒的弹性模量 E 取 40 GPa, 泊松比 ν 取 0.25, 粒径 R 取 0.1 mm, 密度 ρ 取 2.650 g/cm³, 质量为 m , 沙粒的初始冲蚀速度 V_0 取 20 m/s, 冲蚀角度 θ 取 30°、45°、60°、75°和 90°。

3.1 理论验证

为验证冲蚀荷载和涂层应力表达式的正确性和计算精度, 利用 Ansys 有限元分析软件, 建立钢结构涂层与基体的三维实体模型, 如图 2 所示。涂层与钢材基体均选用 SOLID185 单元, 界面部位采用 INTER205 单元。边界条件为底面固结, 荷载作用形式为结点荷载, 采用六面体单元进行网格划分, 网格尺寸取为 $h/10$ 。

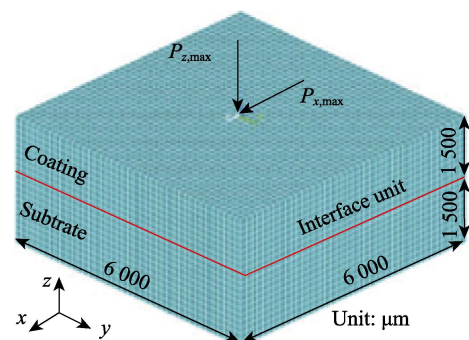


图 2 涂层与基体三维实体模型
Fig.2 Three-dimensional solid model of coating and substrate

以冲蚀角度 $\theta=30^\circ$ 为例, 计算出在 $y=0 \mu\text{m}$ 平面和 $z=h/2$ 平面交线上的应力 σ_z , 并与仿真分析结果进行对比, 如表 1 和图 3 所示。

表 1 涂层应力理论解与数值解对比
Tab.1 Comparison of theoretical and numerical solutions of coating stress

Comparison items	Theoretical solution/kPa	Numerical solution/kPa	Relative error/%
$\sigma_{z,\max}$	5.66	5.79	2.30
$\sigma_{z,\min}$	-61.67	-61.61	0.10

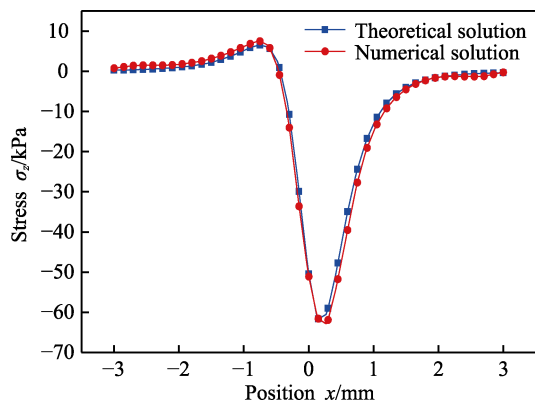


图 3 $y=0$ 和 $z=-h/2$ 平面交线上 σ_z 的理论解与数值解对比

Fig.3 Comparison of theoretical and numerical solutions of stress σ_z at $y=0$, $z=-h/2$

由表 1 可知,利用本文公式得到的指定位置处的应力 $\sigma_{z,\max}$ 和 $\sigma_{z,\min}$ 与数值解的相对误差分别为 2.30% 和 0.10%。同时结合图 3 可知,其他位置处的理论解与数值解均吻合良好,验证了本文推导的冲蚀荷载和

