

DOI: 10.11779/CJGE201703010

隧道管片接缝密封垫防水机理及试验研究

董林伟, 江玉生, 杨志勇, 程晋国, 刘超群, 张加健

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 随着盾构隧道的水压升高, 加强接缝处的防水是隧道建设的关键。针对隧道管片接缝处密封垫的受力和变形特征进行分析, 建立了密封垫防水的力学模型并对密封垫在侧面水压作用下的表面接触应力进行了理论推导。根据表面接触应力的组成, 对挤压密封阻力和自密封阻力进行了量化, 分析得出密封垫的防水性能除受到密封垫自身的接触面积、弹性模量和厚度的影响外, 还受到螺栓的有效横截面积、弹性模量和有效夹紧长度等因素的影响。结合工程实例, 以一种常用盾构隧道管片的密封垫为研究对象, 进行了耐水压试验和装配力试验。通过对试验现象的解读和数据分析, 为下一步隧道管片接缝密封垫的设计和生产以及盾构施工提供参考。

关键词: 接缝防水; 密封垫; 耐水压力; 张开量; 错位量

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)03-0469-06

作者简介: 董林伟(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道与城市地下空间技术的研究。E-mail: dlw860210@163.com。

Experimental study and water-resistant mechanism of gaskets in joints of tunnel segments

DONG Lin-wei, JIANG Yu-sheng, YANG Zhi-yong, CHENG Jin-guo, LIU Chao-qun, ZHANG Jia-jian

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: As the water pressure of shield tunnel increases, the key to tunnel construction is to strengthen the water resistance of joints. By analyzing the characteristics of stress and deformation of the gaskets in the joints of tunnel segments, a mechanical model is established, and a formula for the surface contact pressure of the gaskets under lateral water pressure is deduced theoretically. According to the constitution of surface contact pressure, the bearing seal resistance and self seal resistance are quantified. It is concluded that the contact area, elastic modulus and thickness of the gaskets, effective sectional area, elastic modulus, effective tightening length of bolts and other factors have influences on the water resistance. Based on an engineering example, the water pressure resistance tests and assembly tests are carried out on the gaskets of shield tunnel segments. Through the interpretation of experimental phenomena and the data analysis, it may provide a reference for the following design and production of the gaskets in the joints of tunnel segments as well as the construction of shield tunnel.

Key words: water-resistant joint of segment; gasket; water resistance; opening amount; dislocation amount

0 引言

随着城市建设规模的扩大, 城市轨道交通的优势越来越明显。在拥有的轨道交通里程上, 上海和北京分别是位居世界第一和第二的城市(不包括磁悬浮线)。预计到2020年, 全国地铁总里程将达到6000 km。其中, 盾构施工在城市地铁隧道建设中得到了越来越广泛的应用。该工法始于19世纪的英国, 有着近两百年的历史。20世纪50年代初, 中国开始应用于隧道施工。由于具有开挖速度快、施工质量好、劳动强度低、安全可靠、适应性强、对周围地层扰动小、噪音小、地表沉降和环境影响小等优点, 盾构施工比传统的钻爆法等工法有明显优势。

盾构隧道的防水主要包括管片混凝土自防水、管

片接缝防水、隧道与竖井或联络通道的接头防水3个方面。盾构防水应当以管片自防水为基础, 接缝防水为重点, 并应对特殊部位进行防水处理, 形成完整的防水体系^[1]。其中盾构隧道的接缝防水施工以密封垫防水为主, 嵌缝密封防水为辅助手段。橡胶密封垫作为防水材料, 1969年首次应用于德国汉堡的易北河地下公路隧道中^[2]。现阶段的盾构防水密封垫主要分为遇水膨胀橡胶和三元乙丙弹性橡胶(EPDM)及由含有以上两种材料的复合橡胶。前者广泛应用于日本, 后者广泛应用于德国、英国等欧洲国家。在保证密封

基金项目: 国家科技支撑计划子课题(2013BAB10B02-4); 联合资助基金项目(U1261212)

