

DOI: 10.3901/JME.2014.21.054

硬岩掘进装备支撑系统界面接触刚度非线性特性*

余海东 郝培 赵勇 来新民

(上海交通大学上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室 上海 200240)

摘要: 隧道岩石表面形貌和岩石力学特性对撑靴接触界面刚度特性关系密切。根据隧道岩石形貌特点,采用分形数学模型分析不同分形参数与表面粗糙度之间的关系,通过投影方法建立三维隧道岩石粗糙表面数值分析模型。考虑岩石隧道表面粗糙度,岩石力学特性、撑靴数量以及复合岩层等工况,分析不同参数下撑靴载荷与法向接触刚度之间的关系。结果表明:掘进装备的支撑系统界面法向接触刚度随着法向力、分形维数、弹性模量的增大而增大,随着特征尺度系数的增大而减小;撑靴数量的增加会带来界面法向刚度增加。在相同载荷下,双撑靴的接触刚度接近单撑靴接触刚度的两倍;岩石成分比例相同时,其法向刚度最小;当岩石成分比例不同时,较小弹性模量岩石成分越高,其法向刚度越大;岩石成分比例不同的情况下,其法向刚度相差不大。

关键词: 界面接触刚度; 复杂地质; 硬岩掘进装备支撑系统; 法向刚度; 非线性

中图分类号: TH112

Non-linear Behavior of Normal Contact Stiffness of Tunnel Surface and Supporting System of Tunnel Boring Machines

YU Haidong HAO Pei ZHAO Yong LAI Xinmin

(Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-walled Structures, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The interfacial contact stiffness between the supporting system of tunnel boring machines (TBM) and the tunnel surfaces is closely related to the mechanical behavior of rocks and the morphology of tunnel surfaces. The mathematical model based on the fractal theory is employed to study the relation between the roughness and fractal parameters of three dimensional tunnel surfaces. The coarse surfaces are established by using the projecting method according to the characteristics of tunnel surfaces. Many parameters such as the roughness of the tunnel surfaces, the mechanical behavior of rocks, the number of the supporting boots and composite geologic structures are taken into consideration to obtain the correlation between the normal contact stiffness and the loads. The results show that the increases of the fractal dimension, the elastic modulus, the normal loads and the number of support boots cause the increase of the interfacial contact stiffness. The contact stiffness of the double supporting systems is twice of that of the single one subjected to the same load. The normal stiffness is minimal when the ratios of the soft and hard rocks in the composite geologic structures are approximately identical. The increasing of the ratio of soft rocks in the contacting area causes the increase of the contact stiffness. However, the variation of the contact stiffness is not obvious when the proportions of two kinds of rocks on the contacting area are changed.

Key words: interfacial contact stiffness; composite geologic structures; supporting system of tunnel boring machines; normal stiffness; nonlinear

0 前言

全断面硬岩掘进装备(Tunnel boring machine, TBM)施工隧道具有环境扰动小,掘进效率高等优点,广泛应用于岩石硬度高的公路、铁路隧道工程

建设。TBM掘进过程中冗余驱动推进系统的末端直接支撑在已经开挖的隧道上,由于岩石的脆性特性和刀盘的破岩机理,在掘进过程中推进系统往往受到很大的冲击和振动载荷作用,加之开挖后的隧道表面凹凸不平,与撑靴接触的岩石表面变形、损伤以及突变载荷下的部分岩石失效,会造成撑靴与岩石的接触界面特性发生突变,从而引起推进系统载荷和动力学特性的不可预测性,由此带来的位姿变

* 国家自然科学基金(51275292)和国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2013CB035403)资助项目。20131109 收到初稿, 20140611 收到修改稿

化严重时会造成掘进机在隧道中出现堵转事故,带来巨大经济损失。因此考虑隧道表面粗糙度和岩石的变形及失效特性,建立与撑靴接触的岩石表面接触刚度的计算模型并分析复杂载荷工况下接触界面的刚度特性,对掘进机在复杂地质条件下施工时动力学特性的分析具有十分重要的意义。

