

高拱坝坝面防渗涂层数值模拟研究

李晓娜¹, 张昕¹, 李同春^{2,3}, 齐慧君³, 何金文⁴

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安, 710048; 2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心
江苏 南京 210098; 3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 三峡大学, 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 聚脲防渗材料在大型水利水电工程中应用十分广泛, 在工程不失防渗功能情况下, 选择合理的铺设厚度及铺设方法对节省工程投资具有重要的现实意义。通过建立混凝土块体与聚脲接触模型, 采用 Ogden 材料对聚脲防渗材料进行模拟, 运用 ADINA 软件模拟涂层厚度、垫层宽度对聚脲应力、变形特性的影响进行参数化分析。研究结果表明: 防渗材料最大正应力和最大厚度改变量与裂缝的开展、水深、涂层厚度及垫层宽度等相关, 且垫层宽度对最大正应力和最大厚度改变量的影响较大。

关键词: 聚脲防渗材料; 坝面防渗涂层; 涂层厚度; 垫层宽度; Ogden 材料; 接触模型; 高拱坝
中图分类号: TV441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2017)05-0192-08

Study on numerical simulation of high arch dam surface anti-seepage coating

LI Xiaona¹, ZHANG Xin¹, LI Tongchun^{2,3}, QI Huijun³, HE Jinwen⁴

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4 College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Polyurea anti-seepage materials are widely used in large water conservancy and hydropower project. Under the condition of seepage control in the project, it is of great practical significance to select rational laying thickness and laying method for saving project investment. A contact model is established between concrete blocks and polyurea anti-seepage materials, and Ogden material is used to simulate the polyurea anti-seepage materials, and ADINA commercial software is used to analyze the influence that the coating thickness and cushion layer width make on the Polyurea stress and the deformation characteristics. The research result shows that the maximum stress and the maximum thickness changes of anti-seepage materials are related to the opening degree, water depth, coating layer thickness, and cushion layer width, and cushion layer width has a great influence on the maximum stress and the maximum thickness changes.

Key words: polyurea seepage control material; dam surface anti-seepage coating; coating layer thickness; cushion layer width; Ogden material; contact model; high arch dam

1 研究背景

地震作用下, 拱坝坝踵区应力比较复杂, 且坝体上游面可能出现高应力区, 有开裂的危险。为了防止因上游坝面出现裂缝而导致水力劈裂的发生, 有必要在高拱坝上游坝面铺设防渗涂层。国内外已有

多座混凝土坝上游面增设防渗层的实例^[1-5]。

中国水利水电科学研究院针对 300m 级拱坝喷涂聚脲防渗建立了仿真模型试验^[6], 采用直接喷涂和加 GB 板两种防渗方案, 对聚脲防渗材料性能进行了研究, 并提出当聚脲厚度与缝宽之比大于 0.57 时, 聚脲可以承受 3 MPa 的水压力不渗漏; 喷涂聚脲

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2017-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609200, 51409205)

作者简介: 李晓娜(1983-), 女, 河北衡水人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为水工结构。

技术可以满足大面积快速施工的要求,聚脲与GB板的配合使用,可以克服混凝土开裂而聚脲变薄的缺陷,提高聚脲的防渗效果的结论。贾金生等^[7]在聚脲涂层的耐水压击穿性能方面,通过运用仿真试验模型验证了300 m水头下4 mm厚聚脲防渗材料可以满足要求,且可以满足裂缝从未张开到长期张开8 mm的防渗要求。国内在聚脲的基本力学性能方面也进行了研究,得到聚脲涂层的拉伸强度大于20 MPa,断裂伸长率大于350%,撕裂强度大于50%^[8]。中国水利水电科学研究院在聚脲防渗材料和混凝土之间的附着力方面进行了试验研究^[9],得到喷涂潮湿界面剂情况下,聚脲涂料运行3年后,黏结强度基本没有变化。莫志财等^[10]通过对官地大坝溢流面的聚脲涂层试验研究表明,涂层平均厚度为2.9 mm,附着力平均值为2.83 MPa。陈亮等^[11]通过试验研究表明,底层聚脲材料与混凝土的黏结强度可达5.36 MPa。

大连理工大学对大坝上游坝面防渗材料进行了调研与性能比较,对聚脲弹性体的技术发展史、施工设备、施工方式及要求以及聚脲材料的施工实例等进行了总结与归纳;杨洁^[12]对高拱坝坝踵喷涂聚脲防渗层进行了拉伸、与混凝土粘结强度等试验和对防渗层耐水压击穿运用Ogden超弹性材料本构模型,采用有限分析软件进行了数值模拟,并得出了以厚宽比作为聚脲喷涂厚度控制量是不可取的,并得到了涂层易破坏区域等有意义的结论。李炳奇等^[13]对聚脲基防渗涂层厚度对剥离临界反向压力的影响进行了分析,并考虑了水压力和伸缩缝扩展位移工况下,涂层厚度、涂层弹性模量和内聚力单元切向黏结强度对涂层剥离破坏长度的影响。