收稿日期: 2016-09-06

的前提下, 为降低密封垫的装配闭合力、提高压缩应力松弛性能, 通常将密封垫的断面开设一定数量的对称孔洞, 称为“谢斯菲尔德型”密封垫, 又称多孔橡胶密封垫。国内大多采用这种三元乙丙多孔橡胶密封垫用作接缝防水。

国内外很多学者做了关于盾构衬砌接缝的耐水压研究。王湛^[3]对于不同错位量的密封垫的失效破坏形式进行了数值模拟; 何川等^[4]从接缝防水及结构承压承载能力两个方面对高水压分界值进行了研究并进行了大比例尺模型试验; 赵运臣等^[5]选取不同截面形式的橡胶垫进行了防水性能试验和装配性能试验; 金丰年等^[6]概括了密封垫在深水条件下的3种破坏失效模式; 刘印等^[7]从不均匀沉降引起隧道纵向弯曲的角度分析了其对管片张开量的影响; Faisal等^[8]对隧道管片承受静力荷载和动力荷载下的接缝密封性能进行了研究和相关试验。

近年来, 随着地下空间的开发利用, 地铁隧道埋置深度也越来越大, 隧道接缝处需要承受更大的耐水压力。本文通过对密封垫表面的接触压应力的推导, 指出盾构接缝防水设计中的关键要素并开展了不同条件下的耐水压试验, 为下一步隧道管片的接缝防水提供参考。

1 接缝密封垫防水机理分析

密封垫防水的工作原理主要包括以下两个方面:

(1) 挤压密封: 在竖向压力的作用下, 密封垫产生竖向的挤紧力。压缩量是直接影响密封性能和寿命的重要参数。

(2) 自封作用: 流体压力作用在侧面, 橡胶垫产生竖向的变形, 从而增加了竖向的接触面压力, 提升了密封效果。

下面对于环缝处的防水进行分析。根据后文耐水压试验的结果, 在张开量等于衬垫厚度且错位量达到规范要求的极限值时, 2.0 MPa 水压无法突破密封垫。若盾构管片接缝处发生漏水, 必然是由于外荷载扰动或者不均匀沉降、施工控制等因素导致相应位置的衬垫脱开。故受力分析不考虑衬垫受力, 相应推导可适用于纵缝。

盾构隧道衬砌周围受到水压力的作用时, 水压力对环缝的作用可分为两个方面: 垂直于管片接触面的力, 产生将接触面分离的作用; 平行于接触面的水压力, 产生对密封垫侧面的挤压。

先考虑垂直于接触面的水压力作用。取单位宽度带有纵向螺栓的阴影区域进行受力分析, 如图1所示。其中, p_w 表示水压力大小, A_w 表示沿隧道纵向的水压作用面积; G 表示密封垫的弹性恢复力; B 表示螺

栓沿隧道纵向的挤紧力; 除上述力外, 隧道衬砌受到的其他合外力为 F 。

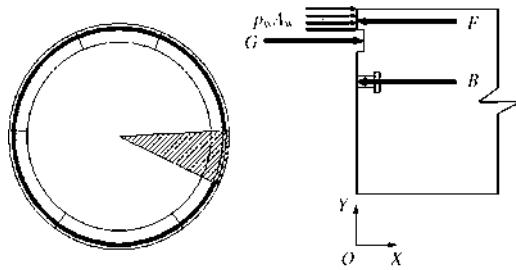


图1 管片环缝受力示意图

Fig. 1 Forces on joints of segments

在 t_1 时刻, 管片未受到水压力作用时, 保持平衡状态, X 方向所受合力为零, 可得

$$B(t_1) + F(t_1) - G(t_1) = 0 \quad (1)$$

在 t_2 时刻, 当接缝受到水压力的作用时, 若此时其他合外力 F 不变, 则该阶段有

$$B(t_2) + F(t_1) - G(t_2) - p_w A_w = 0 \quad (2)$$

由式(1)、(2)可知

$$\Delta B - \Delta G = p_w A_w \quad (3)$$

密封垫的压缩线刚度为 k_G , 螺栓的拉伸线刚度为 k_B 分别有下列计算公式

$$k_B = E_B \frac{A_B}{L_B} \quad , \quad (4)$$

$$k_G = E_G \frac{A_G}{h} \quad . \quad (5)$$

设此时水压引起接缝的附加张开量为 Δx , 则对于密封垫和螺栓分别有

$$\Delta B = k_B \Delta x \quad , \quad (6)$$

$$\Delta G = -k_G \Delta x \quad . \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入(3), 可得