分形理论方法在描述表面粗糙度特性时具有尺度独立性,在研究粗糙表面界面接触特性时得到了广泛的应用。PEI 等^[1]采用显示动态的拉格朗日有限元法计算了粗糙表面之间的弹塑性接触。该模型假设两个粗糙表面之间没有摩擦和黏附且满足自相似的分形表面。结果发现接触面积跟施加的载荷成线性比例关系。JIANG 等^[2]利用分形理论分析了机械加工表面之间的微凸体的弹塑性变形,并基于赫兹接触理论推导出接触刚度。理论分析结果和试验结果具有很好的一致性。AKARAPU 等^[3]分析具有分形特征的固体粗糙表面的接触,发现接触面积和接触刚度随着外部载荷的增加而增加,接触界面之间原子规模上的移动对接触面积和法向接触刚度影响很小,对切向接触刚度影响较大。CAMPANA 等^[4]采用理论的方法计算了法向和切向接触刚度,结果表明法向和切向刚度的比值为一定值。李辉光等^[5]基于弹塑性理论等建立了长方微元体进行有限元接触分析,给出了根据受力和变形关系计算粗糙表面接触刚度的方法,得到了不同载荷下法向切向界面接触刚度。黄康等^[6-7]对圆柱接触分形模型进行分析,并建立了两圆柱体结合面的法向接触模型,分析分形维数、材料的特性参数、圆柱半径参数等对接触刚度的影响。尤晋闽等^[8]基于分形理论建立了结合面法向接触参数的分形预估模型,通过粗糙表面材料性能参数、法向载荷及粗糙表面的分形参数来预估法向接触刚度和接触阻尼,并对其变化规律进行数值仿真。李辉光等^[9]基于弹塑性理论对具有粗糙表面的长方微元体进行有限元接触分析,根据受力和变形关系得到不同载荷作用下法向和切向界面接触刚度,将微元体界面接触接触刚度与宏观结构应力分析结果相结合,给出考虑接触刚度的组合结构动力特性分析方法。目前的工作大多集中在经过机械加工后金属接触表面,对掘进后隧道表面粗糙度的数学描述及其在时变压缩载荷下岩石的变形和失效、撑靴与岩石之间接触界面特性的研究很少涉及。

本文考虑 TBM 施工后隧道岩石表面的特点,采用修正的分形表面模型构造具有不同粗糙度的隧道岩石表面,建立 TBM 支撑系统和岩石接触刚度计算数值分析模型,选取两种不同弹性模量的岩石:

弹性模量较大的花岗岩,弹性模量较小的页岩以及由两种弹性模量按不同比例组成的混合岩石。分析岩石的法向刚度与法向载荷之间的变化关系,并考虑弹性模量、分形维数、特征尺度系数对法向刚度的影响,为 TBM 的动力学特性研究提供约束条件。

1 隧道岩石粗糙表面的建模

1.1 基于分形方法的隧道粗糙表面构造模型

图 1 所示为经过 TBM 滚刀切削后隧道岩石的粗糙表面形貌。分形几何为描述广泛存在的复杂无序、不规则的现象提供了一种定量的描述手段。分形表面的表征有很多种方法,常见的方法有:分形布朗函数法、逆傅里叶变化法、分形插值法和 W-M 函数法^[10]。YAN 等^[11]提出的修正各向同性三维分形表面的公式具有形式结构简单、容易实现等特点,在分析计算载荷和变形时能够考虑材料的特性参数影响。这里采用该模型来生成隧道粗糙的岩石表面,其数学表达式为

$$z(x, y) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{(D-2)} \left(\frac{\ln \gamma}{M} \right)^{1/2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{n_{\max}} \gamma^{(D-3)n} \times \left\{ \cos \phi_{m,n} - \cos \left[\frac{2\pi \gamma^n (x^2 + y^2)^{1/2}}{L} \times \cos \left(\arctan \left(\frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{M} \right) + \phi_{m,n} \right] \right\} \quad (1)$$

式中 $z(x, y)$ ——粗糙表面轮廓高度;
 D ——分形曲面分形维数,且 $2 < D < 3$;
 G ——反映 $z(x, y)$ 大小的特征尺度系数;
 γ ——大于 1 的常数,通常取 $\gamma = 1.5$;
 n ——空间频率序号;
 $n_{\max} = \text{int}[\lg(L/L_s)/\lg \gamma]$;
 L_s ——截止长度;
 L ——取样长度;
 m ——曲面皱褶重叠数 $m = 1, 2, \dots, M$;
 $\phi_{m,n}$ ——随机相位,取值范围 $[0, 2\pi]$ 。



图 1 隧道岩石的粗糙表面

由式(1)可知粗糙表面轮廓的高度主要受分形维数 D 和特征尺度系数 G 的影响。由于岩石的脆性特性, 切削后的隧道表面粗糙度较大。为了考虑这些特性, 在隧道岩石粗糙表面时选取 $L=1\text{ m}$, $L_s=10^{-9}\text{ m}$, $M=10$, $\gamma=1.5$, 图 2 是分形维数 $D=2.4$ 和特征尺度系数 $G=5\times 10^{-9}$ 时粗糙表面的高度变化特性。

