

不同形式加强肋对矿用逆变器外壳强度影响的分析研究

王万峰, 章福成

中煤科工(上海)新能源有限公司, 上海

收稿日期: 2025年5月16日; 录用日期: 2025年6月9日; 发布日期: 2025年6月17日

摘要

基于一种矿用逆变器外壳的加强肋形式, 建立多种不同截面形式的加强肋, 而后导入到有限元分析软件 Workbench 中, 对其内表面施加 1.0 MPa 的载荷, 求解其变形和应力, 评估不同形式加强肋对箱体强度的影响, 以确定最适合该箱体的加强肋。

关键词

加强肋, 外壳, 有限元分析

Analysis and Study of the Influence of Different Forms of Reinforcing Ribs on the Strength of the Housing of Mining Inverters

Wanfeng Wang, Fucheng Zhang

CCTEG (Shanghai) Future Energy Co., Ltd, Shanghai

Received: May 16th, 2025; accepted: Jun. 9th, 2025; published: Jun. 17th, 2025

Abstract

Based on a reinforcing rib design for the housing of a mining inverter, multiple reinforcing ribs with different cross-sectional forms are established. Subsequently, they are imported into the finite element analysis software Workbench. A load of 1.0 MPa is applied to the inner surface to analyze its deformation and stress. The impact of different forms of reinforcing ribs on the strength of the enclosure is evaluated to determine the most suitable reinforcing rib design for the enclosure.

Keywords

Academic Journals Reinforcing Ribs, Housing, Finite Element Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现阶段, 加强肋已广泛应用于各种防爆外壳中。在矿用防爆外壳上, 通过加强肋的应用, 增加局部的结构支撑, 有效提升了箱体的整体强度和稳定性, 增强了其抗震能力和承载能力, 从而延长了其使用寿命并提高了安全性。此外, 还能够优化结构以减少箱体重量, 降低材料成本, 并为工程设计提供更大的灵活性和选择空间。

在已有研究中, 姜振南[1]的研究表明对于矩形隔爆外壳而言, 在同等条件下, 其应力和应变均随着长宽比缩小而变小, 在应变上体现尤其明显。在同等条件下, 随着加强肋宽高比加大, 外壳最大应力增大, 而外壳最大应变减小; 加强肋布置于壳体内侧, 相对于壳体外侧, 其外壳最大应力要稍大, 其外壳最大应变几乎不变; 朱文硕[2]的研究表明在同等条件下, 加强肋内置与外置布局, 壳体质量相等, 但是内置加强肋的优化效果明显优于外置。陈伟[3]在加强肋材料、横截面积及布局位置均相同的情况下, 测试矩形、半圆形、三角形和梯形这 4 种不同加强肋对箱体应力和变形的影响, 结果表明这 4 种加强肋对箱体底板均有一定的加强作用, 但横截面为矩形的加强肋对箱体的加强作用更突出, 其应力、形变优势更为明显。

本文基于矿用逆变器(以下简称 PCS)箱体, 采用不同的加强肋形式, 分析研究不同形式加强肋对外壳的影响, 以确定最合适当前 PCS 箱体的加强肋形式。

2. 槽形加强肋厚度对箱体强度的影响

结构强度刚度理论计算主要为弹性力学理论, 在力学中的变量主要是应变和应力。这些变量要同时满足连续方程、平衡方程、本构方程和边界条件[4]。

在实际中, 隔爆外壳结构较为复杂, 计算前简化一些附件, 去掉联接孔, 观察窗等, 只保留基本的形状和各面板外形尺寸和厚度, 把板最薄处厚度视作整个面板的厚度。为便于分析, 将其进一步简化为均匀厚度、在均布力作用下、周边受支撑的平板, 分别有不同的尺寸和厚度。

下图 1 为受均布载荷作用、四边固定的矩形板模型。

根据弹性力学知识可知, 最大应力点发生在矩形长边的中心位置, 即图 1 中的 P 点, 最大应力:

$$\sigma_{max} = \alpha \frac{pa^2}{h^2}$$

式中 p —— 载荷;

h —— 壁厚;

