

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.10.010

泥饼工况下盾构刀盘热-力耦合分析

谭青^a, 吕丹^a, 夏毅敏^{a,b}, 刘文华^{a,b}

(中南大学 a. 机电工程学院; b. 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 由于在渣粘土质中盾构刀盘中心泥饼的形成造成刀盘出现热损伤等失效, 研究了在泥饼作用下刀盘在盾构掘进过程中的热-应力耦合问题, 得出刀盘在泥饼作用下的温度场和热-应力耦合场分布规律。利用 Solidworks 和 ANSYS 软件建立了盾构刀盘三维有限元模型, 结果表明: 泥饼形成时, 温度在短时间内急剧升高, 导致热应力在同一时间内急剧增大到 168.2 MPa, 最大热变形达到 3.1 mm, 并且刀盘中心出现了翘曲现象。

关键词: 盾构; 刀盘; 泥饼; 温度场; 热-力耦合

中图分类号: TH11

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)10-061-06

Thermo-mechanical coupling analysis of shield cutter head under mud cake condition

TAN Qin^a, LÜ Dan^a, XIA Yimin^{a,b}, LIU Wenhua^{a,b}

(a. College of Mechanical and Electrical Engineering; b. State Key Laboratory of

High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: Aiming at the cutter head thermal damage and other failure problems caused by shield cutter head mud formation in residue and clay soil, the problem of thermal-stress coupling of shield cutter head under the effect of mud in the tunnelling process is studied, and the cutter head temperature and thermal-stress distribution of coupling fields under mud effect are acquired. A shield cutter head three-dimensional finite element model is built by using software ANSYS and Solidworks. The results shows that when the mud is formed, the temperature rises sharply in a short time, which leads to a rapid increase of thermal stress to 168.2 MPa, at the same time, the maximum thermal deformation reaches 3.1 mm, then the center of cutter head is wrapped.

Key words: shield; cutter head; mud cake; temperature field; thermo-mechanical coupling

随着盾构制造技术的不断发展, 盾构被广泛应用到隧道开挖的工程实践中。开挖时, 随着刀盘的转动与推进, 隧道开挖面将产生复杂的相互作用, 刀具推进中与不同土体的相互作用产生了大量的热量。热量以热传导的形式传递给刀盘, 温度的大幅升高将对刀盘的磨损、使用寿命及开挖效率产生很大的影响。

在正常工作情况下, 盾构刀盘上的最高温度只有 40~50 °C^[1], 但是在盾构的掘进过程中, 特别是在复合地层的条件下, 随着泥饼形成与增大的作用下, 刀盘扭矩、总推力的大幅增大、推进速度减慢, 导致刀盘温度高达 400~500 °C, 甚至更高, 刀盘温度超过其许用温度^[2-9]。刀盘温度的升高, 容易产生局部烧伤、刀盘材料属性的变化等现象^[10-11]。当高应

收稿日期: 2013-04-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 计划 (2013CB035401); 国家自然科学基金 (51274252, 51074180); 中国博士后科学基金特别资助项目 (201003519); 湖南省科技重大专项 (2010FJ1002); 湖南省科技支撑计划 (2010GK3073)

作者简介: 谭青 (1955-), 男, 中南大学教授, 博士生导师, 主要从事机械设计方法及理论、机械电子等研究,

(E-mail) jds-share@163.com。

变区域对应于高温区,会造成局部热衰退,加剧高温区磨损和应力集中,进而产生裂纹^[12]。

在刀盘设计中考虑热应力、热力耦合的影响,可以为盾构刀盘的结构设计和材料选择提供重要依据。文中对泥饼工况下的盾构刀盘进行了热力耦合分析,考虑到温度对刀盘材料参数的影响,得出刀盘温度场、热应力场和变形场分布规律,并与正常掘进工况下的应力场和变形场进行了对比,分析了温度对盾构刀盘的影响。

1 刀盘的热力耦合三维有限元分析建模

1.1 刀盘三维建模

针对复合地质条件,采用面板式刀盘,在 Solidworks 三维软件中建立的刀盘三维几何模型如图 1 所示。刀盘上的正滚刀和正面刮刀按螺旋线方式布置。中心滚刀布置在刀盘中心区;正滚刀布置在刀盘正面,径向与刀盘面板平行;边滚刀是位于刀盘外缘区,径向与刀盘面板成一定角度。正面刮刀的切削面与刀盘面板平行;边缘刮刀切削刃呈圆弧状,安装在刀盘边缘。刀盘的切削直径最终由安装在刀盘外周上的边缘滚刀和边缘刮刀来实现。

