

坝后式水电站厂房不同支座方案减震对比研究

景月岭, 王洋洋

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘 要:通过建立某坝后式水电站主体结构的三维有限元模型, 包括大坝、基础、坝后式厂房、厂房顶网架和支座简化模型, 对比分析了在地震作用下带锚栓的板式橡胶支座、铅芯橡胶支座和铰支座 3 个方案对厂房上部结构的减震影响。研究表明: 铰支座方案自振周期最短, 支座节点的地震响应最大, 其中厂房上、下游侧节点对最大层间位移比铅芯橡胶支座方案分别高 31.74% 和 44.5%; 铅芯橡胶支座方案由于具有较好的吸能效果, 在地震作用下其本身适应剪切变形能力强, 能很好地释放支座处支反力, 厂房上、下游排架柱的第一主应力也是 3 个方案中最小的。由此可得, 坝后式水电站厂房铅芯橡胶支座为推荐的支座选型方案。

关键词:带锚栓的板式橡胶支座; 铅芯橡胶支座; 铰支座; 坝后式厂房; 有限元法; 减震影响

中图分类号:TV31

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2018)11-0112-05

1 研究背景

水电站厂房是水电站发挥整体功能的核心部位, 在偶遇地震下的响应值得重点关注。近年来, 国内对水电站厂房上部空间结构的研究取得了很大进展, 其中厂房减震是最近的一个研究热点。郝军刚等^[1]通过研究, 发现罕遇地震下水电站厂房顶部的网架存在垮塌风险, 但其余结构的破坏处于可修水平; 黑灿等^[2]认为在振动条件下厂房顶部网架只对厂房上部结构影响较大, 若需研究发电机层以下部位, 可不考虑网架的影响; 霍学平等^[3]认为厂房上部结构采用剪力墙后对抗震更为有效; 邹磊堂^[4]详细讨论了地震作用下龙开口水电站厂房不同上部结构形式的强度和刚度。

在坝后式水电站厂房中, 排架方案是普遍采用的一种结构形式。从整体结构来看, 厂房上、下游排架柱相对于坝体和厂房下部结构而言显得单薄, 地震作用下会产生鞭梢效应, 即其位移应力响应会被放大。因此, 对水电站厂房排架柱的抗震研究引起了越来越多学者的注意。于瑞艳等^[5]认为排架柱设计要充分考虑竖向地震的作用; 程恒等^[6]研究了钢管混凝土排架的抗震效果; 张汉云等^[7]对水电站厂房的排架柱进行了鞭梢效应的理论和模拟分析, 认为在厂房上、下部结构质量和刚度突变处的二次

放大效应是导致排架柱鞭梢效应的根源。因此要达到水电站厂房大震不倒、中震可修、小震不坏的目标, 必须充分考虑上、下游立柱与空间网架的连接形式。支座作为连接二者的媒介, 给厂房上部结构带来的减震效果值得重点研究。郭鸿儒^[8]建立了厂房和基础模型, 通过对比叠层橡胶支座和铰支座探讨了厂房关键部位的位移、应力和内力, 但没有考虑厂坝联合作用和双向地震波的作用给结构带来的影响。本文以某坝后式水电站厂房为例, 充分考虑了厂坝整体模型、3 种常用支座和双向地震波的作用对坝后式厂房排架柱的减震影响。

2 支座简化的力学模型

在地震作用下, 支座从力学角度考虑主要承担竖向和水平向往复荷载, 其刚度是一个重要指标, 由于阻尼是耗能减震的源头, 故阻尼系数的取值也很关键。本文采用 ANSYS 单元库中的 2 种弹簧单元和 1 种杆单元对 3 种支座进行模拟, 对比分析了铰支座、带锚栓的板式橡胶支座和铅芯橡胶支座方案下的坝后式厂房上部结构的减震效果, 以下分别说明 3 种计算方案中用到的支座的参数取值。

2.1 铰支座方案

各类支座形式都有优点和缺点, 对于铰支座来说, 在其竖向荷载和温度应力等的影响下, 其正常使

收稿日期: 2017-03-07; 修回日期: 2017-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409074); 中国博士后科学基金项目(2014M550341); 中央高校基本科研业务费专项(JZ2014HGCQC0118, 2013HGBH0052); 合肥工业大学博士学位专项(JZ2014HGBZ0022)

