工程科学学报，第 38 卷，第 9 期：1335—1342，2016 年 9 月
Chinese Journal of Engineering，Vol. 38，No. 9：1335—1342，September 2016
DOI：10.13374/j.issn2095—9389.2016.09.020；http://journals.ustb.edu.cn

考虑受力蒙皮作用的除尘器壳体墙板的承载性能

潘立程[1)]，邢凯丽[1)]，钱海峰[1)]，王元清[2)]，邹　昀[1)]，王登峰[1)]✉

1）江南大学环境与土木工程学院，无锡 214122　2）清华大学土木工程系，北京 100086
✉ 通信作者，E-mail：happywdf@126.com

摘　要　采用非线性有限元方法研究除尘器壳体承受板顶竖向均布荷载作用的墙板发挥受力蒙皮作用时的破坏形式和承载能力，分析墙板厚度、墙板宽度、加劲肋间距、立柱横向支撑间距、立柱截面尺寸等因素对墙板承载能力的影响．结果表明：立柱受载水平较低时，墙板发生受剪屈服破坏；立柱受载水平中等时，墙板同时发生受压和受剪屈服破坏；立柱受载水平较高时，墙板发生受压屈服破坏．在同等立柱受载水平情况时，墙板承载能力随着墙板厚度增加、墙板宽度减小、加劲肋间距减小或者立柱支撑间距减小而增大．立柱截面尺寸增大使得立柱刚度增大时，立柱稳定性提高，墙板承载力增大．

关键词　除尘器；壳体；结构体系；承载能力；有限元法
分类号　TU391

Bearing performance of wallboards in an electrostatic precipitator casing in consideration of stressed skin effect

PAN Li-cheng[1)]，*XING Kai-li*[1)]，*QIAN Hai-feng*[1)]，*WANG Yuan-qing*[2)]，*ZOU Yun*[1)]，*WANG Deng-feng*[1)]✉

1）School of Environmental and Civil Engineering，Jiangnan University，Wuxi 214122，China
2）Department of Civil Engineering，Tsinghua University，Beijing 100086，China
✉ Corresponding author，E-mail：happywdf@126.com

ABSTRACT　For a wallboard in an electrostatic precipitator casing playing stressed skin effect under vertical uniform pressure on the top，the failure mode and bearing capacity were investigated by nonlinear finite element method. The influences of structural factors such as wall thickness，wall width，stiffener spacing，column brace spacing and column section size on the wallboard bearing capacity were analyzed. The results show that，shear yielding failure of the wallboard occurs when the stressed level of the column is comparatively lower. Shear yielding failure and compression yielding failure occur simultaneously when the stressed level of the column is medium. Compression yielding failure occurs when the stressed level of the column is comparatively higher. Under the equal column stressed level，the bearing capacity of the wallboard increases with the increase of wall thickness and with the decrease of wall width，stiffener spacing or column brace spacing. The bearing capacity of the wall increases as the column stiffness is increased resulting from the enlargement of column section and its stability increases.

KEY WORDS　electrostatic precipitators；casings；structure systems；bearing capacity；finite element method

火电、冶金、化工和建材等行业的生产过程中产生大量烟尘颗粒，造成严重的大气环境污染．除尘器是广泛应用于这些行业中用以消烟除尘的重要环保装备．目前对于除尘器的研究主要集中于烟尘收集的工艺，而对其支承结构的研究较为欠缺．壳体是除尘器中最重要的工艺部件，其围护结构一般采用墙板—立柱结构体系，结构形式和荷载情况都较为复杂．本文研究的壳体墙板为加劲钢板，骨架立柱为 H 型钢柱，两者连续焊接连接，形成受力整体．当结构体系承担竖向荷载时，立柱是主要受力骨架．墙板发挥受力蒙

收稿日期：2015—12—30
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51308258）；江苏省自然科学基金资助项目（BK20130149）

皮作用，一方面为立柱分担荷载，另一方面为立柱提供侧向约束，提高其稳定性.

关于受力蒙皮效应，Davies 和 Bryan[1] 在大量试验的基础上进行了理论分析，提出确定受力蒙皮剪切柔度和强度的计算方法，即将组成受力蒙皮各个部件在荷载作用下的柔度叠加起来得到整个蒙皮的柔度，强度的计算方法是根据他们提出的计算假定，计算可能发生破坏的部位，取破坏荷载最小值作为最大设计荷载. Wright 和 Hossain[2] 研究表明蒙皮板与支承框架间的连接类型和布置方式对蒙皮板受剪性能有重要影响. Lucas 等[3-4] 研究冷成型檩条-蒙皮板结构的计算模型，一种是包括檩条和蒙皮板的完全模型，另一种是仅建有檩条的简化有限元模型，在简化模型中蒙皮板的剪切和转动刚度以弹簧形式施加到檩条与蒙皮板连接边上，通过设置合理的弹簧参数，两种模型计算结果均与试验吻合良好. Lee 和 Miller[5] 推导了石膏墙板-C 型冷弯薄壁型钢柱结构体系受轴向压力时的承载力，石膏墙板可以与 C 型柱翼缘连接的弹簧模拟，结果表明：石膏墙板易于发生弯曲或弯扭失稳，其变形具有局部性；立柱易于发生弯扭失稳；立柱间距对结构承载力基本无影响. Paulo 等[6] 采用有限元方法研究几何缺陷对加劲铝合金板承受轴向压力时承载力的影响，发现缺陷模态和缺陷幅值对承载力影响较大；同时研究发现焊接区域材料性能变化对板件承载力几乎没有影响. 朱勇军等对蒙皮支撑构件进行系统研究，用非线性有限元方法研究蒙皮抗剪刚度、扭转约束、构件长细比和荷载偏心对蒙皮支撑轴心受压构件受力性能的影响[7-8]；用非线性有限元法研究蒙皮支撑梁间距、跨度、构件截面开口方向及构件初始扭转对蒙皮支撑梁静力性能的影响[9]. 宋波等[10] 对脱硝反应器中薄板进行研究，就加劲肋的位置，截面形式以及板厚对板件屈曲性能的影响进行探讨.

