水　利　学　报
2021年7月　SHUILI　XUEBAO　第52卷　第7期

文章编号:0559-9350(2021)07-0770-11

水电站蜗壳结构研究及应用的回顾与展望

伍鹤皋，高晓峰，傅　丹
（武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室，湖北 武汉　430072）

摘要：简要介绍了国内外三种水电站钢蜗壳埋入方式的应用和发展历程，对我国700 MW级水轮机蜗壳埋入方式的创新性成果进行了整理归纳，总结出水电站蜗壳结构研究中取得的三个重要进展，即蜗壳结构非线性数值分析方法、蜗壳外围混凝土配筋原则以及以机组稳定运行为核心的设计理念。针对当前蜗壳结构理论研究方面存在的不足，指出施工期水化热缝隙的形成机理、运行期温度作用效应、垫层材料长期力学特性、钢蜗壳-混凝土接触面脉动压力的传导特性，以及钢蜗壳和座环的疲劳失效是未来蜗壳结构研究需要重点关注的内容。在蜗壳新技术应用发展方面，介绍了预热膨胀构造初始缝隙和可融涂层构造初始缝隙两种新型蜗壳埋入方式。最后建议研究人员和设计人员应以持续和动态的视角看待蜗壳结构长达几十年的服役过程，充分重视结构老化累积的安全隐患。

关键词：水电站；蜗壳结构；埋入方式；直埋-垫层组合蜗壳；有限元法
中图分类号：TV732.43　**文献标识码：**A　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20210196

1　研究背景

水电站蜗壳是水轮机的重要组成部件之一，其中大中型水电站一般采用金属蜗壳(以下简称钢蜗壳)。蜗壳结构在空间上为半封闭的蜗形开口结构，由钢蜗壳管节、座环(包括固定导叶和上下环板)及外围混凝土构成，空间属性及材料属性复杂。蜗壳结构不仅要承受较高的内水压力，还要直接或间接地承受水轮发电机组传来的各种静、动力荷载，受力条件非常复杂。水电站厂房施工时钢蜗壳按埋入方式可分为垫层蜗壳、充水保压蜗壳及直埋蜗壳三种结构型式。这3种结构型式具有各自的特点，不同历史时期和地区对三种蜗壳埋入方式的认识和应用情况存在显著差异。

近30年来，我国在大型水电站蜗壳结构研究和应用方面实现了从完全引进到自主创新的突破，本文尝试对所取得的主要研究成果进行总结，并对水电建设高速发展下尚未充分探究的问题进行讨论，以期对未来的水电站厂房建设和长久安全运行提供参考。

2　蜗壳结构工程应用历程

2.1　充水保压蜗壳　充水保压蜗壳是使钢蜗壳在一定的保压状态下浇筑外围混凝土的施工工艺，在1930年代初，美国田纳西流域管理局(TVA)就将其作为最优的蜗壳埋设方法进行推广应用。根据美国机械工程师协会(ASME)所制定的压力容器标准，各类压力容器都必须进行水压试验，而水轮机钢蜗壳作为一种压力容器，其水压试验要求和充水保压埋设方法在美国成为了一种历史惯例而长期存在，并逐步在欧美国家的水电站建设中得到广泛的应用，比如大古力、古里、伊泰普等单机容量超

收稿日期：2021-02-27；网络首发时间：2021-06-22
网络首发地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210621.1646.001.html
基金项目：国家自然科学基金项目(51679175)
作者简介：伍鹤皋(1964-)，博士，教授，博士生导师，主要从事水电站压力管道与厂房结构研究。E-mail：wbf1988@vip.sina.com
通讯作者：傅丹(1988-)，博士，高级工程师，主要从事水电站厂房结构研究。E-mail：303960788@qq.com

过500 MW的机组，无一例外地均采用了充水保压蜗壳。

天生桥二级电站1—4号机组单机容量为220 MW，1991年开始发电，是我国中型机组首次采用充水保压蜗壳。二滩水电站总装机3300 MW，装机6台，单机容量为550 MW，采用了美国通用设备公司生产的充水保压水轮发电机组，首台机组1998年投产，是当时我国单机容量最大的充水保压蜗壳。三峡水电站32台机组中有21台采用了充水保压蜗壳，其中左岸14台水轮发电机组主要部件均由欧洲的ALSTOM和VOITH水电设备公司制造，我国东方电气集团和哈电集团作为合作厂家生产了部分辅助部件；右岸7台充水保压水轮发电机组则分别由欧洲的ALSTOM、VOITH、东电集团和哈电集团各自独立承担相应的生产任务，这是我国首次将充水保压蜗壳应用到700 MW级机组。改革开放以来，我国在吸收消化西方国家水电机组制造技术的基础上自主创新，从中等容量机组到三峡水电站的700 MW巨型机组，很快在制造、安装等方面完全掌握了此类技术，并开始广泛地将其应用于大量的水电工程。表1列出了我国典型工程充水保压蜗壳的主要参数。

表1　充水保压蜗壳典型工程的相关参数

电站名称	单机容量/MW	蜗壳进口直径/m	蜗壳最大壁厚/mm	设计内水压力/m	保压水头/m	钢材强度/MPa
天生桥二级	220	4.2	45	270	205	600
二滩	550	7.2	67	231	194	600
瀑布沟	600	8.0	75	245	140	600
锦屏一级	600	7.0	80	310	195	600
锦屏二级	600	6.05	76	410	260	600
官地	600	9.6	70	170	98	600
三峡	700	12.4	75	139.5	70	600
小湾	700	6.5	70	290	190	600
广蓄一期	300	2.3	80	775	270	600
广蓄二期	300	2.1	42	775	450	800
天荒坪	300	2.0	70	870	540	500

对于抽水蓄能电站，由于其发电工况和水泵工况转换频繁，高转速水泵水轮机及厂房结构的振动问题非常突出，对钢蜗壳的制造质量和外围混凝土的结合形式要求更高，因此欧美的ALSTOM和VOITH等主要厂家基本都采用了充水保压蜗壳。我国过去的水泵水轮机主要依靠国外引进，因此在早期投产的广蓄一期、广蓄二期、潘家口、十三陵、天荒坪等工程均采用了国外技术的充水保压蜗壳。即使我国目前已经实现了抽水蓄能机组的全部国产化，但充水保压蜗壳一直应用延续至今。