作者简介: 景月岭(1983-) 男, 河南兰考人, 讲师, 博士, 主要从事水工结构抗震研究。E-mail: jing@hfut.edu.cn

通信作者: 王洋洋(1994-) 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要从事水工结构抗震研究。E-mail: 846225854@qq.com

用阶段支座水平支反力往往较大,长期运行容易导致金属材料疲劳破坏。但是其优点是竖向和水平向承载力大,受力明确。铰支座连接水电站厂房顶的空间网架和下部结构时,简化为水平向和竖向支撑的 2 个杆单元,由于现实中刚性铰支座有转动自由度,但几乎无平移自由度,故在 ANSYS 平台中将铰支座力学模型的水平向和竖向刚度设为无穷大。

2.2 铅芯橡胶支座方案

铅芯橡胶支座中间的铅棒在完全填充的情况下具有良好的耗能效果,铅本身的屈服应力较低,滞回曲线丰满,铅芯橡胶支座的荷载-变形曲线可以用双线性表示^[9]。由于铅芯橡胶支座的廉价性和实用性,它在日本、新西兰等国得到了很好的应用。铅芯橡胶支座同样承担竖向和水平向剪力,竖向用 COMBINE14 单元模拟,刚度经荷载计算取为 $1.458 \times 10^9 \text{ N/m}$,水平向采用 COMBINE40 单元模拟,其中水平剪切刚度屈服前后的参数采自广东某支座公司。经计算,屈服前水平刚度为 $3.932 \times 10^6 \text{ N/m}$,屈服后水平刚度为 $7.15 \times 10^5 \text{ N/m}$,屈服力为 41.9 kN,阻尼为 $8\ 164.5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

2.3 带锚栓的板式橡胶支座方案

带锚栓的板式橡胶支座具有适应屋盖变形、传递水平力明确的优点,并且具有一定的阻尼,可以降低或延缓结构的变形。其橡胶垫和锚栓之间留有一定的水平剪切位移空间,静荷载下其水平剪切刚度与铅芯橡胶支座接近,当遇到偶遇荷载如风荷载或地震作用时,水平剪切位移空间闭合,水平剪切刚度由于锚栓的介入而增大。根据肖建春等^[10]的研究成果,经计算,水平剪切刚度的值在锚栓介入后为 $3.6 \times 10^9 \text{ N/m}$,竖向刚度为 $1.04 \times 10^{10} \text{ N/m}$,阻尼为 $3.6 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

3 有限元模型及自振周期分析

本文选取某坝后式水电站的一个中间标准坝段,建立了整体有限元模型,模型包括了大坝、厂房、空间网架和基础,如图 1 所示。整体坐标系选取 x 向为顺河向, y 向为竖直向, z 向为横河向。由于该坝后式水电站位于强震发生带之间,故地震活动相对较弱,地震烈度对厂坝结构的影响主要来自外围强震。地震作用下结构的动力响应计算采用时程分析法,厂坝地震设计烈度取为 8 度。按《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)^[11]中的规定选取本文采用的规范谱,地震作用下材料

的动态弹性模量取为静弹性模量的 1.5 倍,振型阻尼比系数取为 0.05。已知场地 50 a 超越概率 5% 的地震水平加速度峰值为 $0.24g$,考虑到目前在结构抗震设计中核算截面强度时采用的设计地震系数都为设计烈度对应值的 35%,即为 $0.084g$ 。由于重力坝及其坝后式厂房沿横河向的刚度较大,本文计算时仅在顺河向和竖向施加地震作用,并且在整体模型的横河向边界施加固定约束,不考虑相邻坝段横缝的动态非线性接触。具体的人工波时程信息如图 2 所示,图 2 中 x 向的输入地震波加速度峰值为 $0.084g$, y 向的输入地震波加速度峰值为 $0.056g$ 。

