

带贴板的耳板设计方法研究

董自亮

(上海市政交通设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘要: 带贴板的耳板作为桥梁工程中一种常见的连接构造,其承载力的计算方法研究相对较少。为研究带贴板的耳板设计方法,结合实际工程中采用的耳板,基于现有的规范公式,通过必要的处理,提出了多种设计方法;同时,利用有限元软件ANSYS的接触分析模拟销轴耳板的连接,来验证各设计方法的可靠性。结果表明:基于《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—2019)的两种方法与有限元模拟结果吻合较好,推荐用以计算带贴板的耳板孔壁最大拉、压应力;建议采用有限元计算方法作为耳板剪切应力以及贴板周围焊缝应力的设计依据。

关键词: 耳板;贴板;销轴;有限元

中图分类号: U442.5;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0212-06

Research on Design Method of Ear Plates with Stickers

DONG Ziliang

(Shanghai Municipal Transportation Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: As a common connection structure in bridge engineering, there is relatively little research on the calculation method of bearing capacity for ear plates with stickers. To study the design method of ear plates with stickers, combined with the ear plates used in practical engineering, based on the existing standard formulas and through necessary treatments, the multiple design methods are proposed. Meanwhile, the connection of the pin shaft ear plate is simulated by using the contact analysis of the finite element software ANSYS to verify the reliability of each design method. The results show that the two methods based on the *Design Specification for Steel Gates in Water Resources and Hydropower Engineering* (SL 74-2019) are in good agreement with the finite element simulation results. It is recommended for calculating the maximum tensile and compressive stresses of the ear plate hole wall with stickers, and recommended to use the finite element calculation method as the design basis for the shear stress of the ear plate and the weld stress around the stickers.

Keywords: ear plate; stickers; pin shaft; finite element

0 引言

销轴耳板连接由于其构造简单,施工方便^[1],在工程中十分常见,在系杆拱桥、斜拉桥等索结构桥梁中,常用于拉索(或吊杆)与主梁、主拱或主塔的连接。销轴和耳板作为关键受力构件,其承载能力的计算显得尤为重要。

耳板按构造形式可分为无贴板的耳板和带贴板的耳板。贴板是为了加强耳板承载力而设置在主耳板两侧的加劲板,通过焊缝连接,与主耳板共同受力,是一种很常见的构造形式。实际工程中,大吨位的耳板通常设计为带贴板的耳板,而目前国内现行

的主流规范中,还没有针对这种耳板承载能力统一的规范方法。

耳板的受力分析十分复杂,销轴与耳板之间受力时,其接触面不断发生变化,呈非线性^[2],传统的理论计算方法很难精确分析和计算。利用有限元软件ANSYS对销轴耳板的受力进行局部分析,并将计算结果与规范公式进行对比。

1 工程用耳板概况

某下承式钢箱拱桥的吊杆在拱肋侧采用锚箱的形式连接,在系梁侧采用销轴耳板与插耳配合的形式连接。同时,工程中采用了在耳板两侧焊接贴板的方式来加强其承载能力。耳板构造图及基本尺寸如图1所示:主耳板厚度80 mm,两侧各贴一块厚32 mm的贴板,贴板与主耳板之间采用周围焊缝连

收稿日期: 2025-09-18

作者简介: 董自亮(1992—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

接。耳板孔径 $D = 190 \text{ mm}$, 耳板轴向荷载(吊杆力)为 $4\,770 \text{ kN}$ 。

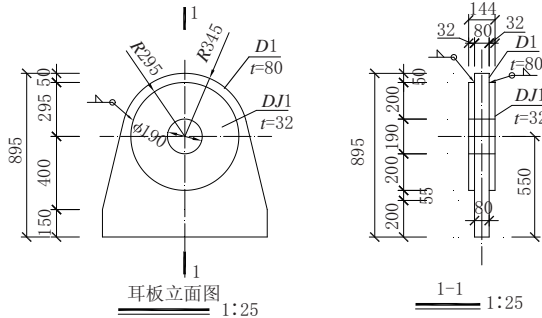


图 1 耳板构造图(单位:mm)

2 规范计算方法

2.1 《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[3](以下简称“钢标”)第 11.6.3 条,耳板应按下列公式进行抗拉、抗剪强的计算。