$$\Delta x = p_w A_w / (k_B + k_G) \quad . \quad (8)$$

将式(8)代入(6)、(7), 可得

$$\Delta B = k_B \frac{p_w A_w}{k_B + k_G} \quad , \quad (9)$$

$$\Delta G = -k_G \frac{p_w A_w}{k_B + k_G} \quad . \quad (10)$$

从密封垫中选取单元体进行分析, 如图2所示。

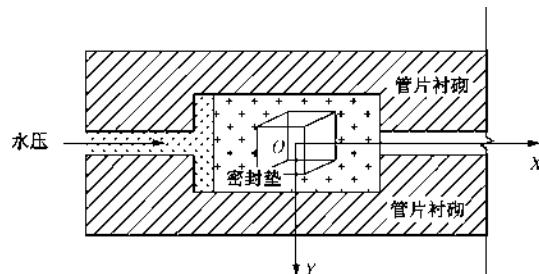


图2 密封垫在水压力下的受力示意图

Fig. 2 Forces on gasket under water pressure

接缝处未受到水压作用时, 有

$$\begin{cases} \sigma_x = 0 \\ \sigma_y = \sigma_0 \\ \varepsilon_y = \varepsilon_0 = \frac{\Delta h}{h} \\ \varepsilon_z = 0 \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入单元体弹性力学物理方程^[9]得

$$E_G \varepsilon_0 = \sigma_0 - \nu \sigma_z = \sigma_0 (1 - \nu^2) \quad (12)$$

接缝处受到压力为 P 的水压时, 不考虑上下表面的摩擦力, 有

$$\begin{cases} \sigma_x = p_w \\ \sigma_y = \sigma_p \\ \varepsilon_y = \frac{\varepsilon_0 h - \Delta x}{h} \\ \varepsilon_z = 0 \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入物理方程, 可得

$$E_G \varepsilon_0 - E_G \frac{\Delta x}{h} = \sigma_p (1 - \nu^2) - \nu (1 + \nu) p_w \quad (14)$$

联立式(8)、(12)、(14)

$$\sigma_p = \sigma_0 + p_w \left[\frac{\nu}{1 - \nu} - \frac{E_G A_w}{(k_B + k_G)(1 - \nu^2)h} \right] \quad (15)$$

橡胶材料可看作不可压缩材料, 泊松比十分接近 0.5^[10]。故将 $\nu = 0.5$ 代入式(15), 得

$$\sigma_p = \sigma_0 + p_w \left[1 - \frac{E_G A_w}{0.75 \times (k_B + k_G)h} \right] \quad (16)$$

将式(4)、(5)、(6)代入式(16)

$$\sigma_p = \sigma_0 + p_w \left[1 - \frac{A_w}{0.75 \times \left(A_G + A_B \frac{E_B}{E_G} \frac{h}{L_B} \right)} \right] \quad (17)$$

式中 σ_p 表示水压作用后的密封垫的表面接触压应力; σ_0 表示水压作用前外力合力作用下密封垫表面的压应力; p_w 表示水压力的大小; A_w 表示沿隧道纵向的水压作用面积; A_G 表示密封垫的接触面积; A_B 表示螺栓的有效横截面积; E_B 表示螺栓的拉伸模量; E_G 表示密封垫的压缩模量; h 表示密封垫的厚度; L_B 表示螺栓的有效夹紧长度。

由密封原理可知, 密封垫的表面接触压应力的大小是衡量其密封性能的尺度^[11]。对同一密封垫而言, 密封垫表面接触压应力越大承受的水压越高。

对式(17)分析, 可以得出以下结论:

(1) 第一项反映了在施加水压前密封垫受到的挤压力对于密封垫防水性能的贡献, 称为挤压密封阻力; 第二项反映了施加的水压对于密封垫防水性能的贡献, 是附加的耐水压力, 称为自密封阻力。

(2) 密封垫的防水性能不仅取决于密封垫自身的

接触面积、弹性模量和厚度, 还受到螺栓有效横截面积、弹性模量和有效夹紧长度的影响。

(3) 在张开量不变的情况下, 增大密封垫的初始厚度, 会使第一项挤压密封阻力提高, 密封垫的防水性能增强。密封垫耐水压力的进一步提高, 又会导致第二项自密封阻力的提高。因此, 密封垫的厚度对于密封垫的防水性能有较大影响。

但对于密封垫防水而言, 密封垫的表面接触压应力不是越大越好。装配应力的增加, 实际上提高了装配的施工成本, 易产生较大拼装误差且造成管片的端面、角部破坏。因此在设计密封垫高度时, 应选择适度的压缩率。

(4) 如前文所述, 水压对于密封垫的作用可以分解为径向和垂直方向。在不考虑自封作用的情况下, 径向水压对密封垫接触面产生剪切作用, 克服密封垫间的摩擦阻力; 垂直方向水压降低了密封垫的表面接触压应力, 为径向水压突破密封创造条件。

2 耐水压力试验和装配力试验

2.1 密封垫基本物理性

试验选取一种盾构常用防水密封垫为原型。该密封垫以三元乙丙橡胶为主要成分, 采用外轮廓尺寸为 47×16.5 的多孔橡胶矩形密封圈的构造形式, 顶面宽度为 36 mm, 底部宽度为 42 mm, 高度为 16.5 mm, 截面内部开有 10 个圆孔, 横截面如图 3 所示。

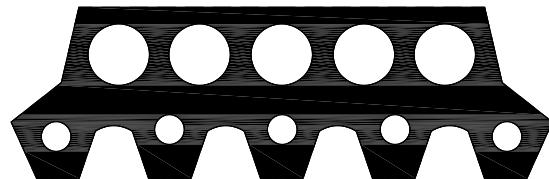


图 3 三元乙丙密封垫横截面图

Fig. 3 Section of EPDM elastic gasket

密封垫的截面面积 (A_0) 为 392.0 mm², 接缝沟槽截面面积 (A) 为 414.0 mm²。满足 $A = (1 \sim 1.15)A_0$ 的要求^[12]。

对密封垫的主要性能进行的检验结果见表 1。

表 1 密封垫主要性能测试结果

Table 1 Test results of parameters of elastic gaskets

序号	试验项目	指标	试验结果
1	硬度(邵尔 A)/度	67±5	64
2	拉伸强度/MPa	≥10.5	12
3	拉断伸长率/%	≥350	385
4	低温硬度变化(-15℃×24 h)/%	≤15	8
5	永久压缩变形(70℃×24 h)/%	≤25	15
	热空气老化硬度变化/度	≤6	4
6	(70℃×96 h) 拉伸强度变化率/%	≥-15	-10
	伸长率变化率/%	≥-30	-21
7	防霉等级	≥1 级	1 级

2.2 试验原理和装置

管片接缝分为纵缝和环缝。在管片的设计计算中,对于纵缝的张开量规范没有给出计算公式。但相关规范的条文中指出^[13],管片由于受周边土压力紧裹的作用,因而其纵缝张开量相对小于环缝。何川等^[14]也指出,盾构隧道的纵向特性比环向特性更为脆弱。当纵向曲率达到一定量之后,隧道就可能出现环缝张开量过大而漏水或管片环纵向受拉破坏。

环缝张开量控制值计算公式如下^[13]:

$$\delta \geq BD(\rho_{\min} - D/2) + \delta_0 + \delta_s \quad (18)$$

式中 δ 为环缝中密封垫在设计水压下,允许的环缝张开量; ρ_{\min} 为隧道纵向变形曲线的最小曲线半径; D 为衬砌环外径; B 为衬砌环宽; δ_0 为生产及施工误差可能造成的环缝间隙; δ_s 为隧道邻近建筑物及桩基沉降引起的隧道挠曲和接缝张开量。

