



中华人民共和国国家标准

GB/T 39681—2020

立体仓库货架系统设计规范

Racking design code for steel static storage systems

2020-12-14 发布

2021-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 材料	2
5 荷载及荷载组合	2
6 货架设计	4
7 部分参数的试验获取及处理方法	12
8 组合式货架单元整体测试	23
附录 A (资料性附录) 无垂直拉杆货架的等效计算长度系数 K	25
附录 B (资料性附录) 均匀受压板件的宽厚比要求	27

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国物流仓储设备标准化技术委员会(SAC/TC 499)归口。

本标准起草单位：上海精星仓储设备工程有限公司、北京起重运输机械设计研究院有限公司、北京京邦达贸易有限公司、东华大学、上海精星物流设备工程有限公司、苏州大森塑胶工业有限公司、深圳市凯东源现代物流股份有限公司。

本标准主要起草人：李宏亮、吕志军、陆大明、黄曦、杨光辉、陈涤新、崔雄、周晓骁、郑方勇、滕旭辉、王银学、杨建国、高颢文、刘远、王墨洋。



立体仓库货架系统设计规范

1 范围

本标准规定了立体仓库货架系统术语、材料、荷载及荷载组合、货架设计及测试方法。本标准适用于以冷弯型钢或热轧型钢构件制成,主要承受静载的立体仓库货架系统。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法

GB/T 232 金属材料 弯曲试验方法

GB/T 700 碳素结构钢

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 2518 连续热镀锌钢板及钢带

GB 4053.3 固定式钢梯及平台安全要求 第3部分:工业防护栏杆及钢平台

GB/T 18354 物流术语

GB/T 28576—2012 工业货架设计计算

GB 50009 建筑结构荷载规范

GB 50011 建筑抗震设计规范

GB 50018—2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范

JB/T 9018 自动化立体仓库 设计规范

JB/T 11270 立体仓库组合式钢结构货架 技术条件

JGJ 145—2013 混凝土结构后锚固技术规程

3 术语和定义

GB/T 18354、GB/T 28576—2012、JB/T 9018、JB/T 11270 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

库架合一式货架 rack-clad building

货架兼作仓库支撑结构的货架系统。

3.2

有效截面面积 effective cross-sectional area

A_e

构件考虑屈曲后强度但并不扣除孔洞的截面有效面积。

3.3

有效净截面面积 effective net cross-sectional area

A_{en}

构件考虑屈曲后强度且扣除孔洞的截面有效面积。



4 材料

4.1 钢材

4.1.1 常温库用钢板

立体仓库货架材料宜采用 GB/T 700 中的 Q235、GB/T 1591 中的 Q355 和 Q460 钢材,或力学性能更佳的其他钢材。

4.1.2 冷冻库用钢板

用于环境温度低于或等于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的立体仓库货架,其主要承重构件材料应采用 GB/T 1591 中的 Q355C/D 及 GB/T 700 中的 Q235C/D,当采用 Q460 或其他非 D 级质量等级的钢材时,应满足相应环境温度下的夏比(V 型缺口)冲击试验要求。

4.1.3 镀锌板

当采用镀锌板时,宜根据 GB/T 2518 的要求选用,当采用其他镀锌板时,其各项性能指标应符合 4.1.1 和 4.1.2 的要求。

4.2 连接件

焊缝及螺栓等连接件的强度设计值应符合 GB 50018 的规定,螺栓宜采用 8.8 级或更高等级。

5 荷载及荷载组合

5.1 分类

货架结构上的荷载可分为恒荷载、活荷载、竖向冲击荷载、水平荷载以及可能有的风荷载、雪荷载、屋面活荷载以及地震作用等,如有其他类型荷载应符合 GB 50009 的规定。

5.2 恒荷载 P_{DL}

恒荷载系指货架系统的自重,库架合一货架的恒荷载还应包括屋面和墙面等结构的自重。恒荷载由全部永久性结构的重量组成,包括货架及连接在货架上的辅助设施,如消防喷淋装置、加热通风和空调系统等,以及其他需要货架构件支撑的固定辅助设备,其质量都应计入恒荷载。

5.3 活荷载 P_{PL}

活荷载一般指搁置在货架结构上的货物和载具的重量,此外还应包含 5.7 中的楼板及走道荷载。

5.4 竖向冲击荷载 P_{IL}

5.4.1 竖向冲击荷载是指存放货物时产生的对横梁的附加冲击力,通常仅在最不利的位置加载一次。在设计横梁、(如果设计有)牛腿和挂片时,可按下列情况计算:

- a) 用机械设备放置货物时(自动化),应等于 50%最大单元荷载;
- b) 人工放置货物时(非自动化),应等于最大单元荷载。

5.4.2 竖向冲击荷载用于对局部构件(横梁、挂片及牛腿等)进行检验,在设计货架整体结构时,均不计竖向冲击荷载的影响。

5.5 水平荷载 P_{HL}

5.5.1 作用于组合式货架结构的水平荷载是指由于货架结构构件的初弯曲、安装偏差、荷载偏心等因

素产生的缺陷以及搬运设备正常作业时所引起的水平力。

5.5.2 由 5.5.1 所述缺陷产生的水平荷载,分别沿组合式货架结构纵、横两个主方向作用于横梁与立柱的连接节点处。水平荷载可取为由横梁传至该节点的全部恒荷载与最大活荷载之和的 0.4%。

5.5.3 设有搬运设备的货架,其水平荷载应根据搬运设备制造厂商提供的有关资料确定。

5.6 地震作用 P_{EL}

5.6.1 地震作用和结构抗震验算应符合 GB 50011 的相关规定。

5.6.2 高度不超过 40 m、以剪切变形为主且质量和刚度沿高度分布比较均匀的货架结构可以采用底部剪力法等简化方法,除此之外的货架结构,宜采用振型分解反应谱法。