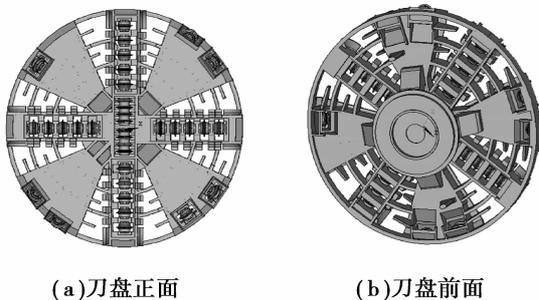


图 1 刀盘三维几何模型

1.2 刀盘温度场模型

刀盘是盾构的关键部件,在掘进过程中,刀盘直接与岩土和空气相接触,破岩产生的热量通过盾构、岩土和空气 3 种方式扩散。刀具刀盘之间主要以热传导的形式传热,但是刀盘之间也存在热对流和热辐射的影响。

刀盘的温度场 $T(x, y, z, t)$ 用热量平衡微分方程描述为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho Q = 0, \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为材料比热; t 为时间; k_x, k_y, k_z 为材料沿 x, y, z 方向的热传导系数; $Q = Q(x, y,$

$z, t)$ 为刀盘内部的热源密度。

温度场的分布应满足边界条件。

边界条件 1:

$$T = T_0; \quad (2)$$

边界条件 2:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q; \quad (3)$$

边界条件 3:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z - h(T_0 - T) = 0. \quad (4)$$

式中: n_x, n_y, n_z 为边界外发现的方向余弦; h 为热系数; $T = T(\Gamma, t)$ 为边界 1 上的给定温度; $q = q(\Gamma, t)$ 为边界 2 上的给定热流量; $T_0 = T_0(\Gamma, t)$ 为在自然对流条件下,是外界环境温度。

1) 考虑到刀盘外表面与岩土之间的传热关系,采用对流换热和辐射换热作为在边界 Γ_1 上的边界条件

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_0} = h(T_h - T_l) + \xi \alpha (T_h^4 - T_l^4), \quad (5)$$

式中: T_h 为外部热源温度; T_l 为刀盘内部温度; ξ 为表面黑体系数 ($0 \leq \xi \leq 1$), 对刀盘材料通常取 0.21, α 为 Stefan-Boltzmann 常数, 取值为 $5.677 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

2) 文中主要考虑刀盘与岩土之间热流的相互作用,忽略了其余表面与空气之间热流换热关系,所以在边界 Γ_2 上的边界条件为

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y = 0, \quad (6)$$

$$k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = 0, \quad (7)$$

式中,边界 Γ_1 为刀盘的隧道开挖面,包括盾构掘进面和刀盘外缘面,边界 Γ_2 为盾构刀盘其余表面。

将边界条件带入,对空间区域内温度场采用加权余量法:

$$\begin{aligned} & \int_V R_V \omega_1 dV + \int_{\Gamma_1} R_{\Gamma_1} d\Gamma + \int_{\Gamma_2} R_{\Gamma_2} d\Gamma = \\ & \int_V \left[\frac{\partial \omega_1}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial \omega_1}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \right. \\ & \quad \left. \frac{\partial \omega_1}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho Q \omega_1 \right] + \\ & \int_{\Gamma_1} -h \omega_2 (T_0 - T) + \xi \alpha (T_h^4 - T_l^4) d\Gamma + \\ & \int_{\Gamma_2} k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z - q \omega_3 d\Gamma = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为权函数。

1.3 基于热-力耦合的刀盘应力应变模型

刀盘应变由 2 部分组成:一部分是刀盘在变温

情况下所受的外在约束,以及体内各部分之间的相互约束,导致形变不能自由发生,从而产生热应力,而热应力又将由于物体的弹性而引起附加的形变^[13-14];另一部分是在掘进过程中,在岩土体对刀盘的载荷和温度的作用下产生的刀盘应变。所以刀盘的应变可表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^t, \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ 为由外部载荷引起的弹性应变矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}^t$ 为由温度矩阵引起的初应变矩阵。

根据应力与应变之间的关系

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (10)$$

将式(9)代入式(10),得出考虑温度作用下的应力

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^t), \quad (11)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为考虑温度场作用下的刀盘结构应力; \mathbf{D} 为刀盘材料的弹性矩阵。