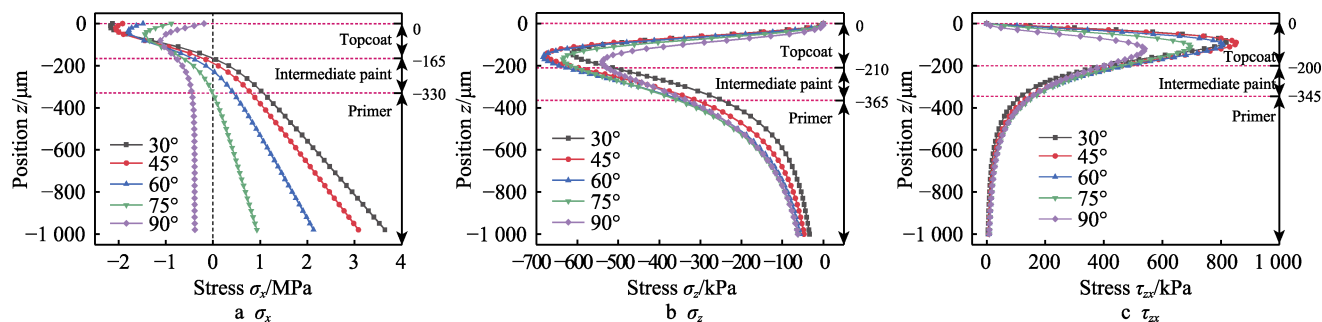


图 4 涂层厚度方向的应力变化特征

Fig.4 Characteristics of stress changes in the thickness direction of the coating

3.3 涂层表面应力分布特征

为了探究沙粒以不同角度 θ 冲蚀钢结构涂层时,在涂层表面 (x 轴上) 的正应力 σ_x 的分布特征。利用式 (22) 和式 (25) 并同时结合叠加原理,求出涂层在指定位置的正应力 σ_x , 如图 5 所示。

由图 5 可知,当冲蚀角度 θ 为 $30^\circ \sim 75^\circ$ 时,在涂层表面 x 轴上的正应力 σ_x 在冲蚀点前侧均为压应力,在后侧均为拉应力,且都随着离冲蚀点距离 x 的增大而逐渐减小;当冲蚀角度 θ 为 90° 时, σ_x 在冲蚀点前后两侧均为压应力且关于 $y=0$ 平面对称。因此,面漆应既具有一定的抗压强度又具有一定的抗拉强度,以防止涂层表面裂纹的形成。

涂层应力表达式的正确性和计算精度。

3.2 涂层厚度方向应力分布特征

为了探究沙粒以不同角度 θ 冲蚀钢结构涂层时,在涂层厚度方向 ($x=150 \mu\text{m}$ 平面和 $y=0 \mu\text{m}$ 平面交线上) 的应力分布特征。将式 (6) 和式 (14) 代入式 (22) 和式 (25) 中,分别求出法向和切向冲蚀荷载单独作用时的应力值,然后利用线性叠加原理可以得到指定位置处的涂层应力最终值,如图 4 所示。

由图 4 可知,沙粒无论以何种角度冲蚀钢结构涂层,在沿涂层厚度方向上 σ_x 先增大后减小然后再反向增大,而 σ_z 和 τ_{zx} 均呈现先增大后逐渐减小的变化规律,且均在 $-100 \mu\text{m}$ 左右达到最大值,因此预计涂层的塑性流动发生在表面以下此位置处。由图 4a 可知,在 $0 \sim -165 \mu\text{m}$ 内 σ_x 均为压应力,在 $-165 \sim -330 \mu\text{m}$ 内 σ_x 由压应力逐渐变为拉应力,在 $-330 \sim -1000 \mu\text{m}$ 内 σ_x 均为拉应力 (除 90° 外)。由图 4b 可知,当冲蚀角度 θ 为 90° 时,在 $0 \sim -210 \mu\text{m}$ 内的 σ_z 最小,而在 $-365 \sim -1000 \mu\text{m}$ 内 σ_z 最大。由图 4c 可知,当冲蚀角度 θ 为 90° 时,在 $0 \sim -200 \mu\text{m}$ 内的 τ_{zx} 最小,而在 $-345 \sim -1000 \mu\text{m}$ 内 τ_{zx} 最大。因此,根据涂层沿厚度方向的应力分布特征,建议钢结构涂层宜设置为 3 层,其中面漆厚度宜取 $165 \sim 210 \mu\text{m}$,中间漆厚度宜取 $145 \sim 165 \mu\text{m}$,底漆厚度可依钢结构表面的具体情况而定。

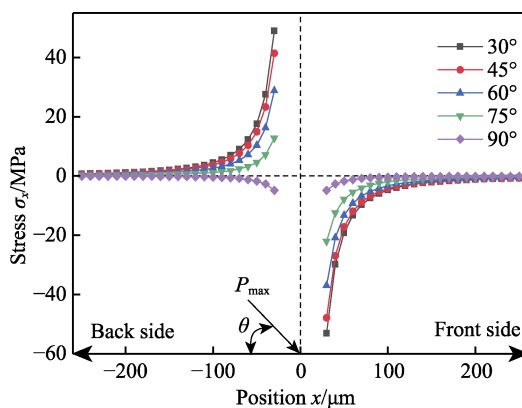


图 5 涂层表面正应力 σ_x 的变化特征

Fig.5 Variation characteristics of the normal stress σ_x on the the coating surface