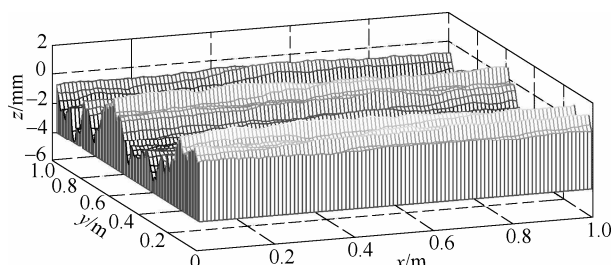


图 2 隧道岩石粗糙表面构造

1.2 不同分形参数与表面粗糙度关系

为了更加直观地表达分形维数 D 和特征尺度系数 G 对表面粗糙度的影响, 引入轮廓线和平均线之间偏差的方均根 σ 来定量描述表面粗糙度的大小^[7], 如图 3 所示, D_s 表示二维截面的分形维数

$$\sigma^2 = \frac{G^{2(D_s-1)}}{2\ln\gamma} \frac{1}{4-2D_s} L^{4-2D_s} \quad (2)$$

将其推广到三维情形, 由于三维分形维数 D 与二维分形维数 D_s 满足 $D=D_s+1$, 则三维粗糙表面高度的标准差 σ' 可以表示为

$$\sigma' = \sqrt{\frac{G^{2(D-2)}}{2\ln\gamma} \frac{1}{6-2D} L^{6-2D}} \quad (3)$$

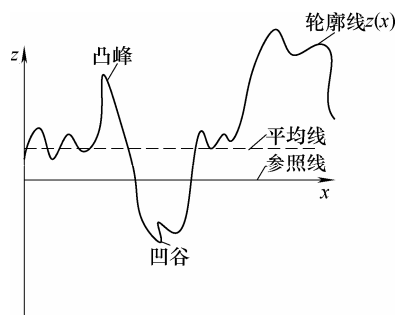
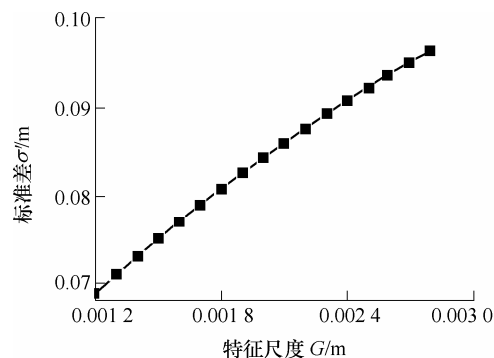


图 3 表面轮廓线示意图

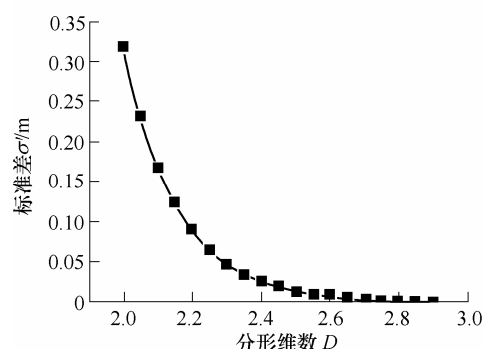
将分形维数 D 和特征尺度系数 G 分别取不同的值时, 表面高度的标准差 σ' 随分形维数 D 和特征尺度系数 G 变化的规律如图 4 所示。

由图 4 知, 当 G 一定时, 表面高度的标准差 σ' 随着分形维数 D 的增大而减小, 即表面粗糙度随着分形维数 D 的增大而非线性减小。而当分形维数 D 一定时, 表面的粗糙度随着特征尺度系数 G 增大而增大。分形维数 D 为 2.1~2.3 时, 该系数对表面粗

糙度影响十分明显。



(a) $D=2.4$, G 取不同值时表面粗糙度特性



(b) $G=10^{-3}\text{ m}$, D 取不同值时表面粗糙度特性

图 4 表面粗糙度与分形参数之间关系

2 隧道粗糙表面仿真模型

将由分形函数生成的粗糙表面沿隧道圆周方向投影, 利用 UG 软件中点云生成曲面的方法得到具有不同粗糙度的隧道岩石表面, 考虑撑靴与隧道岩石表面接触界面特性, 建立具有粗糙表面的岩石接触界面刚度分析模型。采用六面体进行网格划分, 在撑靴接触区域进行网格细分以获得更加准确的结果, 图 5 所示是某种粗糙表面的示意图。由于撑靴采用硬度较高的钢材, 这里将其假设为刚体。分析时采用位移边界条件以提高计算效率, 在撑靴的圆心处施加沿隧道径向位移载荷, 由总径向反力除以径向位移得到撑靴与岩石的接触刚度。

