

压力容器非圆形开孔补强计算研究

梁俊虎
(武汉海博瑞科技有限公司 湖北 武汉 430205)

摘要：相对于圆形开孔来说，压力容器上的非圆形开孔具有曲率变化性和方向性这两个结构特征因素。因此，压力容器上的非圆形开孔在某些情况下，其应力集中远比圆形开孔恶劣。而 GB150 中的等面积补强法和 HG/T 20582 中的压力面积补强法对非圆形开孔的补强计算为简化算法，且均对非圆形开孔结构特征因素的条件限制考虑不全。故使用 GB150 中的等面积补强法和 HG/T 20582 中的压力面积补强法对非圆形开孔进行补强计算时，其结果的安全性存在不足。

关键词：压力容器；非圆形开孔；开孔补强计算

1 概述

为了满足压力容器的使用需求，设计师们通常需要在压力容器的壳体上设计各种各样的开孔，如进（排）料孔、人（手）孔和观察孔等。这些开孔会削弱壳体的承载能力，为了弥补开孔对壳体的削弱，设计师们需要对开孔部位进行补强计算，保证压力容器的设计安全。几乎所有压力容器壳体上都有数量不等的各种开孔，所以压力容器的开孔补强计算是压力容器设计过程中比较常见的设计计算。目前，工程上常用的开孔补强计算方法有等面积补强法、分析补强法和压力面积补强法。由于所采用的理论不同，各补强方法均有其适用范围，详见表 1。

表 1 开孔补强方法及其适用范围

补强方法	补强部位限制	开孔类型范围	技术标准
等面积补强法	圆筒 凸形封头 锥形封头 球形封头 平封头	圆孔 椭圆孔 长圆孔	GB 150
分析补强法	圆筒	圆孔	GB 150
压力面积补强法	圆筒 凸形封头 锥形封头 球形封头	圆孔 椭圆孔 长圆孔	HB/T 20582

压力容器的开孔形形色色，很多时候会出现非圆形的开孔。由表 1 可知，适用于非圆形开孔的补强方法有等面积补强法和压力面积补强法。等面积补强法以补偿开孔局部截面的拉伸强度作为补强准则；而压力面积法以特定的压力载荷面积来计算开孔引起的应力集中及截面补偿面积。两者的总体思路是一致的。这些开孔补强方法均以圆形开孔补强为主要对象，当其应用对象为非

圆形开孔时，则是对非圆形开孔进行一定的条件限制后（表 2）再按圆形开孔进行补强计算。归根结底，非圆形开孔补强计算是一种简化算法。

表 2 非圆形开孔的条件限制

补强方法	条件限制
GB150 等面积补强法	①当在壳体上开椭圆形或长圆形孔时，孔的长径与短径之比应不大于 2.0； ②开孔最大直径对椭圆形或长圆形开孔指长轴尺寸
HG/T20582 压力面积补强法	①圆筒、圆锥上开设长圆孔或椭圆孔时，孔的短轴宜与圆筒或圆锥的经线方向一致； ②凸形封头上开设长圆孔或椭圆孔时，开孔大小应按长圆或椭圆孔的长轴计算；筒体或圆锥上开设长圆孔或椭圆孔，且短轴与圆筒或圆锥的经线方向一致时，开孔大小应按长圆孔或椭圆孔的短轴计算； ③开孔接管的轴线不垂直于壳体经线时，开孔大小应按在经线方向的开孔尺寸计算

由表 2 可知，GB 150 中的等面积补强法主要对非圆形开孔的形状（曲率变化的程度）进行了限制；HG/T 20582 中的压力面积补强法则主要对非圆形开孔的方向进行了限制。然而，非圆形开孔具有曲率变化性和方向性这两个结构特征因素。但 GB 150 和 HG/T 20582 中对非圆形开孔的条件限制仅各占其一，所以无论按哪个标准推荐的方法进行非圆形开孔的补强计算，限制条件均存在疏漏。那么，采用等面积补强法和压力面积补强法对非圆形开孔进行补强计算是否安全呢？我们利用一个非圆形开孔的补强范例来进行研究。

2 研究方法

在一个圆筒上加工一个非圆形开孔，开孔位于圆筒轴线中心，有以下四种开孔形式，见图 1 ~ 图 4。
图 1 和图 2 均为椭圆形开孔，其长径与短径之比为 2，图 1 中椭圆形开孔短径与筒体轴线对齐，图 2 中椭圆形

