

# 橡胶水封接头可靠性提高技术与性能试验\*



闫晓青, 汤伟毕, 陈露露

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:** 针对三峡升船机下闸首工作大门充压水封存在接头质量差、强度低等问题, 为了减少充压水封对下闸首工作大门整体使用性能的影响, 综合考虑充压水封运输及现场安装条件, 对充压水封接头成型方法进行优化, 提出了橡胶水封“分段填模、整体成型”的新接头成型方法。采用两种不同接头成型方法制作了充压水封接头试样, 对充压水封接头部位试样进行了孔隙率测定, 并开展拉伸特性与抗冲磨性能试验。试验结果表明: “分段填模、整体成型”的橡胶水封接头成型方法可大幅提高充压水封接头质量和强度, 延长充压水封服役寿命, 且对充压水封硬度及其它机械物理性能影响较小。

**关键词:** 三峡升船机; 充压水封; 分段填模、整体成型; 接头可靠性; 拉伸性能

中图分类号: U 642.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0132-05

## Reliability improvement technology and performance test of rubber water seal joint

YAN Xiao-qing, TANG Wei-bi, CHEN Lu-lu

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China)

**Abstract:** In view of the poor joint quality and low strength of the pressurized water seal for the working gate of the lower lock head of the Three Gorges ship lift, we need to reduce the impact of the pressurized water seal on the overall service performance of the working gate of the lower lock head. Hence, this paper optimizes the molding method of the pressurized water seal joint by comprehensively considering the transportation and on-spot installation conditions of the pressurized water seal. As a result, we propose a new joint molding method of rubber water seal with “mold feeding by sections and forming as a whole.” Specifically, we adopt two different molding methods to make samples of the pressurized water seal joint, measure the porosity of the samples, and test their tensile properties and abrasion resistance. The results reveal that the molding method of “mold feeding by sections and forming as a whole” could prolong the service life of the pressurized water seal by substantially improving its quality and strength, with little impact on its hardness and other mechanical and physical properties.

**Keywords:** the Three Gorges ship lift; pressurized water seal; mold feeding by sections and forming as a whole; joint reliability; tensile property

橡胶水封是保证水工金属结构正常运行及封水效果的关键部件。橡胶水封接头成型方法受硫化机、模具及工装成本控制等客观因素的限制, 硫化机加热面板及橡胶水封成型模具都无法达到整条橡胶水封长度。另外, 受橡胶水封产品包装、运输条件及安装要求等因素的限制, 亦需要在水

封安装现场进行分节橡胶水封接头硫化黏接成型。因此, 橡胶水封的接头质量成为影响水封整体性能的关键部位, 而橡胶水封接头又是整件水封中承力相对较薄弱部位<sup>[1-4]</sup>。据试验检测与工程应用数据统计显示, 传统橡胶水封接头成型方法, 其接头部位在厂内生产过程为全硫化橡胶材料接头+

收稿日期: 2022-04-02

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402007)

作者简介: 闫晓青(1986—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事船闸与升船机运维技术与管理研究。

预成型半成品橡胶材料接头的方式,接头部位实际强度约为橡胶本体强度的85%~90%。工厂生产工况条件下,接头部位采用全硫化橡胶材料接头+接头生橡胶片+全硫化橡胶材料接头,实际强度约为橡胶本体强度的75%~85%。而在水工金属结构安装现场条件下,接头部位采用全硫化橡胶材料接头+接头生橡胶片+全硫化橡胶材料接头,实际强度约为本体强度的60%~75%。鉴于安装现场的实际工况、加热加压条件及操作人员专业性等因素的限制,橡胶水封接头在安装现场硫化黏接成型的强度很难达到理想效果。

三峡升船机下闸首工作大门充压水封在建设调试及运行期间多次发现水封接头部位破损裂纹漏气,导致发生较严重的漏水情况。针对上述技术问题,齐俊麟等<sup>[5-8]</sup>提出了两节橡胶水封需要对接时在水封两端分别预留150~200 mm的预成型半成品橡胶材料接头(即生胶)的方法,并研制了配套硫化模具,实现了两节橡胶水封对接时接头部位整体成型,即“分段填模,整体成型”的橡胶水封接头成型方法(简称“新接头成型方法”)。为了验证新接头成型方法制作的橡胶水封接头部位性能,以三峡升船机下闸首工作大门充压水封为例,分别采用传统接头成型方法与新接头成型方法制作充压水封接头试样,并对充压水封接头试样的拉伸性能、孔隙率及抗冲磨性能进行试验检测对比,为橡胶水封接头成型方法优化改进提供了科学依据。