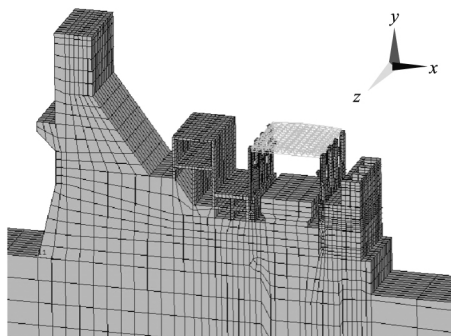


图 1 厂坝整体模型

Fig. 1 Holistic model of dam and powerhouse

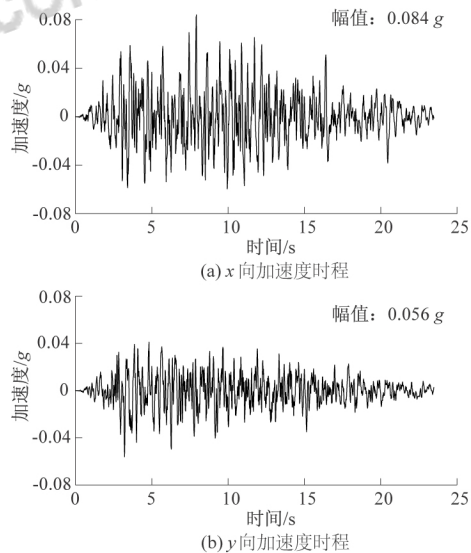


图 2 地震波加速度时程

Fig. 2 Time history of acceleration of seismic wave

按不同的支座类型构成 3 个不同的有限元模型,经模态分析得到 3 种模型结构前 10 阶的自振周期,如表 1 所示。由表 1 得:常用的铰支座第 1 阶振型自振周期为 0.627 7 s;若选用带锚栓的板式橡胶支座,则第 1 阶自振周期延长至 0.651 5 s;若选用水平剪切刚度更小的铅芯橡胶支座,则第 1 阶自振周期延长至 0.671 1 s。说明选用较柔的支座能延长结构的自振周期,在地震作用下对结构起到一定的保护。

表 1 3 种方案结构自振周期对比

Table 1 Comparison of natural vibration period of structure among three schemes

振型阶数	自振周期/s		
	铰支座模型	带锚栓的板式橡胶支座模型	铅芯橡胶支座模型
1	0.627 7	0.651 5	0.671 1
2	0.515 0	0.515 0	0.533 8
3	0.448 7	0.448 7	0.515 5
4	0.407 1	0.407 1	0.514 5
5	0.406 8	0.406 9	0.502 2
6	0.404 5	0.404 6	0.496 1
7	0.404 2	0.404 2	0.488 4
8	0.369 7	0.375 0	0.486 5
9	0.287 9	0.287 9	0.483 3
10	0.263 1	0.263 1	0.448 7

4 位移、应力分析

4.1 位移分析

4.1.1 厂房上游侧

图 3 是厂房上、下游侧 8 个节点对所在的位置。从上游侧的典型节点对(边节点对和中间节点对)层间位移的时程(图 4)可见,铰支座方案各节点对最大层间位移大于其余 2 个方案,其均值为 46.16 mm。这是因为铰支座水平向和竖向刚度都远远大于其余 2 种支座,其在地震作用下的吸能和耗能效果较差。铅芯橡胶支座方案各节点对层间位

移峰值最小,均值为 35.04 mm。铰支座方案的均值比铅芯橡胶支座方案的均值高 31.74%,说明由于铅芯橡胶支座的滞回性能,很好地减小了坝后式厂房上部结构的鞭梢效应,能够在 8 度烈度的地震作用下保护厂房上部结构。带锚栓的板式橡胶支座方案上游侧节点对层间位移均值处于两者之间,达到了 37.88 mm。