在墙板发挥受力蒙皮作用的过程中，墙板与立柱连接边受到立柱的反作用，当墙板顶端承受竖向均布荷载时，墙板与立柱连接边的作用力会影响墙板的承载性能. 立柱上直接作用的荷载水平会影响立柱对墙板的作用，继而影响墙板的承载性能. 本文研究墙板发挥受力蒙皮作用时的承载性能以及各结构参数对其承载能力的影响.

1　模型建立

1.1　结构模型

除尘器壳体-立柱结构体系的几何构造和尺寸均源于实际工程中的电除尘器结构. 为提高建模与计算效率，研究模型仅考虑两跨墙板. 其结构示意图与位移坐标系如图 1 所示. 一跨墙板宽度为 W，板厚 t，墙板角钢加劲肋间距 s. H 型钢立柱总高 H，为提高立柱稳定性，立柱沿高度方向设有等间距的横向支撑，为立柱提供垂直墙板方向的约束，间距为 d. 墙板与 H 型钢立柱一侧翼缘连续焊接连接. 因为墙板底部与灰斗相连，为提高结构刚度，墙板底部设有加劲横梁.

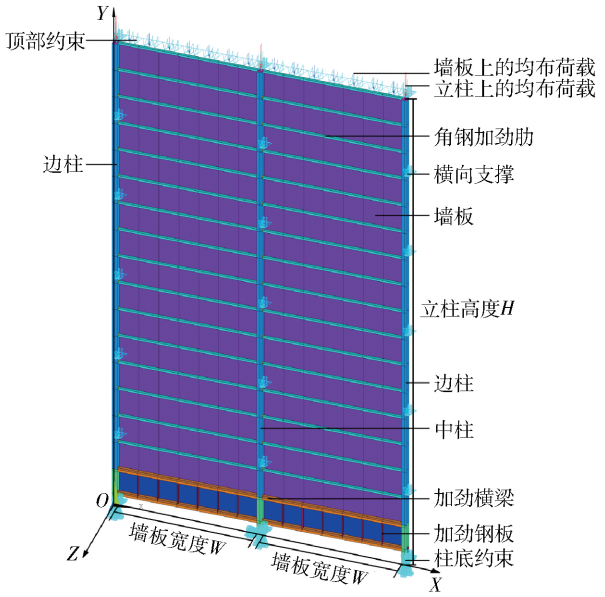

图 1　结构模型

Fig. 1　Structural model

1.2　有限元模型

采用有限元程序 ANSYS 进行分析. 所有结构部件均采用 Shell181 单元模拟. 壳体墙板顶端与壳体加劲顶板连接，因此在墙板顶部边界施加垂直墙板方向（Z 向）的平动约束. 墙板底端与灰斗加劲壁板连接，因此在墙板底端边界施加垂直墙板方向的平动约束. 立柱受等间距布置的横向支撑约束，在立柱与横向支撑连接处施加垂直墙板方向的平动约束. 在中间立柱柱底施加三个方向的平动约束. 由于壳体内烟气往往是高温，为了释放温度变形，两侧立柱底部仅施加沿墙板高度方向（Y 向）和垂直于墙板方向的约束，以实现结构在墙板平面内（X 向）可以伸缩变形. 考虑到墙板在顶部主要支承壳体顶板，顶板上荷载可视作均匀传递到墙板，因此加载时对墙板顶端和立柱顶端施加均布线荷载.

考虑材料非线性影响，钢材材料采用理想弹塑性模型，以 Von Mises 准则判断是否发生屈服. 制作除尘器一般采用 Q235 钢材，其屈服强度 $f_y = 235$ MPa，弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa，泊松比 $\nu = 0.3$. 进行墙板极限承载力分析时也考虑几何非线性影响，采用弧长法跟踪结构响应路径.

1.3　初始缺陷的引入

除尘器壳体结构各部件在实际的运输、吊装和焊接拼装过程中不可避免地会引入初始缺陷，会影响壳体墙板的承载性能，因此本文有限元计算模型中需要

引入初始缺陷.

在吊运和装配过程中,结构顶部区域装配复杂易于产生初始几何变形,且计算表明结构内力水平较高的是在墙板和立柱顶部区域,故研究中应在结构顶部区域引入初始几何缺陷. 本文考查了三种初始几何变形模态,分别为正对称特征值屈曲模态、反对称特征值屈曲模态和完善结构极值点变形模态. 特征值屈曲模态是先以完善的结构体系进行线弹性的特征值屈曲分析,得到其特征值屈曲模态,从中筛选并归纳为两类,一类是两跨墙板在靠近顶部区域关于中间立柱正对称的屈曲,另一类是两跨墙板在靠近顶部区域关于中柱的反对称屈曲. 分别提取两类特征值屈曲模态中最低阶的引入有限元模型,建立正对称特征值屈曲缺陷模态和反对称特征值屈曲缺陷模态. 此外,对完善结构进行非线性分析,达到极限承载力时提取其变形模态,作为完善结构极值点变形缺陷模态. 缺陷幅值均取为单个墙板区格(即左右相邻两立柱和上下相邻两角钢加劲肋围成的墙板区域)最大边长的千分之一.