由上面的研究成果可以看出,国内目前对高拱坝坝面聚脲防渗涂层的数值研究较少,本文对高拱坝坝面防渗涂层应力变形特性进行了初步研究,为以后坝面防渗涂层设计提供可行的参考依据。

2 模拟方法

2.1 聚脲模拟方法

聚脲是由异氰酸酯组份与氨基化合物组份反应生成的一种弹性体物质,属于高聚物,其物理性质与橡胶等超弹性体类似,所以在模拟时选用橡胶本构模型来模拟。

连续介质力学理论认为橡胶是各向同性材料,所以其本构用单位体积的应变能来表征。Ogden材料模型^[14-15]基于如下表达式:

$$W_D = \sum_{n=1}^9 \left[\frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \right] \quad (1)$$

式中: μ_n 和 α_n 是Ogden模型中拟合的参数; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为3个主方向上的伸长率。在平面应变、轴对称和三维分析中,Ogden材料模型是几乎不可压缩的,采用体积应变能密度来表示:

$$W_v = \frac{1}{2} \kappa (\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 - 1)^2 = \frac{1}{2} \kappa (J_3 - 1)^2 \quad (2)$$

式中: κ 为体积模量。

Ogden材料描述有19个参数, $\mu_n, \alpha_n (n=1, \dots, 9)$ 和体积模量。选择 $\mu_n, \alpha_n \neq 0, n=1, 2, 3$ 作为标准的3参数Ogden材料描述。

小应变剪切模量和小应变杨氏模量可以写成(假设 $\kappa = \infty$):

$$G = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^9 \mu_n \alpha_n \quad (3)$$

$$E = \frac{3}{2} \sum_{n=1}^9 \mu_n \alpha_n \quad (4)$$

这些参数应该都大于0。

表1 聚脲的性能参数^[16]

强度指标	水科院	青岛 佳联	东方 雨虹	广州 秀铂	国电
拉伸强度/MPa	20	15	18	16	27.5
断裂强度/%	400	600	450	400	600
黏结强度/MPa	2	3.5	3	2.5	
抗渗强度/MPa	3	3	3		2

表1给出了不同单位得到的聚脲的性能参数,由表1可得聚脲材料黏结强度最小为2 MPa,为了安全起见,在计算中涂层与坝体混凝土的黏结强度取为2 MPa进行计算。

聚脲材料在常温下具有非常优异的柔韧性、耐磨性、高黏接性能,本体拉伸强度、撕裂强度高。

橡胶材料破坏的本质是材料的微观和细观结构的不均质性和缺陷造成不同程度的损伤,包括微观和细观损伤。这些损伤在力学过程中逐渐发展,最终形成宏观开裂或材料破坏。实际的断裂问题可以简化成3种类型,即张开型、滑开型和撕开型;也可能是上述的混合。应力分析法认为在垂直于裂缝的外力作用下,裂缝端部应力达到最大值,并引起裂缝进一步发展。所以可以采用最大正应力是否超标作为聚脲涂层是否破坏的判断标准。

2.2 接触模拟方法

本文采用ADINA软件对聚脲材料进行模拟。

坝体混凝土和聚脲材料的接触在 ADINA 中采用设置库仑摩擦系数来模拟。ADINA 提供了自定义摩擦系数的方式,这样可以很方便且准确地模拟材料之间的接触。这里采用自定义摩擦系数的方式进行接触模拟,取 $I = 2$,即黏结强度。计算该摩擦系数采用的公式为 $\mu = A_1(1 - \exp(-A_2 T_n))/T_n$ 。式中 A_1 、 A_2 为自定义摩擦系数公式中常参数^[17],取 $A_1 = 1 \times 10^6$, $A_2 = 10$; T_n 为接触力, N。确保在有正压力作用下摩擦力一直接近于黏结强度,模拟粘结的情况。

3 有限元模型

由于聚脲尺寸与整体模型尺寸相差很大,若采取整体模型计算,对聚脲防渗材料模拟的精确度降低。而对于混凝土局部变形很小,混凝土与聚脲刚度(即曲线刚开始的切线模量)相差很大,所以可以认为局部混凝土处于线弹性状态。故不需要进行整体计算。

为了能够使局部模型准确地反映实际情况,建立包含防渗材料在内的典型部位裂缝和横缝局部模型,需要进行局部计算的坝体混凝土块为 $1000 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,根据工程需要涂层厚度分别取为 2、3、4、5、6、7 mm。考虑到可能需要加设垫层,在本计算中,垫层假定为在裂缝两侧对称分布,使用一侧的宽度来标记垫层宽度。本设计中垫层模型在裂缝