开孔长径与筒体轴线对齐；图3和图4均为长圆形开孔，长径与短径之比为2，图3中长圆形开孔短径与筒体轴线对齐，图4中长圆形开孔长径与筒体轴线对齐。

假设筒体材质为Q245R，设计内压为1MPa。采用等面积补强法对这四种类型的开孔进行整体补强计算时，则可以将其均看作开孔直径为100mm的圆形开孔进行补强计算，其计算结果均为合格且计算过程一致。采用压力面积补强法对这四种类型的开孔进行整体补强计算时，除了图3中的情况是将其看作开孔直径为50mm的圆形开孔外，其余仍看作开孔直径为100mm的圆形开孔进行补强计算，其计算结果也均为合格。为

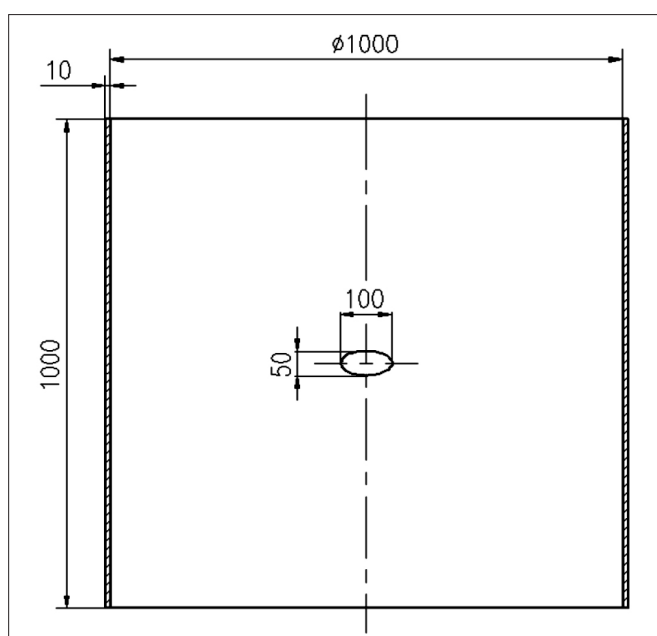


图1 椭圆形开孔1

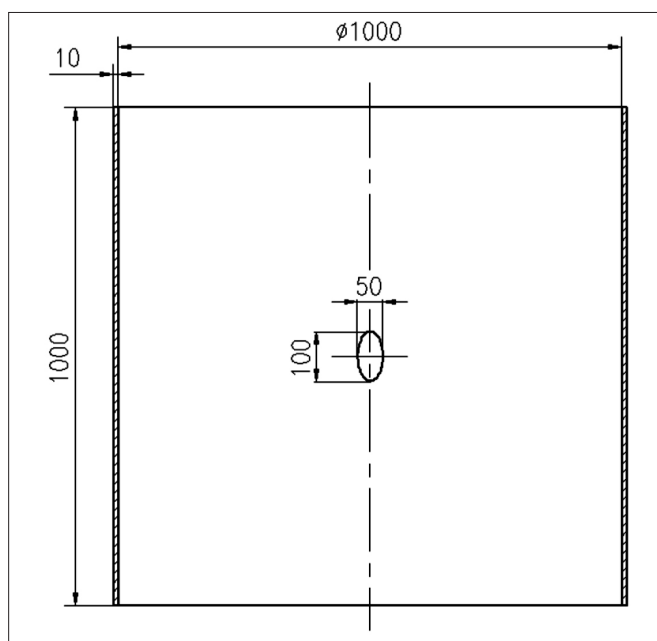


图2 椭圆形开孔2

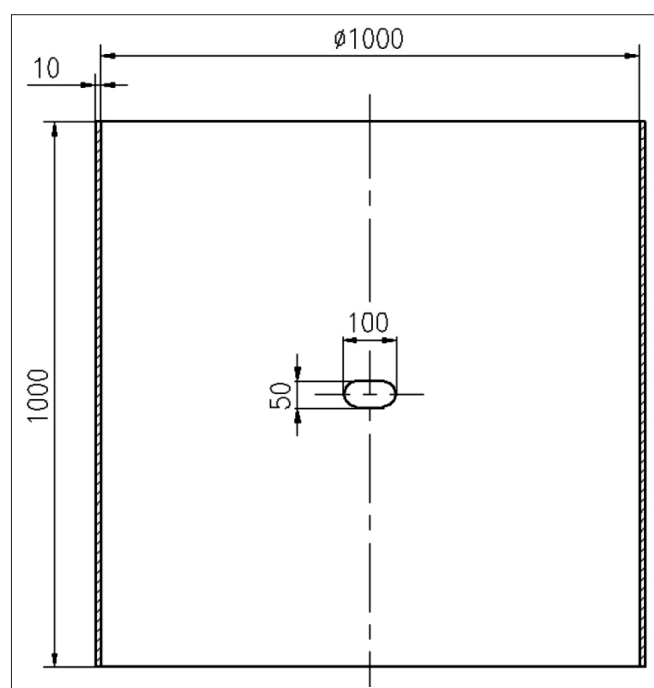


图3 长圆形开孔1

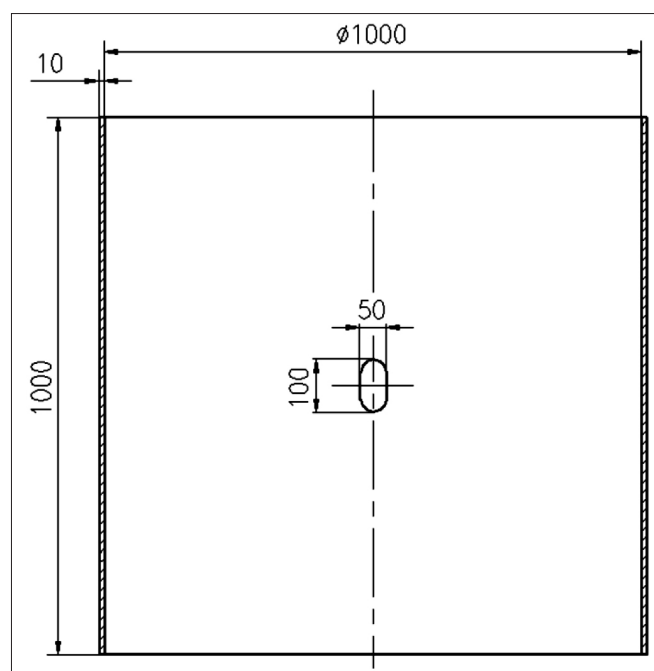


图4 长圆形开孔2

了验证这个计算结果是否准确，我们利用有限元法对这四种类型的开孔进行应力分析。具体如下：

2.1 边界条件

- (1) 圆筒一侧端面约束所有方向自由度；