壳体墙板-立柱结构体系中各部件主要通过焊接连接,有必要模拟焊接缺陷并分析其影响. 通过在墙板与立柱连接边、墙板板块与板块连接边施加负温的方式模拟焊接收缩,从而引入焊接缺陷,再在立柱和墙板顶部施加竖向荷载,研究墙板在焊接缺陷影响下承载能力的变化. 计算表明,焊接收缩在墙板顶部区格产生的残余剪应力与外荷载作用下该区域的剪应力方向相反,因此残余剪应力对墙板的承载能力是有提升作用的; 焊接收缩在墙板与立柱连接区域产生残余拉应力,与外荷载作用下产生压应力相反,故残余拉应力可延缓外荷载作用下墙板边缘压应力的发展,因此对墙板承载能力有所提升. 综合判断,焊接残余应力对于墙板在顶部压力作用下是有利影响.

对一例典型结构分别构建考虑上述缺陷模态的缺陷结构模型并进行非线性计算,得到墙板极限承载力-立柱荷载水平关系曲线如图 2 所示. 模型为: 立柱截面(截面高 × 翼缘宽 × 腹板厚 × 翼缘厚) H200 mm × 200 mm × 8 mm × 12 mm,立柱高 $H = 17460$ mm,墙板宽度 $W = 5130$ mm,墙板厚度 $t = 6$ mm,角钢加劲肋间距 $s = 1000$ mm,立柱横向支撑间距 $d = 3000$ mm. 图中横坐标为墙板达到极限承载力时,立柱顶端施加的轴向压力 $P_{c,cr}$ 与立柱的屈服荷载 P_{cy}($P_{cy} = f_y A_H$,A_H 为 H 型钢立柱截面积)的比值; 纵坐标为墙板的极限承载力 $P_{w,cr}$ 与墙板的屈服荷载 P_{wy}($P_{wy} = tf_y$)的比值. 图 2 表明,在不同的立柱荷载水平时,考虑反对称特征值屈曲缺陷模态的结构,其墙板承载能力最低. 分析其原因,可能在于立柱易于发生靠近柱顶区域的弯扭失稳[11],在反对称的缺陷模态中,立柱有初始弯扭变形,因而在非线性加载过程中更早发生弯扭失稳. 立柱一旦发生弯扭失稳,其刚度减弱,对墙板的约束作用减弱,且立柱所受荷载会更多分配到墙板上,这会导致墙板承载能力的降低. 有焊接缺陷影响时墙板的承载能力显著高于其他仅考虑几何缺陷的情况. 当墙板上最大竖向残余应力值 $\sigma_{rY,max} = 0.617 f_y$ 时的墙板承载力会高于 $\sigma_{rY,max} = 0.462 f_y$ 的情况,表明残余应力幅值越高对墙板的承载能力提升越大. 究其原因,主要是因为焊接残余应力对墙板承载力产生有利影响; 且焊接残余变形幅值很小(当 $\sigma_{rY,max} = 0.617 f_y$ 时,结构最大焊接残余变形为 1.1 mm),对墙板承载力影响很小. 为了充分考虑最不利初始缺陷的影响,本文后续分析均引入反对称特征值屈曲缺陷模态.

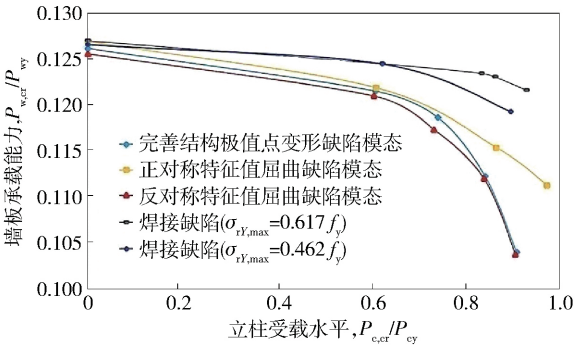

图 2 不同初始缺陷时墙板承载能力-立柱荷载水平关系曲线比较

Fig. 2 Comparison of relationship curves between wall bearing capacity and column loading level for different imperfect models

2 墙板破坏形式

壳体加劲钢墙板与 H 型钢立柱连续焊接连接,形成共同受力的整体,两者相互传递荷载,相互提供约束. 当墙板受载水平较高而立柱受载水平很低时,立柱作为墙板两侧刚性较大的边界,一方面墙板的荷载由顶端逐渐向立柱传递,最后由柱底传递到底部支架; 另一方面立柱为墙板提供约束,限制板件的变形. 当墙板受载水平很低而立柱受载水平很高时,墙板上应力很低且变形很小,立柱则易于发生失稳,此时墙板发挥受力蒙皮作用,一方面为立柱分担荷载,另一方面为立柱提供侧向约束,提高其稳定性. 因此,墙板的破坏形式与承载能力受到立柱荷载水平的很大影响,需要研究在不同立柱受载水平时的墙板破坏形式.

