

# 水电站压力钢管接触灌浆补灌指标敏感性分析

杨兴义,牛 斌,安伟伟

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,四川 成都 610072)

**摘要:**根据哈萨克斯坦玛依纳水电站压力钢管接触灌浆的施工情况,采用三维有限元法对钢管脱空处的变形及应力进行计算分析,研究水电站压力钢管补充灌浆指标的通用计算方法。根据脱空面积及深度的敏感性分析成果,确定钢管补充灌浆开孔标准。电站至今已安全运行3 a,表明计算采用的分析方法合理、可靠。

**关键词:**压力钢管;接触灌浆;敏感性分析;三维有限元法;玛依纳水电站

**中图分类号:**TV547.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2013)S2-0056-03

水电站地下压力钢管安装及外部回填混凝土施工完成后,由于施工工艺及混凝土干缩等原因,在回填混凝土与钢管之间常存在脱空现象,此时可利用压力钢管上预留的接触灌浆孔,对钢管与混凝土之间的缝隙进行接触灌浆。但灌浆工艺的不同以及灌浆方法的差异,导致在接触灌浆完成后,对钢管进行敲击检查时,仍然会存在不同程度的脱空。设计技术要求中通常规定当脱空面积超过某给定值时,需新增开孔进行补充灌浆。新增灌浆孔补强、封孔将引起应力集中或焊接裂纹,尤其对高强钢危害更大。同时,在施工时灌浆孔多数情况下有水,封孔焊接困难,若封堵不好,将形成漏水通道,并威胁钢管安全。另外由于工期的原因,一般情况下大多数电站都很难再对钢管进行补充灌浆,此时,设计单位需要根据钢管具体的脱空形态(范围及深度)进行分析计算,以确定钢管在不进行补充灌浆情况下结构是否安全。

DL/T5141—2001《水电站压力钢管设计规范》<sup>[1]</sup>(以下简称规范)中,对可以不进行补充接触灌浆的脱空面积指标并未做明确规定。设计单位通常都采用工程类比或定性分析方法,确定一个不需要进行补充灌浆的脱空面积指标。而这些脱空面积指标的确定,并没有计算依据,同时也没有标准可以参考。因此,在进行具体工程设计时,需要针对压力钢管的脱空情况进行定量分析,尤其是涉外工程,国外咨询工程师把钢管脱空面积及深度的定量分析作为判别钢管是否安全的唯一方法。

采用何种方法定量分析计算钢管脱空面积及深

度对其应力的影响,是当前压力钢管设计亟待解决的问题。本文依托哈萨克斯坦玛依纳水电站压力钢管接触灌浆的具体实施,采用三维有限元法对钢管脱空范围内的应力及变形进行定量分析,从而研究水电站压力钢管补充灌浆指标(脱空面积及深度)的通用计算方法。

## 1 工程简介

### 1.1 压力钢管设计简介

哈萨克斯坦玛依纳水电站压力钢管布置为地下埋藏式,由上平段、竖井段和下平段以及岔支管段组成<sup>[2]</sup>。主管长约4.321 m,管径4.1 m,支管长约31 m,管径2.6 m。当上覆厚度满足要求时钢管按埋管设计,即管段的内水压力由钢衬、混凝土、围岩共同承担。压力钢管采用两种钢材制造:桩号0+950 m之前采用Q345R,桩号0+950 m之后采用600 MPa级高强钢,钢管管壁厚度18~42 mm。钢管回填灌浆采用预埋灌浆管分段回填灌浆,未在钢衬上开孔。接触灌浆采用开孔灌浆法,为了减小高强钢开孔后的应力集中,在满足接触灌浆施工要求的孔径前提下,在底部60°范围内开设孔径38 mm的单、双交替布置的接触灌浆孔,接触灌浆压力0.2 MPa。

### 1.2 接触灌浆检查

压力钢管接触灌浆完成后,现场采用物探声波检测及敲击检查对灌浆效果进行评价,发现在桩号0+070 m~0+220 m、4+310 m~4+600 m段的压力钢管底部及腰线附近,存在脱空或轻微脱空现象。对