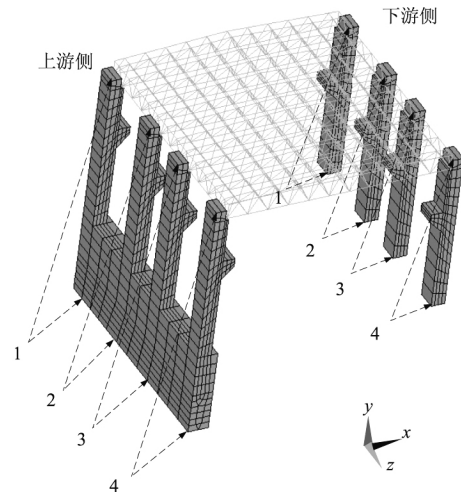


图 3 厂房上部结构及节点对位置

Fig. 3 Upper structure of powerhouse and location of node pairs

4.1.2 厂房下游侧

从下游侧的典型节点对(边节点对和中间节点对)层间位移的时程(图 5)可见,其规律与上游侧基

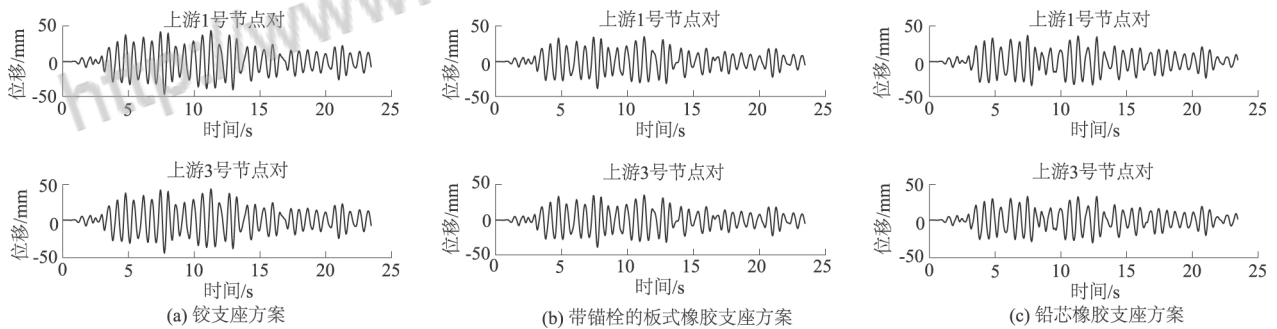


图 4 厂房上游侧典型节点对层间位移时程

Fig. 4 Time-history of displacement of typical node pairs attached to upstream side of powerhouse

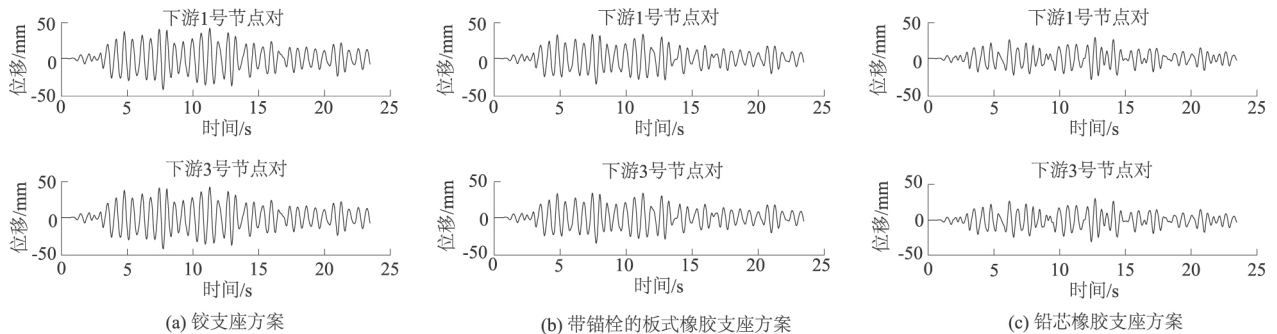


图 5 厂房下游侧典型节点对层间位移时程

Fig. 5 Time-history of displacement of typical node pairs attached to downstream side of powerhouse

本相同:下游侧铰支座方案各节点对层间位移的均值为43.95 mm,带锚栓的板式橡胶支座方案均值为35.92 mm,铅芯橡胶支座方案均值为30.42 mm。从数值上看,同一个方案上下游侧节点对最大层间位移普遍比下游侧高,这是因为进行坝后式厂房上部结构线弹性变位校核时,上游侧墙柱体的底部固端高程取为1 220.4 m,而下游侧墙柱体底部固端取为1 232.4 m。从方案间的对比来看,铅芯橡胶支座的抗震耗能效果是3个方案中最好的,铰支座方案在地震作用下的顺河向位移响应最大,峰值分别比铅芯橡胶支座方案和带锚栓的板式橡胶支座方案高出44.5%和22.4%。