2.2　垫层蜗壳　二战后前苏联对高水头、大容量水轮发电机组蜗壳结构开展了长期的研究和实践，经历了从垫层蜗壳到直埋蜗壳(减薄钢蜗壳并与外围混凝土完全联合承载)的发展过程[1-2]。布拉茨克水电站总装机容量4600 MW、单机容量为225及250 MW，采用了垫层蜗壳。克拉斯诺雅尔斯克水电站装机容量5000 MW，单机容量为500 MW，是1960年代世界上采用垫层蜗壳的最大水电站和最大机组，蜗壳进口断面直径8.7 m，设计内压135 m，*HD*值1174.5 m^2。西方国家及日本的水电站较少采用垫层蜗壳，巴西的垫层蜗壳仅应用在200 MW以下的机组。

我国改革开放前水电站机组单机容量不大，基本都是按前苏联的方法和经验采用了垫层蜗壳。1997年建成的李家峡水电站全部机组采用垫层蜗壳，单机容量400 MW，装机5台，共2000 MW，蜗壳承受静水头约140 m，*HD*值达1280 m^2。随着对垫层蜗壳研究的不断深入，为满足施工进度不断加快的要求，在21世纪初已经将垫层蜗壳成功应用到单机容量700 MW的水电站中，比如装机容量为9×700 MW的龙滩水电站，装机容量为6×700 MW的拉西瓦水电站，以及三峡32台机组中的9台均采用了垫层蜗壳。近年来装机容量为12×850 MW的乌东德水电站和装机容量为16×1000 MW的白鹤滩水电站也采用了垫层蜗壳，成为世界上单机容量最大的垫层蜗壳。表2列出了我国典型工程垫层蜗壳的主要参数。

2.3　直埋蜗壳　从1960年代起，由于高强钢的缺乏，前苏联结合克拉斯诺雅尔斯克和布拉茨克两座

表2　垫层蜗壳和直埋蜗壳典型工程的相关参数

电站名称	单机容量/MW	蜗壳进口直径/m	蜗壳最大壁厚/mm	设计内水压力/m	钢材强度/MPa	蜗壳类型
刘家峡	300	6.5	40	140	500	垫层蜗壳
龙羊峡	320	6.5	44	180	600	垫层蜗壳
李家峡	400	8.0	50	164	600	垫层蜗壳
彭水	350	9.74	65	140	600	垫层蜗壳
三峡	700	12.4	75	139.5	600	垫层蜗壳
龙滩	700	8.7	74	242	600	垫层蜗壳
拉西瓦	700	6.8	64	276	600	垫层蜗壳
向家坝	800	12.2	74	158	600	垫层蜗壳
乌东德	850	11.5	85	173	800	垫层蜗壳
白鹤滩	1000	8.6	95	340	800	垫层蜗壳
景洪	350	11.2	40	96	500	直埋-垫层组合蜗壳
三峡	700	12.4	75	139.5	600	直埋-垫层组合蜗壳
向家坝	800	12.2	74	158	600	直埋-垫层组合蜗壳
溪洛渡	770	7.2	74	287	600	直埋-垫层组合蜗壳
努列克	300	4.2	32	380	500	直埋蜗壳
英古里	260	3.0	36	550	500	直埋蜗壳
萨扬舒申斯克	640	6.5	40	286	500	直埋蜗壳

大型水电站开展了钢蜗壳与钢筋混凝土联合承载结构的研究。通过取消座环与蜗壳连接处1.5～2.0 m范围内的软垫层，降低了该处的蜗壳弯曲应力，在局部区域实现了钢蜗壳与外围钢筋混凝土的完全联合承载。后来又相继在努列克水电站(单机容量300 MW，设计水头380 m)、英古里水电站(单机容量260 MW，设计水头550 m)、萨扬舒申斯克水电站(单机容量640 MW，设计水头286 m)中取消了所有垫层，实现了真正意义上的完全联合承载蜗壳，钢蜗壳按与外围混凝土共同承受内水压力设计，因而钢蜗壳可以采用强度较低的钢材并减小厚度。迄今为止，世界上采用完全联合承载蜗壳的最大水电站和最大机组即为单机容量为640 MW的萨扬舒申斯克水电站机组。

与前苏联不同，北欧、日本在应用直埋蜗壳时，采用的钢蜗壳是按单独承受全部内水压力设计制造的，并不因有外包混凝土而将钢蜗壳减薄。但由于钢蜗壳和混凝土之间没有垫层或保压形成的缝隙，相当部分的内水压力传给外围混凝土，使得蜗壳外围混凝土负担重、配筋多。

为了解决蜗壳直管段外围混凝土开裂和机墩不均匀上抬变形问题，经大量试验研究和设计论证，景洪水电站全部5台机组和三峡水电站的15#、27#机组将蜗壳直管段垫层铺设范围延伸至进口断面下游的45°断面，成为直埋-垫层组合蜗壳[3-4]，是对直埋蜗壳技术的创新发展。直埋-垫层组合蜗壳可解决传统直埋蜗壳局部区域混凝土应力过大、承载比过高和发电机下机架不对称上抬位移过大等问题，未铺设垫层范围钢蜗壳贴紧混凝土可改善座环和过渡板受力条件，增加结构的整体性[4-5]，相比于充水保压蜗壳节省了加压设备和场地，缩短了安装工期，被认为具有广阔的应用前景[6]。三峡工程之后，随着对垫层蜗壳研究的深入，工程上对垫层平面铺设范围的选择更为灵活，向家坝(单机容量800 MW，8台)地面厂房4台机组采用传统垫层蜗壳(包角270°)，地下厂房4台机组则将垫层末端铺设至90°断面；溪洛渡水电站(单机容量770 MW，18台)蜗壳分别采用了45°和155°两种垫层平面包角。大型工程中成功应用直埋-垫层组合蜗壳成为我国在蜗壳埋入方式上的重要创新，直埋-垫层组合蜗壳和直埋蜗壳典型工程的相关参数见表2。

3　蜗壳结构研究焦点及重要进展

3.1　蜗壳结构非线性数值分析方法　蜗壳结构具有复杂的几何体型，材料属性为钢衬-钢筋混凝土组

合结构，这些特点决定了蜗壳结构的受力状态难以通过结构力学解析方法获取，有限元方法成为研究蜗壳结构的重要手段之一。对于*HD*值(蜗壳承受的水头与直径的乘积)较大的水电站而言，蜗壳外围混凝土损伤开裂是必然的，如何准确获得外围混凝土裂缝分布、结构变形及钢材应力成为水电站蜗壳强度安全评价的制约因素，甚至成为论证大型工程蜗壳埋入方式的技术瓶颈，为此众多学者在蜗壳结构的非线性有限元计算研究方面投入了大量的精力。