由于管片制作误差、拼装误差及受力变形的存在,管片接缝(纵缝和环缝)存在一定的张开量和错台,接缝必须具备在上述不利条件下的防水能力。

耐水压力试验通过进水口对密封垫形成的内部水腔进行加压,模拟测试管片接缝处密封垫在不同张开量和错位量下的耐水压力性能。试验装置组装前后分别如图 4, 5 所示。



图 4 耐水压力试验装置(组装前)

Fig. 4 Apparatus for testing water pressure resistance
(before assembly)



图 5 耐水压力试验装置(组装后)

Fig. 5 Apparatus for testing water pressure resistance (after assembly)

为了测定密封垫的部分力学性质,进行了相关的装配力试验。

2.3 试验方案

连接耐水压力试验装置后,通过不同厚度的垫块对密封系统的张开量、错位量进行调整。安装好高强度螺栓后,从进水口对密封系统施加水压。以每次 0.05 MPa 的增量开始加压,待压力稳定且保压不漏水后,继续升高水压力,直至水压突破密封垫。最后,取上一级水压力值作为对应张开量和错位量下密封垫的耐水压力。

另外,在装配力试验装置的沟槽中放置密封垫试件,以 50 mm/min 的速度进行加载,绘制装配力曲线。

2.4 试验结果和分析

在耐水压力试验过程中,水压突破的位置常见于矩形框的平接接头附近。造成这种现象的原因如下:

(1) 与其他部位相比,接头衔接处的平整度差。其他部位采用的挤压型微波硫化的生产工艺^[15],而接头处采用的是硫化接头的工艺。接头硫化后,随着温度的降低,会产生一定的收缩,这就使密封垫的接头在生产过程中的平整度很难控制。国家标准^[16]对此处虽不允许有裂口及“海绵”现象,但也允许有部分凸起产生。

(2) 与其他部位相比,接头衔接处的应力分布不同。其他部位采用内部多孔的横截面而接头采用实芯截面。接头衔接处受压时,二者应力分布的差异,导致此处应力重分布与其他部位不同。应力的重分布降低了水流突破方向的最大表面压应力,导致密封效果的降低。

对于隧道管片接缝密封垫的止水效果,很大程度上取决于接头处的密封。因此,在密封垫的生产中,接头处的处理效果至关重要。首先,生产密封垫接头处应选用弹性模量较其他部位大的橡胶作为原材料,以增加接头处初始的平均应力。同时,应加强生产过程中接框工序的控制管理,尽可能使接头处平整。其次,因接框的硫化工艺不可避免的产生热胀冷缩现象,对此应针对不同配方的橡胶进行试接,记录最佳的硫化时间和硫化温度,为下一步的生产积累经验。最后,在管片拼装中,密封垫表面不要有附着的异物,同时要注意对于密封垫的保护。