## 1 工程概况

三峡升船机下闸首工作大门为下沉式平板门,外形尺寸28.84 m×19.75 m×4.7 m,质量约670 t,在工作大门的下游侧(迎水面)布置有两道U形充压水封(图1),充压水封由水封装置、动力源设备及其电气控制设备等组成。水封装置由山形橡胶水封、止水压板、止水座板和紧固件等组成密闭结构,内、外侧充压水封均由1件底封水橡皮、2件侧封水橡皮、2件转角封水橡皮、2件封堵橡皮组成,总长约56.5 m,其中山形橡胶水封的封

头材料为SF6674、肢体和翼头的材料为SF2050。动力源及其电控设备共2套,布置在U形门体结构两侧的空腔内。下闸首工作大门正常挡水时,两道充压水封同时工作,充压水封装置保压,当压力下降到设定压力时,压力源启动向水封装置充压,至设定压力后停机。调整门位过程中,内侧充压水封工作,外侧充压水封泄压退出工作;门位调整结束后,外侧充压水封重新充压投入工作。

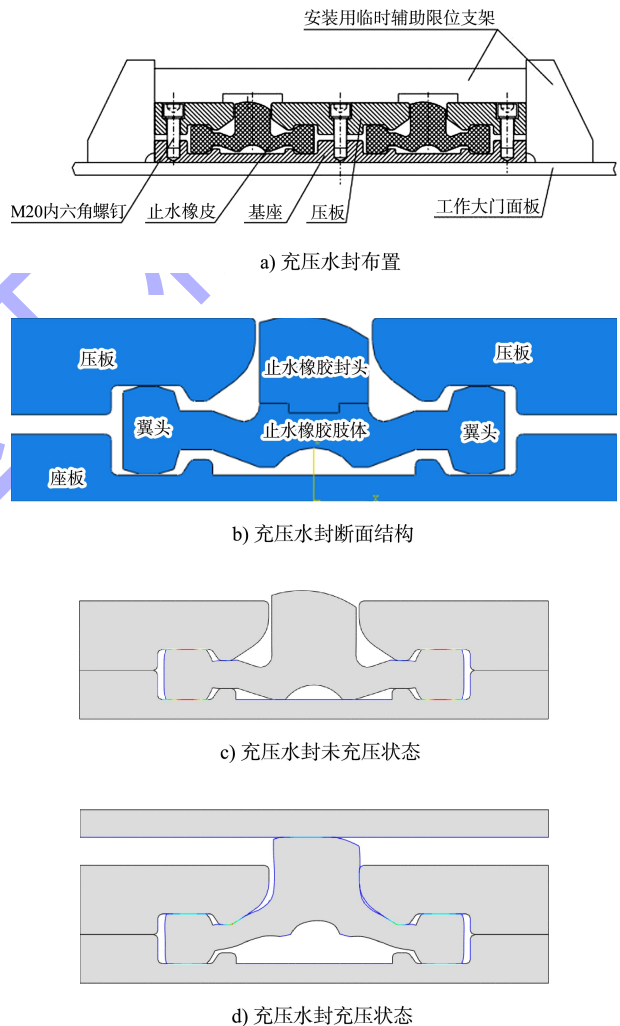


图1 下闸首工作大门充压水封装置

## 2 试验方法

为了验证新接头成型方法对橡胶水封接头部位性能的改善效果,采用传统接头成型方法和新接头成型方法制作了与三峡升船机下闸首工作大门充压水封材料相同、断面形式相同、尺寸相同的橡胶水封接头试样,并对其拉伸性能、孔隙率