(1)耳板孔净截面处的抗拉强度:

$$\sigma = \frac{N}{2tb_1} \leq f$$

$$b_1 = \min(2t + 16, b - \frac{d_0}{3})$$

(2)耳板端部截面抗拉(劈开)强度:

$$\sigma = \frac{N}{2t(a - \frac{2d_0}{3})} \leq f$$

(3)耳板抗剪强度:

$$\tau = \frac{N}{2tZ} \leq f_v$$

$$Z = \sqrt{(a + d_0/2)^2 - (d_0/2)^2}$$

式中: N 为杆件轴向拉力设计值, N ; a 为顺受力方向,销轴孔边缘距板边缘最小距离,mm; b 为耳板两侧边缘与销轴孔边缘净距,mm; b_1 为计算宽度,mm; d_0 为销轴孔径,mm; f 为耳板抗拉强度设计值,MPa; Z 为耳板端部抗剪截面宽度,mm; f_v 为耳板钢材抗剪强度设计值,MPa。

此外,耳板尚须满足钢标中的构造要求:

$$\begin{cases} \frac{b}{t} \leq 4 \\ b_e = \min(2t + 16, b) \\ a \geq \frac{4}{3}b_e \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)推导得,当 a 、 t 取值确定后,为满足构造要求, b 实际取值应满足:

$$\begin{cases} b_{\text{取值}} \leq \min(b, 4t) & (b \geq 2t + 16) \\ b_{\text{取值}} \leq \min(\frac{3}{4}a, 4t) & (b < 2t + 16) \end{cases} \quad (2)$$

由于钢标中的计算方法并未提及贴板,故不能直接采用规范公式进行计算,为了与下文有限元结构进行对比,采用以下 3 种处理方法:

第一种方法,各尺寸以贴板为基准。考虑贴板厚度的贡献,取值如下:

$$t = 80 + 32 \times 2 = 144 \text{ mm};$$

$$a = b = 295 - 190 \div 2 = 200 \text{ mm}; b_{\text{取值}} = \min(\frac{3}{4} \times 200, 4 \times 144) = 150 \text{ mm};$$

$$d_0 = 190 \text{ mm};$$

(1)耳板孔净截面处的抗拉强度:

$$\sigma = \frac{N}{2tb_1} = \frac{4\,770 \times 1\,000}{2 \times 144 \times 86.7} = 191 \text{ MPa}$$

(2)耳板端部截面抗拉(劈开)强度:

$$\sigma = \frac{N}{2t(a - \frac{2d_0}{3})} = \frac{4\,770 \times 1\,000}{2 \times 144 \times (200 - \frac{2 \times 190}{3})} = 226 \text{ MPa}$$

(3)耳板抗剪强度:

$$\tau = \frac{N}{2tZ} = \frac{4\,770 \times 100}{2 \times 144 \times 310} = 53 \text{ MPa}$$

第二种方法,耳板各尺寸以主耳板为基准,不考虑贴板厚度的贡献,取值如下:

$$t = 80 \text{ mm};$$

$$a = b = 345 - 190 \div 2 = 250 \text{ mm};$$

$$b_{\text{取值}} = \min(250, 4 \times 80) = 250 \text{ mm};$$

$$d_0 = 190 \text{ mm};$$

(1)耳板孔净截面处的抗拉强度:

$$\sigma = \frac{N}{2tb_1} = \frac{4\,770 \times 1\,000}{2 \times 80 \times 176} = 169 \text{ MPa}$$

(2)耳板端部截面抗拉(劈开)强度:

$$\sigma = \frac{N}{2t(a - \frac{2d_0}{3})} = \frac{4\,770 \times 1\,000}{2 \times 80 \times (250 - \frac{2 \times 190}{3})} = 242 \text{ MPa}$$

(3)耳板抗剪强度:

$$\tau = \frac{N}{2tZ} = \frac{4\,770 \times 100}{2 \times 80 \times 358} = 83 \text{ MPa}$$