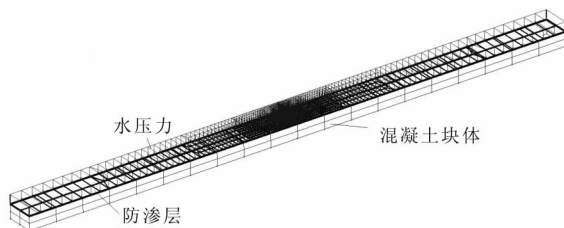


图1 坝体混凝土块体与聚脲有限元模型

4.2 荷载参数

根据工程资料,该水库正常蓄水位 $1\ 130.00 \text{ m}$,大坝上游坝面防渗材料的主要喷涂范围在 $1\ 123.0 \text{ m}$ 以下,分为 $1\ 033.0 \text{ m}$ 高程以上区域、 $1\ 033 \text{ m}$ 高程以下非坝踵区域和坝踵区 3 个区域, $1\ 033.0 \text{ m}$ 高程以上区域要求材料在 100 m 水头防渗条件下有较好的拉伸性能和抗裂性能; $1\ 033.0 \text{ m}$ 高程以下非坝踵区的喷涂区域需要防渗材料在 200 m 水头作用下有较好的抗裂性能和一定的拉伸性能;坝踵区是大坝容易发生开裂损伤的部位,因此该区域的防渗材料不要求有很好的抗裂性能,但是需要有很好的拉伸性能和防渗性能。本文拟分别考虑不同水头作用

两侧分别为 10 和 20 mm 。图 1 给出了坝体混凝土块和聚脲的有限元模型。

该模型共计 $3\ 200$ 个单元, $3\ 760$ 个节点。由于混凝土和涂层两者弹性模量相差很大,所以混凝土按照刚体模拟,在计算中不计算混凝土实体单元。涂层采用 shell 单元模拟。聚脲和混凝土之间接触面为平面,受力情况很简单,所以采用利用黏聚力和摩擦滑移就可以模拟两者的接触状态。两者之间黏结滑移采用 ADINA 中的接触方式考虑,参数参照表 1 中取较小值。混凝土远离涂层的边界采用固定约束,约束 x 、 y 、 z 3 个方向的位移。在涂层表面上施加面荷载来模拟水压力。

4 计算参数

4.1 材料参数

聚脲材料在计算中采用其断裂伸长率为 400% ,拉断应力为 20 MPa ,根据设计单位提供的试验数据拟合出符合曲线 D 特征的应力伸长关系图,如图 2 所示。

聚脲材料属于超弹性材料。对于超弹性材料的本构模型一般不采用弹性模量、泊松比来描述。计算中通常会用主方向的伸长率与力的曲线来替代。在本次计算中,由于聚脲涂层厚度较小,重力作用不明显,所以密度忽略不计。

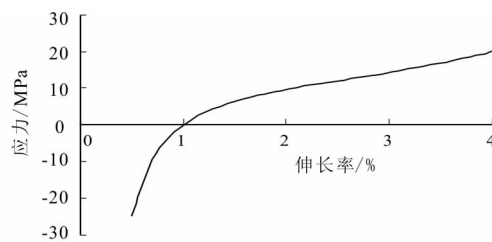


图2 拟合聚脲应力伸长率关系曲线

下,研究防渗涂层的应力和变形特性,坝前水头高度分别取为 20 、 60 、 100 、 150 、 200 m 。

5 计算过程

对确定的防渗涂层厚度(2 、 3 、 4 、 5 、 6 、 7 mm),在不同的水压力作用下(水头分别为 20 、 60 、 100 、 150 、 200 m),调整裂缝或横缝开度(根据工程实际可能的裂缝,选取 2 、 3 、 4 、 5 、 6 、 7 、 8 、 10 mm),可能的垫层宽度(10 、 20 mm),计算得到不同组合情况防渗涂层的最大正应力、最大厚度改变量等。绘图得到对于确定的防渗涂层厚度,随着水压力的增大,对于不同的裂缝或横缝开度以及可能宽度的垫层,防渗材料

的应力、变形特性曲线。同时根据分析得到不同水深,不同开度相应的优化方案。

在裂缝张开的过程中,裂缝周围的涂层与混凝土接触开始失效,接触张开形式如图3所示。

可以看出当涂层受到的拉力超过聚脲与混凝土的黏聚力后,涂层与混凝土之间被拉脱,接触失效。拉脱的涂层可以视为橡胶的自由拉伸。

6 聚脲应力与变形特性影响分析

图4~5给出了涂层厚度3、4 mm时防渗涂层在200 m水压作用下竖向位移云图。

图6~8给出了涂层厚度为3 mm,垫层宽度分别为0、10、20 mm聚脲最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线;图9~11给出了涂层厚度为4 mm,垫层宽度分别为0、10、20 mm聚脲最大正应力

力和最大厚度改变量随水深变化曲线;图12~14给出了涂层厚度为5 mm,垫层宽度分别为0、10、20 mm聚脲最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线;图15~17给出了涂层厚度为6 mm,垫层宽度分别为0、10、20 mm聚脲最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线。