及抗冲磨性能进行试验测试对比。

在橡胶水封生产厂内制作 5 个下闸首工作大门充压水封接头试样，试样 1 为橡胶水封本体试样，试样 2 为传统接头成型方法制作的全硫化橡胶材料接头+预成型半成品橡胶材料接头试样，试样 3 为新接头成型方法制作的预成型半成品橡胶材料接头+预成型半成品橡胶材料接头试样；试样 4 为传统接头成型方法制作的全硫化橡胶材料接头+接头生橡胶片+全硫化橡胶材料接头试样；试样 5 为新接头成型方法模拟安装现场制作的预成型半成品橡胶材料接头+预成型半成品橡胶材料接头试样。每个试样长度约为 1 m，制作的试样见图 2。



图 2 厂内制作的充压水封接头试样

### 3 试验结果

#### 3.1 拉伸强度试验结果

对试验制作的 5 个下闸首工作大门充压水封接头试样进行机械物理性能测试，测试标准为 GB/T 528—1998《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》、GB/T 531—1999《橡胶袖珍硬度计压入硬度试验方法》，制取标准检测试片见图 3；拉伸强度测试采用的测量仪器为 GT-TCS-2000 电子拉力试验机<sup>[9-11]</sup>，见图 4；试验检测结果见表 1。

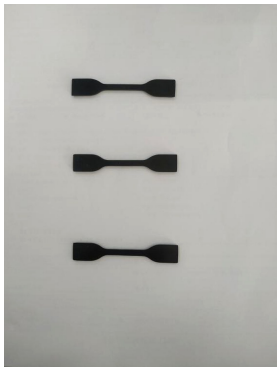


图 3 制取的标准试片

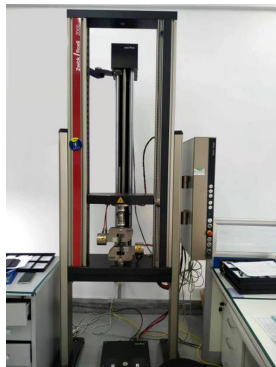


图 4 电子拉力试验机

表 1 橡胶水封接头部位试验测试数据对比

制作方式	部位	试样	硬度(邵氏 A)/度	拉伸强度/MPa	扯断伸长率/%	撕断强度(直角)/(kN·m <sup>-1</sup> )
厂内制作	翼头	1	42	20	537	37
		2	42	17	552	38
		3	47	20	641	35
	封头	1	63	23	542	38
		2	63	19	535	39
		3	64	23	565	34
安装现场制作	翼头	1	42	20	537	37
		4	48	15	601	34
		5	48	20	611	32
	封头	1	63	23	542	38
		4	62	16	501	33
		5	63	22	507	34

分析实测数据，三峡升船机下闸首工作大门充压水封翼头本体拉伸强度为 20 MPa，封头本体拉伸强度为 23 MPa。1)采用传统接头成型方法模拟厂内生产制作的试样 2 翼头接头处拉伸强度为 17 MPa、封头接头处拉伸强度为 19 MPa，分别为橡胶水封本体拉伸强度的 85.0%、82.6%；模拟橡胶水封安装现场制作的水封接头试样 4 翼头接头处拉伸强度为 15 MPa、封头接头处拉伸强度为 16 MPa，分别为橡胶水封本体拉伸强度的 75.0%、69.6%。2)采用新接头成型方法模拟厂内生产制作的水封接头试样 3 翼头接头处拉伸强度为 20 MPa、封头接头处拉伸强度为 23 MPa，均达到了橡胶水封 100%本体拉伸强度；模拟橡胶水封安装现场的水封接头试样 5 翼头接头处拉伸强度为 20 MPa、封头接头处拉伸强度为 22 MPa，分别为橡胶水封本体拉伸强度的 100%、95.7%。