第三种方法,耳板各尺寸以主耳板为基准,同时考虑贴板厚度的贡献。取值如下:

$$t = 80 + 32 \times 2 = 144 \text{ mm};$$

$$a = b = 345 - 190 \div 2 = 250 \text{ mm};$$

$$b_{\text{取值}} = \min(\frac{3}{4} \times 250, 4 \times 144) = 187 \text{ mm};$$

$$d_0 = 190 \text{ mm};$$

(1)耳板孔净截面处的抗拉强度:

$$\sigma = \frac{N}{2tb_1} = \frac{4\,770 \times 1\,000}{2 \times 144 \times 124} = 134 \text{ MPa}$$

(2)耳板端部截面抗拉(劈开)强度:

$$\sigma = \frac{N}{2t(a - \frac{2d_0}{3})} = \frac{4\,770 \times 1\,000}{2 \times 144 \times (250 - \frac{2 \times 190}{3})} = 134 \text{ MPa}$$

(3)耳板抗剪强度:

$$\tau = \frac{N}{2tZ} = \frac{4\,770 \times 100}{2 \times 144 \times 358} = 46 \text{ MPa}$$

表 1 钢标计算方法结果对比 单位:MPa

应力	方法 1	方法 2	方法 3
耳板孔净截面拉应力	191	169	134
耳板端部拉应力	226	242	134
耳板剪应力	53	83	46

耳板采用 Q345qD 钢材,抗拉强度设计值为 250 MPa,抗剪强度设计值为 145 MPa,由表 1 可知,两种计算方法的强度均满足要求。

(1)方法 1(计贴板作用)的耳板孔净截面拉应力计算值大于方法 2(不计贴板作用)的计算结果,说明以贴板为基准的方法 2 计算值偏大,原因在于该方法没有考虑贴板以外部分的主耳板宽度作用。

(2)钢标计算得到的耳板端部拉(劈开)应力最大,且钢标没有计算端部承压应力的公式。

2.2 《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—2019)

《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—2019)^[4](以下简称“钢闸门规范”)附录 M,耳板应按下列式验算孔壁承压应力、耳孔拉应力:

(1)耳板孔壁承压应力:

$$\sigma_{cj} = \frac{P}{d\delta} \leq [\sigma_{cj}]$$

(2)耳板孔拉应力:

$$\sigma_k = \sigma_{cj} \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} \leq [\sigma_k]$$

式中: P 为杆件轴向拉力设计值,N; δ 为耳板厚度,mm; r 为耳板孔直径,mm; d 为耳板孔直径,mm; R 为取 $\min(B/2, r+a)$;

此外,耳板尚须满足钢闸门规范中的构造要求:

$$\begin{cases} B = (2.4 \sim 2.6)d \\ \delta \geq \frac{B}{20} \\ a = (0.9 \sim 1.05)d \end{cases}$$

式中: B 为耳板总宽度,mm; a 为顺受力方向,销轴孔边缘距板边缘最小距离,mm;

同样的,由于钢闸门规范中的计算方法并未提及贴板,故不能直接采用规范公式进行计算,为了与

下文有限元结构进行对比,采用以下 3 种处理方法。

第一种方法,各尺寸以贴板为基准。考虑贴板厚度的贡献,取值如下:

$$B = (2.4 \sim 2.6) \times 190 = 490 \text{ mm};$$

$$\delta = 80 + 32 \times 2 = 144 \text{ mm};$$

$$a = 295 - 190 \div 2 = 200 \text{ mm};$$

(1)耳板孔壁承压应力:

$$\sigma_{cj} = \frac{P}{d\delta} = \frac{4\,770 \times 1\,000}{190 \times 144} = 174 \text{ MPa}$$

(2)耳板孔壁拉应力:

$$\sigma_k = \sigma_{cj} \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} = 174 \times \frac{245^2 + 95^2}{245^2 - 95^2} = 236 \text{ MPa}$$

第二种方法,各尺寸以主耳板为基准。不考虑贴板厚度的贡献,取值如下:

$$B = (2.4 \sim 2.6) \times 190 = 490 \text{ mm};$$

$$\delta = 80 \text{ mm};$$

$$a = 1.05 \times 190 = 200 \text{ mm};$$

(1)耳板孔壁承压应力:

$$\sigma_{cj} = \frac{P}{d\delta} = \frac{4\,770 \times 1\,000}{190 \times 80} = 314 \text{ MPa}$$