3.4 涂层内部应力分布特征

图 6 给出了沙粒以不同角度 θ 冲蚀钢结构涂层时, 在涂层内部 ($z = -300 \mu\text{m}$ 平面和 $y = 0 \mu\text{m}$ 平面交线上) 的应力分布特征。

由图 6a 可知, 当冲蚀角度为 $30^\circ \sim 75^\circ$ 时, 涂层内部 x 轴方向上的正应力 σ_x 在冲蚀点前侧均为拉应力, 在后侧均为压应力, 且都随着离冲蚀点距离 x 的增大而逐渐减小; 当冲蚀角度为 90° 时, σ_x 在冲蚀点前后两侧均为压应力, 且关于 $y = 0$ 平面对称。因此, 中间漆在涂层平面内应既具有一定的抗拉强度又具有一定的抗压强度。由图 6b 可知, 无论沙粒以何种角度

θ 冲蚀钢结构涂层, 在涂层内部离冲蚀点越近则 σ_z 越大, 且在 $0 \sim 125 \mu\text{m}$ 内分别达到极大值, 但均不超过 800 kPa 。当冲蚀角度为 30° 和 45° 时, 分别在冲蚀点后侧 $-200 \mu\text{m}$ 和 $-300 \mu\text{m}$ 处出现拉应力, 但拉应力值相对较小。因此, 中间漆在厚度方向应具有一定的抗压强度, 且应不小于 800 kPa 。由图 6c 可知, 无论沙粒以何种角度 θ 冲蚀钢结构涂层, 涂层内部的剪应力 τ_{zx} 均随离冲蚀点距离 x 的增大而先增大后减小, 但其极大值均不超过 250 kPa 。因此, 中间漆应具有良好的抗剪强度且应不小于 250 kPa , 以防止涂层内部发生塑性屈服。