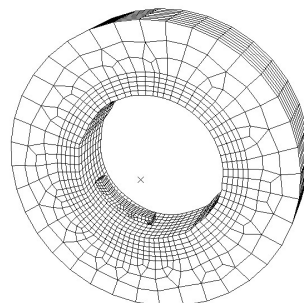


图 5 三维有限元接触模型

3 撑靴与岩石粗糙表面法向接触刚度

3.1 弹性模量对界面法向接触刚度的影响

岩石的弹性模量对于界面接触刚度影响明显, 不同岩石材料受压后抵抗变形的能力不同, 这里根据不同岩石的力学特性, 选取两种典型岩石材料(花岗岩和页岩)对其与撑靴之间的接触刚度进行分析, 计算结果如图 6 所示。结果表明, 随着弹性模量的增大, 法向刚度增大。当法向力较小时, 两条曲线几乎重合, 此时弹性模量对法向刚度影响较小。这是因为在法向力较小时, 岩石表面是小凸体与撑靴相接触, 小凸体之间相互影响很小, 此时尚未形成大面积的接触, 因此弹性模量对法向刚度的影响较小。在法向载荷增大到一定值时, 弹性模量对法向刚度的影响增大。这是因为此时的接触区域已不是岩石表面微凸体与撑靴接触, 而是形成了面接触, 因此弹性模量较大的材料, 其变形更加困难, 在相同的载荷下, 其法向刚度越大。

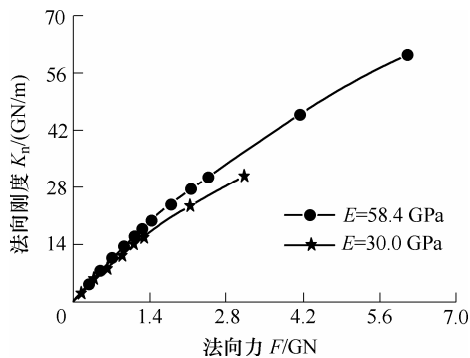


图 6 $D=2.4$, $G=10^{-3}$ m 时弹性模量对法向刚度的影响

3.2 特征尺度系数对界面接触法向接触刚度的影响

特征尺度系数 G 表征表面粗糙度的大小, G 越大则表面粗糙度越大。取不同的特征尺度系数, 分析其变化对接触刚度的影响如图 7 所示。结果表明: 随着特征尺度系数的增加, 法向刚度减小。产生的原因是: 由于 G 值是反应表面轮廓高度幅值的系数, G 值越大, 则表面轮廓高度幅值越大。在与撑靴接

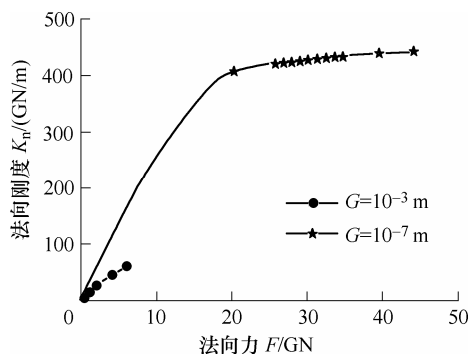


图 7 $D=2.4$, $E=58.4$ GPa 时特征尺度系数对法向刚度的影响

触时, 由于是小凸体的接触, 因此 G 值较小, 则小凸体的高度相差较小, 此时接触的小凸体数量增加, 导致对撑靴的法向作用力增加, 刚度增大。

3.3 分形维数对界面法向接触刚度的影响

分形维数 D 越大, 则能够反映的粗糙表面越为精细。计算得到考虑不同分形维数时法向载荷与接触刚度之间的关系如图 8 所示。结果表明: 随着分形维数的增加, 法向刚度逐渐增加。主要原因是随着分形维数增大, 能反映的表面特征越精细。此时接触区域的小凸体数增加, 岩石表面对撑靴的法向作用力增大, 导致法向刚度增加。