(2)耳板孔拉应力:

$$\sigma_k = \sigma_{cj} \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} = 314 \times \frac{345^2 + 95^2}{345^2 - 95^2} = 365 \text{ MPa}$$

第三种方法,各尺寸以主耳板为基准。考虑贴板厚度的贡献,取值如下:

$$B = (2.4 \sim 2.6) \times 190 = 490 \text{ mm};$$

$$\delta = 80 + 32 \times 2 = 144 \text{ mm};$$

$$a = 1.05 \times 190 = 200 \text{ mm};$$

这种方法,由于构造限制,各尺寸取值与方法一取值一致。因此计算结果与方法一相同。

表 2 钢闸门规范计算方法结果对比 单位:MPa

应力	方法 1	方法 2	方法 3
耳板孔壁承压应力	174	314	174
耳板孔壁拉应力	236	365	236

耳板采用 Q345qD 钢材,抗拉、抗压强度设计值为 250 MPa。由表 2 可得如下结论。

(1)钢闸门规范方法 2 计算得的强度无法满足规范的要求,这个结论与钢标的结论相反。

(2)钢闸门规范计算得到的耳板孔壁的拉应力大于孔壁顶部的承压应力。

3 有限元分析方法

3.1 建立有限元模型

采用通用有限元软件 ANSYS 建立实体有限元,

采用 solid 单位模拟耳板及销轴构件。销轴与耳板、贴板之间采用滑动摩擦接触,摩擦系数取 0.1。

为与上述规范计算方法对比,本节先建立两种无贴板的耳板有限元模型:有限元模型 1-1 耳板板厚取 80 mm;有限元模型 1-2 耳板板厚取 144 mm。模型如图 2 所示。

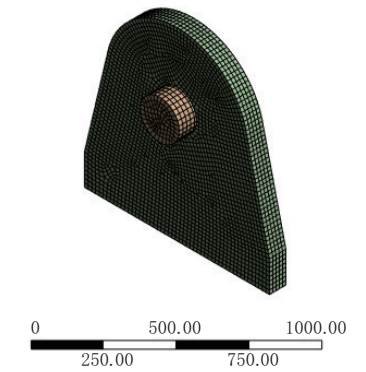


图2 有限元模型 1-1、1-2(单位:mm)

对于带贴板的耳板,为模拟焊缝连接,在有限元模型中建立了焊缝模型。贴板与主耳板之间为无摩擦连接,焊缝与贴板、主耳板之间为绑定连接。约束条件为固结销轴。轴向拉力荷载施加在耳板底部。此为有限元模型 2。模型如图 3 所示。

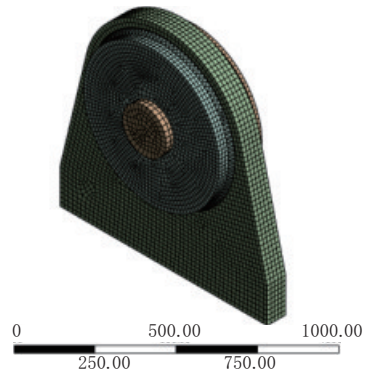


图3 有限元模型 2(单位:mm)

3.2 无贴板模型计算结果分析

受篇幅影响,且由于模型 1-1 和模型 1-2 之间仅板厚不同,应力分布规律相似,下文仅列出模型 1-2 的应力云图,见图 4 至图 6。

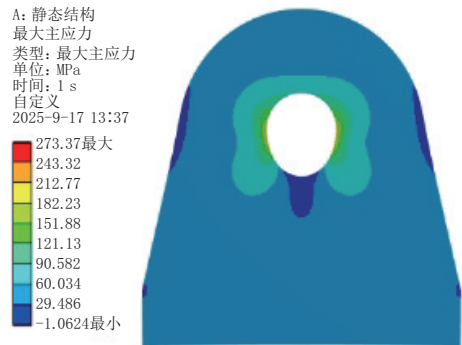


图4 耳板主拉应力(单位:MPa)

