

水电站巨型薄壁输水钢管外压失稳 规律分析及优化设计方案*

史长莹, 马文英, 简新平

(河北工程学院 水利系, 河北 邯郸 056021)

[摘要] 针对水电站输水钢管向巨型化发展的现状, 分析了加劲钢管临界失稳时的外压承载力及失稳形态与管径、壁厚、加劲环形状、尺寸、布置间距及材料的力学性能之间的关系, 揭示了其外压承载力骤减的主要因素及其骤减区间, 给出了合理的加劲环形状、尺寸及最有效布置间距, 提出了钢管各部位外压稳定与强度安全协调一致的优化设计方案。

[关键词] 水电站; 输水钢管; 外压失稳

[中图分类号] TV 41; TU 511.3⁺7

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)07-0087-06

随着低成本、无污染水能资源的大力开发, 水电站输水钢管日趋向巨型($HD > 1\ 200\text{ m} \cdot \text{m}$, H 为内压水头, D 为钢管直径)、超巨型($HD > 3\ 000\text{ m} \cdot \text{m}$)化发展^[1], 且为了满足能源结构改善的需要, 兴建大型水电站也将带动巨型钢管的日趋广泛应用。目前世界上已建水电站巨型管道达 90 余座, 我国约占 10 余座^[2]。而因焊接质量等因素所限, 钢管壁厚一般控制在 40 mm 以内, 管径与壁厚之比有的已达 600 多倍^[3]。这种巨型薄壁钢管在施工、运行期间, 当受到随机外压、局部外压和均匀外压作用时极易失稳, 近年来我国就发生了十起钢管外压失稳事故, 如: 湖南省埋藏式输水钢管, 管径 7 200 mm, 壁厚 14 mm, 在灌浆压力作用下发生了局部失稳, 管身上半部出现 9 个失稳波, 波直径达 700~850 mm^[4]。可见, 对巨型薄壁钢管外压失稳规律进行分析, 探讨其优化设计方案, 已成为大型水电站建设中亟待解决的问题。

从结构特征看, 随着管径不断增加, 环向刚度不断降低, 在某个范围内, 钢管性能必将发生骤然变化, 致使外压失稳成为影响其安全的主要因素。因此, 模拟钢管巨型薄壁化过程, 分析其外压失稳规律, 以探索优化的结构形式和设计方法十分必要。

本文以加劲钢管为分析模型, 将其视为加劲环之间的“管身段”和加劲环部位的“环管段”2 种子模型构成的系统, 其中“环管段”为加劲环连同其两侧

$0.78(rt)^{1/2}$ 范围内的管身部分(r 为管半径, t 为管壁厚度)^[5]。研究了钢管在巨型薄壁化过程中, 管径、壁厚、加劲环断面形状、尺寸、布置间距、材料的力学性能等因素对其临界失稳外压承载力及其失稳波形的影响, 揭示了巨型薄壁钢管外压承载力骤减的原因及其骤减区间, 给出了合理的加劲环形状、尺寸及其最有效间距, 提出了通过优化加劲环尺寸及间距, 使管身段与环管段外压承载力协调一致及钢管外压稳定与强度安全协调一致的优化设计方法, 揭示了加劲环断面形状、尺寸、布置间距不同的某些环管段之间临界失稳规律的“耦合”现象及其应用。

1 计算模型与计算方法

为模拟钢管巨型薄壁化过程, 并考虑影响结构失稳的各因素, 对管身段: (1) 设管半径 r 与管壁厚度 t 之比 r/t (称相对管半径) 从 20 逐渐变化至 400, 步长为 20; (2) 加劲环布置间距 L 与管半径 r 之比 L/r (称相对环间距) 从 0.1 逐渐变化至 50, 随 L/r 增大, 步长依次取为 0.1, 0.2, 0.4。对环管段: (1) 加劲环断面形状, 分别取为矩形和 T 形(二者断面积及环间距均相等); (2) 加劲环厚度 a 依次取为 20, 40, 60, 80 和 100 mm; (3) 加劲环高度 b 与厚度之比 b/a (称高厚比) 从 0.2 变化至 50, 随 b/a 增大, 步长依次取为 0.1, 0.2, 0.4; (4) 相对环间距 L/r 从 0.1 变化至 3.0, 步长取为 0.1; (5) 在环管段分析中, 管