5.6.3 构件的截面抗震验算,抗震承载力强度设计值取 $R/0.75$,承载力稳定性设计值取 $R/0.8$, R 为结构构件承载力设计值。

5.7 楼板和走道荷载

对于楼板或走道上起作用的荷载按实际需求计算均布荷载或集中荷载,不应低于 300 kg/m^2 ,其他情况应符合 GB 4053.3 的相关规定。

5.8 栏杆上的推力

楼梯和楼板的栏杆应设计成能够承受作用在栏杆上方任意方向的不大于 0.7 kN/m 的推力,其他情况应符合 GB 4053.3 的相关规定。

5.9 风荷载 P_{WL}

库架合一式货架的风荷载验算应符合 GB 50009 的相关规定。

5.10 雪荷载 P_{SL} 及屋面活荷载 P_{RL}

库架合一式货架的雪荷载及屋面活荷载验算应符合 GB 50009 的相关规定。

5.11 荷载组合

按照承载能力极限状态设计货架结构时,应根据使用过程中货架结构上可能同时出现的荷载,由下列荷载组合中的相应情况取最不利的荷载组合计算货架结构的内力 P_{max} ,其中各类荷载分项系数均按照其效应对结构不利的工况取值,工况组合中可能有部分不存在的荷载,对其不予考虑即可:

a) 考察货架结构静态极限承载性能,按式(1)确定:

$$P_{max} = 1.35P_{DL} + 1.4P_{PL} \dots\dots\dots(1)$$

b) 考察冲击荷载作用下的货架局部构件及连接件的性能,按式(2)确定:

$$P_{max} = 1.2P_{DL} + 1.4P_{PL} + 1.4P_{IL} \dots\dots\dots(2)$$

c) 考察货架在活荷载和水平荷载作用下的性能,按式(3)确定:

$$P_{max} = 1.2P_{DL} + 1.4P_{PL} + 1.4P_{HL} + 1.4\Psi_{cW}P_{WL} + 1.4\Psi_{cR}(P_{RL} \text{ 或 } P_{SL}) \dots\dots\dots(3)$$

d) 考察货架在风荷载作用下的性能,按式(4)确定:

$$P_{max} = 1.2P_{DL} + 1.4\Psi_{cP}P_{PL} + 1.4\Psi_{cP}P_{HL} + 1.4P_{WL} + 1.4\Psi_{cR}(P_{RL} \text{ 或 } P_{SL}) \dots\dots\dots(4)$$

e) 考察货架在雪荷载或屋面活荷载作用下的性能,按式(5)确定:

$$P_{max} = 1.2P_{DL} + 1.4\Psi_{cP}P_{PL} + 1.4\Psi_{cP}P_{HL} + 1.4\Psi_{cW}P_{WL} + 1.4(P_{RL} \text{ 或 } P_{SL}) \dots\dots\dots(5)$$

f) 考察货架整体及构件抗震性能,按式(6)确定:

$$P_{max} = 1.2P_{DL} + 1.2P_{PL} + 1.3P_{EL} \dots\dots\dots(6)$$

g) 考察货架在风荷载及地震作用下的锚固性能,按式(7)、式(8)确定:

$$P_{\max} = 0.9P_{DL} + 1.4P_{WL} \dots\dots\dots (7)$$

$$P_{\max} = 0.9P_{DL} + 0.9P_{PL} + 1.3P_{EL} \dots\dots\dots (8)$$

式(3)~式(5)中:

Ψ_{CP} ——活荷载及水平荷载的组合值系数,取 0.9;

Ψ_{CW} ——风荷载的组合值系数,取 0.6;

Ψ_{CR} ——雪荷载及屋面活荷载的组合值系数,取 0.7。

按正常使用极限状态设计货架时,各类荷载分项系数可参照式(1)~式(6)组合式,将各数字分项系数均改取 1 即可。其他情况的荷载及荷载组合应符合 GB 50009 的相关要求。

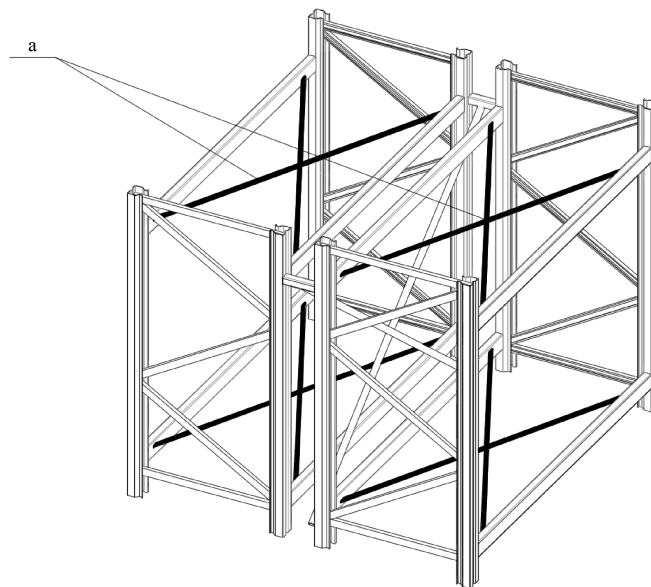
6 货架设计

6.1 一般性设计要求

6.1.1 本标准采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,以分项系数设计表达式进行计算。对水平荷载、风荷载起主导作用的组合工况及地震作用工况,应进行结构二阶分析。

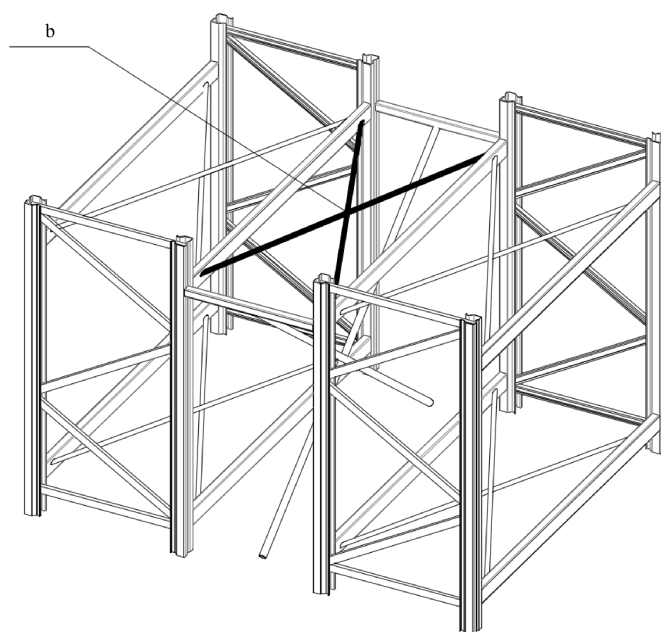
6.1.2 货架结构的承重构件应按承载力极限状态设计,非承重构件应按构造要求设计。承载力极限状态包括:构件和连接件强度破坏、疲劳破坏,结构和构件丧失稳定导致结构破坏。对于货架整体位移、横梁挠度等通过刚度进行控制的设计,应按照正常使用极限状态设计。

6.1.3 货架的整体刚度要求应符合 GB/T 28576—2012 中第 8 章的要求,如图 1 所示的方式可以增强货架的整体刚度。



a) 背靠背小距离模式

图 1 背靠背货架



b) 背靠背大距离模式

说明:

a —— 货架水平拉杆;

b —— 货架间抗扭构件。

图 1 (续)