2.1 受剪破坏

以图 2 中反映模型为例进行分析. 首先考虑立柱荷载水平较低时的情况. 进行结构非线性分析时对立柱施加的荷载很小,墙板达到极限承载力时,$P_{w,cr} = 0.123 P_{wy}$,$P_{c,cr} = 0.123 P_{cy}$. 由于墙板上存在初始几何缺陷,加载初期,墙板的屈曲就发生,其鼓曲变形开始加速发展,不同立柱荷载水平模型的墙板上施加荷载-墙板最大出平面变形曲线如图 3 所示. 顶部区格内的

墙板直接受竖向荷载作用，其中央区域的板件因为屈曲逐渐退出工作并发生较大的竖向变形（$-Y$ 向）. 由于立柱受载水平很低，几乎没有发生竖向压缩变形，且其相对墙板刚度很大，能够约束墙板两侧边界的竖向变形，因此这块板件因为中央区域与边界竖向变形不协调而在与立柱连接边产生了较大的剪应力. 随着板件屈曲的发展，更多中央区域的板件退出工作，受力主要由受立柱约束的两侧边界区域板件承担，进一步提高了此处剪应力的水平. 达到极限承载力时，顶部区格墙板的剪应力分布如图 4 所示，墙板与立柱连接处顶部区域剪应力达到了钢材的抗剪屈服强度，由于中央区域板件早已因屈曲而退出工作，因此整个板件丧失进一步加载的能力. 本文将墙板由于受剪屈服而发生的破坏定义为受剪破坏模式. 此时，顶部墙板屈曲变形明显，而立柱上的应力及变形一般都较小，墙板与立柱连接区域的压应力也很小.

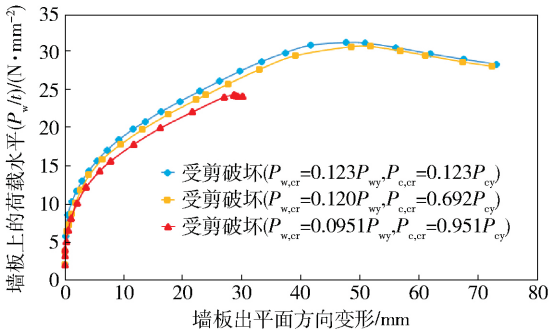

图 3　墙板上荷载-墙板最大出平面位移曲线

Fig. 3　Curves between vertical load on the wallboard and maximum displacement out of plane

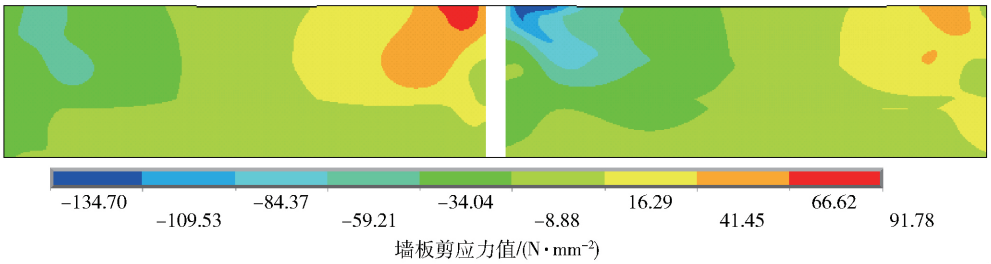

图 4　受剪破坏时的墙板顶部区格剪应力分布云图

Fig. 4　Local shear stress distribution in the wallboard for shear failure

2.2　受压破坏

其次考虑立柱荷载水平很高时的情况. 进行结构非线性分析时对立柱施加的荷载很大，墙板达到极限承载力时，$P_{w,cr}=0.0951P_{wy}$，$P_{c,cr}=0.951P_{cy}$. 当立柱受载水平较大时，立柱基本可以与墙板实现同步压缩变形，因此墙板中央区域与边界区域的竖向变形基本协调，墙板边缘剪应力不大. 此外，由于立柱受载水平高，墙板受载水平低，立柱上的压力沿着高度方向由顶部向下逐渐向墙板上分配. 达到极限承载力时，墙板上的压应力分布如图 5 所示. 墙板与立柱连接邻域内压应力水平均较高，已经非常接近钢材屈服点，且沿着立柱高度方向分布较为均匀. 由于板件存在初始缺陷，中央区域板件早已因屈曲退出工作，当边缘板件受压屈服后，整个板件丧失了进一步加载的能力，因而发生破坏. 本文将墙板由于受压屈服而发生的破坏定义为受压破坏模式.

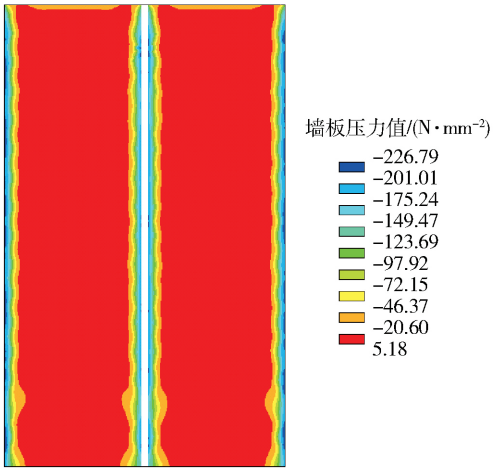

图 5　受压破坏时的墙板压应力分布云图

Fig. 5　Global compressive stress distribution in the wallboard for compression failure

2.3　剪压破坏

最后考虑立柱荷载水平中等时的情况. 进行结构非线性分析时对立柱施加中等水平的荷载，墙板达到极限承载力时，$P_{w,cr}=0.12P_{wy}$，$P_{c,cr}=0.692P_{cy}$. 当立柱受中等水平荷载时，其压缩变形不大，因此顶部区格墙板中央与边缘区域的竖向变形不协调依然存在，墙板与立柱连接域的剪应力较大，可以达到屈服点. 同时，立柱所受压力从柱顶往下迅速向墙板上分配，使得墙板除了顶部区域外与立柱连接区域的压应力水平较高，非常接近屈服点. 边缘板件发生屈服后，整个墙板失去进一步加载的能力，继而发生破坏. 本文将墙板顶部区域发生受剪屈服，同时中间区域发生受压屈服的破坏模式定义为剪压破坏模式. 发生这种模式的破坏时墙板剪应力和压应力分布分别如图 6 和图 7 所示.