* [收稿日期] 2004-10-08

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50079005)

[作者简介] 史长莹(1964-), 男, 副教授, 在读博士, 硕士生导师, 主要从事水工结构研究。

半径及管壁厚度均取为定值 $r = 6200 \text{ mm}$, $t = 40 \text{ mm}$ 。因此,形成了由 529 个“管身段”和 1128 个“环管段”构成的有序子模型计算系统^[6]。分别应用 Mises 理论^[7]和弹性环外压稳定分析理论^[8],计算各子模型临界失稳时的外压承载力 P_{cr} 值及失稳波数 n 值。同时,为了解钢管各部位在外压下临界失稳时的材料属性,以 16Mn、Q235 钢为例,应用圆筒公式计算各子模型在材料塑性屈服时的外压承载力 P 值^[9]。

2 巨型薄壁钢管管身段分析

2.1 计算公式与计算结果

对管径、壁厚、加劲环间距各不相同的管身段子模型,临界失稳时的外压承载力 P_{cr} 值及相应失稳波数 n 值由 Mises 公式计算^[10]:

$$P_{cr} = \frac{E}{(n^2 - 1) \left(1 + \frac{u^2 L^2}{\pi^2 r^2} \right)} \times \frac{t}{r} + \frac{E}{12(1 - \nu^2)} \times \left[n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - \nu}{1 + \frac{u^2 L^2}{\pi^2 r^2}} \right] \times \frac{t^3}{r^3} \quad (1)$$

式中, E , ν 分别为材料弹性模量及泊松比,其余符号意义同前。

各子模型在材料塑性屈服时的外压承载力 P 值由圆筒公式计算:

$$\sigma_s \cdot t = P \cdot r \quad (2)$$

式中, σ_s 为材料屈服应力。

对任一子模型,须设一系列 n 值,应用(1)式求得一系列 P_{cr} 值,其中最小 P_{cr} 值即为所求,与之对应的 n 值即为该子模型的失稳波数。因此,对于每一个 L/r 和 r/t 值不同的子模型,均可求得一对 (P_{cr}, n) 值。为便于比较,还计算了光面管($L/r = \infty$)临界失稳时的外压承载力 P_{cr} 值。同时,应用(2)式计算不同 r/t 值的子模型在材料塑性屈服时的外压承载力 P 值。

整编计算结果,制成了管身段临界失稳外压承载力 P_{cr} 及相应失稳波数 n 与 $r/t, L/r$ 之间的关系曲线,即 $\lg P_{cr}, n \sim r/t, L/r$ 曲线,如图 1 所示。图中曲线、分别是 16Mn、Q235 钢材质的管身段由(2)式求得的材料塑性屈服时的外压承载力 P 与 r/t 之间的关系曲线,即 $\lg P \sim r/t$ 曲线。为光面管的 $\lg P_{cr}, n \sim r/t, L/r$ 曲线。为显示清晰,图 1 中只给出了 $L/r = 0.1, 0.2, 5.0, 50$ (与光面管曲线重合)的曲线上各部位的 n 值,其他 L/r 值曲线上的 n 值,图中未给出。