1990年代，受限于客观条件，研究人员大都采用自编程序开展非线性计算，蜗壳结构只能简化为轴对称平面模型或取局部扇形区。文献[7-10]的研究工作基本抓住了混凝土抗拉强度低的主要矛盾，但计算模型和计算假定与实际存在一定差异，自编程序未能在行业内推广应用。

进入21世纪后，国内引进的ANSYS程序中Solid65混凝土单元采用改进的William-Warnke五参数破坏准则，可以模拟混凝土压碎和开裂，混凝土单元每个高斯积分点最多有3条相互垂直的裂缝，钢筋一般采用整体式模型，为此天津大学、大连理工大学及武汉大学的研究人员采用上述数值模型做了大量有意义的计算研究工作。伴随计算机计算能力的进步，蜗壳结构非线性分析也实现了从二维到三维的突破[11-13]。但是采用ANSYS程序开展蜗壳结构非线性计算的过程中逐渐暴露两个突出的问题：(1)混凝土材料一旦达到抗拉强度便完全丧失承载能力，与实际不符；(2)蜗壳结构体型复杂，外围混凝土中至少布置2～3钢筋，大型工程蜗壳局部甚至达5层钢筋，整体式钢筋模型特别难以开展三维计算。为此，武汉大学研究人员开始尝试将Abaqus程序应用到蜗壳结构三维非线性计算中，该程序中的塑性损伤模型可自定义混凝土受拉、受压软化段，可考虑混凝土单向加载损伤后的刚度退化和循环反复加载刚度的转换，钢筋采用离散式模型嵌入混凝土中，自动耦合自由度，解决了ANSYS程序存在的两个主要缺陷，为蜗壳结构的三维非线性分析创造了极大的便利条件。

三峡水电站蜗壳埋入方式从1990年代开始论证，最终32台机组中21台采用充水保压蜗壳，9台采用垫层蜗壳，2台采用直埋-垫层组合蜗壳(15#、27#)。文献[14-15]以15#机组蜗壳为对象，拟定了4条混凝土拉伸软化曲线进行了研究，计算结果表明混凝土软化段对典型区域的钢材应力、裂缝宽度以及结构变形的模拟效果非常明显，但同时存在较大影响，需要谨慎选取。与此同时，从结构强度上来看，三峡采用直埋-垫层组合蜗壳是安全的，但在蜗壳上下蝶边附近、直管断面及0°断面的顶部和腰部、180°和270°断面的腰部可能出现贯穿性裂缝(图1)，通过优化配筋基本可以把裂缝宽度限制在允许范围内。文献[16]的研究表明蜗壳各钢部件应力均远小于钢材允许应力，外围混凝土仅在局部较薄处出现较大的损伤，其他部位的损伤指标均较小，从强度上可以保证直埋蜗壳在高HD值水电站中的正常运行。文献[17]探讨了三峡直埋蜗壳的结构优化措施，认为仅靠增加配筋不能防止贯穿性裂缝，延长垫层铺设范围至45°断面并适当布置C40混凝土的效果更好。文献[14]和文献[18]则进一步开展了内水压力循环反复作用下的非线性计算，结果表明内水压力反复加载会导致钢材应力、裂缝宽度以及结构变形进一步演变，但随循环次数的增加将趋于稳定。之后，武汉大学研究人员进一步结合景洪及溪洛渡水电站开展了相关研究，结果表明从强度的角度出发，直埋蜗壳的安全性是很高的[19-20]。

以三峡水电站等大型工程为依托，经过国内多家科研单位长达10多年的积累，研究人员在蜗壳结构的非线性数值分析方法方面取得了重大突破，论证了直埋蜗壳或直埋-垫层组合蜗壳应用于大型工程的可行性，成为蜗壳结构研究的重要进展之一。

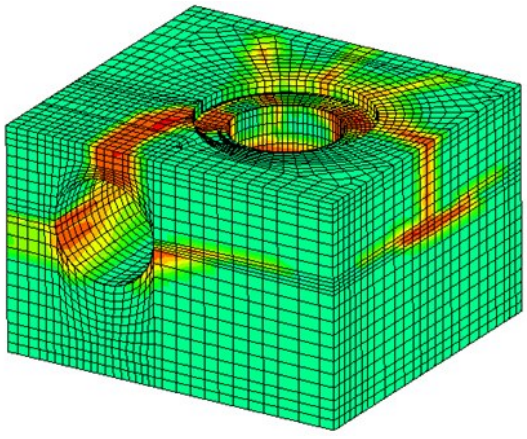


图1　三峡15#机组蜗壳结构混凝土损伤

3.2　钢蜗壳外围混凝土配筋原则　我国早期建设的工程一般采用平面“Γ”形框架法对蜗壳外围混凝土结构进行配筋，计算时假定钢蜗壳承担全部内水压力，外围混凝土只承担水轮机层楼面荷载和

机墩传来的机组荷载。1990年代初开始，有科研单位对钢蜗壳及外围混凝土开展三维有限元计算，且随着对钢衬–钢筋混凝土这类结构承载机理研究的深入，逐步认识到蜗壳外围混凝土甚至可能是承担内水压力的主体，需要合理配置钢筋。蜗壳外围混凝土结构不同于单纯的钢筋混凝土结构，钢蜗壳已经按承担全部内水压力设计，因此寻求合理的混凝土配筋原则，以实现既安全又经济的目标，成为了大型水电站蜗壳结构设计中的关键技术问题。

蜗壳外围混凝土结构由于体型复杂不宜简化为杆件体系，设计时一般采用有限元方法求得蜗壳外围混凝土在弹性状态下的应力图形，然后按照文献[21]给出的非杆件体系钢筋混凝土结构配筋原则，计算拉应力图形面积并确定配筋数量，简称拉应力图形法。该方法由于具备较好的操作性，易于被工程设计人员掌握，因此在实践中得到了大量运用。工程实践表明，拉应力图形法可以保证结构的承载能力等强度要求，但无法得出混凝土结构裂缝宽度及实际变形状态；更为关键的是，这种方法没有反映蜗壳外围混凝土承担内水压力的比例与自身是否开裂、开裂程度的关系。对于未开裂部位，混凝土承担了绝大部分内水压力，往往呈现全截面受拉但拉应力数值并不大，按规范中拉应力图形法完全忽略混凝土抗拉能力进行配筋是偏于保守的；而对于贯穿性裂缝截面，钢蜗壳应力明显增加，混凝土承担的内水压力相应减小，线弹性计算结果无法反映这种调整机制，从而导致配筋保守。我国广州抽水蓄能电站和天荒坪抽水蓄能电站采用上述方法配筋，蜗壳外围混凝土钢筋层数达到5层，以至于影响混凝土浇筑施工，但仍然无法避免蜗壳进口部位混凝土开裂[22]（图2）。