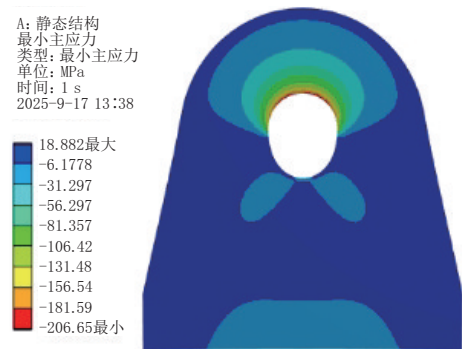


图5 耳板主压应力(单位:MPa)

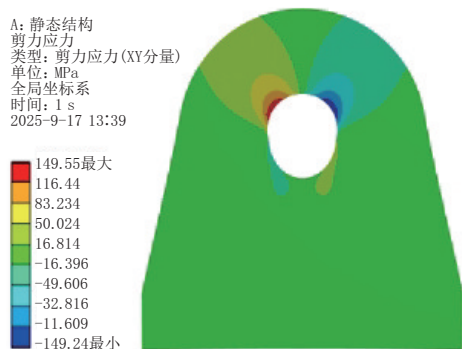


图6 耳板剪切应力(单位:MPa)

由图 4 和图 5 可知,无贴板耳板的主拉应力及主压应力均集中在耳板孔附近,呈现两边对称、上大下小的应力分布规律。

3.3 无贴板模型计算结果与规范计算值对比

为研究上文两本规范公式与有限元计算之间的区别,做对比如表 3 所示。

表 3 无贴板耳板计算结果对比				单位:MPa
计算方法		孔壁最大拉应力	孔壁最大压应力	耳板剪切应力
有限元	模型 1-1	368	326	200
	模型 1-2	274	207	150
钢标	方法 2	242	—	83
	方法 3	134	—	46
钢闸门规范	方法 2	365	314	—
	方法 3	236	174	—

需要说明的是,表 3 数据中,模型 1-1 和两本规范中的方法 2 计算的是对应完全相同的耳板;同样地,模型 1-2 和方法 3 也是对应相同的耳板。

为了方便对比,将相对应的两本规范的计算值除以有限元计算值,得到如表 4 的数据。

由表 4 可知,钢闸门规范的计算值与有限元计算结果拟合较好。钢标的计算值与有限元计算结果拟合较差,且钢标的计算值偏小,偏不安全。

3.4 有贴板模型计算结果分析

由图 7 可知,带贴板的耳板等效(Von-Mises)应力云图的分布规律为:最大等效应力为 313.7 MPa,

表 4 无贴板耳板应力比值 单位:MPa

计算方法		孔壁最大拉应力	孔壁最大压应力	耳板剪切应力
钢标	方法 2/模型 1-1	0.66	—	0.42
	方法 3/模型 1-2	0.49	—	0.31
钢闸门规范	方法 2/模型 1-1	0.99	0.96	—
	方法 3/模型 1-2	0.86	0.84	—

发生在焊缝上,主耳板孔周围应力次之,贴板的应力最小。

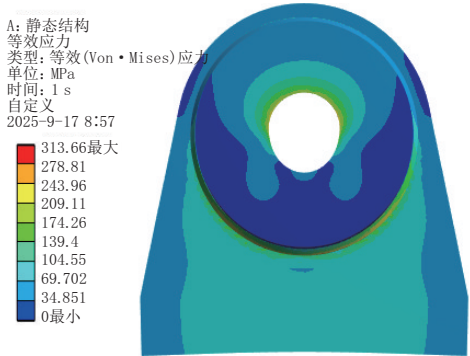


图 7 总体等效应力(单位:MPa)

由图 8 可知,焊缝等效(Von-Mises)应力云图的分布规律为:最大应力为 313.7 MPa,发生在下半部分的焊缝上,上半部分焊缝应力较小。

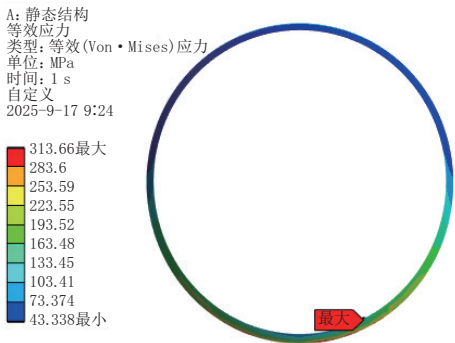


图 8 焊缝等效应力(单位:MPa)