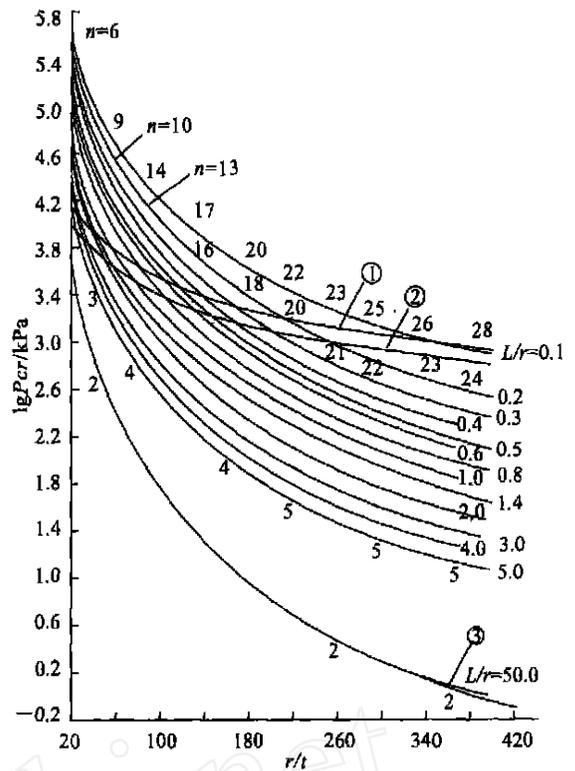


图 1 管身段外压临界失稳分析曲线

Fig 1 Curve of critical losing stability of steel tube body under external pressure

2.2 计算结果分析

2.2.1 巨型薄壁化钢管管身段抗外压失稳能力的骤减及其骤减区间 图 1 表明:(1)管身段临界失稳外压承载力 P_{cr} 随 r/t 的增大而减小,至巨型薄壁状态时已变得极低,例如 $L/r = 5.0$, $r/t = 400$ 时的 P_{cr} 值仅为 120 kPa,管身只能承受约 1.2 m 的外压水头。(2) P_{cr} 值的骤减区间大致在 $r/t = 20 \sim 220$,例如 $L/r = 0.1 \sim 5.0$,当 r/t 由 20 增至 220 时,管身 P_{cr} 值骤减至初值($r/t = 20$ 的 P_{cr} 值)的 0.25% ~ 0.5%, $r/t > 220$ 以后,降减规律渐趋平缓,但 P_{cr} 值极低。

2.2.2 加劲环的作用及最有效的环间距 由图 1 可见,减小加劲环间距可有效提高管身 P_{cr} 值,且 L/r 值愈小, P_{cr} 值及其增长比率愈大。当 $r/t = 220$, L/r 由 5.0 减至 1.0,再减至 0.1 时,管身 P_{cr} 值增量分别为 2300 和 2540 kPa,环间距 L 每减少 0.1r 时, P_{cr} 值的平均增量分别为 5.75 和 254 kPa,后者是前者的 44 倍。从总计算结果看,巨型薄壁钢管的最有效环间距为 $L = 0.6r$ 。

2.2.3 零作用环间距 图 1 表明,随着相对环间距的增大,加劲环作用逐渐减小, $L/r = 50$ 时,环间距

身段的 $\lg P_{cr}, n \sim r/t$ 和 L/r 曲线与“光面管”的曲线基本重合, 尤其在 $r/t = 300$ 时完全重合, 表明二者的抗外压失稳能力相当, 加劲环已不具有刚度支持作用。因此, 工程中应避免采用零作用环间距, 即 $L = 50r$ 。

2.2.4 管身段失稳波数 n 失稳波数 n 反映环间管身段的失稳形态, 也是其纵向与环向刚度的综合

反映。由表 1 可见, n 值随 r/t 的增大而增大, 但随 L/r 增大而减小。也就是说, 随着管径的巨型化, 环向刚度降低, 管身段失稳波增多; 而随着相对环间距的增大, 管身段轴向刚度降低, 失稳波减少。因此, 对于大管径密间距加劲管的环间管身段, 失稳时为多波形式; 而对于光面管仅为双波失稳, 即 $n = 2$ 。

表 1 管身失稳波数 n 值变化规律表

Table 1 Rule table of losing stability wave n of steel tube body

L/r	r/t								
	20	40	60	100	140	180	240	300	400
0.1	6	9	11	15	17	20	23	25	28
0.3	7	9	11	13	15	16	18	19	21
0.6	6	8	9	10	11	12	13	14	15
0.8	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.2	5	6	7	8	8	9	10	10	11
1.6	4	5	6	7	7	8	8	9	10
2.5	4	4	5	5	6	6	7	7	8
5.0	3	3	4	4	4	5	5	5	6