文献[23]分析了拉应力图形法存在的问题，认为蜗壳外围混凝土也可以按照钢衬钢筋混凝土结构设计方法进行初步配筋，而不再采用拉应力图形法。即初步计算时可假定内水压力全部由钢蜗壳和钢筋承担，混凝土完全不承受拉力，据此确定出各径向截面所需的钢材总面积，扣除钢蜗壳截面积后即为外围混凝土配筋面积。实际工程中，混凝土开裂部位和裂缝数是有限的，绝大部分混凝土截面是完整的或部分完整的，仍然具备抗拉强度，因此钢蜗壳和钢筋的应力会比计算值低得多，这一观点也被模型试验[24]和原型监测[25]所证实。钢蜗壳及外围混凝土结构相比背管结构几何体型要复杂得多，部分截面混凝土尺寸大，截面合力也不能近似为轴向受拉，存在明显弯矩。此外，厂房上部结构以及机墩下传荷载对蜗壳外围混凝土应力状态的影响也非常显著，这些都是钢衬钢筋混凝土管道设计方法未能考虑的。因此，根据钢衬钢筋混凝土结构设计方法进行初步配筋后，还需建立考虑上述初步配筋的有限元模型，采用二维或三维非线性有限元方法进行计算，根据钢筋应力和裂缝宽度以及机墩不均匀上抬变形等条件，不断调整并最终确定配筋方案。

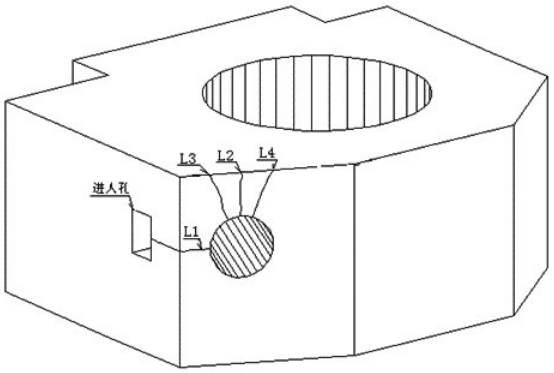


图2　广州抽水蓄能电站1#机组蜗壳外围混凝土裂缝

随着蜗壳结构非线性分析方法逐渐成熟，文献[26]建议在蜗壳外围混凝土结构配筋中直接引入非线性有限元方法，执行限裂配筋原则。其主要思想是采用规范的拉应力图形法初步计算配筋，然后根据非线性有限元计算来复核钢筋应力和裂缝宽度，经过多次反馈分析（一般是钢筋不断优化减少）获得经济合理的配筋方案。

综上所述，针对蜗壳外围混凝土这一复杂结构，提出一种简便的显式配筋方法是非常困难的，随着认识的深入和分析方法的进步，行业内无论是文献[23]还是文献[26]基于开裂非线性有限元计算的蜗壳结构配筋方法都已经有了本质的进步，避免了与蜗壳实际受力情况出现严重偏差的现象，也成为蜗壳结构研究的重要进展之一。

3.3　以机组稳定运行为核心的优化设计理念　三峡水电站机组尺寸及重量巨大，混凝土结构显得相对单薄，设计阶段机组厂家对座环径向柔度提出了明确要求，相当于间接地对座环周边混凝土结构的支撑刚度提出了要求。文献[27]结合三峡15#机组比较了不同埋设方式对座环径向柔度的影响，并

考虑了钢蜗壳与混凝土之间接触摩擦及初始缝隙的影响，结果表明蜗壳埋入方式及接触摩擦对座环柔度的影响较小，初始缝隙的影响则相对显著。文献[16]进一步针对蜗壳外围混凝土的损伤开裂特性开展研究，结果表明混凝土开裂损伤对座环柔度的影响非常显著。文献[28]结合溪洛渡水电站讨论了不同埋设方式下座环的柔度，结果表明保压蜗壳座环柔度最小，垫层蜗壳最大，直埋蜗壳居中，但相差在8%以内。除蜗壳座环外，机组厂家对上机架基础和下机架基础的径向刚度一般也有要求，尤其在抽水蓄能电站中非常常见。因此保证蜗壳外围混凝土关键位置的刚度对于机组稳定运行的意义显著，该因素已引起设备厂家和厂房土建方高度重视。

蜗壳结构属非轴对称结构，内水压力作用下蜗壳上部的机墩沿360°圆周发生不均匀上抬变形，这一现象较早就被研究人员发现并受到重视。武汉大学、长江科学院的研究人员结合国内多个水电站开展了机墩不均匀变形的研究[5,20,28-30]，主要结论为：(1)直埋蜗壳机墩的不均匀变形最大，保压蜗壳最小，垫层蜗壳居中，但保压蜗壳机墩变形与保压值的选取相关；(2)直埋-垫层组合蜗壳对减小机墩的不均匀变形非常有利，垫层平面包角在135°～180°之间时机墩不均匀变形最小；(3)考虑混凝土损伤开裂后，机墩不均匀变形明显大于线弹性计算结果。从上述研究成果来看，目前学术界对机墩不均匀上抬变形的力学机理与影响因素认识清晰，主要问题是缺乏行业认可的变形控制标准。

蜗壳在内水压力作用下会形成一个指向下游、大小为蜗壳进口断面面积与内水压力乘积的不平衡水推力，该水推力相对机组中心形成一个较大的扭矩。近年来水轮机厂家对该不平衡水推力及相应的扭矩十分重视，一般采取在蜗壳进口处设置止推环的工程措施。为此文献[31]最早对不平衡水推力开展研究，首次揭示了蜗壳座环是承担不平衡水推力的主体之一，并初步探讨了伸缩节、止推环及垫层铺设等因素对座环承载的影响。此后，武汉大学和大连理工大学研究人员针对该问题开展了专题研究[32-35]，全面阐述了垫层蜗壳和充水保压蜗壳座环的承载规律，研究结果同时表明直埋蜗壳由于混凝土具有较强的包裹效应，座环的受力是3种蜗壳埋入方式中最好的。