α —— 系数, 与长、短边比值 b/a 有关, 按表 1 取值。

最大变形(挠度)位置发生在板面中心位置, 即图 1 中的 O 点, 最大变形为:

$$w_{max} = \frac{\beta(1-\mu^2)pa^4}{Eh^3}$$

式中 μ ——泊松比;
 E ——弹性模量;
 β ——系数, 与长、短边比值 b/a 有关, 按表 1 取值。

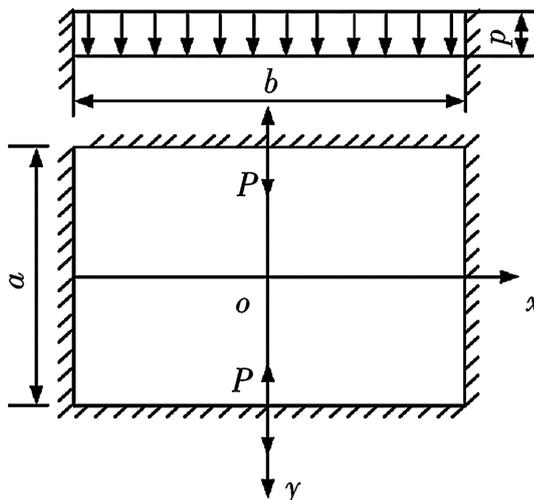


Figure 1. Model of a rectangular plate with fixed boundaries
 图 1. 周边固定的矩形板模型图

Table 1. Value table for α and β
 表 1. α 、 β 取值表

b/a	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	>2.0
α	0.248	0.294	0.343	0.374	0.390	0.398	0.400
β	0.015	0.021	0.025	0.028	0.029	0.030	0.031

在矩形平板上增加加强肋, 相当于将矩形平板分割成若干个小矩形, 且四周固定。小矩形板宽度为:

$$b = \sqrt{\frac{\sigma_x t^2}{\alpha q}}$$

式中 α ——小矩形板长宽比对应系数;
 t ——小矩形板厚度, mm;
 q ——设计承受压力, MPa;
 σ_x ——材料需用应力, MPa。

由上式可知, 分割成的小矩形板宽度与小矩形板长宽比对应系数的平方根成反比, 经查表得系数 α 在长宽比为 1 时最小, 因此按照加强肋横向间距与纵向间距相等的方式设计效果最优。

针对不同的外壳加强肋形式也会有所不同, 最常见的加强肋截面形式有矩形、槽形、圆形。而槽形加强肋又存在多种厚度可以选择, 为不变更原始加强肋布局, 基于矩形加强肋截面的长与宽, 建立 5 mm、8 mm 与 10 mm 厚度的槽形加强肋模型, 其中矩形与 5mm 厚度槽型加强肋模型如图 2 所示。

在 PCS 箱体中主要有五块板运用加强肋加强, 四块为矩形板, 一块为异形板。对异形板进行简化处理, 并取一块矩形板为研究对象, 依据上述理论, 便于实际箱体内外部元器件的安装, 设置两块板的加强肋布局如图 3 所示。

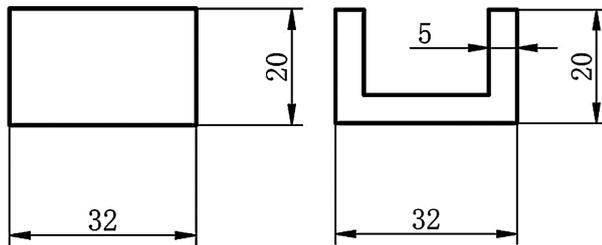


Figure 2. Cross-sectional dimensions of the rectangle and the channel-shaped stiffening rib with a thickness of 5 mm
图 2. 矩形与 5 mm 厚度槽形加强肋截面尺寸