2.3 管身段外压稳定优化设计

图 1 中, 曲线、将管身段 $\lg P_{cr}, n \sim r/t, L/r$ 曲线簇分为塑性失稳和弹性失稳的上、下二区。当管径及相对环间距较大时, 管身将在承受较小外压下发生弹性失稳, $\lg P_{cr}$ 值落于下区; 反之, 当管径及相对环间距较小时, 管身强度及抗外压能力均较强, 管身将在承受较大外压作用下失稳, 同时伴随有材料塑性变形, $\lg P_{cr}$ 值落于上区。管身弹性失稳时, 材料的力学性能将不能充分发挥。

运用管身段计算结果(图 1)可对管身进行如下优化设计: 当 r/t 由运用、施工要求确定后, 通过优化组合图 1 中的 L/r 值及管身材料规格, 使所确定的管身段 $\lg P_{cr}$ 值既满足外压稳定要求, 又落于曲线、附近, 以期管身失稳时充分利用材料强度, 保

证外压稳定与强度安全协调一致。

3 巨型薄壁钢管环管段分析

3.1 计算公式与计算结果

对设有矩形环与 T 形环的环管段子模型[图 2(a)、图 2(b)], 临界失稳外压承载力 P_{cr} 值由弹性环外压稳定公式计算:

$$P_{cr} = 3EJ_K / R_K^3 L \tag{3}$$

式中, R_K 为环管段形心至钢管轴线距离; J_K 为环管段截面形心惯性矩; 其余符号意义同前。

对于矩形环:

$$R_K = \frac{\frac{a}{2}(b+t)^2 + 0.78\sqrt{rt}t^2}{a(b+t) + 1.56\sqrt{rt}t} \tag{4}$$

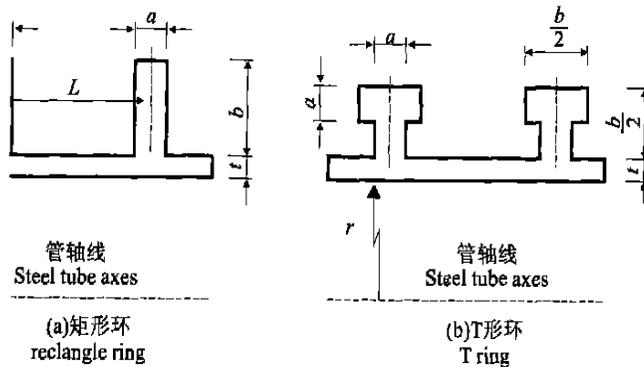


图 2 加劲环样式

Fig. 2 Bracing ring form

$$J_K = \frac{a}{12}(b+t)^3 + a(b+t)(R_K - \frac{b+t}{2})^2 + 0.13\sqrt{rt}t^3 + 1.56\sqrt{rt}t(R_K - \frac{t}{2})^2 \quad (5)$$

对于 T 形环:

$$R_K = \frac{\frac{ab}{4}(b-a+2t) + \frac{a}{2}(a+t+\frac{b}{2})^2 + 0.78\sqrt{rt}t^2}{\frac{ab}{2} + a(a+t+\frac{b}{2}) + 1.56\sqrt{rt}t} \quad (6)$$

$$J_K = \frac{a^3b}{24} + \frac{ab}{2}(\frac{b-a}{2} - R_K + t)^2 + \frac{a}{12}(\frac{b}{2} + t)^3 + a(\frac{b}{2} + t)[\frac{1}{2}(\frac{b}{2} + t) - R_K]^2 + 0.13\sqrt{rt}t^3 + 1.56\sqrt{rt}t(R_K - \frac{t}{2})^2 \quad (7)$$