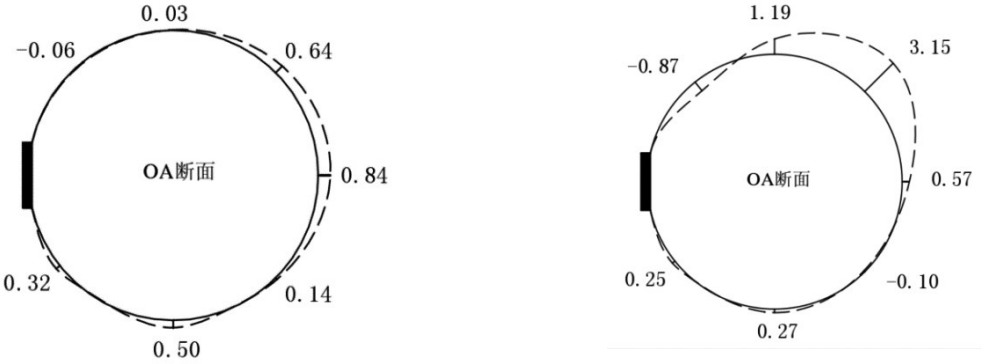
厂房土建方早期主要关注蜗壳外围混凝土结构强度安全，后来国内多家科研单位和设计单位在大型工程蜗壳结构型式的论证过程中，土建方和机电方通过加强交流，逐渐认识到蜗壳外围混凝土结构强度和刚度也是保证水轮发电机组稳定运行的基础条件之一，机墩、蜗壳、尾水管等厂房下部钢筋混凝土结构本质上都是为机组运行服务的，对蜗壳的埋设方式和结构配筋进行优化设计时应综合考虑影响机组稳定运行的多个因素(结构刚度、机墩变形、座环抗剪与抗扭)，该理念目前在工程界和学术界已经形成了共识，成为近年来蜗壳结构研究的重要进展之一。

4　蜗壳结构研究和应用发展方向

4.1　基础理论研究

(1)施工期温度缝隙的形成机理。迄今为止，分析直埋蜗壳和垫层蜗壳结构时一般均未考虑钢蜗壳和混凝土之间存在的初始缝隙。充水保压蜗壳因为人为构造了初始保压缝隙，因此其全过程的仿真分析一直是研究的重点，武汉大学、大连理工大学和昆明理工大学的研究人员基于不同的技术路线，模拟了施工期保压缝隙的初始分布，揭示了保压缝隙的非均匀闭合特性，成为近年来保压蜗壳研究的重要进展[36-38]。但上述成果都聚焦于内水压力的影响，施工期混凝土水化热作用下初始缝隙的形成机理缺乏深入研究。文献[39]结合西龙池抽水蓄能电站蜗壳的初步研究结果表明，施工期水化热温升引起的钢蜗壳变形甚至远大于保压水头引起的变形(图3)，这是非常值得关注的现象。

水化热温升导致钢蜗壳断面内发生径向变形，甚至发生一定的整体变形。随着施工期水化热耗散，混凝土逐渐硬化，加上钢蜗壳与混凝土线膨胀系数不同，二者变形非协调，逐渐分离形成间隙，这一过程中钢蜗壳与混凝土之间还存在接触摩擦，力学机制非常复杂。三峡水电站充水保压蜗壳混凝土浇筑时要求当蜗壳内水温在22～28 ℃时，在22 ℃基础上每上升2 ℃，内水压力降低0.01 MPa[40]。某抽水蓄能电站水轮机厂家也要求当蜗壳施工期水温超过25 ℃时，水温每升高1 ℃，内水压力须相应降低0.1 MPa，说明业界已经认识到水化热温升对初始缝隙的影响。尽管如此，目前



（a）保压状态　　（b）混凝土浇筑完成

图3　西龙池抽水蓄能电站施工期蜗壳变形（单位：mm）

关于该问题的研究工作相对滞后，温度初始缝隙的分布规律以及与内水压力的补偿机制未见比较成体系的研究成果，该问题值得进一步研究。

（2）运行期温度荷载的作用效应。文献[41]的研究结果表明，运行期温度荷载对蜗壳外围混凝土应力状态和配筋量的影响非常显著，而文献[42]的研究同样证明运行期温度荷载在蜗壳外围混凝土中产生的温度应力是非常大的。事实上，如果不能合理考虑混凝土开裂及徐变的影响，通过线弹性计算得到这一结论几乎是必然的。现实情况中温度应力随着混凝土开裂自动松弛，文献[21]指出对超静定结构，温度荷载对结构承载能力没有影响，主要影响裂缝开展。因此，对于允许出现裂缝的钢筋混凝土结构，当其他荷载所需的受拉钢筋面积超过温度构造配筋面积时，可不另配温度钢筋。文献[43]规定对于钢衬钢筋混凝土管道，运行期温度应力计算结果可用于计算裂缝宽度和调整钢筋布置，但不宜作为确定配筋量的依据，截至目前还没有因为温度应力增加坝后背管配筋的实例。

由上述文献资料可知，蜗壳结构强度储备本身是非常高的，温度作用对混凝土裂缝扩展的影响更应被关注。但目前公开发表的成果中，仅文献[44]研究了温度荷载对裂缝扩展的影响，说明该问题还未引起国内研究人员的足够重视或由于技术上的难度导致研究进展缓慢。对于蜗壳这类结构，温度作用的影响途径一是直接作用在混凝土上，另外一条容易被忽视的途径为引起钢蜗壳膨胀或收缩，从而改变钢蜗壳和混凝土之间的缝隙分布以及内水压力的外传比例。在考虑设计内水压力引起混凝土损伤开裂的基础上，研究温度作用下内压外传机制以及裂缝扩展规律是蜗壳结构理论研究的发展方向之一。