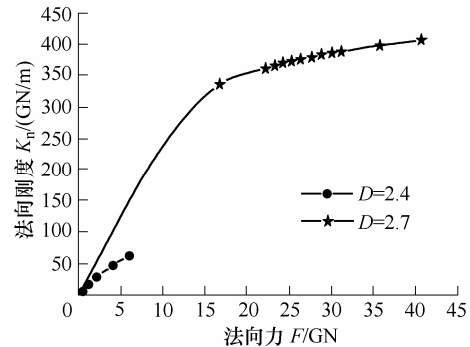


图 8 $G=10^{-3}$ m, $E=58.4$ GPa 时分形维数对法向刚度的影响

3.4 撑靴个数对界面法向接触刚度的影响

根据不同的地质条件, TBM 掘进机设计时撑靴的形状和数量不同, 这里对掘进机经常采用的含一个撑靴和两个撑靴两种情况下接触界面刚度特性进行比较分析。尽管相同的分形维数得到的表面粗糙度统计特性相同, 但是不同位置由于表面的形貌不同, 计算得到的刚度特性也会呈现不同的特性。计算得到单个和两个撑靴的接触刚度随载荷的变化关系如图 9 所示。由图 9 知, 随着撑靴数量的增加会带来界面法向刚度增加。这主要是由于撑靴数量增加会带来接触面的增大, 相同的法向载荷下, 接触界面产生的法向位移变小。结果表明双撑靴时最大法向刚度约为 700 GN/m, 单撑靴时约为 450 GN/m, 这说明岩石粗糙表面形貌的不同使得接触刚度并不是两倍的关系。

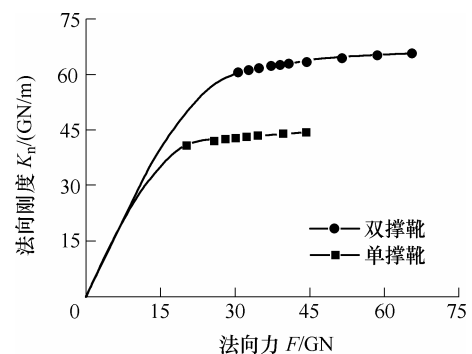


图 9 $E=58.4$ GPa, $D=2.4$, $G=10^{-7}$ m 时撑靴数量对法向刚度的影响

4 复合岩石层接触刚度特性

在实际的施工过程中,与撑靴接触的岩石的成分一般是多种多样的。接触区域内不同组成成分的岩石材料对接触刚度有着不同的影响。为了研究接触区域中变化岩石成分变化对接触刚度的影响,取两种典型岩石材料构成接触区域,分析其对接触刚度的影响规律。

TBM 掘进过程中可能遇到多种岩石混合的情况,由于混合岩石材料属性的不同以及混合区域可能发生的岩石畸变、破坏等,会造成撑靴各部分受力不均匀,使得支撑系统的受力情况难以预测,甚至发生破坏。以 $D=2.7$, $G=10^{-3}$ m 得到的粗糙岩石表面为研究对象,讨论同时含有弹性模量为 $E=58.4$ GPa 和 $E=30$ GPa 混合岩石在法向力作用下的接触刚度特性的变化规律。含不同复合岩石层得到的撑靴接触刚度如图 10 所示。结果表明混合成分岩石的法向刚度随法向力的增大而增大,与成分比例无关;法向接触界面刚度随法向载荷的变化规律与单一成分岩石规律基本一致,这说明岩石法向刚度变化趋势与岩石成分无关;当岩石只有一种成分时,弹性模量越大,法向刚度越大;当岩石为混合成分时,从图中可知:岩石成分比例相同时,其法向刚度最小;当岩石成分比例不同时,较小弹性模量岩石成分越高,其法向刚度越大。这主要是因为岩石弹性模量越小,则其抵抗变形的能力越弱,但混合成分的岩石,当较小弹性模量部分发生变形时,会向接触区外部延伸,此时受到较大弹性模量部分的阻碍,使得法向力增加,从而导致法向刚度增加;两种弹性模量岩石所占比例相同时,变形较为均匀,产生的法向力较小,因此法向刚度最小;比例不同时,弹性模量较小的部分所占比例越多,其变形越厉害,所受到的周围较大弹性模量岩石的阻碍越大,则法向力越大,法向刚度越大。说明弹性模量较小的成分对整体接触刚度影响较大。