局部脱空部位附近的原有灌浆孔进行补充灌浆,进浆效果较差,增加灌浆压力后进浆并不明显,说明压力钢管脱空区域与原开设的灌浆孔未连通,需要增设灌浆孔才能进行补灌。由于对段长约 450 m 的钢管进行开孔补充接触灌浆,将直接影响引水系统的直线工期,且新增开孔灌浆要在一定程度上损伤钢管管体,开孔后需要对孔周补强,封孔将引起应力集中或焊接裂纹。为了降低高强钢开孔和灌浆孔漏堵而导致的风险,以及通过国外业主及咨询工程师的验收,需根据钢管脱空的实际情况,对钢管的应力及变形进行分析计算,研究钢管不再开孔进行补充灌浆的可能性。

2 压力钢管脱空面积敏感性分析

由于压力钢管回填混凝土及围岩的存在,假设围岩、混凝土及钢管紧贴的非常理想(缝隙不存在),钢管的计算应力是非常小的,这可以从反映围岩、混凝土及钢管的三维有限元模型中得到验证。当钢管局部地方与混凝土接触不好,有脱空现象,可能引起局部应力集中,脱空部位的应力将有所增加。物探声波检测成果表明,钢管与混凝土在桩号 4+200 m 附近底部及管腰脱空较多,为了解运行工况下脱空面积对钢管变形及应力的影响,现采用三维有限元法对桩号 4+200 m 管段进行脱空面积敏感性计算。

围岩、混凝土及钢管的计算参数:围岩变形模量取 9 GPa、泊松比取 0.27(Ⅲ类);混凝土弹性模量取 25 GPa、泊松比取 0.167;钢板弹性模量取 206 GPa、泊松比取 0.3。计算时截取桩号 4+200 m 附近 10 m 段作为脱空面积敏感性分析的模型。脱空位置位于管腰线附近,计算假定脱空处钢管可以自由变形(相当于脱空处空腔深度无限大),而非脱空部位钢管与混凝土共同变形。不同脱空面积对应的钢管应力及变形结果列于表 1。

表 1 (管)4+200 m 段脱空面积敏感性计算成果

| 脱空面积/<br>m <sup>2</sup> | 内水压力/<br>MPa | 直径/<br>m | 板厚/<br>mm | 脱空处<br>计算最大<br>变形/mm | 脱空处<br>计算最大<br>应力/MPa | 非脱空<br>处计算最<br>大变形/mm | 非脱空处<br>计算最大<br>应力/MPa |
|-------------------------|--------------|----------|-----------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1.34                    | 6.3          | 4.1      | 42        | 1.72                 | 146.5                 | 0.83                  | 84.7                   |
| 2.68                    | 6.3          | 4.1      | 42        | 3.42                 | 265.4                 | 0.83                  | 84.7                   |
| 3.13                    | 6.3          | 4.1      | 42        | 4.83                 | 286.1                 | 0.83                  | 85.4                   |
| 3.35                    | 6.3          | 4.1      | 42        | 5.45                 | 322.8                 | 0.83                  | 85.5                   |
| 3.57                    | 6.3          | 4.1      | 42        | 6.25                 | 343.9                 | 0.84                  | 86.5                   |

从表 1 可以看出,随着脱空面积的增大,钢管的变形及应力相应增大。由于有限元计算是线弹性的,脱空面积与应力的关系曲线也近似成线性变化。当脱空面积在 3.3 m<sup>2</sup> 附近时,脱空部位的钢管应力接近埋管的允许应力 315 MPa,而非脱空部位的钢管由于外包混凝土和围岩的作用,处于一个较低的

应力水平。现场在对钢管进行物探声波或敲击检查时,脱空面积容易确定,但很难确定钢管脱空的具体深度(除非对钢管进行打孔测试)。根据脱空面积敏感性分析可知,在钢管脱空面积不大于 3.3 m<sup>2</sup> 情况下,钢管应力水平处于允许范围内,结构是安全的。