（3）垫层材料长期力学特性。规范[45]推荐了聚氨酯软木（PU板）、聚乙烯闭孔泡沫（PE板）和聚苯乙烯泡沫（PS板）等非金属的合成或半合成材料作为垫层材料，工程上常用的是聚氨酯软木（如拉西瓦和李家峡等）和聚乙烯闭孔泡沫（如龙滩和三峡等）。垫层材料的弹性模量通常为1～3 MPa，厚度一般采用20～50 mm。早期研究垫层蜗壳时大都假定垫层材料是线弹性的，忽略材料非线性，实际上3种材料的应力-应变均不满足线性关系，其中聚乙烯闭孔泡沫和聚苯乙烯泡沫的非线性非常显著[46]。同时，已有数值分析结果表明，垫层材料的非线性力学特性值得被关注和重视[47]。试验研究发现，聚氨酯软木和聚乙烯闭孔泡沫在反复加、卸载作用下均会出现一定的永久残余变形，在设计阶段应充分考虑该特性带来的不利影响，实际应用时宜提前对垫层材料进行预压，降低其残余变形的影响[48]。

上述研究考虑的时间尺度较小，未能涉及垫层材料长期的蠕变特性及耐久性，对其在机组长期运行中的性能劣化乃至失效机制缺乏认识，对机组服役期内稳定运行的影响尚不明确。后续有必要对垫层材料在较大时间尺度下的性能演变开展研究，从而进一步揭示垫层蜗壳全生命周期的力学特性。

（4）钢蜗壳-混凝土接触振动传递机制。三峡水电站15#机组直埋蜗壳论证过程中，研究人员比较关注直埋蜗壳外围混凝土损伤开裂后厂房结构动力特性的变化情况。研究时混凝土损伤开裂的模拟方式主要有裂缝概化模型[49-50]和损伤塑性模型[51-53]，前者根据静力计算和模型试验结果，对开裂部位

的混凝土弹性模量人为折减，存在较大的人为因素，而后者混凝土单元弹性模量则根据静力损伤程度由程序自动计算折减，具有较高的计算精度。分析上述研究成果可知，无论采用哪种力学模型，蜗壳外围混凝土的材料非线性都不是厂房动力特性和响应的主要影响因素。

相比材料非线性，钢蜗壳与混凝土之间的动力接触问题关注度相对不足，目前仅中国水利水电科学研究院的研究人员结合三峡水电站开展了相关研究[54]，结果表明：(1)进行流道脉动压力作用下的厂房振动分析时，钢蜗壳与混凝土之间的接触不能被忽略；(2)钢蜗壳与外包混凝土之间初始缝隙的存在，对混凝土结构能起到一定程度的隔振作用。实际监测结果和计算结果对比分析也表明，厂房实际振动响应小于计算值，文献[55]分析原因之一可能是钢蜗壳与混凝土之间实际缝隙大于预期设计值，并推测实际运行时3种蜗壳埋设方式下钢蜗壳与混凝土之间可能都存在缝隙，这与过去假定任何水头下直埋蜗壳和垫层蜗壳必然贴紧混凝土是相悖的。文献[56]结合景洪直埋蜗壳开展了现场振动测试，测试结果表明，经钢蜗壳传导后，蜗壳内部的水力振动由低频振动转移至高频振动，而经过混凝土后再次降频，首次从频域的角度分析了脉动压力的传导规律。

综合以上分析可知，目前关于钢蜗壳与混凝土之间动态接触问题的研究尚不充分，低水位低温季节时，钢蜗壳与外围混凝土接触面在一定范围可能长期处于脱空状态，脉动压力沿钢板–缝隙–混凝土向外传递，钢蜗壳–混凝土动力接触属性对钢蜗壳及厂房结构振动响应的影响值得进一步研究。

(5)钢蜗壳及座环疲劳失效。文献[57]的研究表明，蜗壳座环在脉动压力作用下不会发生高周疲劳破坏，脉动压力引起的动应力幅值较低。与流道脉动压力相比，蜗壳充水运行和放空带来的静水压力循环幅值较高，蜗壳和座环的应力幅值较高，可能引起流道金属结构出现低周疲劳破坏[58]。该问题对于承担调峰调频的常规机组和抽水蓄能电站是比较突出的，承担调峰调频的机组往往开停机频繁，负荷变化范围大，例如隔河岩水电站每年开停机达到1800次。鲁地拉水电站运行不久座环固定导叶发生了疲劳断裂[59]，且该现象并不罕见[60-61]。随着蜗壳HD值的增大，乌东德水电站已经采用800 MPa级高强钢，钢蜗壳应力水平将随之进一步提高。但作为焊接结构，提高母材的屈服强度对焊接接头疲劳特性的影响并不明显[62]，高强钢的使用与钢蜗壳疲劳风险之间的内在联系应该引起重视。

蜗壳结构体型复杂，由于过去研究蜗壳结构时侧重点不同，对钢蜗壳和座环局部构造的模拟不够精细，而局部不连续的部位恰好是容易出现应力集中的部位。钢蜗壳管节和座环之间焊缝众多，尤其蜗壳鼻端区域焊接非常复杂，并非典型的焊接接头，疲劳分析时名义应力的定义以及S–N曲线的选取都是比较困难的。目前常用的名义应力法、结构应力法及缺口应力法在实用性和科学性方面存在各自的优势和不足[63]，如何综合应用到蜗壳结构的疲劳分析中是未来非常值得研究的课题。

4.2 应用发展方向 文献[6]和文献[64]分别强调应以“控制”的理念看待垫层和缝隙，武汉大学和天津大学研究人员提出了两种缝隙构造方式，为蜗壳埋设方式的发展提供了新的思路，与“控制”理念相契合。

(1)预热膨胀构造初始缝隙的蜗壳埋入方式。施工阶段通过加热钢蜗壳产生膨胀变形，采用预热膨胀的方式替代充水保压。文献[65]的研究表明，预热膨胀与充水保压两种方式下，钢蜗壳产生的初始变形、初始间隙分布及闭合规律具有明显差异，但从外包混凝土承载比、运行期混凝土应力水平及特征截面合力的宏观角度出发，预热膨胀埋设方式能够减小运行期蜗壳内水压力向混凝土传递，两种方案存在替代关系。

(2)可融涂层构造初始缝隙的蜗壳埋入方式。相比充水保压和预热膨胀方式间接形成缝隙，该种蜗壳埋入方式属于直接形成缝隙。蜗壳安装固定后，在钢蜗壳外表面涂抹一定厚度的石蜡或某种涂层，涂层厚度可通过有限元计算拟定；混凝土硬化后，通过加热钢蜗壳到一定的温度融化涂层并从预留孔排出，以形成缝隙。采用这种埋入方式可以省去充水保压阶段的闷头和座环内封环，施工相对简便，但需重点研究涂层材料的热稳定性。