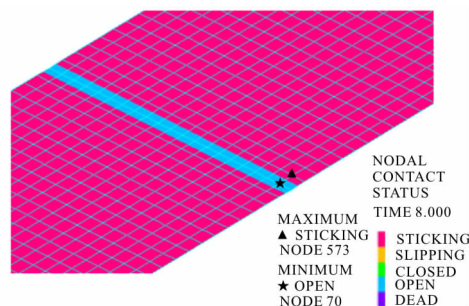


图3 涂层与混凝土接触张开示意图

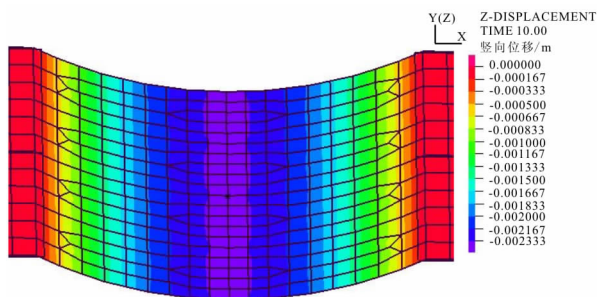


图4 涂层厚度3 mm,垫层宽度0 竖向位移云图

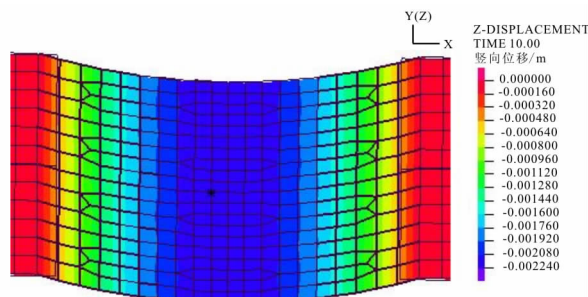
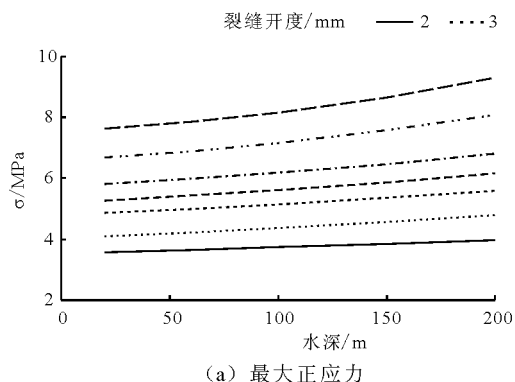
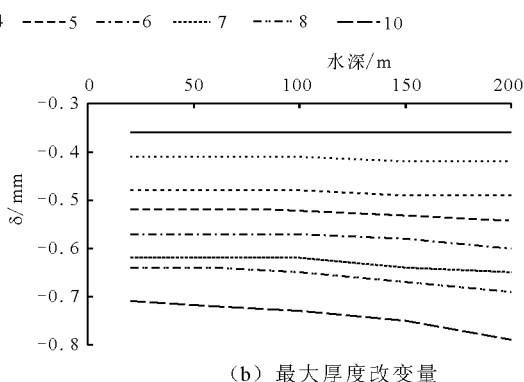