6.1.4 对需要进行抗震设计或抗风设计的货架宜增设垂直拉杆以保持货架整体稳定性。

6.1.5 标准中的所有公式在未有说明的前提下均使用国际单位制。

6.1.6 标准中未涉及的设计及校核内容,如螺栓连接、焊缝连接等,均参照 GB 50018。

6.2 立柱及货架片的设计

6.2.1 对于非多孔件,平均设计强度 f_{ya} 可按式(9)确定,若非多孔件通过 7.3 的方法测定了截面积 A_{eff} 并用于计算,则本条内容不适用。

$$f_{ya} = f_y + \left(\frac{C_f N t^2}{A_g} \right) (f_u - f_y) \leq 0.5(f_u + f_y) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

f_y —— 材料的公称屈服强度;

f_u —— 材料的公称极限抗拉强度;

t —— 材料的设计厚度(冷成型前);

A_g —— 毛截面面积;

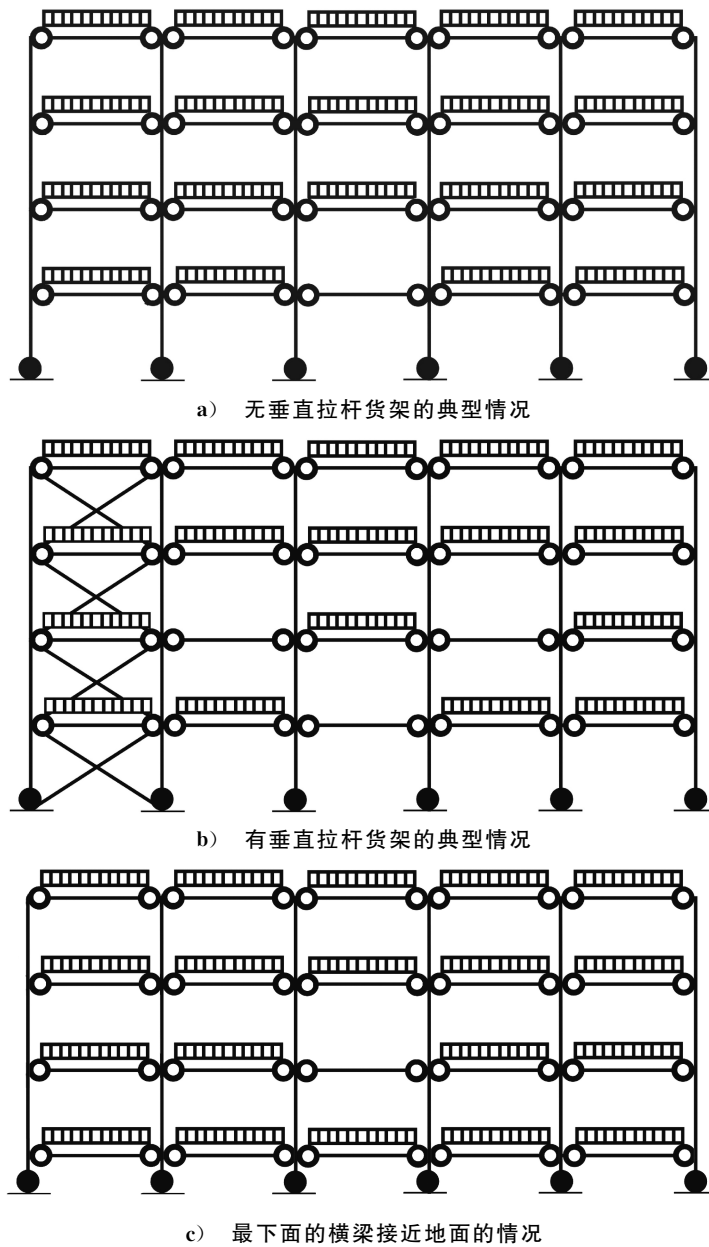
C_f —— 与成型类型有关的系数:

对于冷弯方法成型材料, $C_f = 5$;

对于其他成型方法, $C_f = 7$;

N —— 截面内 90° 弯曲角的个数,且折弯半径不大于 $5t$ 。

6.2.2 对于立柱的设计,一般只要考虑结构承受如图 2a) 所示的荷载情况,即除了在结构最低一层接近中间部位的一个横梁是空载外,其他横梁都是满载的情况。对于有垂直拉杆货架,还需考虑使立柱发生单一弯曲的另一种加载模式,如图 2b) 所示。如果第一层横梁接近地面,则按第二层的一根横梁不加载情况分析,如图 2c) 所示。



说明：

- 表示柱脚连接；
- 表示半刚性连接。

图 2 沿着巷道方向分析的加载模式

6.2.3 按承载能力极限状态下计算得到的轴向力和弯矩可直接用于立柱设计。

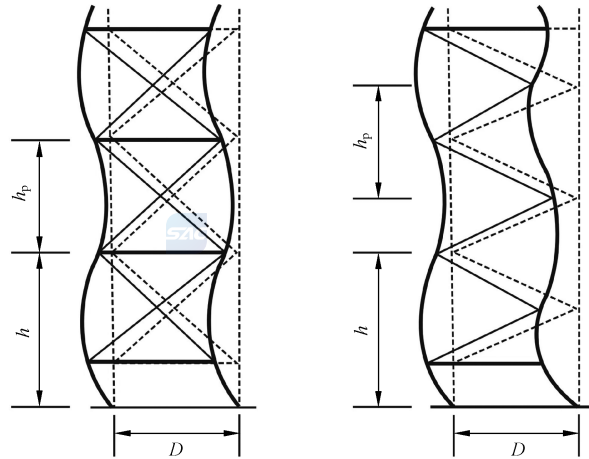
6.2.4 货架片的内力应按 5.11 中的最不利荷载组合计算，其许用承载力可由计算确定，亦可按 7.4 的方法测得稳定系数，进而推导出许用承载力。

6.2.5 对构件的截面验算宜根据 GB 50018 进行。立柱计算中涉及的计算截面面积 A_{eff} 可按有限元法或 7.3 的方法由测试确定，其中测定有效净截面面积 A_n 采用的立柱样件为有孔样件，测定有效截面面积 A_e 采用无孔样件；稳定性计算中弯曲计算长度 l 可按 6.2.6 的方法计算，扭曲计算长度 l_t 可按 6.2.7 的方法计算。

6.2.6 构件在受压状态下的弯曲计算长度 l 可通过理论分析或测试的方法确定，如果计算长度没有通过整体分析确定，则可以使用有效长度系数 K 值： $l=KL$ 。 L 即在相应屈曲模式中支撑点之间的长度。