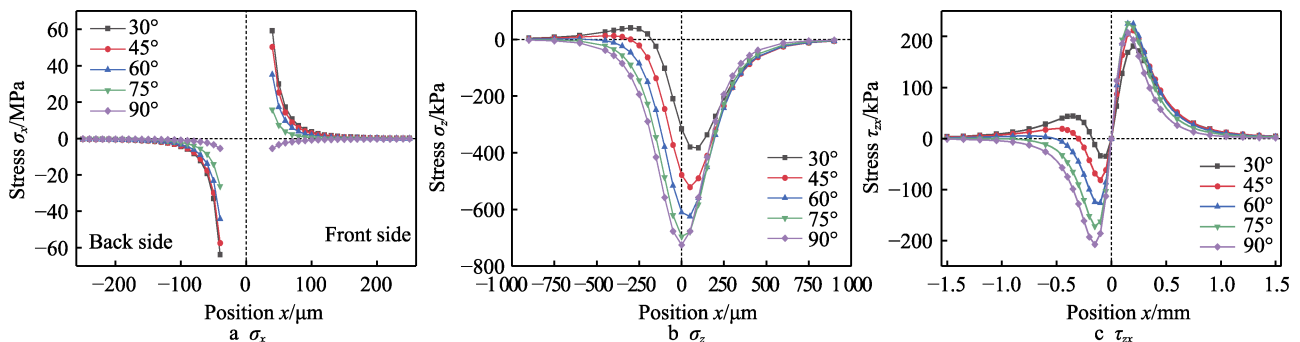


图 6 涂层内部应力变化特征

Fig.6 The characteristics of stress changes inside the coating

图 7 给出了沙粒以不同角度 θ 冲蚀钢结构涂层时, 涂层内部两点 ($x = \pm 100 \mu\text{m}$ 平面、 $z = -300 \mu\text{m}$ 平面和 $y = 0 \mu\text{m}$ 平面的交点) 在平面应力状态下的最大剪应力 τ_{\max} 。由图 7 可知, 涂层内部两点 ($x = \pm 100 \mu\text{m}$ 平面、 $z = -300 \mu\text{m}$ 平面和 $y = 0 \mu\text{m}$ 平面的交点) 在平面应力状态下的最大剪应力 τ_{\max} 均随冲蚀角度 θ 的增大而逐渐减小。在 $x = 100 \mu\text{m}$ 平面、 $z = -300 \mu\text{m}$ 平面和 $y = 0 \mu\text{m}$ 平面的交点处, 冲蚀角度为 30° 、 45° 、 60° 和 75° 时的最大剪应力 τ_{\max} 分别为 90° 时的 395.9%、337.4%、237.6% 和 112.9%。在 $x = -100 \mu\text{m}$ 平面、 $z = -300 \mu\text{m}$ 平面和 $y = 0 \mu\text{m}$ 平面的交点处, 冲蚀角度为

30° 、 45° 、 60° 和 75° 时的最大剪应力 τ_{\max} 分别为 90° 时的 436.5%、407.8%、333.4% 和 224.9%。因此, 钢结构建筑物的最小迎风面积应尽可能地垂直于风向, 以减少风沙对钢结构涂层的冲蚀破坏。

4 结论

1) 本文基于接触力学和结构动力学理论, 建立了风沙侵蚀钢结构涂层时的冲蚀荷载表达式, 利用位势理论推导出了在冲蚀荷载作用下钢结构涂层的应力计算公式, 并与 Ansys 有限元模型计算结果进行对比, 验证了本文的研究方法和所推导公式的正确性。

2) 涂层的面漆厚度宜取 $165 \sim 210 \mu\text{m}$, 中间漆厚度宜取 $145 \sim 165 \mu\text{m}$, 底漆厚度可依钢结构表面的具体情况而定。

3) 面漆应具有良好的抗拉、抗压和抗剪性能, 以防止发生表面开裂和次表层塑性屈服现象; 中间漆在厚度方向的抗压强度应不小于 800 kPa , 抗剪强度应不小于 250 kPa 。

4) 钢结构建筑物的最小迎风面积应尽可能的垂直于风向, 以降低风沙对钢结构建筑物的冲蚀破坏。

参考文献:

[1] 王涛, 陈广庭, 钱正安, 等. 中国北方沙尘暴现状及对

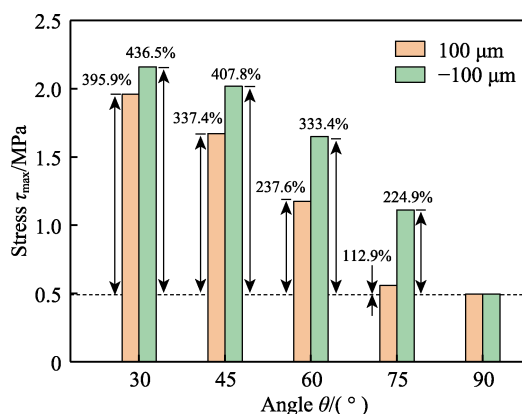


图 7 涂层内部两点处的最大剪应力 τ_{\max}
Fig.7 The maximum shear stress τ_{\max} at two point in the coating