#### 3.2 孔隙率测试结果

为了检验橡胶水封接头部位致密性，分别对试样 2~4 进行孔隙率测定，各水封接头试样孔隙率测试结果见表 2。

表 2 水封接头部位孔隙率测定结果

接头成型方法	试样编号	接头部位孔隙率/%
传统方法	4	7.41
传统方法	2	5.28
新方法	3	2.30

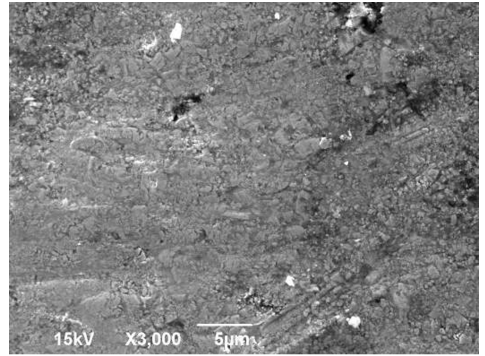
由表 2 可以看出, 橡胶水封在传统接头成型方法条件下, 试样 2 和 4 接头部位孔隙率均为大于 5%; “分段填模, 整体成型” 接头成型方法条件下, 试样 3 接头部位孔隙率小于 3%。这表明新接头成型方法模拟厂内生产制作的水封接头试样接头部位的孔隙较少、致密性较好。一般来说, 接头部位的孔隙率越低则综合性能越好。

### 3.3 磨粒磨损试验结果

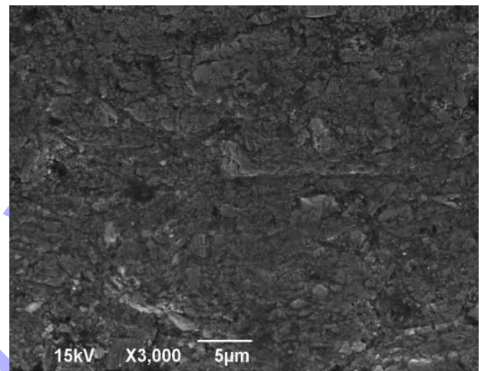
为了检验新接头成型方法制作的橡胶水封接头的耐磨性, 分别对传统接头成型方法和新接头成型方法制作的试样 2~4 进行了磨粒磨损试验, 试验结果见表 3 和图 5、6。

表 3 水封接头部位磨粒磨损试验结果

接头成型方法	试样编号	失重		
		载荷 13N, 磨粒 60 目	载荷 13N, 磨粒 100 目	载荷 5N, 磨粒 100 目
传统方法	4	0.142 0g	0.111 7g	0.084 0g
传统方法	2	0.120 3g	0.109 7g	0.062 7g
新方法	3	0.115 0g	0.103 5g	0.060 0g

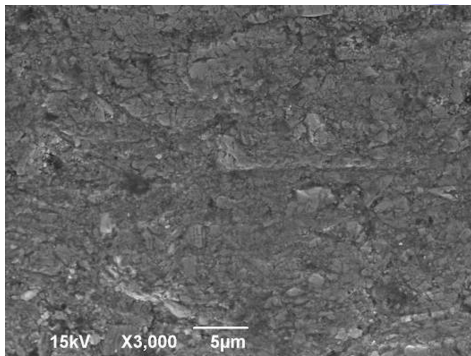


a) 磨料粒度60目

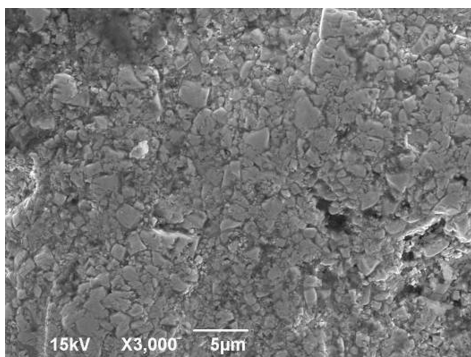


b) 磨料粒度100目

图 6 水封接头部位在不同磨料粒度磨损后的表面微观形貌对比



a) 荷载5 N



b) 荷载13 N

图 5 水封接头部位在不同载荷磨损后的表面微观形貌对比

图 5 为试样 3 在不同载荷磨损后的表面微观形貌, 从表 3、图 5a) 可以看出, 当试验载荷为 5 N 时, 试样 3 表面颗粒受到棕刚玉颗粒沿橡胶轮线速度方向的切削磨损, 而在晶界处产生断裂, 接头部位表面以小块的颗粒形式脱落, 而后在接头部位的表面形成空穴, 由于载荷较小, 未在接头部位磨损表面形成明显的犁沟, 此时接头部位的失效主要为晶粒剥落方式。当载荷为 13 N 时, 如表 3、图 5b) 所示, 接头部位表面颗粒失效形成空穴的同时, 接头部位的磨损表面也存在明显的犁沟, 这时接头部位的失重随之增加, 犁沟具有较大的深度且其长度已横穿整个接头断面, 并且造成了接头部位硬质颗粒的剥落, 此时接头部位的失效形式为犁沟切削方式与硬质颗粒剥落相结合。试验结果表明, 新接头成型方法条件下, 模拟厂内生产试样 3 接头部位具有最佳的耐磨性能。