由图 9 可知,贴板等效(Von-Mises)应力云图的分布规律为:应力主要分布在耳板孔的周边,且总体呈现上大下小,两边大上边小的规律。最大应力为 231.8 MPa,发生在耳板孔壁两侧。

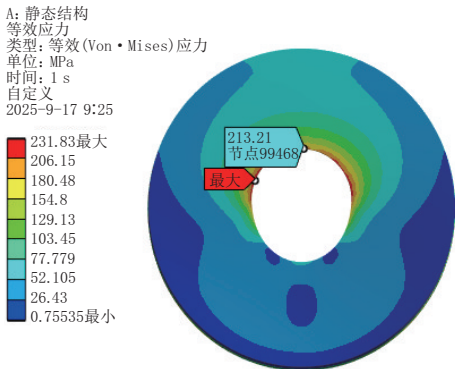


图 9 贴板等效应力(单位:MPa)

由图 10 可知,主耳板等效(Von-Mises)应力云图的分布规律与贴板规律类似,具体为:应力主要分布在耳板孔的周边,且总体呈现上大下小,两边大上边小的规律。最大应力为 245.5 MPa,发生在耳板孔壁两侧。孔壁顶部等效应力为 201.4 MPa。

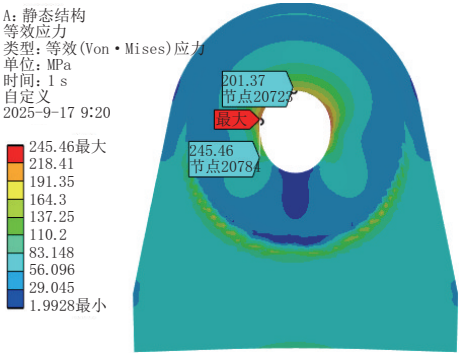


图 10 主耳板等效应力(单位:MPa)

由图 11 可知,主耳板主压应力云图的分布规律为:主压应力主要分布在孔壁顶部,并由内向外逐渐减小。最大主压应力为 175 MPa,发生在孔壁正上方。

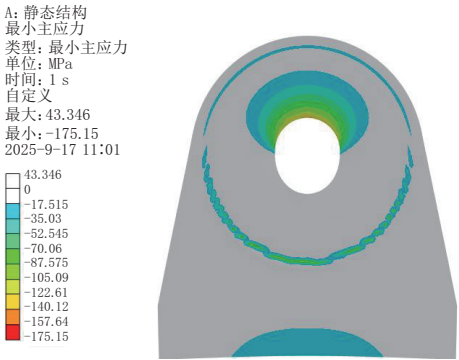


图 11 主耳板主压应力(单位:MPa)

由图 12 可知,主耳板主拉应力云图的分布规律为:(1)主拉应力主要分布在孔壁两侧,并由内向外逐渐减小;(2)相比前文无贴板模型,焊缝附近的主耳板主拉应力也较大,最大约 200 MPa,说明贴板所受到的力通过周围焊缝传递到耳板的下半部分,这使得耳板孔壁周围的局部应力有所减小;(3)耳板最大主拉应力为 243.1 MPa,发生在孔壁两侧。

由图 13 可知,主耳板最大剪切应力为 130.2 MPa,发生在孔壁顶端两侧与耳板轴线约 45°截面处。

4 带贴板的耳板设计方法

4.1 有限元结果与钢标计算值对比

有限元结果与钢标计算值对比如表 5 所示。由表 5 中数据可知:

(1)钢标计算的耳板剪切应力值偏小,偏不安全;分析原因主要是因为有限元结果显示:剪切应力

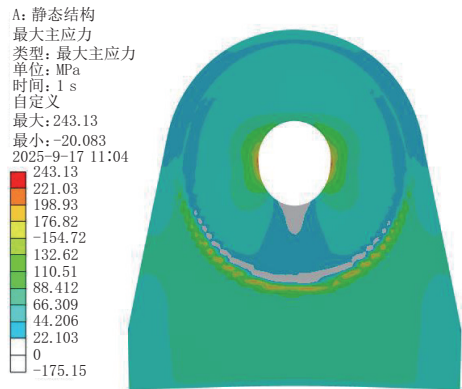


图 12 主耳板主拉应力(单位:MPa)