3 压力钢管脱空深度敏感性分析

在上节分析钢管脱空面积对钢管应力的影响时,假定脱空部位钢管缝隙为无限大(钢管在脱空部位可以任意变形)。实际上钢管脱空深度即缝隙值是一个非均匀的定值(不是无限大),且非脱空部位有初始缝隙,也不是紧贴混凝土面。当脱空部位的缝隙值较小时,钢管变形达到一定程度后,即与混凝土发生接触,混凝土会限制钢管继续变形。钢管脱空深度也是影响钢管脱空区域应力及变形的的重要因素,因此有必要对缝隙值进行敏感性分析。

在对桩号 4+200 m 段附近作脱空深度敏感性分析时,计算中采用的围岩单位弹性抗力系数为 30 MPa/cm,其余参数同上节。三维有限元计算中采用接触单元对脱空处的缝隙值进行模拟,当钢管变形达到缝隙值时(发生接触),外包混凝土及围岩发挥弹性抗力作用,会限制钢管继续变形;当钢管变形小于缝隙值时(不发生接触),混凝土及围岩没有发挥任何作用,钢管可以任意变形。另外非脱空部位也假定混凝土与钢管之间存在初始缝隙 0.82 mm。在脱空面积维持 3.3 m<sup>2</sup> 不变的条件下,假定脱空部位的深度(缝隙值)为不同的值时,可以得出相应的钢管应力及变形值,如表 2 所示。

表 2 (管)4+200 m 段脱空深度敏感性计算成果

| 脱空深度/<br>mm | 脱空面积/<br>m <sup>2</sup> | 内水压力/<br>MPa | 直径/<br>m | 板厚/<br>mm | 脱空处<br>计算最<br>大变形/<br>mm | 脱空处<br>计算最<br>大应力/<br>MPa | 非脱空<br>处计算<br>最大变<br>形/mm | 非脱空<br>处计算最<br>大应力/<br>MPa |
|-------------|-------------------------|--------------|----------|-----------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 3           | 3.3                     | 6.3          | 4.1      | 42        | 3.78                     | 295.5                     | 2.14                      | 224.3                      |
| 4           | 3.3                     | 6.3          | 4.1      | 42        | 4.60                     | 341.7                     | 2.14                      | 224.2                      |
| 5           | 3.3                     | 6.3          | 4.1      | 42        | 5.42                     | 348.4                     | 2.14                      | 224.2                      |
| 8           | 3.3                     | 6.3          | 4.1      | 42        | 7.22                     | 361.1                     | 2.14                      | 224.2                      |
| 10          | 3.3                     | 6.3          | 4.1      | 42        | 7.22                     | 361.1                     | 2.14                      | 224.2                      |

从表 2 可以看出,随着脱空深度(缝隙值)的增加,钢管的变形及应力相应增大,由于有限元接触分析是非线弹性计算,脱空深度与应力的关系曲线也成非线性变化。当脱空深度大于 8 mm 时,脱空部位的钢管应力接近一个定值,约 361 MPa(钢管已处于自由变形)。非脱空部位的钢管由于变形超过初始缝隙 0.82 mm,外包混凝土和围岩发挥弹性抗力作用,应力值约为 224 MPa。脱空深度在 3~8 mm 之间变化时,脱空深度越大,钢管应力越大。当脱空深度为 4 mm 时,钢管的应力为 341 MPa,已经超过钢

管的允许应力 315 MPa。根据脱空深度敏感性分析可知,在钢管脱空面积不大于 3.3 m<sup>2</sup>,且脱空深度不超过 3.5 mm 时,钢管应力水平处于允许范围内,此时即使不开孔进行补充灌浆,结构也是安全的。

值得一提的是根据计算成果,如果对脱空部位采取打孔进行脱空深度检查,以明确缝隙值是否在允许范围内,对打孔部位灌浆及封孔是必然的。由于缝隙值也不是均匀的,计算模型只能近似模拟实际情况。如果物探声波检测手段能准确判定脱空的面积和深度,上述计算成果可用于指导现场有针对性的开孔补充灌浆,避免开孔过多而损伤母材,并能缩短工期。