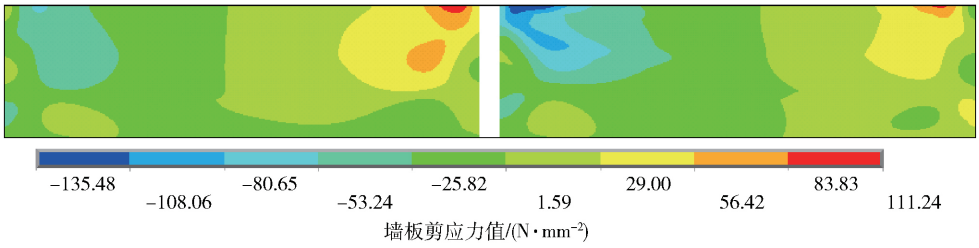

图 6　剪压破坏时的墙板局部剪应力分布云图

Fig. 6　Local shear stress distribution in the wallboard for shear—compression failure

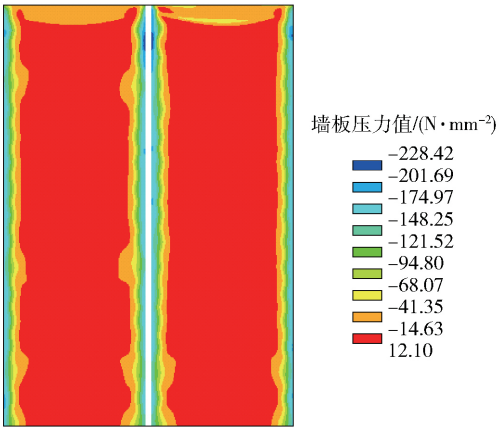

图 7　剪压破坏时的墙板整体压应力分布云图

Fig. 7　Global compressive stress distribution in the wallboard for shear—compression failure

2.4　立柱受载水平对墙板承载力的影响

当立柱受载水平变化时，墙板上出现的最大剪应力和压应力变化曲线如图 8 所示. 立柱受载水平较低时发生受剪破坏，剪应力达到屈服，压应力不大. 立柱受载水平较高时发生受压破坏，压应力达到屈服，剪应力不大. 随着立柱受载水平提高，破坏时的剪应力逐渐减小，压应力逐渐增大.

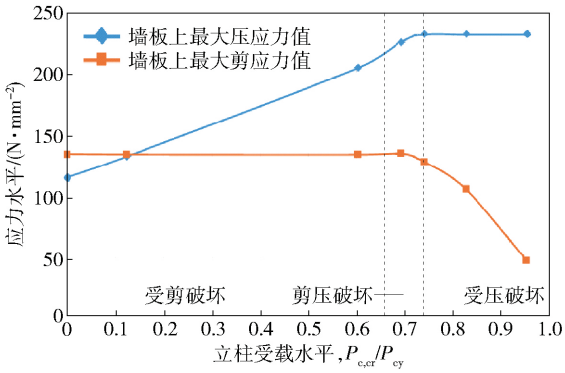

图 8　不同立柱受载水平时的的最大剪应力和最大压应力发展趋势

Fig. 8　Development of maximum shear stress and compressive stress in the wallboard under different column loading levels

立柱受载水平变化时，墙板极限承载力变化曲线如图 9(a) 所示(对应 $t = 6$ mm 情况) . 当立柱受载水平不高时($P_{c,cr}/P_{cy} = 0 \sim 0.65$) ，墙板发生受剪破坏，墙板的承载力随着立柱受载水平提高有很小量的降幅，曲线基本呈现为一条水平线. 当立柱受载水平提高到一定值($P_{c,cr}/P_{cy} = 0.65 \sim 0.75$) ，墙板发生剪压破坏，墙板承载能力随着立柱受载水平的提高而减小. 进一步提高立柱受载水平($P_{c,cr}/P_{cy} = 0.75 \sim 0.95$) ，墙板发生受压破坏，其承载力随着立柱受载水平提高而显著减小. 此外，由图 3 可见，墙板抵抗屈曲变形的刚度随着立柱受载水平的增大而减小. 立柱受载水平较低时，墙板不需要为立柱分担荷载，主要承受板顶均布荷载，且立柱作为墙板边界，其约束能力很强，因此墙板承载能力较高. 立柱受载水平较高时，墙板明显为立柱分担荷载，承受板顶与两侧荷载，且立柱濒临破坏，刚性减弱，其对墙板约束能力也减弱，因此墙板承载能力较低.

3　结构参数对墙板承载能力的影响

构建模型组 1: 立柱截面为 H200 mm × 200 mm × 8 mm × 12 mm，$H = 17460$mm，$W = 5130$ mm，$t = 6$ mm，$s = 1000$ mm，$d = 3000$ mm. 模型组 2: H250 mm × 250 mm × 9 mm × 14 mm，$H = 25460$ mm，$W = 5800$ mm，$t = 8$ mm，$s = 1600$ mm，$d = 3200$ mm. 考察各参数对对墙板承载能力的影响时，除待考察变量外，其余构造与几何尺寸保持不变.

3.1　墙板厚度的影响

不同墙板厚度时模型组墙板承载力随立柱受载水平的变化曲线如图 9 所示. 由图可见，在相等立柱受载水平时，随着墙板厚度减小墙板承载力明显降低. 由前述分析可知，不论破坏时立柱的受载水平如何，由于初始缺陷的存在，墙板在加载初期就会发生屈曲，随着屈曲的发展，板件中央区域退出工作，荷载主要由靠近与立柱连接边的墙板承担，最后的破坏源于这些区域墙板的屈服. 当墙板的厚度减小，其抵抗屈曲的能力减小，对应屈曲发生的荷载更小，后屈曲性能更差，因此墙板的极限承载能力降低. 当板厚较小($t = 4$ mm 和 6 mm) ，受剪破坏时墙板承载力随着立柱受载水平的提高基本不变. 当板厚较大($t = 8$ mm) ，受剪破坏时墙板承载力随着立柱受载水平的提高而减小.