载荷作用下的结构总应变为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\boldsymbol{\delta}^e, \quad (12)$$

式中: \mathbf{B} 为几何矩阵; $\boldsymbol{\delta}^e$ 位移向量。

将式(11)和式(12)代入,在温度载荷和外载荷作用下的载荷列阵 \mathbf{F}

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \int_V \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \\ &= \int_V \mathbf{B}^T (\mathbf{D}\mathbf{B}\boldsymbol{\delta}^e - \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}^t) dV = \\ &= \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D}\mathbf{B}\boldsymbol{\delta}^e dV - \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}^t dV \end{aligned} \quad (13)$$

1.4 刀盘三维有限元分析模型

刀具在掘进过程中,温度往往在很短的时间内就可以升高到 400 °C 以上,导致材料的特性发生了一定的变化。在广州地铁掘进过程中,中心滚刀出现过淬火现象,可知掘进过程中温度对刀盘和刀具的影响是巨大的。当温度场发生变化特别是在温度达到 200 °C 以上时,与温度相关的固体特性如刀盘的弹性模量、泊松比、导热系数等热物理参数会随着温度的变化而发生明显的改变,图 2 为热物理参数温度变化曲线。

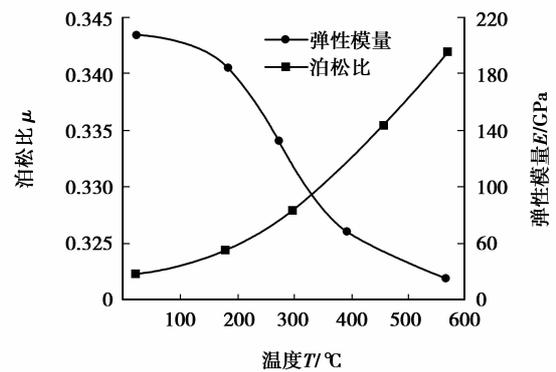
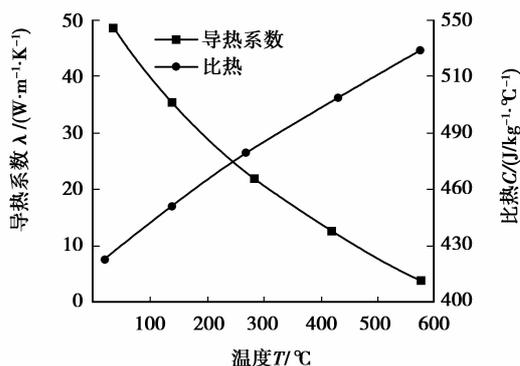


图 2 热物理参数

使用 ANSYS 有限元软件进行计算,图 3 所示为盾构刀盘在 ANSYS 软件中的有限元模型。在温度场计算中,单元类型为 solid 70 单元;进行结构应力计算时,单元类型则选用 solid 45 单元。

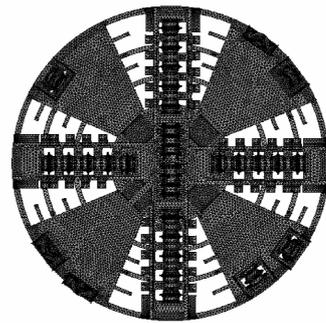


图 3 刀盘有限元模型

由于掘进中盾构刀盘在空气,岩土等外界物质的作用下温度变化不是恒定的,进行刀盘温度分析时应采用瞬态分析法。热-应力耦合计算采用顺序耦合法。其过程分解为 2 个部分:针对在外部热源的作用下,刀盘内部的热流场进行计算,得到在掘进热量作用下的温度场;将温度场所得每一时刻结果应用到结构应力计算中,得到在温度和外载荷作用下的刀盘应力场。

2 刀盘温度场仿真结果与分析

针对复合地质条件,特别是软土地质条件,由于温度的升高和刀盘开口率的关系,部分沙土不易排出,沙土较易产生附着和粘结,导致刀盘中心较易形成泥饼。泥饼将降低刀盘中心热量的扩散量,在刀盘中心形成一个高温区。

文中刀盘在渣粘土质中以 1 r/min 的转动速度掘进,并在刀盘中心逐渐形成泥饼的工况下,分析盾构刀盘掘进 5 h 内的刀盘热-应力场分布。

2.1 刀盘温度场分布特性

时间为 5 h 时的刀盘温度分布见图 4 所示。由于刀盘换热系数分布不均匀,刀盘面板的温度分布也不均匀^[15]。温度从刀盘中心到刀盘边缘逐渐降低到 50 °C 左右,在刀盘的中心滚刀上出现了最高温度 510.3 °C,泥饼导致了中心滚刀高温的存在,同时形成了刀盘中心高温区,温度由中心逐渐传递刀盘边缘,刀盘整体温度随着半径的增大而逐渐减小。