4 结 语

地下埋藏式压力钢管在上覆岩体厚度及缝隙值满足规范要求的情况下,往往会考虑围岩分担内水压力。当钢管接触灌浆完成后,形成局部脱空,使得钢管的受力状况不同于真实意义上的埋管,此时需要分析钢管的受力状态。本文采用三维有限元法对哈萨克斯坦水电站压力钢管进行脱空面积及深度的敏感性分析,得出钢管变形及应力的变化趋势及规

律,从而掌握钢管可允许的脱空面积及深度的范围值,用于指导现场开孔补充灌浆。其他水电站压力钢管也可采用类似的敏感性分析方法来分析确定不需要进行补充灌浆的指标(脱空面积、深度)。

由于钢管与混凝土之间的缝隙值不是均匀的,脱空面积也不是规则的,敏感性分析计算方法并不能完全模拟实际情况,计算结果是否可以作为压力钢管开孔补灌的判别依据,还有待进一步分析论证。哈萨克斯坦水电站压力钢管已安全运行近 3 a,如果能获取钢管脱空处的一些监测数据,例如变形、应力以及钢管与混凝土脱空的具体缝隙值,将能更好地验证该敏感性分析方法的可靠性和适用性。

参考文献:

[1] DL/T5141—2001 水电站压力钢管设计规范[S].  
[2] 杨兴义,陈亚琴,刘朝清. 水电站压力管道:哈萨克斯坦玛依纳水电站压力管道设计[C]//中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 第七届水电站压力管道学术会议论文集. 北京:中国电力出版社,2010:46-51.  
(收稿日期:2013-11-23 编辑:熊水斌)

(上接第 55 页)

大坡口侧施焊。焊接过程中要同时监控管节弧度变形情况,变形过大时转到另一侧施焊。如果施焊时偏差过大则增加换侧频率,以控制变形。

b. 环缝焊接工艺顺序。采用偶数焊工以管节中心线为对称中心,进行分段倒退焊接,如图 2 所示。尽量用相同的焊接规范参数、相同焊接层数进行焊接。



图 2 环缝焊接示意图

3.5 焊缝检验

钢管的焊接规范应依照焊接工艺所制订的参数执行。在钢管的焊缝焊接完毕后应在管壁上打上焊工钢号,并按规范进行焊缝外观检查,合格后按合同及规范要求进行无损探伤,如发现有不允许缺陷,应在缺陷方向或可疑部位作补充探伤,如经补充探伤

仍发现有不允许缺陷,则应对该焊工在该条焊缝上所施焊的焊接部位或整条焊缝进行探伤<sup>[5]</sup>。纵缝和环缝的返修次数不得超过两次,超过两次应制定出可靠返修工艺,并经焊接工程师批准方可进行。焊缝检验全部合格后可交下一工序。

4 结 语

本文总结了笔者在实际工作中的一些工作经验及常见的问题,重点针对结构形式较为复杂的钢管制作及焊接技术进行了分析论述,这些技术的使用有利于控制施工成本,降低施工难度,有效控制焊接质量和变形,保证产品质量,缩短施工工期。

参考文献:

[1] DL/T 5017—1993 水电水利工程压力钢管制造安装及验收规范[S].  
[2] ASME 锅炉及压力容器规范Ⅷ压力容器建造规则[M]. 北京:中国石化出版社,2002.  
[3] 李文凌. 电站引水压力钢管中异形管制作技术[J]. 水电站机电技术,2012(1):39-41  
[4] 曹锋,郭蕾. 浅谈巴贡电站压力钢管制作与安装的焊接[J]. 科技资讯,2012(29):57-58.  
[5] 鲁鹏,黄创艺. 压力钢管的制作工艺[J]. 中国石油和化工标准,2012,32(4):40  
(收稿日期:2013-11-23 编辑:熊水斌)