图5 涂层厚度4 mm,垫层宽度0 竖向位移云图

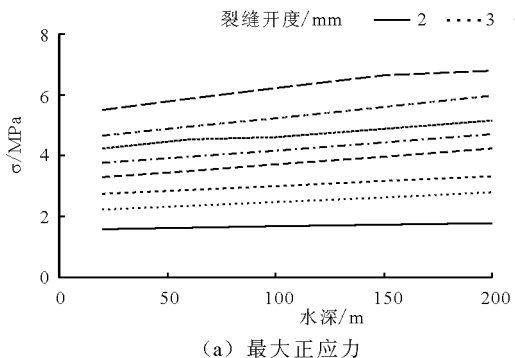


(a) 最大正应力

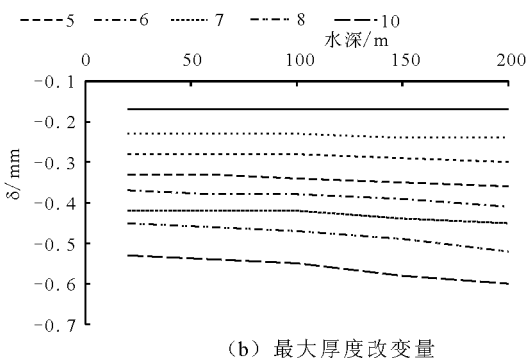


(b) 最大厚度改变量

图6 涂层厚度3 mm,垫层宽度0,最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线



(a) 最大正应力



(b) 最大厚度改变量

图7 涂层厚度3 mm,垫层宽度10 mm,最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

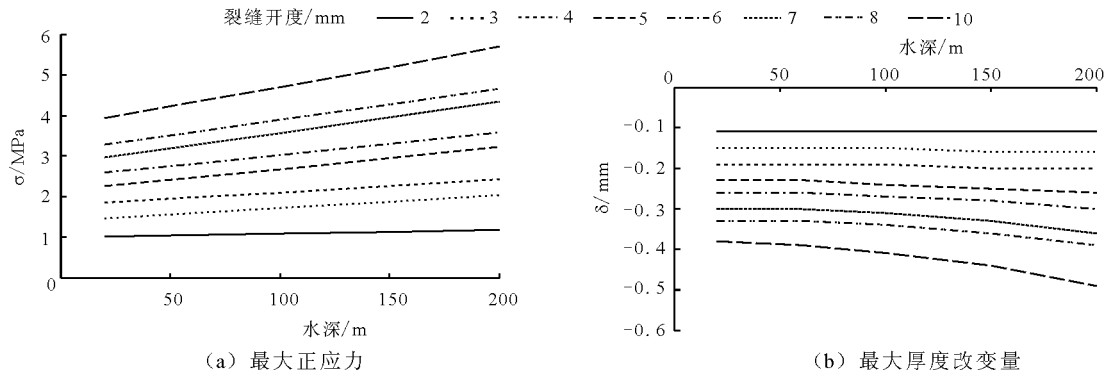


图8 涂层厚度 3 mm, 垫层宽度 20 mm, 最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

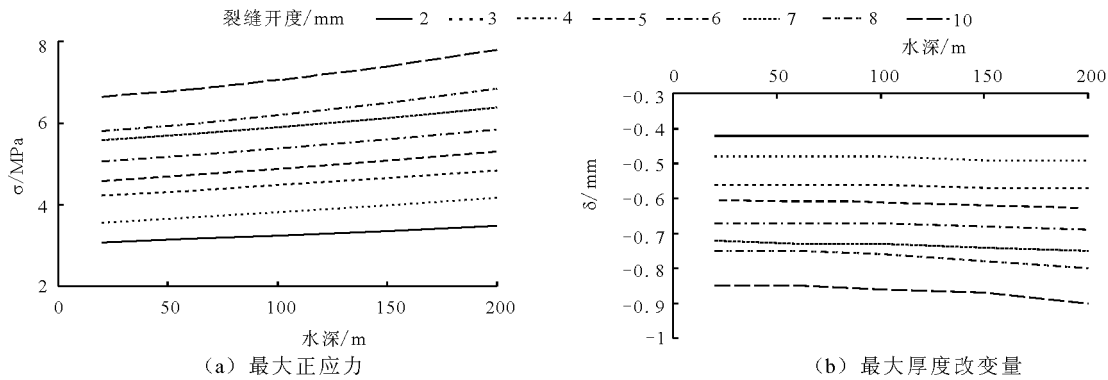


图9 涂层厚度 4 mm, 垫层宽度 0, 最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

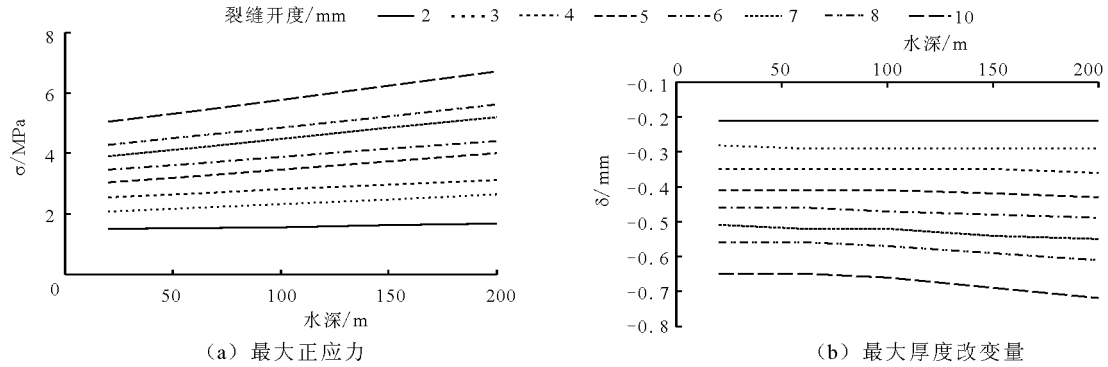


图10 涂层厚度 4 mm, 垫层宽度 10 mm, 最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

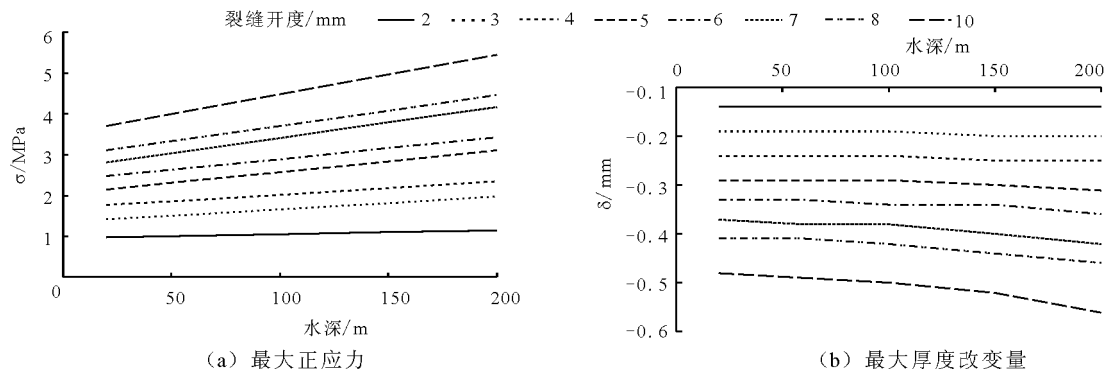


图11 涂层厚度 4 mm, 垫层宽度 20 mm, 最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

对比图6到图17,应力和变形特性随水深和裂缝开度的变化都呈现一定的规律。由图6(a),图7(a),图8(a)等图可以看出在确定的涂层厚度情况下,对于不同的裂缝或横缝开度,最大正应力随水压力的增大而增大;同时可以看出对于确定的涂层厚度,在相同的水压力下,最大正应力随着裂缝开度的增大而增大。