此外,岩石成分比例不同时候,其法向刚度相差不大,这主要是因为单一岩石成分只是混合岩石成分的特例,故其弹性模量在两种极限情况(只含较大弹性模量成分或只含较小弹性模量成分)时法向刚度相差较大;混合岩石的变形受到两种弹性模量岩石的影响,使得法相刚度相差较小,说明在该种混合成分情况下岩石的稳定性较好。

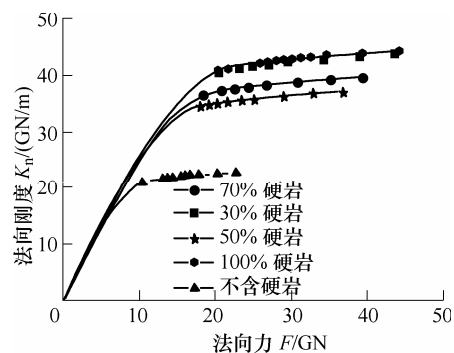


图 10 不同成分岩石法向力随法向刚度变化曲线

5 结论

(1) 掘进装备的支撑系统的界面法向接触刚度随着法向力、分形维数、弹性模量的增大而增大,随着特征尺度系数的增大而减小。

(2) 随着撑靴数量的增加会带来界面法向刚度增加。在相同载荷下,双撑靴的接触刚度并不是单撑靴接触刚度的两倍。

(3) 岩石成分比例相同时,其法向刚度最小;当岩石成分比例不同时,较小弹性模量岩石成分越高,其法向刚度越大。同时法向刚度变化受岩石成分比例影响不大。

(4) 撑靴与岩石接触时同时受到法向和切向载荷的作用,且切向载荷实时变化,因在此分析撑靴与岩石的法向接触刚度还需要进一步考虑切向载荷的作用。撑靴接触界面刚度特性的分析为对 TBM 动力学特性研究具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- [1] PEI L, HYUN S, MOLINARI J, et al. Finite element modeling of elasto-plastic contact between rough surfaces[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53: 2385-2409.
- [2] JIANG Shuyun, ZHENG Yunjian, ZHU Hua. A contact stiffness model of machined plane joint based on fractal theory[J]. Journal of Tribology, 2010, 132, 011401-1-011401-7.
- [3] AKARAPU S, SHARP T, ROBBINS M. Stiffness of contacts between rough surfaces[J]. Physical Review Letters, 2011, 106: 204301-1-204301-4.
- [4] CAMPANA C, PERSSON B, MUSER M. Transverse and normal interfacial stiffness of solids with randomly rough surfaces[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2011, 23: 1-9.
- [5] 李辉光,刘恒,虞烈.粗糙接触结合面的接触刚度研究

- [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(6): 69-74.
- LI Huiguang, LIU Heng, YU Lie. Contact stiffness of rough mechanical joint surfaces[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(6): 69-74.
- [6] 黄康, 赵韩, 陈奇. 两圆柱体表面接触承载能力的分形模型研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(6): 529-533.
- HANG Kang, ZHAO Han, CHEN Qi. Research of fractal contact model on contact carrying capacity of two cylinders' surface[J]. Journal of Tribology, 2008, 28(6): 529-533.
- [7] 赵韩, 陈奇, 黄康. 两圆柱体结合面的法向刚度分型模型[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 53-58.
- ZHAO Han, CHEN Qi, HUANG Kang. Fractal model of normal contact stiffness between two cylinders' joint interfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7): 53-58.
- [8] 尤晋闽, 陈天宁. 基于分形接触理论的结合面法向接触参数预估[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(9): 1275-1280.
- YOU Jinmin, CHEN Tianing. Estimation for normal parameters of joint surfaces based on fractal theory[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(9): 1275-1280.
- [9] 李辉光, 刘恒, 虞烈. 考虑接触刚度的燃气轮机拉杆转子动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(7): 4-8.
- LI Huiguang, LIU Heng, YU Lie. Dynamic characteristics of a rod fastening rotor for gas turbine considering contact stiffness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(7): 4-8.
- [10] 邢柏强. 基于分形表征的粗糙-光滑表面接触状态有限元分析与应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
- XING Boqiang. The finite element analysis and application of rough-smooth surface contact state based on fractal characterization[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [11] YAN W, KOMVOPOULOUS K. Contact analysis of elastic plastic surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 84: 3617-362.

作者简介: 余海东(通信作者), 男, 1975 年出生, 副教授。主要研究方向为材料与结构的力学行为。

E-mail: hdyu@sjtu.edu.cn

郝培, 男, 1986 年出生。主要研究方向为复杂机械结构界面特性。

E-mail: haopei@sjtu.edu.cn