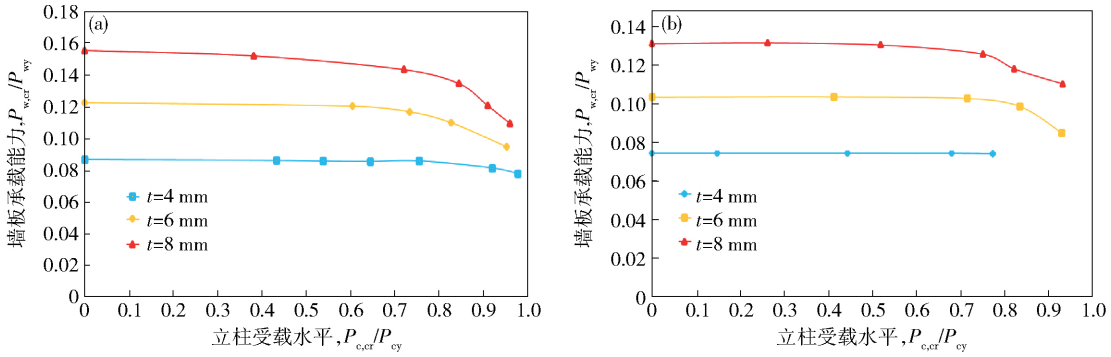

图 9　墙板厚度对墙板承载能力的影响.（a）模型组 1；（b）模型组 2

Fig. 9　Influence of wall thickness on wall bearing capacity: (a) structure model series 1; (b) structure model series 2

3.2　墙板角钢加劲肋间距的影响

不同墙板角钢加劲肋间距时模型组墙板承载力随立柱受载水平的变化曲线如图 10 所示. 由图可见，在相等立柱受载水平时，随着加劲肋间距减小墙板承载力明显增大.

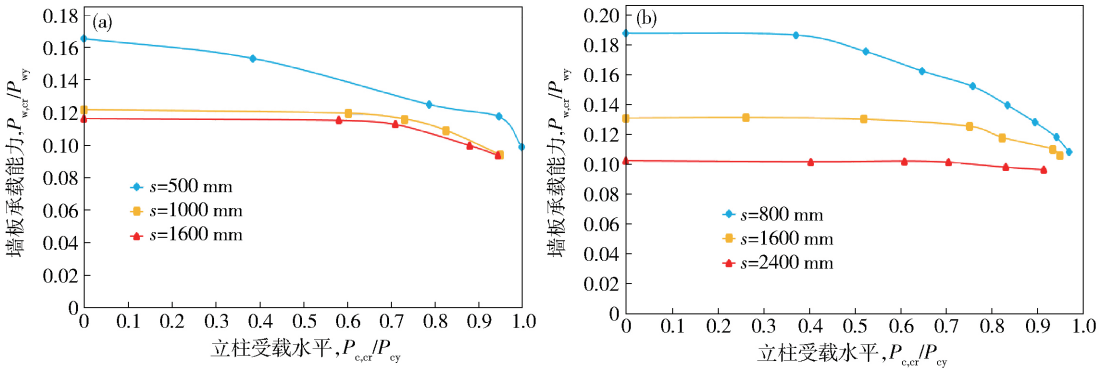

图 10　加劲肋间距对墙板承载能力的影响.（a）模型组 1；（b）模型组 2

Fig. 10　Influence of stiffener spacing on wall bearing capacity: (a) structure model series 1; (b) structure model series 2

分析其原因，墙板较薄，可以看作为被两侧的 H 型钢立柱和上、下角钢加劲肋分隔成的四边支承板件，其稳定性受每一个区隔几何形状的影响. 参考四边简支板均匀受压和受剪情况的屈曲临界应力理论解[12]：

$$\sigma_{cr,Y} = k_c \frac{\pi^2 E t^2}{12 W^2 (1 - v^2)}，受压; \tag{1}$$

$$\tau_{cr,XY} = k_s \frac{\pi^2 E t^2}{12 W (1 - v^2)}，受剪. \tag{2}$$

式中，$k_c = \left(\frac{mW}{s} + \frac{s}{mW}\right)^2$，为单边均匀受压屈曲系数. 当 $s/W \leqslant \sqrt{2}$ 时，取屈曲波数 $m = 1.0$. k_s 为均匀受剪屈曲系数，对于四边简支板：当 $s \geqslant W$ 时，$k_s = 5.34 + 4(W/s)^2$；当 $s \leqslant W$ 时，$k_s = 4 + 5.34(W/s)^2$.

计算表明，墙板宽度不变，角钢加劲肋间距减小，墙板区格高度减小，其抗压、抗剪屈曲临界应力的理论解都会减小. 尽管线弹性的理论解答无法考虑初始缺陷、结构非线性以及边界条件非理想等因素，但是可以推测，由于加劲肋间距减小，改变了墙板区格几何形状，其稳定性提高，因此墙板屈曲发生时对应的荷载提高，后屈曲性能更好，其极限承载力增大.

3.3　墙板宽度的影响

不同墙板宽度时模型组墙板承载力随立柱受载水平的变化曲线如图 11 所示. 由图可见，在相等立柱受载水平时，随着墙板宽度增大墙板承载力降低. 由式（1）和式（2）的计算可得，当角钢加劲肋间距不变，每一区格板件高度不变，增加其宽度时，板件受压、受剪的屈曲临界应力理论解均减小. 墙板宽度增大改变了墙板区格几何形状，其稳定性降低，因此墙板屈曲发生时对应的荷载减小，后屈曲性能变差，其极限承载能力降低.