- (2) 圆筒另一侧端面约束环向方向自由度，仅保留轴向方向自由度。

2.2 计算载荷

- (1) 圆筒内表面施加1MPa的压力；
- (2) 开孔处的孔内壁施加均布力，均布力大小为

1MPa×开孔面积 (mm²), 方向为开孔法向, 由内壁指向外壁 (N);

(3) 圆筒保留轴向方向自由度的端面施加法向均布拉力, 均布拉力大小为 1MPa×圆筒截面积 (mm²), 值为 785000N。

2.3 计算结果

应力分析按照 JB 4732-1995 (R2005) 的要求进行了应力线性化处理及分类, 结果见表 3。

2.4 结果分析

按照 GB 150.3 提供的内压圆筒应力计算公式, 可以计算出该筒体的总体膜应力

对比表 3 中开孔周边 (孔中心 ϕ 300 处) 的总体膜应力计算结果可知, 两者是基本一致的, 所以可以认为应力分析的结果是准确可靠的。根据表 3 的分析结果进行强度评定, 结果见表 4。

由表 3、表 4 可知, 四种类型的开孔补强应力分析结果差距很大, 且有两种开孔形式的一次局部薄膜应力强度评定不合格。这与采用等面积补强法及压力面积补强法的计算结果是相悖的。由此可见, 采用等面积补强法及压力面积补强法进行非圆形开孔的补强计算时, 其