受压状态下的弯曲计算长度 l 和相应屈曲模式中支撑点之间长度 L 的选取如下：

- a) 在货架片自身平面内,当校核立柱计算长度时, L 的取值按图 3 的两种情况取 $L=h, K=1.0$, 即 $l=h$ 。



说明：

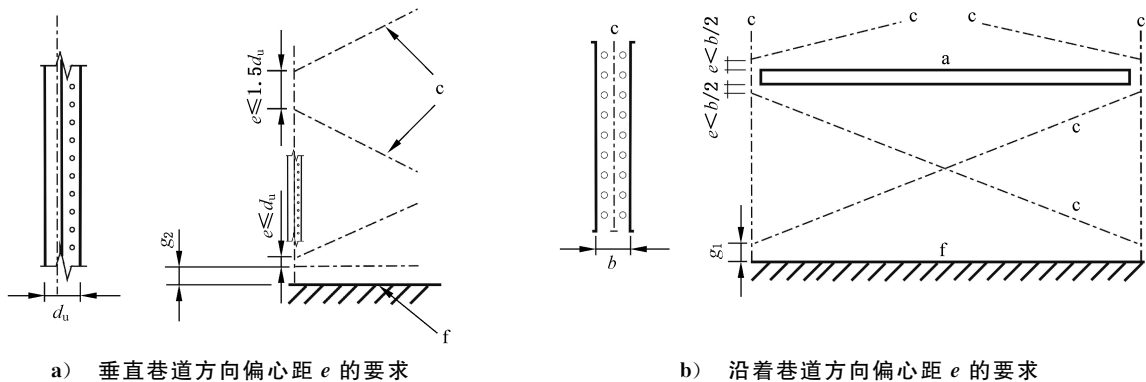
- h_p —— 立柱上两支撑点之间的距离；
- h —— 通常用计算长度；
- D —— 货架片宽度。

图 3 货架片自身平面内的计算长度

如果货架结构同时符合以下要求：

- 1) 单根支撑与立柱的两翼缘同时相连接；
- 2) 支撑偏心距 e 同时满足图 4 要求；
- 3) 立柱安装有柱脚板；
- 4) 地面为混凝土。

则 $K=0.9$ 。

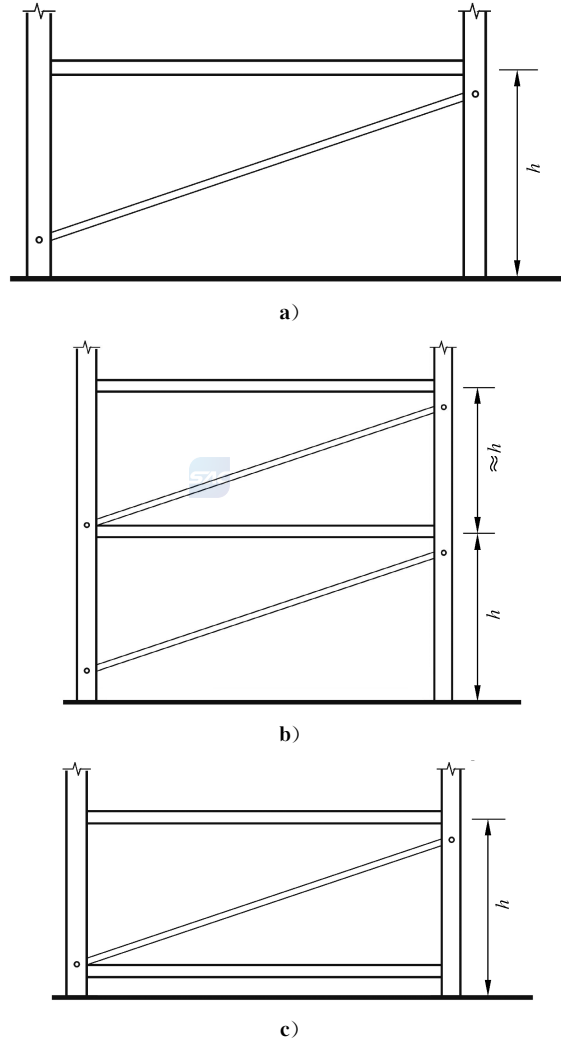


说明：

- a —— 托盘；
- b —— 立柱在垂直货架片方向的宽度；
- c —— 构件轴心受力线；
- d_u —— 立柱在沿着货架片方向的宽度；
- e —— 支撑偏心距；
- f —— 地面；
- g_1, g_2 —— 底层支撑的偏心距。

图 4 支撑偏心距 e 示意图

- b) 在货架片自身平面内,当上部支撑间距 h_p 大于 h 时, L 的取值按图 3 的两种情况取 $L = h_p$, $K = 1.0$,即 $l = h_p$ 。
- c) 在垂直货架片方向,对于有垂直拉杆的结构, L 的取值按图 5 的数种情况取 $L = h$, $K = 1.0$,即 $l = h$ 。若货架上部存在横梁层间距 h_p 大于 h 的情况,则需要对该部分立柱的计算长度 l 进行重新取值,取 $l = h_p$ 。



说明:

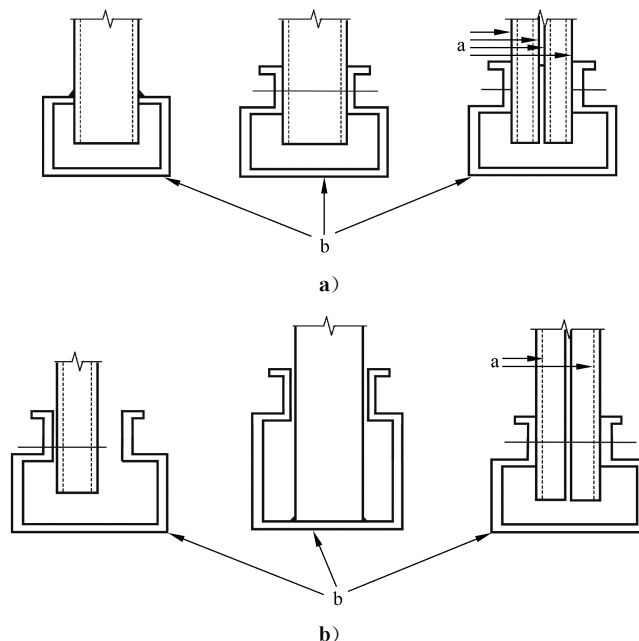
h ——层高。

图 5 沿巷道方向的计算长度

- d) 在垂直货架片方向,对于无垂直拉杆的结构,立柱的计算长度 $l = K \cdot h$,通常可近似取 $K = 1.7$, h 的含义与图 5 相同。 K 值也可通过梁柱节点刚度、柱脚刚度及货架结构尺寸等进一步计算予以确定,计算方法参照附录 A,其中梁柱节点刚度 k_a 可按照 7.5 的方法测定,柱脚刚度 k_u 可按照 7.6 的方法测定。
- e) 当需要考虑货架片在自身平面内的整体受压稳定性时,可参照 GB 50018—2002 中 5.2 的格构柱的相关计算内容,其中货架片的计算长度 $l = K \cdot H$, H 为货架片全高, K 可根据荷载重心位置的不同按下列规定取用:
- 1) 当货架片上荷载重心位置低于货架片全高 H 的 $1/2$ 时, $K = 1.1$;
 - 2) 当货架片上荷载重心位置低于货架片全高 H 的 $2/3$ 时, $K = 1.6$;

3) 当货架片上荷载重心位置高于货架片全高 H 的 $2/3$ 时, $K=2.0$ 。

6.2.7 对于扭转屈曲, 扭转屈曲的计算长度 l_{ω} 由图 6 所示的情况来确定。



说明:

a —— 支撑的直接受力面;

b —— 立柱。

图 6 平斜撑与立柱的固定方式

采用图 6a) 的固定方式时, l_{ω} 为同一立柱上平斜撑相邻固定点之间的距离 h_p 的 0.7 倍, 即 $l_{\omega} = 0.7h_p$, 采用图 6b) 的固定方式时, $l_{\omega} = h_p$ 。

6.3 横梁/托梁的设计

6.3.1 作用于横梁的荷载

通常可将作用于横梁的荷载看作是均匀分布的。对于不适用这种假设的情况, 可使用表 1 中系数将实际布置的荷载转换成等价的均匀分布荷载。

表 1 横梁荷载系数

加载形式	β_m	β_0	β_{Δ}
	1.0	1.0	1.0
	2.0	1.5	1.6

表 1 (续)

加载形式	β_m	β_θ	β_Δ
	1.0	1.12	1.1
	1.33	1.33	1.36
	1.11	1.06	1.05
	1.33	1.25	1.27
	1.0	1.03	1.02
	1.2	1.2	1.21

表 1 中未出现的加载情况, β_m 、 β_θ 、 β_Δ 可按式(10)~式(12)计算:

$$\beta_m = \frac{M}{WL/8} \dots\dots\dots (10)$$

$$\beta_\theta = \frac{\theta}{WL^2/24EI_b} \dots\dots\dots (11)$$

$$\beta_\Delta = \frac{\Delta}{5WL^3/384EI_b} \dots\dots\dots (12)$$



式中：

W ——作用在横梁上的总荷载；

M ——由 W 引起的最大弯矩；

θ ——由 W 引起的梁端转角；

Δ ——由 W 引起的中点挠度；

L ——横梁的跨度(取两立柱表面之间的距离,对于牛腿式货架的托梁设计,梁的跨度取两牛腿之间的跨距)；

E ——钢材弹性模量；

I_b ——横梁绕弯曲轴的惯性矩。

6.3.2 横梁的设计弯矩

组合式货架结构的横梁可通过测试方法 7.5 获取梁柱节点刚度值 k_b ,则荷载跨中设计弯矩 M_{sd} 可按式(13)计算：

$$M_{sd} = \frac{W_d L}{8} \beta_m \left[1 - \frac{\frac{2}{3} \beta_\theta}{\beta_m \left(1 + \frac{2EI_b}{k_e L} \right)} \right] \dots\dots\dots (13)$$

式中：

k_e ——计算系数；

$$k_e = \frac{k_b}{1 + \frac{k_b h}{3EI_c}}$$

W_d ——横梁的最大设计荷载；

E, L, I_b, β_θ ——同式(11)；

β_m ——同式(10)；

h ——横梁间层高；

k_b ——梁柱节点刚度值；

I_c ——立柱绕截面对称轴的惯性矩。

6.3.3 横梁的挠度

组合式货架结构的横梁可通过测试方法 7.5 获取梁柱节点刚度值 k_b ,则横梁的最大挠度 Δ_{max} 可按式(14)计算：

$$\Delta_{max} = \frac{5W_{ser} L^3}{384EI_b} \beta_\Delta \left[1 - \frac{0.8\beta_\theta}{\beta_\Delta \left(1 + \frac{2EI_b}{k_e L} \right)} \right] \dots\dots\dots (14)$$

式中：

W_{ser} ——横梁的正常使用荷载；

E, L, I_b, β_θ ——同式(11)；

β_Δ ——同式(12)；

k_e ——同式(13)。

6.4 立柱柱脚设计

6.4.1 柱脚板的设计

每个立柱都应配备柱脚板,并提供明确的固定方法。本条中给出了柱脚板轴心受压时的近似设计

方法,当柱脚板承受压弯组合时,可按照 7.6 的方法进行测试。

柱脚板设计过程中,假设柱脚板有效面积 A_b 所承受的压力是均匀地分布在有效面积上。如图 7 所示,其有效面积由阴影部分所表示,其中有效宽度 e 应按式(15)计算:

$$e = t_b \sqrt{\frac{f_y}{3f_c}} \dots\dots\dots(15)$$

式中:

t_b ——柱脚板的厚度;

f_y ——材料公称屈服强度;

f_c ——接触压力下的混凝土强度设计值;

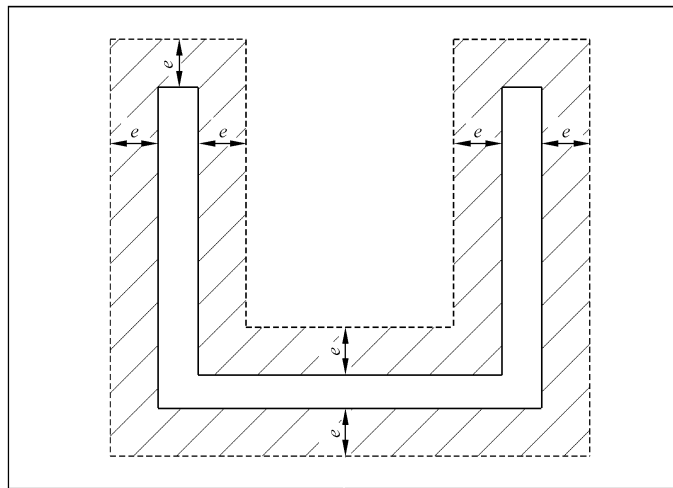
$$f_c = 1.67f_{ck}$$

f_{ck} ——混凝土的圆柱体抗压强度。

当立柱中心受到设计轴向荷载 N_{sd} 时, N_{sd} 应满足式(16):