同时,应用(2)式计算环管段各子模型塑性屈服时的外压承载力 P 值。

整编计算结果,制成如图 3~5 所示的曲线。其中,图 3 是分别设有矩形环与 T 形环的环管段在临界失稳时外压承载力 P_{cr} 值的比较曲线,即二者的 $\lg P_{cr} \sim b, L/r$ 曲线;图 4 和图 5 分别为矩形环环管

段及 T 形环环管段临界失稳时外压承载力 P_{cr} 与加劲环尺寸参数 $a, b/a$ 及 L/r 之间的关系曲线,即 $\lg P_{cr} \sim a, b/a$ 和 L/r 曲线。图 4 和图 5 中、曲线分别为 16Mn, Q235 钢材质的环管段塑性屈服时的外压承载力 P 与 $a, b/a$ 之间的关系曲线,即 $\lg P \sim a, b/a$ 曲线。

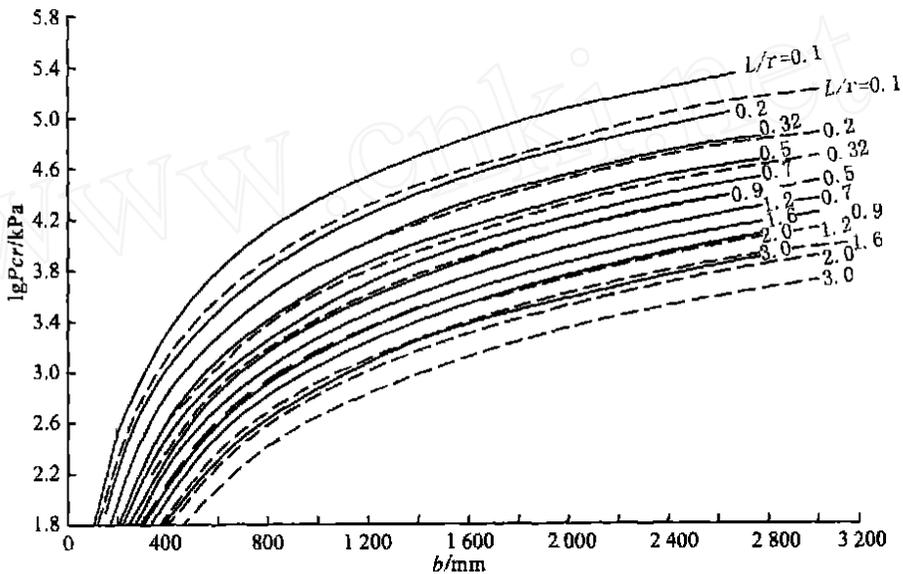


图 3 矩形环与 T 形环环管段的曲线

——. 矩形环; ----. T 形环

Fig 3 $P_{cr} \sim b, L/r$ curve in looping pipe of rectangle and T ring

——. Rectangle ring; ----. T ring

3.2 计算结果分析

3.2.1 加劲环的合理断面形状 比较图 3 中矩形环与 T 形环的 $\lg P_{cr} \sim b$ 和 L/r 曲线可知,加劲环间距及断面面积相同时,采用矩形环可获得更高的 P_{cr} 值,且 L/r 值愈小,效果愈显著。以 $b=1000$ mm 为例, $L/r=0.1$ 时,矩形环与 T 形环的环管段 P_{cr} 值分别为 36 310 和 20 890 kPa; 而 $L/r=3.0$ 时, P_{cr} 值则分别为 1 180 与 690 kPa。 $L=0.1r$ 时,矩形环与 T 形环的环管段 P_{cr} 值之差为 15 420 kPa; 而 $L=3.0r$ 时,二者 P_{cr} 值之差则为 490 kPa,前者高出后者 30.5

倍。可见,采用小间距矩形环更为合理,且制造施工方便。

3.2.2 加劲环适宜尺寸 比较图 4 和图 5 可知:

(1) 加劲环厚度 a 过小,尤其是当 a 小于钢管壁厚 t (如图 4, 5 中 $a=20$ mm) 时,即使采用过大环高也不易获得较高的 P_{cr} 值,且过大环高不便施工,还将存在自身屈曲问题; 而当 $a > t$ (如 $a=40, 60, 80, 100$ mm) 时,则可在较小环高 b 及适当 $b/a, L/r$ 值时获得较大的 P_{cr} 值,但环厚度愈大经济性愈差; (2) 加劲环厚度 a 及环高度与厚度之比 b/a 均不宜过大,否

则, 虽环管段可获得较大的 P_{cr} 值, 但其高出材料塑性屈服时的外压承载力 P 值 (见图 4、5 中 ①、② 曲线) 过多, 也比相同环间距的管身段 P_{cr} 值高出许多, 导致管身段过早失稳, 且环管段又可能出现强度不足, 从而恶化钢管工作条件。比较图 1 与图 4、5 的曲

线可见, 当 $a = 60 \text{ mm}$, $b/a = 20$ 时, 则开始呈现上述情形。综合上述分析, 巨型钢管加劲环的适宜厚度 a 与高度 b 应分别为: $a = (1 \sim 1.5)t$; $b = (5 \sim 20)a = (5 \sim 30)t_b$

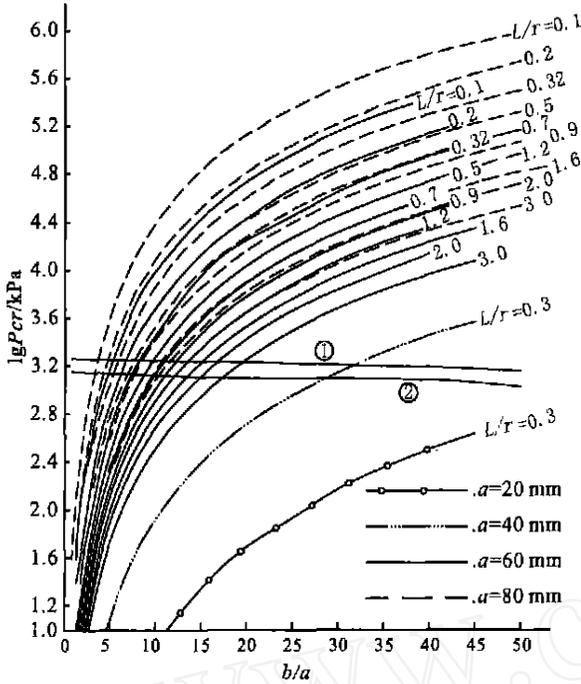


图 4 矩形环管段的 $\lg P_{cr} \sim a, b/a, L/r$ 曲线
Fig 4 $\lg P_{cr} \sim a, b/a, L/r$ curve in looping pipe of rectangle ring

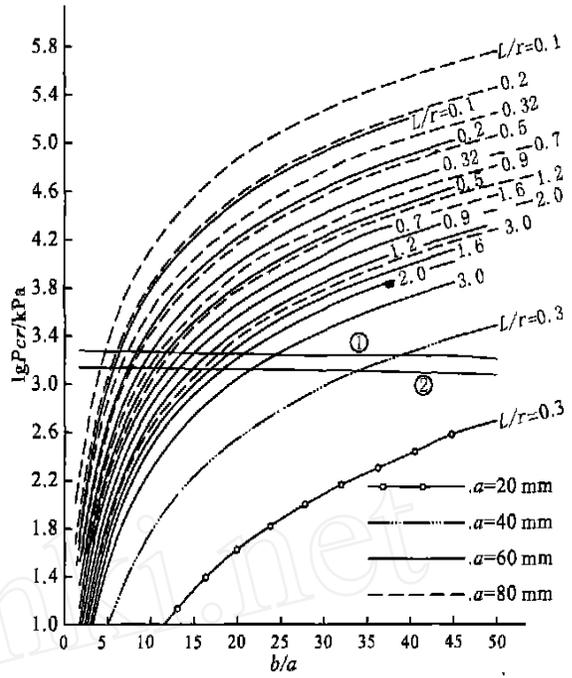


图 5 T 形环管段的 $\lg P_{cr} \sim a, b/a, L/r$ 曲线
Fig 5 $\lg P_{cr} \sim a, b/a, L/r$ curve in looping pipe of T ring