表 3 四种开孔形式在相同条件下的应力分析结果

开孔类型	应力强度分布图示	局部膜应力 / MPa	一次 + 二次应力 / MPa	周边总体膜应力 (孔中心 ϕ 300 处) / MPa
椭圆孔 (短径对齐筒体轴线) 见图 1		82.3	128.6	50.5
椭圆孔 (长径对齐筒体轴线) 见图 2		308.7	309.1	49.2
长圆孔 (短径对齐筒体轴线) 见图 3		129.4	148.3	50.5
长圆孔 (长径对齐筒体轴线) 见图 4		238.6	241.7	49.0

注: 查 GB 150.2-2011, Q245R (3 ~ 16mm, 20℃) 的许用应力为 S_m=148MPa。

表 4 四种开孔形式在相同条件下的强度评定

开孔类型	应力类型	计算值 / MPa	许用值 / MPa	评定结果
椭圆孔 (图 1a)	一次局部薄膜应力 S _{II}	82.3	1.5S _m =222	合格
	一次 + 二次应力 S _{IV}	128.6	3S _m =444	合格
椭圆孔 (图 1b)	一次局部薄膜应力 S _{II}	308.7	1.5S _m =222	不合格
	一次 + 二次应力 S _{IV}	309.1	3S _m =444	合格
长圆孔 (图 1c)	一次局部薄膜应力 S _{II}	129.4	1.5S _m =222	合格
	一次 + 二次应力 S _{IV}	148.3	3S _m =444	合格
长圆孔 (图 1d)	一次局部薄膜应力 S _{II}	238.6	1.5S _m =222	不合格
	一次 + 二次应力 S _{IV}	241.7	3S _m =444	合格

结果并非完全可靠。

3 研究分析

等面积补强法及压力面积补强法关注的是开孔补强有效范围内的强度补偿面积问题以及开孔率引起的应力集中问题。这对于圆形开孔来说已经足以安全应用于工程计算了。然而对于非圆形开孔来说却不一定, 因为非圆形开孔比圆形开孔多出了曲率变化性和方向性这两个结构特征因素。所以, 在进行非圆形开孔的补强计算时,

还应对开孔形状和开孔方向引起的应力集中问题进行考虑。

在 GB 150 推荐的等面积补强法中, 仅以孔的长径与短径之比不大于 2m 约束非圆形开孔的曲率变化性, 而未考虑开孔方向。在 HG/T 20582 推荐的压力面积补强法中, 则以孔的短轴宜与圆筒或圆锥的经线方向一致这种推荐性条款来约束孔的方向性, 而未考虑开孔形状。众所周知, 薄壳圆筒在内压作用下, 其环向应力是轴向应力的 2 倍 (薄壳圆筒上圆形开孔的应力集中见图 5)。而当非圆形开孔的长径与筒体轴向对齐时, 开孔部位受筒体环向应力的影响最大, 并在开孔轮廓突变处产生最强的应力集中 (图 6), 这种应力集中是随着其长径与短径之比的增大而增大的, 图 2、图 4 即为该情况。而与之相反的是非圆形开孔的短径与筒体轴向对齐的情况, 这

时开孔部位受筒体环向应力和轴向应力的影响最为均匀(见图7),应力集中也是最小的,图1、图3即为该情况。所以,非圆形开孔的形状和方向不同,导致了等面积补强法及压力面积补强法的计算结果与应力分析结果不一致,也证明了等面积补强法及压力面积补强法在对非圆形开孔进行补强计算时是存在局限性的,这种局限性导致了其计算结果的安全性存在不足。