4.1.3 支座变形

图6提取了3种方案厂房上下游侧共8个柱顶支座在地震作用下的水平向最大变形。从图6中可见:带锚栓的板式橡胶支座和铰支座由于水平向刚度较大,在地震作用下支座的水平剪切变形很小,都不足1 mm,难以释放支座处较大的支反力;而铅芯橡胶支座方案由于支座水平向刚度小,柔度大,在地震作用下可以很好地适应变形,虽然支座的水平向剪切变形较其余2个方案大,但是在可承受范围内,很好地释放了支座处的支反力,减震效果更好。

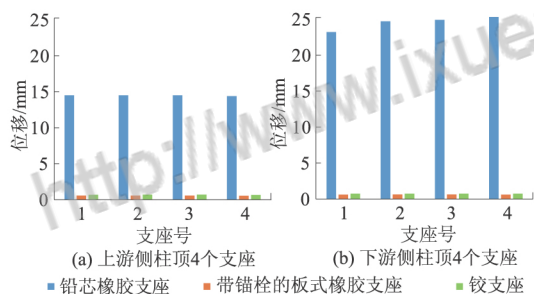


图6 地震作用下各支座水平向最大变形

Fig. 6 Maximum horizontal deformation of bearings under earthquake action

4.2 厂房应力分析

图7列出了地震作用下各方案上下游厂房排架柱节点第一主拉应力峰值,从图7中可见:顶部节点的第一主拉应力峰值较小,各节点都没有超过0.1 MPa;底部节点第一主拉应力峰值下游侧都比上游侧大,下游侧均值在5 MPa左右,上游侧均值在1 MPa左右。从这个指标来看,下游侧底部节点在地震作用下有开裂的可能。从各支座方案对比来看,除了上游侧顶部外,铅芯橡胶支座方案排架柱的其余部位均是最安全的。铰支座方案由于水平和竖向刚度大,没有弹性滑移的余地,故其第一主拉应力峰值较大,易造成支座的疲劳破坏。

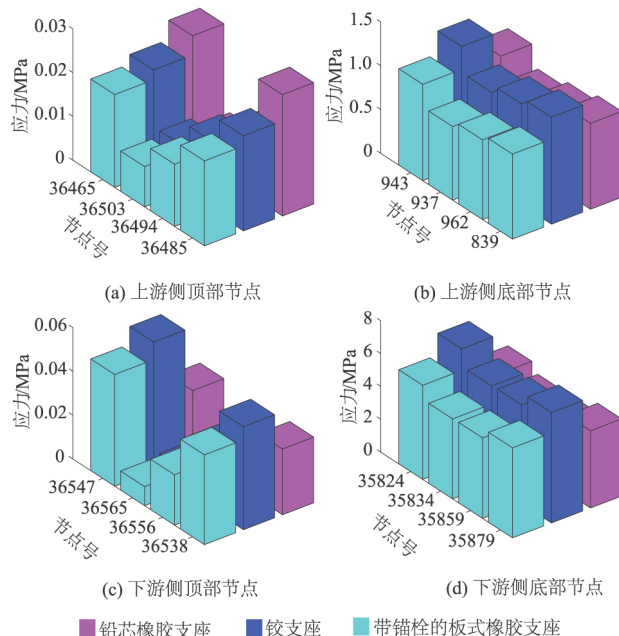


图7 厂房上下游侧排架柱节点第一主拉应力

Fig. 7 First principal tensile stress of columns in the upstream and downstream side of powerhouse

5 结论

本文通过对比某坝后式水电站厂房上下游侧排架柱顶的3种支座方案,得到以下结论:

(1) 铰支座方案水平和竖向刚度均很大,在平时能承受很大的静荷载,但在地震作用下其平移自由度受到限制,加上鞭梢效应导致其上下游柱顶的层间位移角是3个方案中最大的。此方案下排架柱的顶部和底部的第一主拉应力也是3个方案中最大的,故铰支座方案不利于坝后式厂房上部结构的减震。

(2) 带锚栓的板式橡胶支座方案的上、下游侧排架柱节点对的最大层间位移处于铰支座方案和铅芯橡胶支座方案之间。

(3) 地震作用下3种支座本身适应水平剪切变形的能力差异较大,铰支座和带锚栓的板式橡胶支座水平剪切变形能力较小,不能很好地释放支座处支反力,铅芯橡胶支座在地震作用下上、下游侧水平剪切变形分别达到14 mm和25 mm左右,通过其本身较大的剪切变形很好地释放了支座处积累的支反力,达到了减震效果。