由图9(b)、10(b)和11(b)等图中可以看出垫层对涂层最大正应力的影响,同种情况下,有垫层比无垫层时最大正应力要小,而且垫层越宽,涂层中的最大正应力越小。

由图6(a)、9(a)和12(a)等图中可以看出涂层厚度对最大正应力的影响,同种情况下,涂层厚度越厚对应的最大正应力越小。

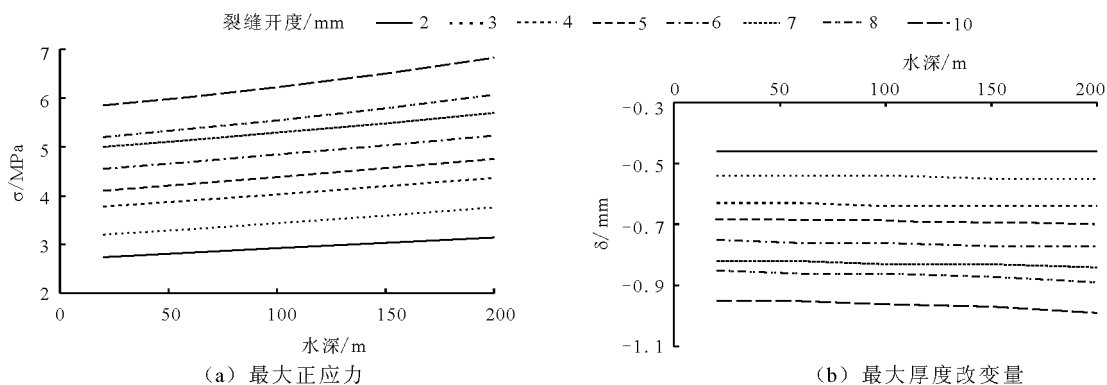


图12 涂层厚度5 mm,垫层宽度0,最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

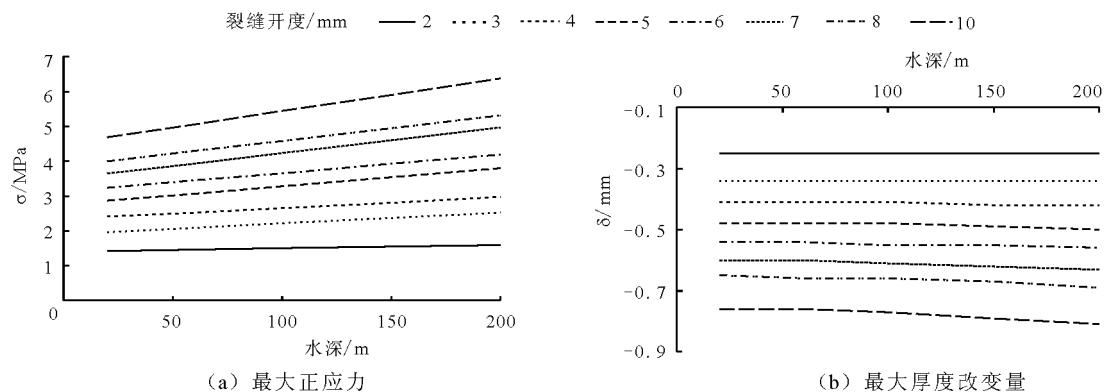


图13 涂层厚度5 mm,垫层宽度10 mm,最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

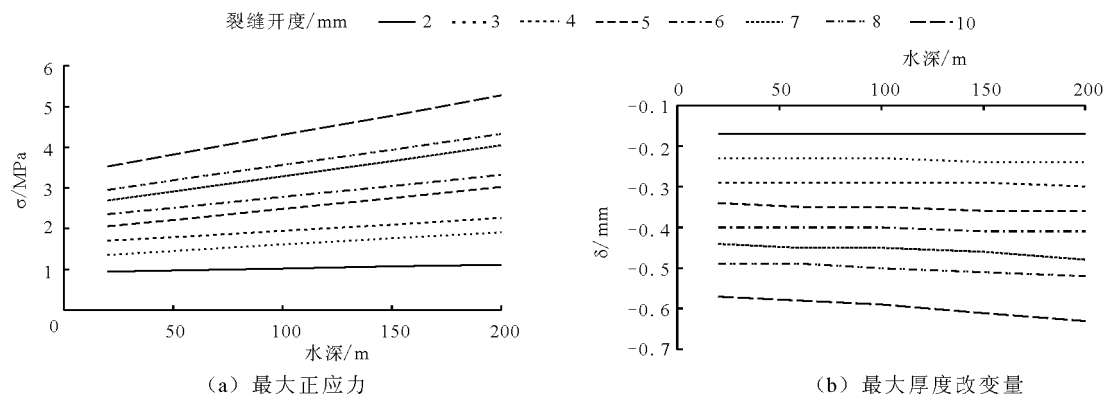


图14 涂层厚度5 mm,垫层宽度20 mm,最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

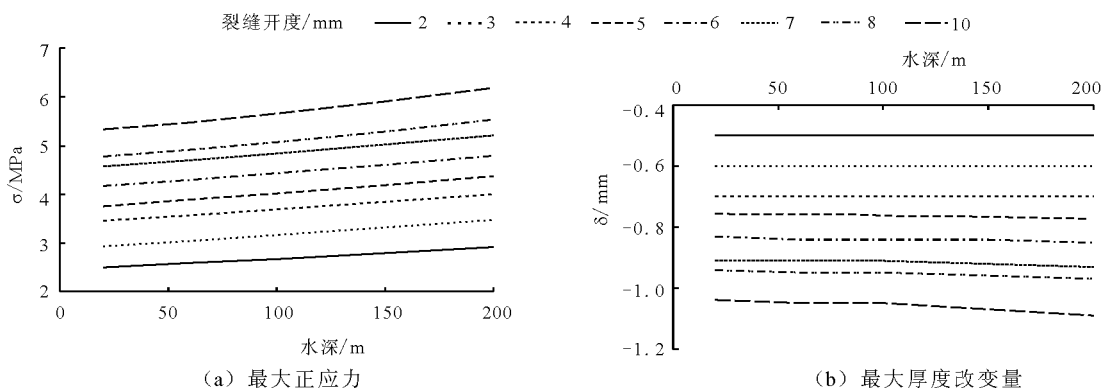


图 15 涂层厚度 6 mm, 垫层宽度 0, 最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