$$N_{sd} = f_c A_b \dots\dots\dots(16)$$

柱脚板有效面积 A_b 按照图 7 计算,当立柱表面至柱脚板边缘的距离小于 e 时,应当将 e 值修正为立柱到柱脚板边缘的距离。



说明:

e ——有效宽度。

图 7 柱脚板设计的有效截面面积

6.4.2 锚固的设计

锚栓的设计应按照 JGJ 145—2013 中的要求或者锚栓生产企业提供的相关设计资料对荷载组合进行计算确定。

7 部分参数的试验获取及处理方法

7.1 一般规定

7.1.1 立体仓库货架结构宜借助于相应的测试来确定设计中所需要的参数。此外,也可直接通过测试确定货架结构或某个构件的承载能力。

7.1.2 试件所用钢材应与实际货架结构用材相同,试件截面的成型方式应与实际货架一致。

7.1.3 测试设备和测量仪表应经有资质的计量部门标定、检验合格。

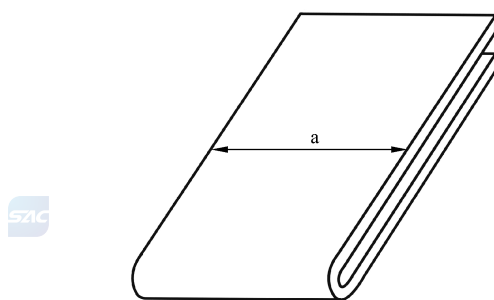
7.2 材料测试

7.2.1 材料屈服强度 f_t 的获取

材料的实际屈服强度 f_t 通过拉伸测试获取,应按照 GB/T 228.1 要求进行,材料沿其轧制方向取样。

7.2.2 弯曲测试

材料的弯曲性能测试应按照 GB/T 232 进行,横向弯曲测试样件宜进行 180° 弯曲(如图 8 所示方向),弯曲内径(折弯半径)等于测试样件厚度的二倍,且弯曲处外部无裂痕,以验证材料的韧性。



说明:

a——轧制方向。

图 8 弯曲后的横向弯曲测试样件

如目测测试样件从底弯曲 180° 后外表无裂纹,则认为该样件满足标准要求。若在弯曲处有局部裂痕,但该裂痕距样件边缘延伸不大于 1 mm,则仍允许使用。

7.3 立柱计算截面面积 A_{eff} 的获取

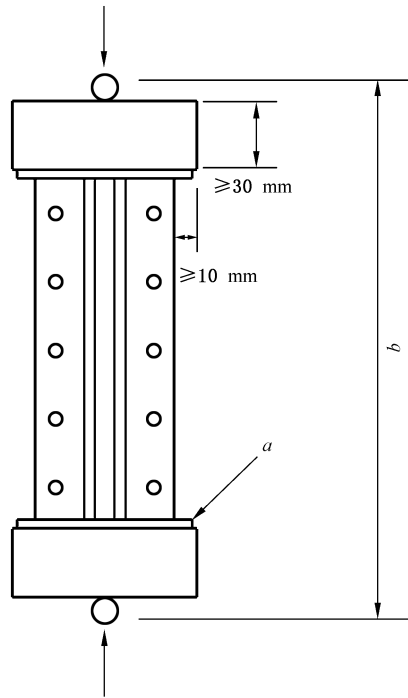
7.3.1 测试目的

立柱的计算截面面积 A_{eff} 分为有效截面面积 A_e 及有效净截面面积 A_{en} ,均可通过短柱试验获取,并可观测冲孔、局部(纵向)屈曲等因素对短柱的抗压强度影响。

7.3.2 测试方案

测试样件如图 9 所示,样件长度应大于截面最大尺寸的 3 倍(忽略中部折弯),且至少应包括 5 组规律的冲孔。样件的切断应在 2 组穿孔之间,且沿与纵轴垂直的方向。

组合式柱脚或底板用螺栓或焊接方式固定到短柱的两端,然后再将短柱样件固定在厚度大于 30 mm 的压板的相应位置上,厚压板宜有小的钻削过的凹痕,以便容纳一个钢珠,如图 9 所示。



说明：

a —— 基座/底板；

b —— 屈曲长度。

图 9 短柱测试方案

钢珠的直径不可达到临界值，钢珠的一些典型直径见表 2。

表 2 建议测试用钢珠直径

预计极限荷载/kN	钢珠直径/mm
50	10
100	15
200	20
300	25
450	30
800	40
1 250	50

钢珠应放置在立柱横截面的重心位置，然后压力机通过两端的钢珠施加轴向力。荷载应逐渐增大直至样件变形且不能再承载更多负荷为止，此时的荷载记录为观测极限荷载 R_{ii} 。

7.3.3 结果修正

立柱的特征极限荷载 R_k 由式(17)进行修正：

$$R_k = R_m - K_s S \dots\dots\dots (17)$$

式中：

S ——标准偏差：

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{ni} - R_m)^2}$$

K_s ——该值由表 3 给出：

表 3 测试次数 n 与 K_s 对应关系

n	K_s
3	3.37
4	2.63
5	2.33
6	2.18
7	2.08
8	2.00
9	1.95
10	1.92
15	1.82
20	1.76
30	1.73
40	1.71
50	1.69
100	1.68
∞	1.64

R_m ——修正短柱失效荷载平均值：

$$R_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ni}$$

n ——测试次数, n 不小于 3；

R_{ni} ——第 i 次测试中的修正短柱失效荷载：

$$R_{ni} = R_{ti} \left(\frac{f_y}{f_t} \right)^\alpha \left(\frac{t}{t_t} \right)^\beta$$

R_{ti} ——第 i 次测试中观测的短柱失效荷载；

f_y ——材料公称屈服强度；

f_t ——根据 7.2.1 测得材料屈服强度；

t_t ——样件厚度的测量值；

t ——样件设计厚度；

α ——计算系数；

当 $f_y \geq f_t$ 时, $\alpha = 0$ ；

- 当 $f_y < f_t$ 时, $\alpha = 1.0$;
- β ——计算系数;
- 当 $t \geq t_t$ 时, $\beta = 0$;
- 当 $t < t_t$ 时, $\beta = \frac{b_p}{t} \frac{1}{k \sqrt{\frac{E}{f_t}}} - 1$, 且 $1 \leq \beta \leq 2$;
- k ——计算系数;
- 当板件为双边支撑时, $k = 0.64$;
- 当板件为单边支撑时, $k = 0.21$;
- E ——弹性模量;
- b_p ——板件的平面宽度, b_p/t 即为板件宽厚比, 其限值可参照附录 B。