- 策[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 343-348.
- WANG Tao, CHEN Guang-ting, QIAN Zhen-gan, et al. Situation of Sand-Dust Storms and Countermeasures in North China[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4): 343-348.
- [2] RAMESH M, KAILAS S V, SIMHA K R Y. Micro and Macro Contact Mechanics for Interacting Asperities[J]. Sadhana, 2008, 33(3): 329-338.
- [3] 方燕飞, 何军, 黄平. 基于光弹实验与有限元法的涂层/基体接触应力分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 103-109.
- FANG Yan-fei, HE Jun, HUANG Ping. Contact Stresses Analysis of Coated Substrate Based on Photoelasticity Experiment and Finite Element Method[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 103-109.
- [4] SURENDRA K V N, SIMHA K R Y. Characterizing Frictional Contact Loading via Isochromatics[J]. Experimental Mechanics, 2014, 54(6): 1011-1030.
- [5] 张永康, 孔德军, 冯爱新, 等. 涂层界面结合强度检测研究(I): 涂层结合界面应力的理论分析[J]. 物理学报, 2006, 55(6): 2897-2900.
- ZHANG Yong-kang, KONG De-jun, FENG Ai-xin, et al. Study on the Determination of Interfacial Binding Strength of Coatings (I): Theoretical Analysis of Stress in Thin Film Binding Interface[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2897-2900.
- [6] 张永康, 孔德军, 冯爱新, 等. 涂层界面结合强度检测研究(II): 涂层结合界面应力检测系统[J]. 物理学报, 2006, 55(11): 6008-6012.
- ZHANG Yong-kang, KONG De-jun, FENG Ai-xin, et al. Study on the Detection of Interfacial Bonding Strength of Coatings(II): Detecting System of Bonding Strength[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(11): 6008-6012.
- [7] PANICH N, SUN Y. Effect of Penetration Depth on Indentation Response of Soft Coatings on Hard Substrates: A Finite Element Analysis[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 182(2-3): 342-350.
- [8] 庄蔚敏, 陈延红. 基于连续损伤力学的表面涂层损伤模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(4): 857-862.
- ZHUANG Wei-min, CHEN Yan-hong. Simulation of Surface Coating Failure Based on Continuum Damage Mechanics[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(4): 857-862.
- [9] AHRENS M, VABEN R, STÖVER D. Stress Distributions in Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings as a Function of Interface Roughness and Oxide Scale Thickness[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 161(1): 26-35.
- [10] 刘铁军, 汪越胜. 功能梯度材料涂层半空间的轴对称光滑接触问题[J]. 固体力学学报, 2007, 28(1): 49-54.
- LIU Tie-jun, WANG Yue-sheng. Axisymmetric Smooth Contact Problem of a Functionally Graded Coated Half-Space[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2007, 28(1): 49-54.
- [11] JOHNSON K L. Contact Mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [12] 杨万友, 周青华, 王家序, 等. 接触载荷作用下非均质材料表层应力集中分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(5): 1095-1102.
- YANG Wan-you, ZHOU Qing-hua, WANG Jia-xu, et al. Subsurface Stress Concentration of Heterogeneous Material under Contact Loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(5): 1095-1102.
- [13] 杨万友, 周青华, 王家序, 等. 考虑异质材料的线接触性能建模与分析[J]. 复合材料学报, 2016, 33(8): 1848-1858.
- YANG Wan-you, ZHOU Qing-hua, WANG Jia-xu, et al. Modeling and Analysis on Line Contact Performance of Considering Heterogeneous Properties of Material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(8): 1848-1858.
- [14] 杨万友, 王家序, 周青华, 等. 线接触载荷下材料非均质特性对滚动接触疲劳的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 61-67.
- YANG Wan-you, WANG Jia-xu, ZHOU Qing-hua, et al. Influences of Heterogeneous Property of Material under Line Contact Loads on Material's Rolling Contact Fatigue[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(11): 61-67.
- [15] OLIVEIRA S A G, BOWER A F. An Analysis of Fracture and Delamination in Thin Coatings Subjected to Contact Loading[J]. Wear, 1996, 198(1-2): 15-32.
- [16] 周思博, 吴敬涛, 邓文亮, 等. EB-PVD 热障涂层系统界面应力的理论分析[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 189-198.
- ZHOU Si-bo, WU Jing-tao, DENG Wen-liang, et al. Analytic Research on Interface Stress of EB-PVD Thermal Barrier Coatings[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 189-198.
- [17] 杨震. 薄膜涂层内部受集中力的基本解及其应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- YANG Zhen. Fundamental Solution for Coating Materials Subjected the Internal Load[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [18] 许金泉. 双材料应力分析中的镜像点方法[J]. 力学学报, 2004, 36(1): 106-111.
- XU Jin-quan. Mirror Point Method for Stress Analysis of Bonded Dissimilar Materials[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 36(1): 106-111.
- [19] JACCODINE R J, SCHLEGEL W A. Measurement of Strains at Si-SiO₂ Interface[J]. Journal of Applied Physics, 1966, 37(6): 2429-2434.
- [20] 刘兆月, 司良英, 马家骥, 等. 基于 Stoney 公式适用性分析——取向硅钢绝缘涂层张应力的计算[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 146-151, 167.
- LIU Zhao-yue, SI Liang-ying, MA Jia-ji, et al. Based on Applicability Analysis of Stoney Equation: Calculation of Tensile Stress Induced in Grain-Oriented Silicon Steel by Insulation Coating[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 146-151, 167.