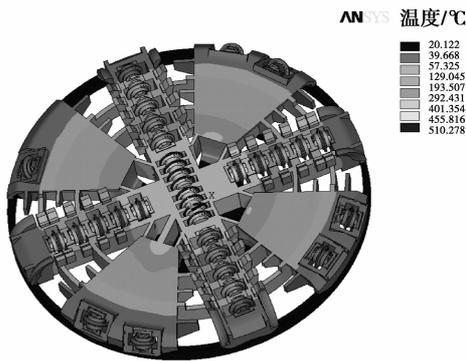


图 4 温度分布

图 5 所示为刀盘上最高温度-时间的变化曲线图。刀盘中心泥饼逐渐形成 120 min 内,温度缓慢升高,达到了 240 °C 左右;在 120~300 min 时间范围内,温度急剧升高,达到最大值 510 °C。

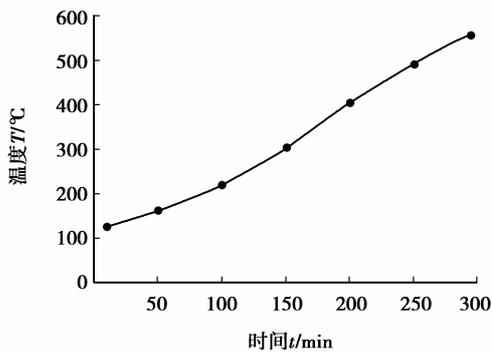


图 5 温度-时间变化图

3 刀盘热-应力场结果分析

图 6 所示为刀盘在热-应力耦合作用下的平均应力-时间的变化曲线图。当掘进过程中产生泥饼后平均应力呈缓慢变化状态,由最小值缓慢增大至 124 MPa,然后刀盘平均应力呈快速增长并达到最大值 168.2 MPa。

刀盘温度场对刀盘的结构应力影响较大,平均

应力的变化与温度的变化趋势基本趋于一致,在控制刀盘结构应力的同时应考虑温度影响。

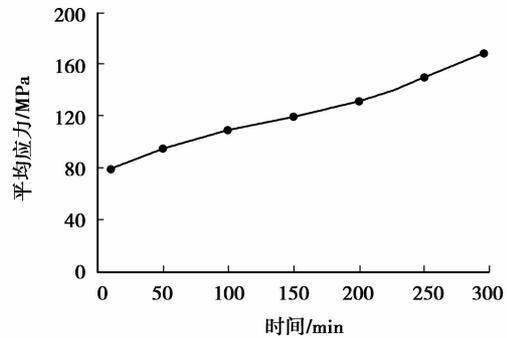
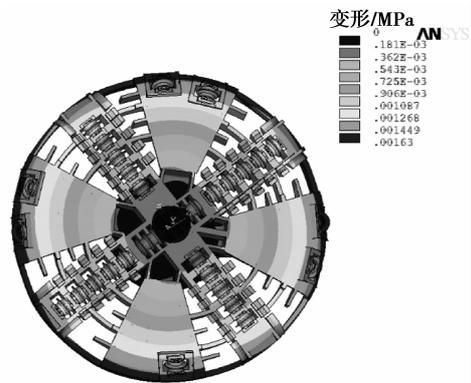
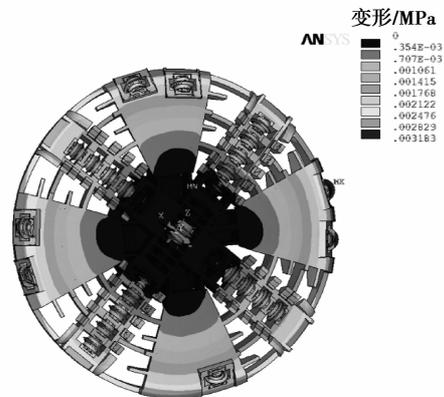


图 6 刀盘平均应力-时间变化图

图 7 所示为刀盘变形图。可见,正常掘进状态下刀盘变形随着半径的增大而逐渐增大到 1.63 mm,中心的变形趋于 0。而在热-应力耦合作用下,随着半径的增大,变形由 1.1 mm 逐渐变化到 0 mm,然后增大到最大值 3.12 mm,并且刀盘中心点处发生了翘曲现象,变形达到 1.1 mm。