3.2.3 环管段外压稳定优化设计 图 4 和图 5 中, 曲线 ①、② 将环管段 $\lg P_{cr} \sim a, b/a$ 和 L/r 曲线簇分为塑性失稳和弹性失稳的上、下二区, 当 a 及 b/a 值较大时, 环管段在承受较大外压下失稳, 同时伴随有材料塑性变形, $\lg P_{cr}$ 落于上区; 反之, 环管段将在较小外压作用下发生弹性失稳, $\lg P_{cr}$ 落于下区。对于后者, 材料的力学性能将不能充分发挥。

运用环管段计算结果 (图 4、5) 优化设计时, 先由管身段外压稳定确定 L/r 值, 再通过优化组合图 4 (或图 5) 中的 $a, b/a$ 值及材料规格, 使之满足: (1) 环管段与管身段的 P_{cr} 值接近或相等, 以使管身与环管段具有协调一致的抗外压失稳性能, 改善钢管外压承载条件; (2) 环管段 $\lg P_{cr}$ 值满足外压稳定要求后落于图 4 (或图 5) 中 ①、② 曲线附近, 以使环管段失稳时充分利用材料强度, 保证外压稳定、强度安全与经济合理协调一致; (3) 管身与环管段材料规格相同, 以方便制造和施工。

3.3 耦合规律及其应用

计算发现, 环管段外压临界失稳规律存在如下

耦合现象:

(1) 不同形状加劲环管段的 $\lg P_{cr} \sim b, L/r$ 曲线耦合。耦合规律为: 某一疏间距矩形环管段的 $\lg P_{cr} \sim b, L/r$ 曲线与某一密间距 T 形环管段的 $\lg P_{cr} \sim b, L/r$ 曲线完全或部分重合 (见图 3), 例如, 矩形环 $L/r = 1.2$ 和 T 形环 $L/r = 0.7$ 的 2 条曲线在 $b = 1800 \text{ mm}$ 时完全重合; 矩形环 $L/r = 0.32$ 和 T 形环 $L/r = 0.2$ 的 2 条曲线在 $b = 1200 \text{ mm}$ 时重合; 矩形环 $L/r = 2.0$ 和 T 形环 $L/r = 1.2$ 的 2 条曲线在 $b = 1600 \text{ mm}$ 时重合; 矩形环 $L/r = 0.5$ 和 T 形环 $L/r = 0.9$ 的 2 条曲线在 $b = 1800 \text{ mm}$ 时出现重合。

(2) 不同加劲环尺寸与环间距的环管段 $\lg P_{cr} \sim a, b/a$ 和 L/r 曲线耦合。耦合规律为: 某一小尺寸密间距的加劲环与另一较大尺寸较疏间距的加劲环, 其 $\lg P_{cr} \sim a, b/a, L/r$ 曲线完全或部分重合。如图 4 中, $a = 60 \text{ mm}, L/r = 0.5$ 和 $a = 80 \text{ mm}, L/r = 1.2$ 的 2 条曲线在 $b/a = 50$ 时完全重合; $a = 60 \text{ mm}, L/r =$



$= 0.2$ 和 $a = 80 \text{ mm}$, $L/r = 0.5$ 的 2 条曲线在 $b/a = 20$ 时重合; $a = 60 \text{ mm}$, $L/r = 1.2$ 和 $a = 80 \text{ mm}$, $L/r = 3.0$ 的 2 条曲线在 $b/a = 22.5$ 时重合; 图 5 中, $a = 60 \text{ mm}$, $L/r = 0.32, 0.7, 0.9$ 的 3 条曲线分别与 $a = 80 \text{ mm}$, $L/r = 0.7, 1.6, 2.0$ 的 3 条曲线, 在 $b/a = 50$ 时完全重合。