3.4　立柱横向支撑间距的影响

不同立柱横向支撑间距时模型组墙板承载力随立柱受载水平的变化曲线如图 12 所示. 由图可见，在立柱受载水平较低时（基本对应受剪破坏阶段），立柱支撑间距对墙板承载力影响不大，三条曲线基本重合. 在立柱受载水平较高时（基本对应剪压破坏和受压破坏阶段），对于相等的立柱受载水平，随着立柱支撑间距增大墙板承载力降低. 立柱横向支撑的作用主要是

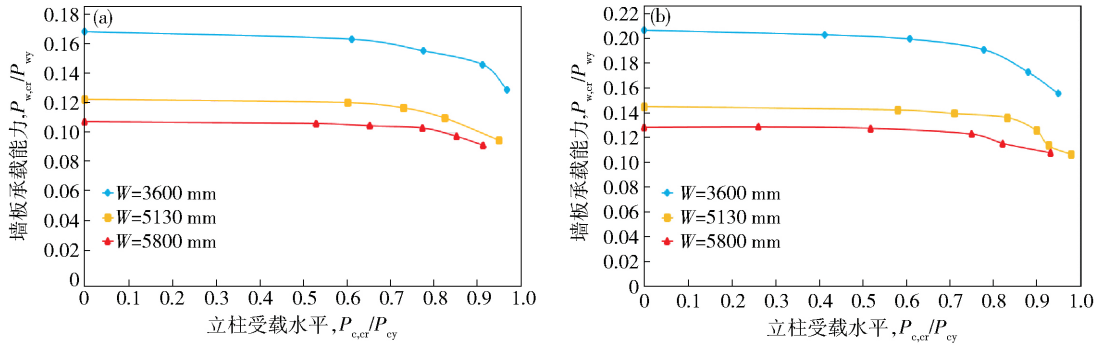

图 11　墙板宽度对墙板承载能力的影响.（a）模型组 1；（b）模型组 2

Fig. 11　Influence of wall width on wall bearing capacity: (a) structure model series 1; (b) structure model series 2

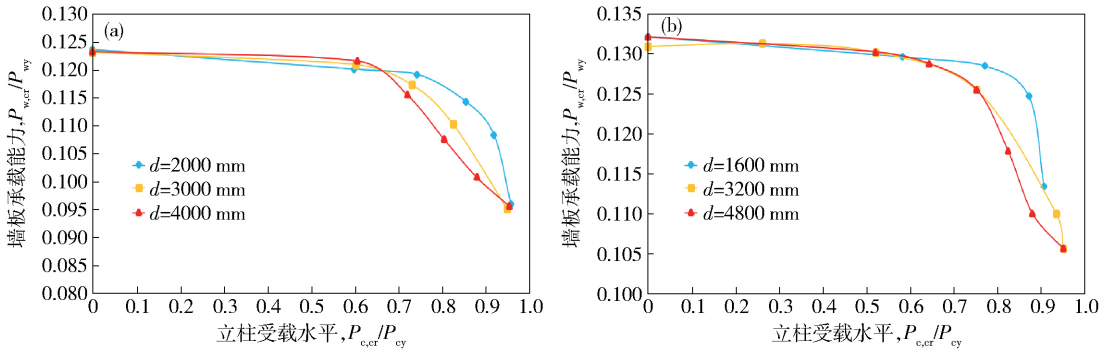

图 12　立柱横向支撑间距对墙板承载能力的影响.（a）模型组 1；（b）模型组 2

Fig. 12　Influence of column brace spacing on wall bearing capacity: (a) structure model series 1; (b) structure model series 2

减小立柱计算长度，立柱横向支撑间距增大，立柱稳定性会降低. 当立柱受载水平较低时，立柱上应力较小，柱顶施加的荷载并不会引起立柱失稳，立柱作用主要是作为刚性边界支持墙板承载，因此改变横向支撑间距对于整个结构体系中立柱的承载性能基本无影响，继而对墙板承载力影响较小. 当立柱受载水平较高时，立柱上应力水平高，立柱会向墙板传递荷载；加载后期立柱会发生失稳，立柱需要由墙板提供侧向约束. 因此，增大立柱横向支撑间距，立柱自身稳定性变差，更早发生失稳，立柱上施加的荷载更早更多地传递到墙板，且墙板会对立柱提供更多约束以限制其失稳变形，这造成墙板在与立柱连接边承担更多荷载，墙板的边界也弱化，使墙板承载能力降低.

3.5　立柱截面尺寸的影响

对于不同截面立柱，模型组 1 墙板承载力随立柱受载水平的变化曲线如图 13 所示. 由图可见，尽管曲线在部分区段有相交，但总体而言，在相等的立柱受载水平时，立柱截面尺寸增大，立柱抗弯抗扭刚度增大，墙板承载力因之而增加. 在立柱受载水平较低时，立柱截面刚度越大，对墙板的变形约束作用越强，且为墙板分担荷载的能力也越强，因此墙板的承载能力越高. 当立柱受载水平较高时，由于立柱计算长度不变，立柱截面刚度越大，立柱稳定性越好，到加载后期，墙板为立柱分担荷载较少，为立柱提供的抑制失稳变形发展的约束相对较弱，这样墙板在与立柱连接边受到的荷载作用相对就小，其顶端承担荷载的能力得以提高.