需要提到的是,由于凸形封头、平封头等应力分布与薄壳圆筒完全不同,所以本文讨论的非圆形开孔补强问题,仅限于薄壳圆筒。

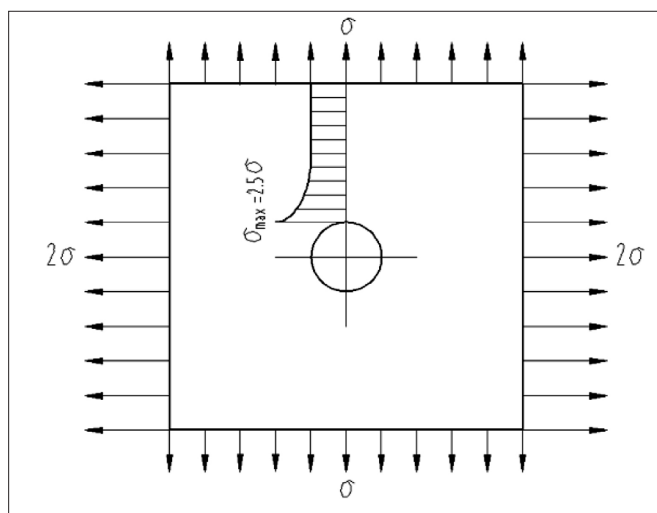


图5 薄壁圆筒上圆形开孔的应力集中

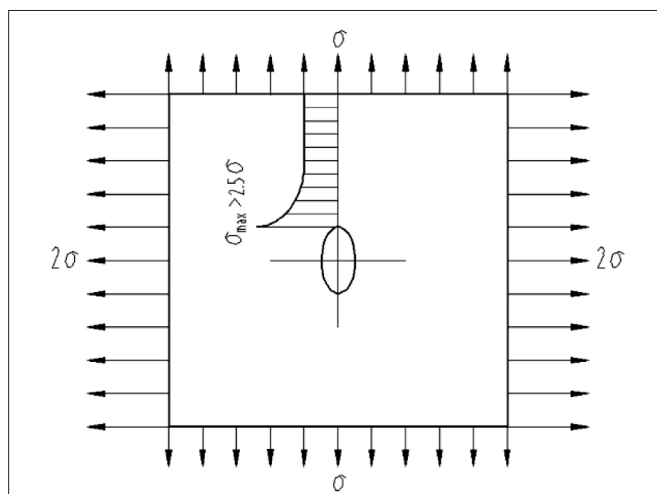


图6 薄壁圆筒上椭圆形开孔(长径对齐筒体轴线)的应力集中

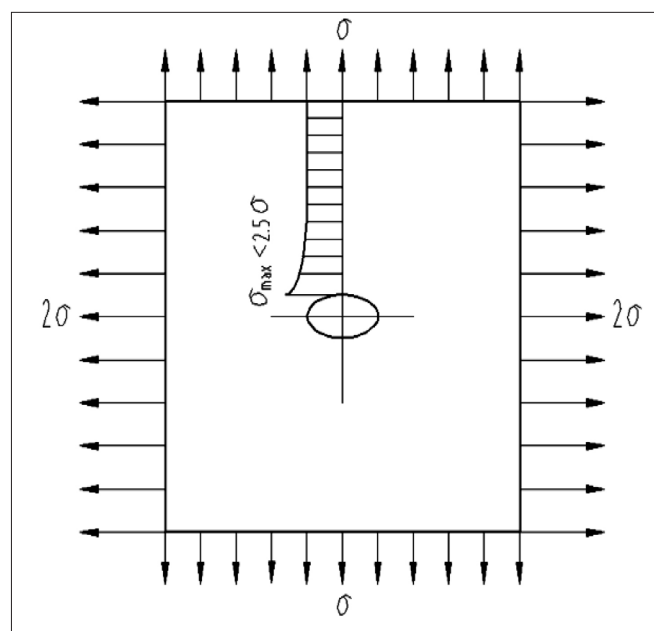


图7 薄壁圆筒上椭圆形开孔(短径对齐筒体轴线)的应力集中

4 结语

综上所述,在对非圆形开孔进行补强计算的时候,不宜完全照搬标准上所给出的计算方法,还应对开孔的实际情况进行分析,确认标准与计算工况是否相符。对于非圆形开孔的补强计算,给出以下建议,供参考。

(1) 进行非圆形开孔的补强计算时,建议将GB 150和HG/T 20582中对非圆形开孔的条件限制进行合并使用;

(2) 当非圆形开孔的长径与筒体(锥壳)轴向对齐或夹角较小时,建议采用局部应力分析的方法进行开孔补强计算,确保开孔安全。

参考文献:

- [1] 寿比南, 杨国义, 徐锋, 等. GB 150-2011《压力容器》标准释义 [M]. 北京: 新华出版社, 2021.
- [2] GB 150.1 ~ 150.4-2011, 压力容器 [S].
- [3] HG/T 20582-2020, 钢制化工容器强度计算规范 [S].
- [4] HG/T 20583-2020. 钢制化工容器结构设计规范 [S].

作者简介: 梁俊虎(1986.05-), 男, 汉族, 湖北武汉人, 本科, 工程师, 研究方向: 载人压力容器设计及制造。