5 结语

经过我国工程设计人员和研究人员的努力，20多年前关于建设期蜗壳埋入方式的诸多疑问获得

了解决，但也无法回避在水电建设高速发展之下，诸多科学问题的探索是落后于工程实践的。蜗壳结构作为水轮发电机组的核心部件，始终承受动态循环荷载的作用，不能以静止的视角看待蜗壳结构长达几十年的连续服役。我国早期投产的大中型水电站即将步入“中年”阶段，凝聚科研力量，综合检测、监测、理论分析等各种手段，管理单位、机组厂家及设计单位多方协同，及时发现运行期存在的隐患，避免我国出现萨扬舒申斯克水电站类似的重大事故，是未来水电站厂房设计和研究人员以及机电设备制造厂家的努力方向。

参 考 文 献：

[1] 阿辛比尔格 В И，阿尔希波夫 А М．钢衬钢筋混凝土蜗壳研究[J]．伍鹤皋，白建明，译，水电站设计，1993，9(1)：87-88．

[2] 阿列克桑德罗夫 В Г，阿尔希波夫 А М．萨彦舒申斯克水电站水轮机机座的结构特点[J]．刘正启，译，水利水电快报，1999，20(12)：3-5．

[3] 钮新强，谢红兵，刘志明．三峡右岸电站蜗壳直埋方案研究[J]．人民长江，2008，39(1)：1-2．

[4] 袁达夫，谢红兵．大型混流式水轮机蜗壳的埋设方式[J]．人民长江，2009，40(16)：37-39．

[5] 郝军刚，傅丹，伍鹤皋．水电站直埋-垫层组合蜗壳结构受力特性分析[J]．武汉大学学报(工学版)，2014，47(3)：306-310．

[6] 张启灵，伍鹤皋．水电站垫层蜗壳结构研究和应用的现状和发展[J]．水利学报，2012，43(7)：869-876．

[7] 张玉美．对蜗壳外包钢筋混凝土受力问题的探讨[J]．水利水电技术，1993，24(1)：27-30，36．

[8] 董毓新，鲁一晖，马震岳．钢衬和钢筋混凝土联合承载蜗壳结构分析[J]．大连理工大学学报，1995，35(3)：389-394．

[9] 李胜军，马波，王日宣，等．钢衬钢筋混凝土蜗壳结构非线性分析[J]．天津大学学报，1999，32(3)：3-5．

[10] 伍鹤皋，马善定，白建明．三峡水电站充水保压蜗壳平面非线性分析[J]．水利学报，2003(5)：57-61．

[11] 肖阳．水电站蜗壳结构非线性分析与设计优化[D]．大连：大连理工大学，2004．

[12] 张雪利．水电站蜗壳结构的裂缝分析与优化设计[D]．大连：大连理工大学，2006．

[13] 亢景付，孙少杰．西龙池抽水蓄能电站蜗壳结构非线性有限元分析[J]．水力发电学报，2007，26(5)：42-46．

[14] 伍鹤皋，蒋逵超，申艳，等．三峡水电站完全联合承载蜗壳结构研究[C]//第六届全国水电站压力管道学术论文集．贵州省科学技术协会，2006．

[15] 伍鹤皋，蒋逵超，申艳，等．直埋式蜗壳三维非线性有限元静力计算[J]．水利学报，2006，37(11)：1323-1328．

[16] 张运良，张存慧，马震岳．三峡水电站直埋式蜗壳结构的非线性分析[J]．水利学报，2009，40(2)：220-225．

[17] 陈琴，林绍忠，苏海东．大型机组直埋式蜗壳结构不同限裂措施的三维非线性分析[J]．长江科学院院报，2008，25(6)：101-105．

[18] 张存慧，张运良，马震岳．内水压力重复加载作用下蜗壳外围钢筋混凝土的损伤分析[J]．水利学报，2008，39(11)：1262-1266．

[19] 蒋逵超，伍鹤皋，申艳．完全联合承载蜗壳三维非线性分析[J]．水力发电学报，2007，26(1)：71-76．

[20] 伍鹤皋，黄小艳，张启灵，等．水电站直埋蜗壳结构受力特性与承载力[J]．天津大学学报，2008，41(7)：777-782．

[21] SL 191-2008，水工混凝土结构设计规范[S]．

[22] 秦继章，马善定，戴会超．高水头抽水蓄能电站蜗壳结构配筋原理研究[J]．水力发电学报，2006，25(1)：30-33．

[23] 伍鹤皋，马善定，秦继章．大型水电站蜗壳结构设计理论与工程实践[M]．北京：科学出版社，2009．

[24] 秦继章，马善定，龚国芝，等．三峡水电站“充水保压”蜗壳三维仿真整体结构模型试验[J]．水利学报，2002(10)：33-38．

[25] 李文慧．二滩水电站水轮机蜗壳联合受力监测研究[J]．水电站设计，2003，19(3)：41-44．

[26] 张启灵，伍鹤皋．水电站蜗壳结构配筋计算原则研究[J]．应用基础与工程科学学报，2009，17(4)：536-542．
[27] 张运良，陈婧，马震岳，等．不同埋设方式下巨型蜗壳结构的静动力特性对比研究[C]//2008中国水力发电论文集．北京：中国水力发电工程学会，2008．
[28] 张启灵，伍鹤皋，黄小艳，等．大型水电站不同埋设方式蜗壳结构分析[J]．水力发电学报，2009，28(3)：85-90．
[29] 张启灵，伍鹤皋，李端有．水电站蜗壳垫层平面铺设范围的确定原则[J]．应用力学学报，2011，28(2)：194-200．
[30] 陈琴，苏海东，崔建华，等．大型机组蜗壳不同埋设方式的结构开裂分析[J]．长江科学院院报，2009，26(4)：40-43．
[31] 姚栓喜，孙春华，王冬条．关于水轮机蜗壳结构不平衡水推力初步研究[J]．西北水电，2010(5)：16-20．
[32] 张宏战，姚栓喜，马震岳，等．不平衡水推力下垫层蜗壳座环结构剪力特性分析[J]．大连理工大学学报，2013，53(4)：565-571．
[33] 李晓俊，张宏战，陈婧，等．垫层蜗壳座环结构剪切力特性分析[J]．水电能源科学，2011，29(11)：159-161．
[34] 傅丹，伍鹤皋，胡蕾，等．水电站垫层蜗壳座环传力机理研究[J]．水力发电学报，2014，33(4)：196-201．
[35] 傅丹，伍鹤皋，石长征．水电站充水保压蜗壳接触行为及座环受力研究[J]．四川大学学报(工程科学版)，2014，46(S2)：54-59．
[36] 许新勇，李敏芝，马震岳，等．基于非均匀间隙的充水保压蜗壳施工仿真分析[J]．水力发电学报，2009，28(4)：75-80．
[37] 郭涛，张立翔，李世杰．基于非均匀缝隙的充水保压蜗壳三维仿真算法研究[J]．水利学报，2015，46(12)：1434-1443．
[38] 傅丹，伍鹤皋，胡蕾．水电站充水保压蜗壳间隙闭合及接触传力特性[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2014，42(7)：27-32．
[39] 王金辉．温度对充水保压蜗壳结构蜗壳与外围混凝土间隙的影响[D]．天津：天津大学，2007．
[40] 张杨．三峡左岸电站蜗壳保温保压系统施工研究[J]．水利水电快报，2009，30(6)：28-30．
[41] 练继建，喻刚，王海军．温度变化对水电站蜗壳结构配筋的影响[J]．天津大学学报，2006，39(8)：957-962．
[42] 王林玉，朱向荣，钟秉章．岩石抗力和内外温差对大型水电站蜗壳结构的影响[J]．浙江大学学报(工学版)，2000，34(4)：85-89．
[43] SL 281-2003，水电站压力钢管设计规范[S]．
[44] 吕克志，吕克金．温度作用下蜗壳外围混凝土裂缝稳定性分析[J]．水利与建筑工程学报，2012，10(1)：73-77．