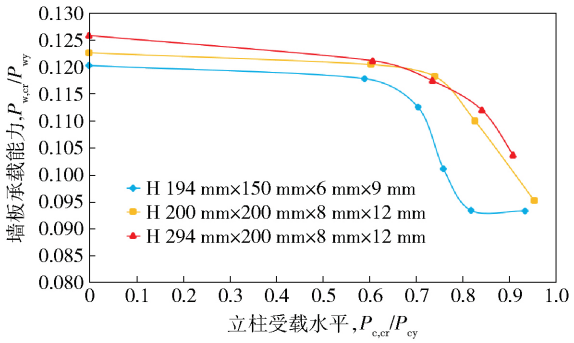

图 13　立柱截面尺寸对墙板承载力的影响

Fig. 13　Influence of column section size on wall bearing capacity

4　结论

（1）墙板发生关于中间立柱反对称的初始变形是较为不利的初始缺陷形式；墙板与立柱连接边的焊接残余应力对墙板承载能力产生有利影响.

（2）立柱受载水平较低时，墙板因受剪屈服而破坏；立柱受载水平中等时，墙板因同时发生受剪屈服和受压屈服而破坏；立柱受载水平较高时，墙板因受压屈服而破坏.

(3) 立柱受载水平不变时，墙板承载能力随着墙板厚度和立柱截面尺寸的增加而提高，随着墙板上加劲肋间距或墙板宽度的减小而提高；立柱受载水平不变时，立柱支撑间距减小，立柱稳定性提高，墙板承载能力随之提高.

(4) 墙板破坏形式取决于立柱受载水平，将受剪破坏和剪压破坏分界点记为 $P_{c,cr} = \alpha P_{cy}$. 对计算数据的归纳整理表明：当四边单纯受剪简支板的弹性屈曲临界应力 $\tau_{cr,XY} \leqslant 50$ MPa 时，α 可取 0.6；当 $\tau_{cr,XY} > 50$ MPa 时，α 可取 0.4. 由于在受剪破坏阶段，墙板承载力随立柱受载水平降低很小，因此可以认为当 $P_{c,cr} < \alpha P_{cy}$ 时，墙板承载力不受其发挥受力蒙皮作用的影响，不考虑其承载力降低.

(5) 对墙板承载能力计算结果的归纳分析表明，即便当立柱受载水平很高时，在考虑初始缺陷和材料非线性的情况下，墙板承载力 $P_{w,cr}$ 值仍会高于单边均匀受压四边简支板的屈曲临界应力的弹性理论解答，因此在立柱受载水平很高的情况下可以采用该理论解来保守计算墙板的承载能力.

参 考 文 献

[1] Davies J M, Bryan E R. *Manual of Stressed Skin Diaphragm Design*. London: Granada Publishing, 1982

[2] Wright H D, Hossain K M A. In-plane shear behavior of profiled steel sheeting. *Thin-walled Struct*, 1997, 29(1-4): 79

[3] Lucas R M, Al-Bermani F G A, Kitipornchai S. Modelling of cold-formed purlin-sheeting systems: Part 1. Full model. *Thin-walled Struct*, 1997, 27(3): 223

[4] Lucas R M, Al-Bermani F G A, Kitipornchai S. Modelling of cold-formed purlin-sheeting systems: Part 2. simplified model. *Thin-walled Struct*, 1997, 27(4): 263

[5] Lee Y K, Miller H T. Axial strength determination for gypsum-sheathed, cold-formed steel wall stud composite panels. *J Struct Eng*, 2001, 127(6): 608

[6] Paulo R M F, Teixeira-Dias F, Valente R A F. Numerical simulation of aluminium stiffened panels subjected to axial compression: sensitivity analyses to initial geometrical imperfections and material properties. *Thin-walled Struct*, 2013, 62: 65

[7] Zhu Y J, Zhang Y C, Liu X L, et al. Several factors affecting the static behavior of diaphragm-braced columns. *J Harbin Univ Civ Eng Archit*, 1998, 31(5): 20
(朱勇军，张耀春，刘锡良，等. 影响蒙皮支撑柱静力性能的若干因素. 哈尔滨建筑大学学报，1998，31(5)：20)

[8] Zhu Y J, Zhang Y C, Liu X L. Static analysis of diaphragm braced columns. *J Buil Struct*, 1999, 20(6): 32
(朱勇军，张耀春，刘锡良. 蒙皮支撑柱的静力性能分析. 建筑结构学报，1999，20(6)：32)

[9] Zhu Y J, Zhang Y C, Liu X L. Several factors affecting the static behavior of diaphragm braced beams. *J Tianjin Univ*, 1999, 32(2): 163
(朱勇军，张耀春，刘锡良. 影响蒙皮支撑梁静力性能的若干因素. 天津大学学报，1999，32(2)：163)

[10] Song B, Wang L, Luo X L, et al. Buckling behavior of thin steel sheets with ribbed stiffeners in selective catalytic reactor. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2010, 32(8): 1094
(宋波，王利，罗晓玲，等. 大型反应器加劲薄钢板结构屈曲性能. 北京科技大学学报，2010，32(8)：1094)

[11] Wang D F, Wang Y Q, Shi Y J, et al. Imperfection sensitivity of wall-column structural system electrostatic precipitator casing. *Eng Mech*, 2012, 29(5): 78
(王登峰，王元清，石永久，等. 电除尘器壳体墙板-立柱结构体系缺陷敏感性研究. 工程力学，2012，29(5)：78)

[12] Chen J. *Stability of Steel Structures Theory and Design*. 6th Ed. Beijing: Science Press, 2001
(陈骥. 钢结构稳定理论与设计. 6 版. 北京：科学出版社，2001)