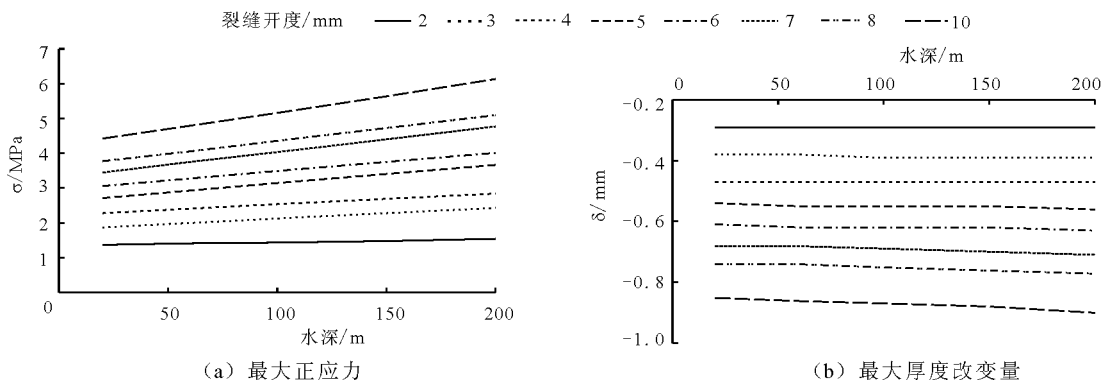


图 16 涂层厚度 6 mm, 垫层宽度 10 mm, 最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

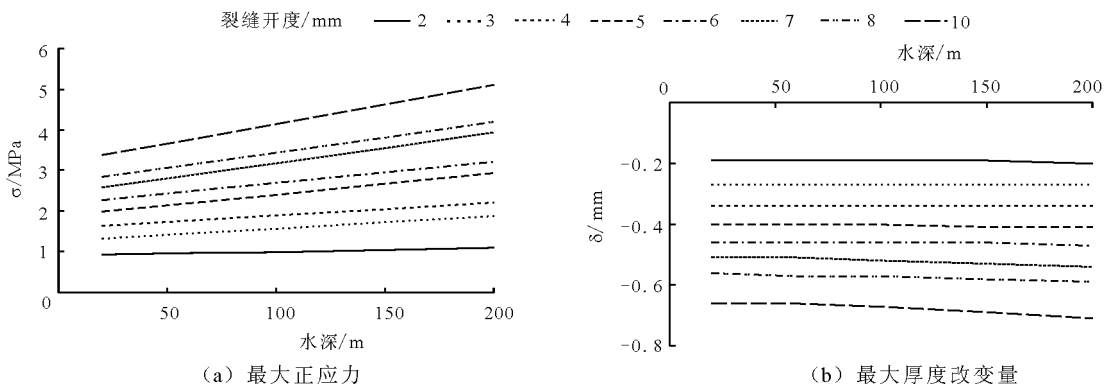


图 17 涂层厚度 6 mm, 垫层宽度 20 mm, 最大正应力和最大厚度改变量随水深变化曲线

由上图可知,水深、涂层厚度、垫层宽度、裂缝开度对最大厚度改变量的影响和对最大正应力的影响趋势基本相同。

根据计算结果和实验所得参数,选取最大正应力和最终涂层厚度作为涂层厚度和垫层宽度组合是否符合标准,对不同的水深和裂缝开度组合,提出以下优化方案,如表 2 所示。

表 2 给出了指定水深和缝开度推荐的涂层厚度

和垫层宽度组合。对于给定的水深以及裂缝开度,可以从表中查出需要的涂层厚度以及是否需要铺设垫层。从表 2 中可以看出,3 mm 厚的涂层在缝开度小于或等于 6 mm 时适应范围较广。但是对于较大的裂缝开度在高水头作用下时,需要加厚涂层,或者铺设垫层。在裂缝开度达到 10 mm、水深在 150 ~ 200 m 时,要选用 5 或 6 mm 厚的涂层或者铺设垫层。