在无错位条件下,密封垫张开量与对应耐水压力的试验曲线如图 6 所示。通过试验曲线可以看出,随着张开量的减小,对应的密封垫的耐水压力明显提高。

装配力曲线如图 7 所示,通过试验曲线可以看出,随着竖向力的增加,密封垫的压缩量逐渐减小,对应的压缩刚度逐渐增大。

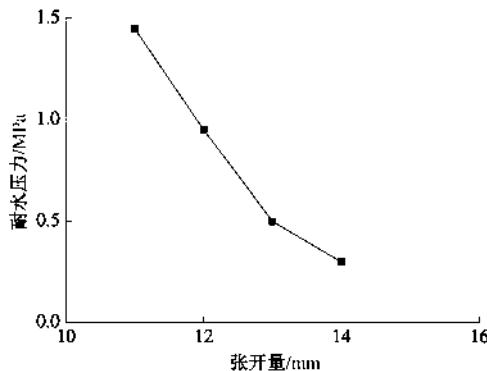


图 6 无错位量下的耐水压力试验曲线

Fig. 6 Curve of water pressure resistance without dislocation

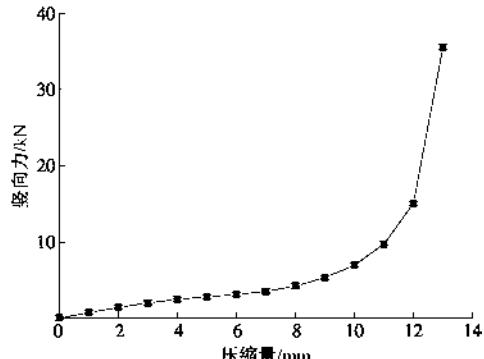


图 7 装配力试验曲线

Fig. 7 Curve of assembly force

将几组相同张开量下的不同错位量对应的最大耐水压力值绘制成曲线, 如图 8 所示。

通过试验数据曲线, 可以得出以下几点结论:

(1) 尽管几组曲线的张开量不同, 但随着错位量的增大, 其耐水压力都产生了下降, 且下降趋势有所减缓。张开量越大, 这种下降趋势越明显。

(2) 相同错位量下的耐水压力, 随着张开量的减小, 耐水压力得到了较大的提升。相同变化量下, 张开量对密封垫防水性能的影响比错位量大。

因此从防水的角度上来讲, 对盾构隧道管片接缝的施工控制应该是以张开量为主, 错位量为辅, 做好盾构的导向控制和姿态调整。同时采取同步注浆和二次补浆等技术措施, 减少盾构隧道的沉降, 特别是差异沉降。

(3) 随着压缩量的增加, 泊松比是变化的^[17]。将结构单元在单向受压时, 横向正应变与轴向正应变的绝对值的比值, 称为等效泊松比。对等效泊松比的影响, 材料的结构因素大于材料本身的性质。随着张开量的减小, 密封垫橡胶材料的泊松比基本不发生变化, 但是由于结构性的孔洞不断被周围材料填充, 坚向变形引起的横向变形逐渐增加, 导致密封垫的等效泊松比增大。将所得装配力试验数据带入式(15)分析可知, 等效泊松比的增加将会引起接触应力的提高。因此随着压缩量的增加, 密封垫的自封作用防水逐渐

增强。

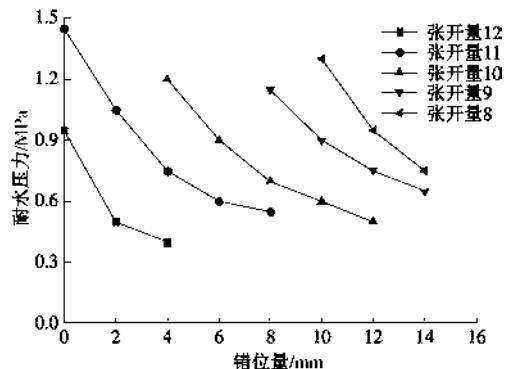


图 8 张开量 - 错位量 - 耐水压力试验曲线

Fig. 8 Curves of opening amount, dislocation and water pressure resistance

3 结论与建议

本文对密封垫的防水机理进行了分析和相关推导, 针对一种常用的管片接缝密封垫开展了耐水压力试验。相关的结论和建议如下:

(1) 密封垫的防水性能由挤压密封阻力和自密封阻力两部分构成。在理想状态下, 盾构接缝的密封防水不仅取决于密封垫自身的接触面积、弹性模量和厚度, 还受到螺栓的有效横截面积、弹性模量和有效夹紧长度的影响。

(2) 在密封垫的生产中, 应加强对接头接框工艺的控制管理, 选用具有合理弹性模量的橡胶进行接头的生产。

(3) 在地铁施工中, 张开量和错位量的控制对密封垫防水性能至关重要, 且张开量对密封垫防水性能的影响较错位量大。因此, 仅从防水角度看, 盾构隧道管片接缝的施工控制应该以张开量为主, 错位量为辅。在做好导向控制和姿态调整的同时, 应采取措施减少隧道的差异沉降。

(4) 随着张开量的减小, 使得密封垫的等效泊松比增大, 增强了其自封作用的防水效果。

参考文献:

- [1] GB 50446—2008 盾构法隧道施工与验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GB 50446—2008 Code for construction and acceptance of shield tunneling method[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 王民. 隧道盾构施工管片橡胶密封垫的材料和结构及产品性能特性[J]. 特种橡胶制品, 2005, 26(1): 42~46. (WANG Min. Material and structure of rubber gasket for shield driven tunnel segment and characteristic of the

- products[J]. Special Purpose Rubber Products, 2005, **26**(1): 42 - 46. (in Chinese))
- [3] 王 湛. 水下盾构隧道弹性密封垫防水失效数值模拟研究[J]. 隧道建设, 2015, **35**(11): 1164 - 1168. (WANG Zhan, Numerical study on waterproof failure mechanism of elastic sealing gasket of underwater shield-bored tunnel[J]. Tunnel Construction, 2015, **35**(11): 1164 - 1168. (in Chinese))
- [4] 周济民, 何 川, 张 增. 铁路隧道管片衬砌承受高水压分界值研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1583 - 1589. (ZHOU Ji-min, HE Chuan, ZHANG Zeng. Boundary value of high hydraulic pressure upon segment lining in railway tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1583 - 1589. (in Chinese))
- [5] 赵运臣, 肖龙鸽, 刘招伟, 等. 武汉长江隧道管片接缝防水密封垫设计与试验研究[J]. 隧道建设, 2008, **28**(5): 570 - 575. (ZHAO Yun-chen, XIAO Long-ge, LIU Zhao-wei, et al. Experiment study and design on the water tight seal for reinforced concrete segment joint of Wuhan Yangtze River Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2008, **28**(5): 570 - 575. (in Chinese))
- [6] 金丰年, 范华林, 郭铁英. 地下工程管片密封橡胶承受高水压作用的力学分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2001, **2**(4): 49 - 52. (JIN Fen-nian, FAN Hua-lin, GUO Tie-ying. Mechanical analysis of waterproof swelling rubber under high water pressure[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, **2**(4): 49 - 52. (in Chinese))
- [7] 刘 印, 张冬梅, 黄宏伟. 基于纵向不均匀沉降的盾构隧道渗漏水机理分析[J]. 铁道工程学报, 2011, **152**(5): 66 - 70. (LIU Yin, ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei. Analysis of mechanism of water leakage induced by longitudinal uneven settlement of shield tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, **152**(2): 66 - 70. (in Chinese))
- [8] FAISAL I S, EDWARD J C, STANLEY L P. Concrete segment tunnel lining sealant performance under earthquake loading[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2012, **31**: 51 - 60.
- [9] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (XU Zhi-lun. A concise course in elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))
- [10] MONTGOMERY T S, WILLIAM J M. Introduction to polymer viscoelasticity[M]. New York: A John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [11] 雷震宇. 盾构隧道管片橡胶密封垫的优化设计方法[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(4): 770 - 774. (LEI Zhen-yu. An optimal design approach for the rubber sealing gasket in shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(4): 770 - 774. (in Chinese))
- [12] GB 50108—2008 地下工程防水技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GB 50108—2008 Technical code for waterproofing of underground engineering works[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [13] CECS 370 2014 隧道工程防水技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. (CECS 370 2014 Technical code for tunnel engineering waterproofing[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese))
- [14] 何 川, 曾东洋. 盾构隧道结构设计及施工对环境的影响[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007. (HE Chuan, ZENG Dong-yang. The structure design of shield tunnel and the impact of construction on environment[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007. (in Chinese))
- [15] 朱祖熹, 陆 明, 柳 献. 隧道工程防水设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (ZHU Zu-xi, LU Ming, LIU Xian. Waterproof design and construction of tunnel engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [16] GB 18173.4—2010 高分子防水材料 第4部分: 盾构法隧道管片用橡胶密封垫[S]. 2010. (GB 18173.4—2010 Polymer water-proof materials—part 4: rubber gasket for shield-driven tunnel[S]. 2010. (in Chinese))
- [17] FAISAL S, EDWARD C, STANLEY P. Sealant behavior of gasketed-segmental concrete tunnel lining[C]// 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Thessaloniki-Greece. Greece, 2007: 1636 - 1648.