图6为新接头成型方法条件下,模拟厂内生产的试样3在不同磨料粒度下磨损后的表面微观形貌。由图6a)可以看出,磨料粒度为60目时,接头部位表面存在着大量的犁沟,并且接头部位表面晶粒剥落所形成的空穴的分布比较密集且其直径较大。在图6b)中,磨料粒度为100目时,与图6a)相比较,空穴的密度明显降低,接头部位表面同样存在犁沟,与前者相同,两者的失效形式同为硬质颗粒剥落和犁沟切削相结合。

### 3.4 冲压损伤试验结果

传统接头成型方法和新接头成型方法制作的试样2~4在冲压强度为0.3 MPa、不同冲压角度下的接头部位失重对比见表4。

表4 水封接头部位冲压损伤试验结果

接头成型方法	试样编号	失重	
		30°	90°
传统工艺	4	0.018 0g	0.019 8g
传统工艺	2	0.008 6g	0.012 8g
新工艺	3	0.006 8g	0.010 4g

由表5可以看出,在冲压角度为30°与90°时,新接头成型条件下,模拟厂内生产试样3接头部位的耐冲压损伤性能最佳。

## 4 结论

1)“分段填模,整体成型”橡胶水封接头成型方法在橡胶水封生产过程中,水封接头部位实现了整体硫化,所以该接头成型方法不仅可以改善橡胶水封的外观质量、实现接头处无硫化接头痕迹的视觉效果,而且可以极大地增加橡胶水封接头部位的强度,理论上可以达到橡胶水封本体强度的95%以上。同样,在保证现场实际工况和设备条件满足规范要求的情况下,橡胶水封安装现场硫化粘接的接头部位亦可达到工厂制作的外观和强度质量标准。

2)相比采用传统接头成型方法,采用“分段填模,整体成型”的橡胶水封接头成型方法,充

压水封厂内生产与现场硫化粘接的接头拉伸强度最少约提高15.0%和25.0%。“分段填模,整体成型”接头成型工艺制作的橡胶水封接头部位具有优异的抗磨粒磨损、冲蚀磨损能力,可以有效提高橡胶水封接头部位性能、极大延长橡胶水封服役寿命,且成型方法对充压水封接头硬度及其它机械物理性能影响较小。

### 参考文献:

- [1] 熊润娥,严根华. 水工闸门止水结构动力特性与体型优化[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 798-802, 818.
- [2] WANG X, LUO S Z, HU Y A, et al. High-speed flow erosion on a new roller compacted concrete dam during construction [J]. Journal of hydrodynamics (B), 2012, 24(1): 32-38.
- [3] 李家熹. 阀门止水装置可靠性与失效分析[J]. 水运工程, 1992(11): 33-36, 13.
- [4] 刘礼华, 雷艳, 方寒梅, 等. 自封闭式高压闸门水封的试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(6): 714-718.
- [5] 长江三峡通航管理局. 橡胶水封用胶料及其制备成型方法和设备, 中国. CN202010762741.9[P]. 2020-11-13.
- [6] 薛小香, 吴一红, 李自冲, 等. 高水头平面闸门P型水封变形特性及止水性能研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 56-61, 92.
- [7] 闫晓青, 向化雄, 龚国庆, 等. 三峡升船机上闸首工作门止水结构数值模拟与优化改造[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6): 167-171.
- [8] 中国电力企业联合会. 水电水利工程钢闸门制造安装及验收规范: DL/T 5018—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [9] 胡小玲, 刘秀, 李明, 等. 炭黑填充橡胶超弹性本构模型的选取策略[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 34-42, 48.
- [10] 中国石油和化学工业协会. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定: GB/T 528—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [11] 国家石油和化学工业局. 橡胶袖珍硬度计压入硬度试验方法: GB/T 531—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

(本文编辑 武亚庆)