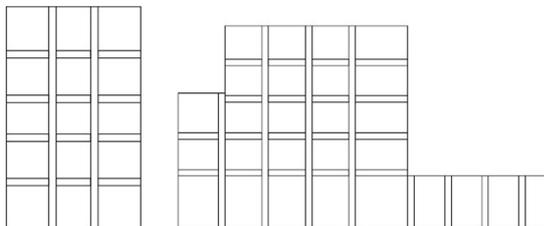


Figure 3. Layouts of the stiffening ribs for two types of plates
图 3. 两种板加强肋布局

建立好加强肋模型与矩形板与异形板模型后, 将加强肋与板进行装配而后导入到有限元分析软件 Workbench 中, 对其内表面施加 1.0 MPa 压力的载荷[5], 求解其变形和应力, 得到结果如表 2 所示。

Table 2. Simulation effects of two kinds of plates strengthened by channel-shaped stiffening ribs with different thicknesses
表 2. 不同厚度槽形加强肋加强后两种板仿真效果

槽型截面加强肋厚度	异形板变形	异形板应力	矩形板变形	矩形板应力
5 mm	<p>最大变形 1.8127 mm</p>	<p>最大应力 286.89 MPa</p>	<p>最大变形 1.7902 mm</p>	<p>最大应力 191.47 MPa</p>
8 mm	<p>最大变形 1.5805 mm</p>	<p>最大应力 259.88 MPa</p>	<p>最大变形 1.5207 mm</p>	<p>最大应力 161.21 MPa</p>
10 mm	<p>最大变形 1.4975 mm</p>	<p>最大应力 249.86 MPa</p>	<p>最大变形 1.4346 mm</p>	<p>最大应力 150.49 MPa</p>

从表 2 中数据可以看出, 不论是异形板还是矩形板, 随着槽形加强肋厚度的增加, 变形与应变都呈现出减小趋势; 而且在由 5 mm 增加为 8 mm 时, 减小程度较大, 8 mm 与 10 mm 的变化程度较小, 这说明, 在厚度较小时, 增加槽形加强肋的厚度可以有效增加箱体的强度, 而且随着厚度的增加对箱体强度的影响也在逐渐减小。由以上分析可知, 8 mm 厚度的槽形加强肋在这三种厚度中较为适合。

3. 不同截面加强肋对箱体强度的影响

基于相同的原理, 建立截面为类半圆形的加强肋, 如图 4 所示。

而后建立模型后导入 Workbench 中, 求解其变形和应力, 得到矩形截面、8 mm 槽形截面、类半圆形截面加强肋加强后两种板的仿真结果, 如表 3 所示。

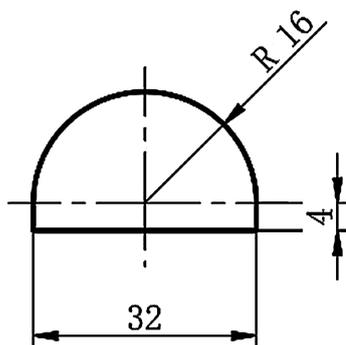
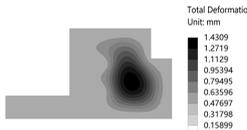
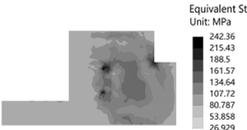
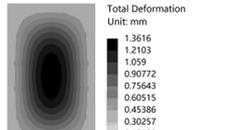
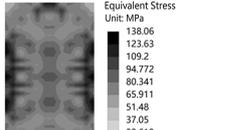
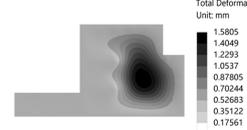
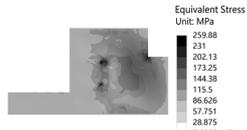
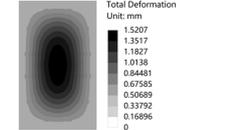
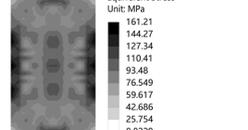
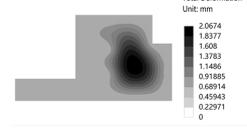
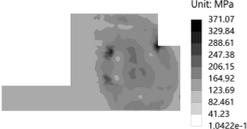
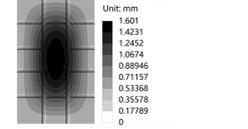
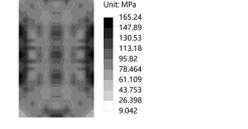