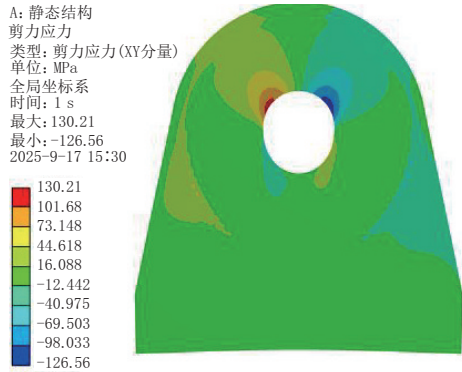


图 13 主耳板剪切应力(单位:MPa)

主要分布在耳板孔周围,有较不均匀的分布特点,并不是如钢标所假设的在整个耳板端部范围均匀分布。

(2)对耳板孔壁拉应力,钢标的方法 1 和方法 2 与有限元计算值相差较小(10% 以内)。

(3)钢标方法 3 与有限元计算结果相差较大,且应力偏小,不建议作为设计依据。

表 5 有限元结果与钢标计算值对比 单位:MPa

计算方法	耳板孔壁最大拉应力	耳板孔壁最大压应力	耳板剪切应力
方法 1	226	—	53
钢标 方法 2	242	—	83
方法 3	134	—	46
有限元 模型 2	243	175	130
方法 1/模型 2	0.93	—	0.41
方法 2/模型 2	0.99	—	0.64
方法 3/模型 2	0.55	—	0.35

4.2 有限元结果与钢闸门规范计算值对比

由表 6 中数据可知:

(1)钢闸门规范的方法 1、3 计算值与有限元结果之间相差较小(5% 以内);

(2)钢闸门规范方法 2 计算值偏大,不建议作为设计依据;原因在于方法 2 并未考虑贴板的作用。

4.3 带贴板的耳板设计方法

带贴板的耳板承载力计算应包含以下应力指

表 6 有限元结果与钢闸门规范计算值对比 单位:MPa

计算方法	耳板孔壁最大拉应力	耳板孔壁最大压应力	耳板剪切应力
方法 1	236	174	—
方法 2	365	314	—
方法 3	236	174	—
有限元 模型 2	243	175	130
方法 1/模型 2	0.97	0.99	—
方法 2/模型 2	1.50	1.79	—
方法 3/模型 2	0.97	0.99	—

标:耳板孔壁拉应力、压应力、剪切应力以及贴板周围焊缝应力。

结合以上对比分析,钢闸门规范有耳板孔壁拉应力及压应力两项计算公式,且均与有限元结果拟合较好,故钢闸门规范的方法 1、3 可作为推荐设计方法,计算带贴板耳板的孔壁拉应力及压应力。实际设计过程中,建议采用两种方法互相验证,最终取不利值作为最终结果。

此外,钢闸门设计规范并未提供耳板剪切应力以及贴板周围焊缝应力的计算,且钢标提供的方法计算得到的剪切应力小于有限元模拟结果,并相差较大,故针对这两项应力,建议采用有限元计算方法作为设计依据。

5 结 语

以现有规范为基础,对规范公式进行了合理的处理,并通过有限元建模分析加以对比,得出以下主要结论:

(1)可采用有限元的非线性接触计算分析耳板的应力分布;

(2)基于钢闸门规范的方法 1、3 可用于计算耳板孔壁拉应力、压应力;

(3)耳板剪切应力以及贴板周围焊缝应力水平较高,设计者应引起重视,该两项应力应采用有限元模型进行计算;

(4)有限元分析结果表明:贴板不仅可以提高耳板整体承载能力,还能通过焊缝将荷载传递到耳板远端,使得耳板孔壁附近局部应力减小。

参考文献:

[1] 陈志华,钱思卿,刘红波.带贴板销轴耳板连接参数化分析及设计方法研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(10):1064-1077.
[2] 颜东煌,刘雪峰,田仲初,等.销轴连接结构的接触应力分析[J].工程力学,2008,25(1):229-234;240.
[3] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
[4] SL 74—2019 水利水电工程钢闸门设计规范[S].