表 2 推荐的涂层厚度和垫层宽度组合

裂缝开度/mm	水深/m				
	20	60	100	150	200
2	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>
3	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>
4	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>
5	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>
6	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	4 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>
7	3 <i>T</i>	3 <i>T</i>	4 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	4 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	4 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>
8	4 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	4 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	4 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	4 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	5 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>
10	4 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	5 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	5 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	5 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 10 <i>D</i>	6 <i>T</i> 或 3 <i>T</i> + 20 <i>D</i> 或 5 <i>T</i> + 10 <i>D</i>

注:表中 *T* 表示涂层厚度, *D* 表示垫层宽度,单位均为 mm。

7 结 论

通过对最大正应力和最大厚度改变量进行分析,主要取得如下结论:

(1)固定其他变量的情况下,最大正应力与裂缝开度、水深正相关,与涂层厚度、垫层宽度负相关;且垫层对最大正应力的影响较大;最大厚度改变量和最大正应力呈现相同的规律。

(2)对可能的水深和裂缝开度,为满足最大正应力和最终厚度要求,可以尽可能地增加涂层厚度和垫层宽度,但从施工整体性方面讲,垫层宽度越宽会影响坝体整体性而且增加了施工难度,从工程投资角度分析,增加涂层厚度将会增加防渗材料的工程量和投资。

(3)考虑到某拱坝的实际裂缝开度情况,参考表 2 中推荐的涂层厚度和垫层宽度组合方案,得到:1033.00 m 高程以上非横缝部分采用单独 3mm 厚的涂层;1033.00 m 高程以上横缝部分,横缝部位两侧各 1 m 宽范围内采用单独 4 mm 厚的涂层或者 3 mm 厚的涂层和 10 mm 宽的垫层组合;1033.00 m 高程以下非坝踵范围,横缝部位以及非横缝部位均采用单独 3 mm 厚的涂层;坝踵区域采用单独 3 mm 厚的涂层。

本文为大坝防渗材料的铺设厚度及铺设方法(是否铺设垫层)的研究提供了思路,对节省工程投资具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] 林 赛,杜振坤,张宝琼. 喷涂聚脲技术在犁地坪水库混凝土面板面板裂缝处理中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2015,13(1):68-73.

[2] 李 伟,艾九红. 喷涂聚脲防渗材料在山口岩水库大坝上的防渗应用[J]. 江西水利科技,2014,40(1):31-33+51.

[3] 樊 锐. 喷涂聚脲在混凝土大坝坝面破损修复中的应用[J/OL]. 西北水电,2017,(1):43-46. [2016-12-06]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1260.TV.20161206.1430.016.html>.

[4] 刘 锐. 聚脲涂层在大坝混凝土面板防渗加固中的应用[J]. 人民长江,2016,47(4):47-49.

[5] 邝亚力,韩 炜,景 锋,等. 新型裂缝修补材料在金沙江溪洛渡溢洪道中的应用研究[J]. 长江科学院院报,2015,32(7):119-121.

[6] 孙志恒,喻建清. 300m 级拱坝喷涂聚脲防渗仿真模型试验及应用[J]. 水利水电科技进展,2009,29(6):49-53.

[7] 贾金生,袁玉兰,郑瑾莹,等. 中国水库大坝统计和技术进展及关注的问题简论[J]. 水力发电,2010(1):6-10.

[8] 黄微波,刘旭东,马学强,等. 喷涂纯聚脲技术在水利工程防护中的应用与展望[J]. 现代涂料与涂装,2011,14(9):20-24+40.

[9] 孙志恒,夏世法,付颖千,等. 单组分聚脲在水利水电工程中的应用[J]. 水利水电技术,2009,40(1):71-72+80.

[10] 莫志财,孙岩丽. 官地水电站大坝溢流表面聚脲抗冲刷磨弹性体涂层施工工艺试验研究[J]. 西北水电,2011(6):34-39.

[11] 陈 亮,韩 炜,李 珍,等. 聚脲基坝面保护材料的制备及其施工工艺研究[J]. 长江科学院院报,2011,28(3):63-67+71.

[12] 杨 洁. 高拱坝坝踵喷涂聚脲防渗层的性能与应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.

[13] 李炳奇,张宇弛,刘小楠,等. 伸缩缝防渗结构聚脲基涂层剥离破坏研究[J]. 水利学报,2017,48(1):70-77.

[14] 刘礼华,王 蒂,欧珠光,等. 基于 Ogden 公式的充压伸缩式水封非线性计算研究[J]. 固体力学学报,2011,32(1):102-107.

[15] Treloar L R G. The Physics of Rubber Elasticity[M]. Oxford: Clarendon Press, 2005.

[16] 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院. 高拱坝抗震分析与抗震工程措施研究[R]. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院,长沙:2012.

[17] ADINA R&D, Inc. Theory and modeling guide volume I: ANINA[Z]. 2010.