出现耦合表明二者抗外压失稳性能相同。利用耦合特性可改善钢管外压稳定设计。例如, 当某一较大尺寸、较疏间距加劲环使环间管身段 P_{cr} 值不符合外压稳定要求时, 利用耦合规律, 可采用相应较小尺寸、较密间距的加劲环, 在不改变环管段抗外压失稳性能的前提下, 增大管身段外压承载力 P_{cr} 值, 使二者抗外压失稳性能协调一致; 反之, 若某一加劲环尺寸与环间距使管身段抗外压失稳能力有过大安全余度时, 利用耦合规律可选用相应较大尺寸、较疏间距的加劲环, 在保证管身段外压稳定的前提下, 降低造价和方便制造与施工, 此时环管段的抗外压失稳性

能并未改变; 此外, 将耦合规律应用于巨型薄壁输水钢管外压稳定性试验研究, 可使模型设计更具有目的性与系列性, 有利于更系统、有序地研究其失稳破坏机理^[11]。

4 结 语

随着管身巨型薄壁化, 钢管抗外压失稳能力已变得极低, 采用加劲环是提高其抗外压失稳性能的有效措施。本文分析结果表明, 加劲环的合理使用形式为小间距的矩形环; 加劲环适宜厚度与高度分别为 $a = (1 \sim 1.5)t$, $b = (5 \sim 20)a = (5 \sim 30)t$, 最有效环间距为 $L = 0.6r$ 。应用本文分析结果, 作者提出了使钢管各部位外压稳定性协调一致, 且外压稳定与强度安全协调一致的优化设计方法; 加劲环尺寸与间距不同的环管段之间外压临界失稳规律的耦合现象, 除可优化钢管外压稳定设计外, 还将为这一问题的深入研究^[5]提供有价值的参考。

[参考文献]

- [1] 刘宪亮 水电站压力管道的应用、发展与研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998
- [2] 周关炳 国内外巨型压力钢管的发展动态[J]. 水利水电技术, 1992, 13(7): 25- 27.
- [3] 熊德炎, 龚国芝 三峡电站压力管道温度变化的结构强度和变形研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998
- [4] 刘东常, 孟闻远, 刘宪亮 地下埋管在外压作用下稳定性问题的半解析有限元方法及其应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998
- [5] 潘家铮 压力钢管[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982
- [6] 刘东常, 马文英, 赵 瑜 半解析有限元法分析圆柱壳外压稳定性问题的研究[J]. 应用力学学报, 1992, 33(2): 35- 39.
- [7] 徐芝纶 弹性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1984
- [8] Timoshenko S P. 弹性稳定理论[M]. 北京: 科学出版社, 1965
- [9] 刘东常, 孟闻远, 刘琰玲 环向加劲压力钢管稳定性分析的 YGWDF 程序[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998
- [10] 中华人民共和国水利电力部 水电站压力管道设计规范(试行)(SD 144-85)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985
- [11] 魏永晖 三峡水电站引水压力管道技术设计审查综述[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998

An optimized design project & principle analysis of losing stability on huge thin wall hydroelectric station penstock under external pressure

SHI Chang-ying, MA Wen-ying, JIAN Xin-ping

(School of Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056021, China)

Abstract: The diameter of water conveyance steel tube becomes larger and larger. The paper analyzed the connection of bearing capacity of bracing steel tube critical losing stability and pattern under external pressure and steel tube diameter, wall thickness, bracing ring form, dimension, arrangement spacing and material mechanics capability, showed the main affecting factor of bearing capacity and range reducing very quickly under external pressure, presented reasonable shape, appropriate sizes and most efficient arrangement spacing of bracing ring, and put forward the optimized design project which ensures harmonizing and being identical of all the sections of steel tube stability under external pressure and intensity safe.

Key words: hydroelectric station; water conveyance steel tube; losing stability of external pressure