(a)正常掘进工况



(b)热-应力耦合工况

图 7 刀盘变形图

图 8(a)为正常状态下刀盘应力分布。随着半径的增大,刀盘整体应力出现逐渐增大的趋势。半径的增大,刀盘所受摩擦力力矩的增大,正压力弯矩增大,导致应力的增大;但是在牛腿与刀盘相接处的地方产生了集中应力峰值 78 MPa。图 8(b)所示为稳定状态下刀盘热-应力分布。刀盘应力随着半径的增大而减小,应力最大值 262 MPa 出现在刀盘面板中心处,中心滚刀两侧与面板连接处的应力值均在 200 MPa 以上。

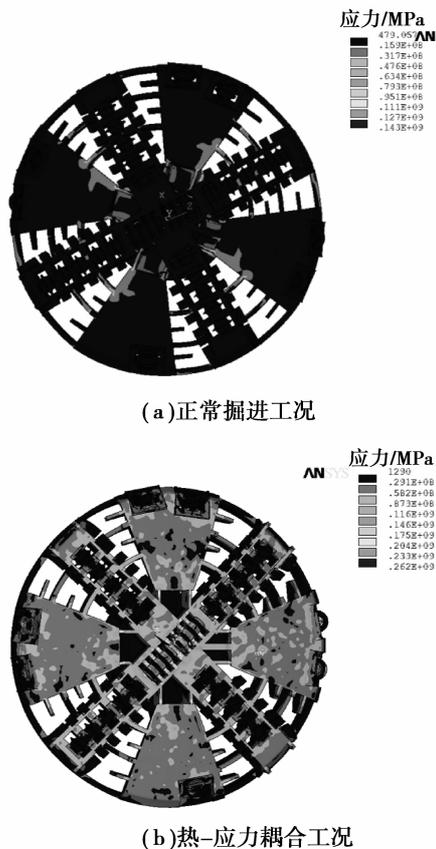


图 8 刀盘应力分布

掘进过程中岩土体对刀盘的作用力,使刀盘产生一定的挠度,当温度升高,挠度增大,刀盘上各点变形也随之增大。由于刀盘中心高温的作用,刀盘中心产生翘曲现象,刀盘各点的变形都随着刀盘中心翘曲的增大而增大,导致热-应力作用下的刀盘变形大于正常掘进状态下刀盘变形。

温度的变化速度与结构应力是呈正比关系。温度梯度对结构应力的影响较大,当温差载荷增大,温度应变增大,结构应力增大;温差载荷变小,刀盘应力呈现逐渐减小的趋势^[16]。在温度影响下,刀盘中心温度快速增长,在温差载荷的作用下,应力达到最高值 262 MPa,远远大于正常工况下应力值;随着刀

盘半径的增大,2 种工况下温度的差距慢慢减小,在刀盘边缘处温度的变化率一致,所以 2 种掘进状况下的应力大小也趋于一致(见图 9)。

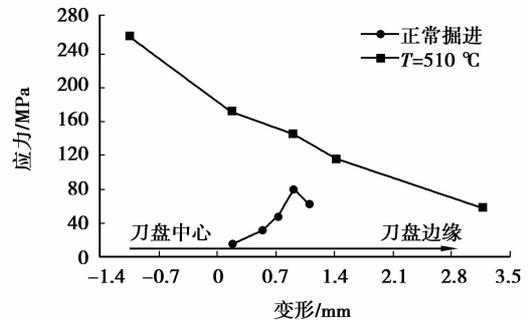


图 9 不同工况下应力-变形对比

4 结 论

通过对刀盘进行热-应力分析,得出以下结论:

1)在掘进过程中,当部分沙土没有及时排出而产生泥饼时,在前 120 min 内,刀盘中心和中心滚刀温度缓慢升高,达到 240 °C;在 120 min 到 300 min 时间范围内,温度急剧升高,达到最大值 510 °C。

2)温度作用下刀盘材料的热物理参数发生变化导致刀盘应力的变化,温度的变化率也同时影响了刀盘的应力分布。刀盘中心温度的快速升高导致应力急剧增大到最大值 168.2 MPa,出现在刀盘中心滚刀刀尖处;刀盘最大热变形达到 3.1 mm,出现在刀盘边缘处。