Figure 4. Cross-sectional dimensions of the semi-circular-like stiffening rib
图 4. 类半圆形加强肋截面尺寸

Table 3. Simulation effects of two kinds of plates strengthened by stiffening ribs with different cross-sectional forms
表 3. 采取不同截面形式加强肋加强后两种板仿真效果

加强肋截面形状	异形板变形	异形板应力	矩形板变形	矩形板应变
矩形	 <p>最大变形 1.4309 mm</p>	 <p>最大应力 242.36 MPa</p>	 <p>最大变形 1.3616 mm</p>	 <p>最大应力 138.06 MPa</p>
8 mm 厚度槽形	 <p>最大变形 1.5805 mm</p>	 <p>最大应力 259.88 MPa</p>	 <p>最大变形 1.5207 mm</p>	 <p>最大应力 161.21 MPa</p>
类半圆形	 <p>最大变形 2.0674 mm</p>	 <p>最大应力 371.07 MPa</p>	 <p>最大变形 1.601 mm</p>	 <p>最大应力 165.24 MPa</p>

从表 3 中数据可以看出, 不论是异形板还是矩形板, 类半圆形、8 mm 厚度槽形、矩形截面的加强肋对板的加强效果依次增加。单看对矩形板的仿真效果, 8 mm 厚度槽形与类半圆形截面变形较为接近; 且应力相差也不是很大。这说明, 在加强矩形板时, 适当厚度的槽形与类半圆形截面加强肋在一定程度上可以互换, 但是从材料重量考虑, 槽形依然更优; 而对于异形板, 矩形截面与 8 mm 厚度槽形截面结果较为接近, 而类半圆形截面则效果不佳。而另一方面, 相较于矩形截面, 槽形截面更能减少箱体重量, 因此综合考虑槽形截面加强肋在这三种加强肋截面中更为适合。

4. 实验验证

基于上文所述的仿真模拟过程, 依据 8 mm 厚度槽型加强肋设计加工图纸, 并严格按照图纸要求完成实物加工, 实物如图 5 所示。为验证仿真结果的准确性与可靠性, 对加工完成的箱体进行了系统性的水压测试, 实验过程如图 5 所示。在实验过程中, 将实验压力调控至 1.0 MPa, 并保持该压力状态持续 1 分钟, 并查看箱体变形情况。测试结果表明, 箱体表面无任何肉眼可见的形变, 且各连接部位密封良好, 未出现渗漏现象, 验证了仿真结果的可靠性。



Figure 5. Hydrostatic pressure test and physical object

图 5. 水压实验与实物

5. 结论

本文基于矿用逆变器箱体的两块箱体侧板, 建立并分析了 5 mm、8 mm 与 10 mm 槽形截面加强肋对矩形板与异形板的加强效果, 发现 8 mm 厚度槽形加强肋在这三种厚度中较为适合; 而后分析了 8 mm 厚度槽形、矩形与类半圆形截面加强肋对两种板的加强效果, 发现矩形截面加强筋表现最优, 8 mm 厚度槽形加强肋其次, 类半圆形截面加强肋表现最差。总体而言, 对于本文分析的几种不同截面形式的加强肋, 8 mm 厚度的槽形截面加强肋表现最优。

参考文献

- [1] 姜振南. 矿用隔爆外壳结构形式研究[J]. 煤矿机械, 2018, 39(5): 102-104.
- [2] 朱文硕. 隔爆壳体结构分析与优化[J]. 煤矿机械, 2024, 45(7): 138-140.
- [3] 陈伟. 矿用隔爆外壳加强肋设计研究[J]. 煤矿机械, 2021, 42(10): 16-19.
- [4] 姜振南. 矿用隔爆外壳强度设计研究[J]. 煤矿机械, 2019, 40(2): 3-5.
- [5] 柴鹏斌, 王然风, 张星荣. 矿用隔爆外壳的结构优化[J]. 煤炭技术, 2017, 36(6): 263-265.