[45] SL 266-2014，水电站厂房设计规范[S]．
[46] 甘启蒙．聚氨酯软木垫层材料在水电站的应用[J]．水力发电，2008，34(12)：107-109．
[47] ZHANG Qiling，WU Hegao．Effect of compressible membrane's nonlinear stress-strain behavior on spiral case structure[J]．Structural Engineering and Mechanics，2012，42(1)：73-93．
[48] 张启灵，胡蕾，胡超，等．蜗壳垫层材料压缩-回弹响应行为的试验研究及数值模拟[J]．工程科学与技术，2018，50(5)：71-76．
[49] 张运良，马震岳，王洋，等．混凝土开裂对巨型水电站主厂房动力特性的影响[J]．水利学报，2008，39(8)：982-987．
[50] 欧阳金惠，陈厚群，张超然，等．156m水位下三峡水电站15#机组厂房结构的振动安全研究[J]．水利水电技术，2007，38(9)：48-51．
[51] 蒋逵超，伍鹤皋，申艳，等．脉动压力作用下直埋式蜗壳非线性动力响应[J]．水力发电学报，2007，26(4)：103-109．
[52] 申艳，伍鹤皋，蒋逵超．三峡水电站直埋式蜗壳结构自振特性[J]．武汉大学学报(工学版)，2007，40(6)：56-60，65．
[53] 张存慧，马震岳，张运良．三峡右岸电站主厂房结构的振动应力分析[J]．水力发电学报，2010，29(6)：

144-148.
[54] 欧阳金惠，陈厚群，张超然，等.基于接触单元的三峡电站厂房振动分析[J].水力发电学报，2008，27(5)：41-46.
[55] 欧阳金惠，陈厚群，张超然.大型水电站蜗壳埋设方式对厂房振动的影响分析[J].水力发电学报，2012，31(4)：162-166，174.
[56] 职保平，马震岳，张宏战，等.直埋式蜗壳结构动力响应特性真机测试分析研究[J].水力发电，2011，37(8)：52-55.
[57] 王洋，马震岳，张运良，等.脉动水压力作用下巨型水电站流道系统的疲劳分析[J].水电能源科学，2007，25(1)：98-101.
[58] 张启灵，傅丹，胡蕾，等.充水保压蜗壳结构中钢衬的低周疲劳问题[J].华中科技大学学报(自然科学版)，2017，45(8)：127-132.
[59] 文劲，崔茁，郭楠，等.鲁地拉电站座环固定导叶疲劳断裂分析[J].云南水力发电，2020，36(3)：53-56.
[60] 边美华.水轮机固定导叶裂纹原因分析及处理[J].电焊机，2015，45(12)：149-151.
[61] 翟建平，马华明，董大龙.白水峪水电厂水轮机固定导叶裂纹的处理[J].水电与新能源，2012，26(3)：48-50.
[62] 兆文忠，李向伟，董平沙.焊接结构抗疲劳设计[M].北京：机械工业出版社，2017.
[63] 张彦华，刘娟，杜子瑞，等.焊接结构的疲劳评定方法[J].航空制造技术，2016，59(11)：51-56.
[64] 郭涛，张立翔，武亮.水电站充水保压蜗壳结构研究和应用综述[J].昆明理工大学学报(自然科学版)，2015，40(3)：70-78.
[65] 喻鹏.水电站钢蜗壳预热膨胀埋设方式研究[D].武汉：武汉大学，2020.

Review and prospect in research and application of spiral case structure in hydropower plant

WU Hegao，GAO Xiaofeng，FU Dan

(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science*，*Wuhan University*，*Wuhan* 430072，*China*)

Abstract：The application and development of three embedding methods of spiral case in hydropower plant is summarized briefly in this paper，as well as the innovative achievements on the embedding methods of spiral case of 700MW class hydro turbine in China. Three significant advances are pointed out，i.e. nonlinear numerical analysis method of spiral case structure，reinforcement calculation principle of surrounding concrete，and the design philosophy focusing on the safe and reliable operation of unit. At present，there are some deficiencies in the theoretical research of spiral case structure，and attention should be paid to formation mechanism of hydration heat gap in construction period，temperature effect during operation period，long-term mechanical properties of compressible membrane，conductive features of pulsating pressure in metal-to-concrete interface，and fatigue failure of spiral case and stay ring. Two new embedment methods of spiral case are introduced，based on thermal effect under preheating condition and fusible coating. Finally，it is suggested that the service process of spiral case structure for decades should be considered from a continuous and dynamic perspective，and full attention should be paid to the potential risk caused by structure aging.

Keywords：hydropower plant；spiral case structure；embedding method of spiral case；spiral case with partial membrane covering；finite element method

（责任编辑：王冰伟）