(4) 铅芯橡胶支座中橡胶的超弹性和铅芯的滞回性能对排架柱起到了良好的减震效果。分析结果表明此方案上下游侧厂房排架柱的第一主拉应力最小,很好地降低了厂房上部结构薄弱部位的混凝土拉应力,地震作用下上、下游侧柱子开裂的可能性较

小。其上、下游侧节点对最大层间位移也最小,即层间位移角最小,有利于上部结构的减震,且其整体结构的前 10 阶自振周期较长,故其结构在地震作用下的反应较小,能很好地保护整体结构中的薄弱部位,是推荐的支座选型方案。

参考文献:

- [1] 郝军刚,胡 蕾,伍鹤皋,等.罕遇地震作用下水电站厂房上部结构破坏模式研究[J].振动与冲击,2016,35(3):55-61.
- [2] 黑 灿,伍鹤皋,傅 丹,等.基于不同网架模拟方式的水电站厂房振动特性研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2016,38(1):26-30.
- [3] 霍学平,马震岳,陈 婧,等.水电站地面厂房上部结构抗振分析[J].人民黄河,2016,38(8):95-98.
- [4] 邹磊堂.水电站厂房上部结构型式研究[D].大连:大连理工大学,2007.
- [5] 于瑞艳,梁兴文,刘小军.考虑竖向地震作用的排架柱抗震设计[J].工程抗震与加固改造,2008,30(3):53-57.
- [6] 程 恒,张燎军,林 斌,等.水电站厂房钢管混凝土排架结构抗震性能[J].河海大学学报(自然科学版),2009,37(5):586-590.
- [7] 张汉云,张燎军,李龙仲,等.水电站地面厂房鞭梢效应及抗震分析[J].水电能源科学,2012,30(1):88-92.
- [8] 郭鸿儒.水电站端部厂房段动力特性及抗震性能分析研究[D].西安:西安理工大学,2008.
- [9] 王常峰.桥梁结构非线性地震反应研究(支座摩擦·限位装置·基础非线性)[D].兰州:兰州交通大学,2010.
- [10] 肖建春,聂建国,夏绍全.带锚栓的加劲板式橡胶支座使用阶段的水平刚度[J].建筑结构学报,2003,24(3):70-75.
- [11] NB 35047—2015,水电工程水工建筑物抗震设计规范[S].北京:中国电力出版社,2015.

(编辑:赵卫兵)

Comparative Study of Different Bearing Solutions on Shock Absorption of Power Station at Dam Toe

JING Yue-ling, WANG Yang-yang

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A three-dimension finite element model of a power station at dam toe is built in this paper. The main structures include dam, foundation, powerhouse at dam toe, roof net, and simplified bearing model. Three kinds of bearings, namely, laminated rubber bearing supported with anchor bolt, lead rubber bearing, and hinge support, are compared to find their influence on the upper structure under earthquake action. Result reveals that hinge support is unfavorable for seismic reduction with the shortest natural vibration period and the largest seismic response; also, the maximum displacement of node pairs on the upstream and downstream side of powerhouse are higher than that in the case of lead rubber bearing by 31.74% and 44.5%, respectively. Lead rubber bearing has good ability of releasing support force under earthquake due to good energy absorption effect and better adaptation to shear deformation; moreover, the first principal stress of node pairs on upstream and downstream side of the powerhouse under earthquake is the lowest among the three cases. In conclusion, the lead rubber bearing is recommended.

Key words: laminated rubber bearing supported with anchor bolt; lead rubber bearing; hinge support; power station at dam toe; finite element method; seismic alleviation

(上接第 111 页)

in the mid-stage, permeability increased slowly; in the later stage of loading, permeability increased dramatically. (2) The permeability of rock increased in positive exponential relation with the rising of temperature. (3) The thermal expansion of rock was unapparent below a certain temperature, while thermal expansion induced by higher temperature would significantly damage rock structure, mitigating the increasing of elastic modulus and strength with the rise of temperature. (4) In line with the theory of thermodynamics, the rock fracture caused by thermal stress under varying temperature was deduced, and the model of permeability varying with temperature was obtained. The results offer reference for the study of multi-field coupling under high temperature.

Key words: rock mechanics; mechanical properties; triaxial test; thermal stress; permeability; fitting model



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