3)由于泥饼的形成与作用,刀盘中心温度的急剧升高,导致刀盘中心变形量增大了 1.1 mm,并出现了翘曲的现象。随着半径的增大,温度的影响逐渐减小,在刀盘边缘面板与边滚刀上的应力与正常掘进状态下相差不大。

4)刀盘高温区的应力明显增大,易引起刀盘失效。应增大刀盘开口率,调整刀具安装高度,合理设置泡沫口等防止泥饼现象以及高温区的产生。

参考文献:

- [1] 刘殿勇,张宁川. 盾构机掘进热平衡问题的分析与计算[J]. 隧道建设,2006,26(2):82-86.
LIU Dianrong, ZHANG Ningchuan. Calculation and analysis of heat balance of boring of Shield TBMs[J]. Tunnel Construction,2006,26(2):82-86.
- [2] VINAI R, OQQERI C, PEILA D. Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2008,23(3):308-317.

- [3] QIAO G G, YUAN D J, LIU B. Experimental research on the engineering properties of foam-improved red clay soil[J]. *Advanced Materials Research*, 2007, 261-263: 1831-1835.
- [4] 竺维彬, 鞠世健. 盾构施工泥饼(次生岩块)的成因及对策[J]. *地下工程与隧道*, 2003, 2: 25-29.
ZHU Weibin, JU Shijian. Causes and countermeasures of mud(Secondary rock block) in shield tunnelling[J]. *Underground Engineering and Tunnels*. 2003, 2: 25-29.
- [5] HOULSBY G, MARRIT R. Easing the way-soil conditioning[J]. *Tunnels & Tunneling International*, 2003, 35(6): 48-50.
- [6] JIANG H, JIANG Y S, HUANG M L, et al. Study on soil conditioning and key construction parameters of EPB TBM advancing in sand-pebble layer of Beijing metro [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 90-93: 2138-2142.
- [7] BALL RORY P A, TOUNG DAVID J, ISAACSON JON, ET AL. Research in soil conditioning for EPB tunneling through difficult soils[C/OL]// *Proceedings of 2009 Rapid Excavation and Tunneling Conference*, June 14-17, 2009, Alaska USA. [2011-09-11]. <http://www.langmaacks.eu/assets/retc-2009.pdf>.
- [8] JUNG H S, CHOI J M, CHUN B K, et al. Causes of reduction in shield TBM performance -A case study in Seoul [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(3): 453-461.
- [9] 谢方伟, 侯友夫. 液体黏性传动装置摩擦副瞬态热应力耦合[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2010, 41(6): 2201-2206.
XIE Fangwei, HOU Youfu. Transient thermal-stress coupling of friction pair of hydro-viscous drive device [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2010, 41(6): 2201-2206.
- [10] ZHANG Z X, KOUS Q, LINDQVIST P A. In-situ measurements of TBM cutter temperature in Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(4): 585-590.
- [11] NILSEN B, DAHL F E, HOLZHAUSER J, et al. Abrasivity of soils in TBM tunneling[J]. *Tunnels & Tunneling International*, 2006, 3: 36-38.
- [12] 孙冬野, 胡丰宾, 邓涛, 等. 湿式多片离合器翘曲特性模拟与试验[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(5): 1-6.
SUN Dongye, HU Fengbin, DENG Tao, et al. Simulation and experiment for warp characteristic of wet multiple disc clutches[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(5): 1-6.
- [13] 向勇, 杨建军, 刘建华. 组合式轧辊轧制过程的稳定性分析[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2009, 40(1): 164-168.
XIANG Yong, YANG Jianjun, LIU Jianhua. Stability analysis of assembled milling rolls in milling process [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2009, 40(1): 164-168.
- [14] 张军伟, 冯斌, 周忆, 等. 大口径光学元件环境热稳定性的有限元分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(8): 1295-1298.
ZHANG Junwei, FENG Bin, ZHOU Yi, et al. Finite element analysis on ambient thermal stability of large aperture optical element [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(8): 1295-1298.
- [15] 高建良, 魏平儒. 掘进巷道风流热环境的数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(2): 201-205.
GAO Jianliang, et al. Numerical simulation of the thermal environment at working face of diving airway [J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(2): 201-205.
- [16] 张开林, 赵利华, 张红军. 热-结构耦合的高炉炉壳静强度及疲劳强度分析[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2008, 31(6): 627-631.
ZHANG Kailin, ZHAO Lihua, ZHANG Hongjun. Strength analysis of new-style blast furnace based on the thermal-structural coupling [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2008, 31(6): 627-631.

(编辑 詹燕平)