7.3.4 计算截面面积 A_{eff} 的计算

立柱的计算截面面积 A_{eff} 由式(18)确定:

$$A_{\text{eff}} = \frac{R_k}{f_y} \dots\dots\dots (18)$$

式中:

- R_k ——立柱特征极限荷载;
- f_y ——材料公称屈服强度。

7.4 立柱受压稳定系数 χ 的获取

7.4.1 测试目的

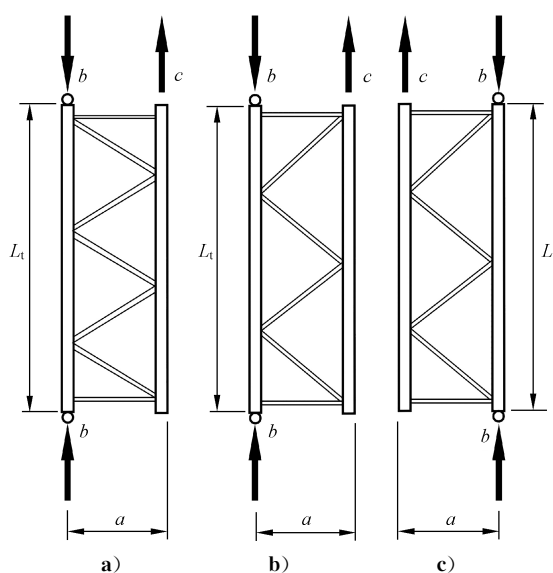
立柱受压稳定系数 χ 通过货架片测试获取, 其意义是立柱在沿着巷道方向(垂直货架片方向)发生位移变形时, 在立柱失稳长度范围内的折减系数。该稳定系数受立柱各种屈曲以及垂直拉杆约束的影响。

注: 根据本测试的系列结果, 可以绘制出相关立柱的力学性能曲线, 用于描述立柱受压稳定系数 χ 和无量纲的长细比 $\bar{\lambda}$ 之间的关系, 在立柱及货架系统设计时可供参考。需要注意的是这条关系曲线的确定未考虑梁柱节点的约束效应, 因而可能偏向于保守。

7.4.2 测试方案

测试采用已装配好的货架片进行测试, 货架片的宽度为指定产品的最大宽度, 且仅在两个立柱中的一个上施加轴向荷载, 如图 10 所示。支撑形式、支撑截面及支撑连接方式应与实际产品结构相同。货架片立柱通过钢珠施加荷载, 钢珠要求见 7.3.2, 如图 10 中所示。

如图 10a) 所示的货架片, 可只做单根立柱的承压测试; 如图 10b) 和图 10c) 所示的货架片应对每根立柱做承压测试, 以便发现结构薄弱环节并确认其抗压强度。也可以如图 11 所示对货架片进行整体承压测试。



说明：

a —— 货架片宽度；

b —— 承压荷载；

c —— 拉力,用于平衡货架片重量；

L_t —— 结构长度。

图 10 货架片测试

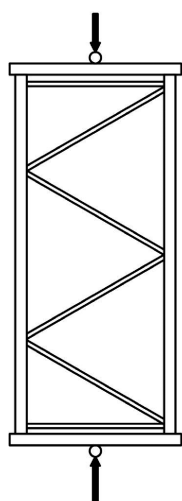


图 11 可供选择的立柱压力测试

7.4.3 测试方法

立柱应在长度系列范围内取不同的若干长度进行测试,其最小长度是单个支撑间隔(如图 3 中 h_p),最大长度则对应于垂直货架片方向屈曲的无量纲长细比 $\bar{\lambda}=1.5$ 时的长度,并且在这两个极端长度之间近似等间距地再进行至少三个长度的测试,故一次测试最少需要 5 组样件。在测试中,荷载逐渐增加至立柱失效为止,注意观察失效模式。

7.4.4 结果修正

每个失效荷载的观测值都需要修正,应根据式(19)进行。

根据测试样件的实际厚度和屈服应力,对观察到的破坏失效荷载进行修正:

$$R_{ni} = R_{ti} C^\alpha \left(\frac{t}{t_t} \right)^\beta \dots\dots\dots (19)$$

式中:

R_{ti} 、 α 、 β 、 t_t 、 t ——同式(17);

C ——计算系数;

当 $0 \leq \bar{\lambda} < 0.2$ 时: $C = \frac{f_y}{f_t}$;

当 $0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 1.5$ 时: $C = \frac{\bar{\lambda} - 0.2 + \frac{f_y}{f_t} (1.5 - \bar{\lambda})}{1.3}$;

当 $\bar{\lambda} > 1.5$ 时: $C = 1.0$;

$\bar{\lambda}$ ——无量纲的长细比;

f_y ——材料公称屈服强度;

f_t ——根据 7.2.1 测得材料屈服强度;

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}}$$

λ ——立柱的长细比。

7.4.5 曲线拟合

应要考虑所有货架片承压测试结果以获取拟合曲线,具体步骤如下:

a) 每次测试,应根据式(20)和式(21)计算出屈曲折减系数 χ_{ni} 和无量纲长细比 $\bar{\lambda}_{ni}$ 的值:

$$\chi_{ni} = \frac{R_{ni}}{A_{eff} f_y} \dots\dots\dots (20)$$

$$\bar{\lambda}_{ni} = \frac{\lambda_{ni}}{\lambda_1} \sqrt{\beta_1} \dots\dots\dots (21)$$

式中:

R_{ni} ——同式(19);

A_{eff} ——同式(18);

λ_1 ——计算系数;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

f_y ——同式(18);

β_1 ——计算系数。

$$\beta_1 = \frac{A_{eff}}{A_g}$$

A_g ——立柱毛截面面积;

λ_{ni} ——第 n 个立柱样件截面相对于主轴方向的长细比, $n = 1, \dots, 5$ 。

b) 做出一个 χ_{ni} 和 $\bar{\lambda}_{ni}$ 的图表;

c) 曲线拟合:通过最小二乘法拟合不超过 5 次的多项式曲线,形成折减系数 χ_{ni} 与无量纲长细比 $\bar{\lambda}_{ni}$ 对应关系;

d) 根据 7.3.3 的方法计算 χ_{ni} 的平均值 χ_m ,并由此计算标准偏差 S ;

e) 承压折减系数 χ 的设计值应按式(22)确定:

$$\chi = \chi_m (1 - K_s S) \dots\dots\dots (22)$$

式中:

χ_m —— χ_{ni} 的平均值;

S ——同式(17);
 K_s ——见表 3。

7.5 梁柱节点刚度 k_b 的获取

7.5.1 测试目的

梁柱节点的刚度 k_b 通过梁柱节点弯曲测试获取。

7.5.2 测试方案

测试方案见图 12,将一小段立柱 h 连接到刚度相当大的测试框架 e 上,可采用图 12 中的两种固定方式,立柱两端之间的净距离 g 见式(23):

$$g \geq l_1 + 2w \quad \dots\dots\dots(23)$$

式中:

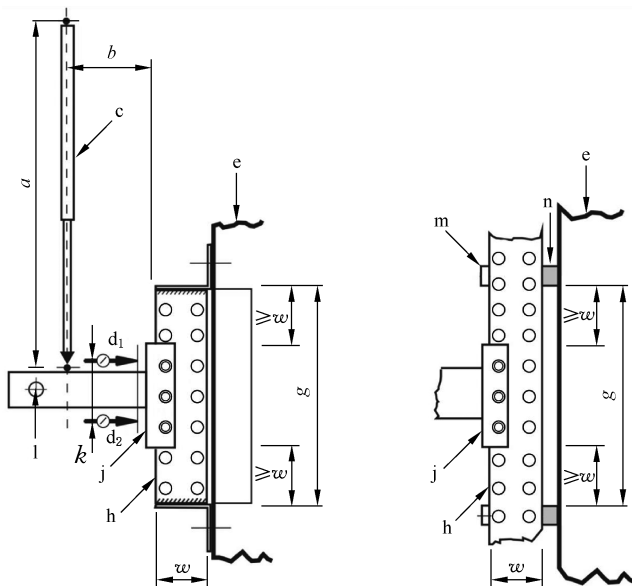
l_1 ——挂片 j 的长度;
 w ——立柱在垂直货架片方向的宽度。

测试过程中,立柱 h 不能与测试框架 e 发生接触。

在横梁的另一端施加侧向约束,防止横梁端部的侧向移动和扭转,但允许横梁在加载方向自由运动。

通过加载顶杆 c 在离立柱表面 $b=400$ mm 处施加荷载,加载顶杆 c 的长度 $a \geq 750$ mm。

将一块金属板固定在横梁上靠近立柱的位置处,两个位移传感器分别测得金属板上下的位移量,则横梁的转角可通过两个位移传感器的读数计算获得,金属板与挂片之间要留有足够的间隙允许挂片变形。



说明:

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| a ——加载顶杆 c 的长度; | j ——挂片样件; |
| b ——加载顶杆至立柱表面距离 400 mm; | k —— d_1 与 d_2 之间距离; |
| c ——加载顶杆; | l ——侧向约束; |
| d_1 、 d_2 ——位移测量仪; | m ——夹具; |
| e ——测试框架; | n ——垫片; |
| g ——立柱样件长度; | w ——立柱在垂直货架片方向的宽度。 |
| h ——立柱样件; | |

图 12 梁柱节点弯曲测试方法

左挂片和右挂片的梁柱节点刚度值应分别测出,设计时采用其平均值。加载到横梁上的初始荷载 F 一般为预计失效荷载的 10%,然后固定零部件,随后卸载,重置测量仪器,荷载 F 再逐渐增加至最大荷载值直至梁柱节点失效。观测挂片的扭转情况,根据式(24)、式(25)做出每一次测试的力矩 M 和旋转量 θ 曲线图,方法如下:

$$M = bF \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\text{且 } \theta = \frac{\delta_2 - \delta_1}{k} \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

- b ——如图 12 所示;
- F ——加载到横梁上的荷载;
- k ——如图 12 所示;
- δ_1 —— d_1 测得的位移量;
- δ_2 —— d_2 测得的位移量。

7.5.3 结果修正

根据每种梁柱节点组合样件中立柱、挂片的实际用材厚度和屈服强度情况,第 i 次测定的失效力矩 M_{ni} 是根据式(26)对失效力矩观测值 M_{ti} 的修正值:

$$M_{ni} = M_{ti}C_k \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中:

- M_{ni} ——第 i 次测定的失效力矩;
- M_{ti} ——失效力矩观测值;
- C_k ——计算系数, $C_k \leq 1$;

$$C_k = 0.15 + C_m$$

- C_m ——修正系数,且 $C_m \leq 1$;

$$C_m = \left[\left(\frac{f_y}{f_t} \right)^\alpha \left(\frac{t}{t_t} \right) \right]_{\max}$$

- f_y ——样件材料的公称屈服强度;
- f_t ——根据 7.2.1 测得样件材料屈服强度;
- t_t ——样件厚度的测量值;
- t ——样件设计厚度;
- α ——计算系数;
- 当 $f_y \geq f_t$ 时, $\alpha = 0$;
- 当 $f_y < f_t$ 时, $\alpha = 1.0$;

$[\]_{\max}$ ——表示取横梁、立柱和挂片三者中影响最大的值,即数值最小的值,且最大值不超过 1.0。

梁柱节点的特征失效力矩 M_k 由式(27)进行修正:

$$M_k = M_m - K_s S \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中:

- S ——标准偏差;

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (M_{ni} - M_m)^2}$$

- K_s ——该值由表 3 给出;
- M_m ——修正梁柱节点特征失效力矩平均值;

$$M_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{ni}$$

n ——测试次数, n 不小于 3;

M_{ni} ——第 i 次测定的失效力矩。

7.5.4 梁柱节点设计弯矩及刚度的计算

梁柱节点的设计弯矩 M_{Rd} 应满足式(28)的要求:

$$M_{Rd} = \eta \frac{M_k}{\gamma_M} \dots\dots\dots (28)$$

式中:

M_k ——同式(27);

η ——计算安全系数, 通常工况下取 1, 但也可依据结构总体安全情况适当折减;

γ_M ——挂片的材料安全系数, 取 1.1。

梁柱节点刚度表示为一条通过原点直线的斜率 k_{ni} , 该直线将测试曲线分为面积相等的两部分, 刚度线与测试曲线的交点位于设计力矩 M_{Rd} 以下, 如图 13 所示, 并满足式(29)的要求:

$$k_{ni} \leq 1.15 \frac{M_{Rd}}{\theta_{Rdi}} \dots\dots\dots (29)$$

式中:

θ_{Rdi} ——设计力矩 M_{Rd} 值的直线与曲线 $M(\theta)$ 的交点横坐标值, 如图 13 所示。

梁柱节点刚度的设计值 k_b 可取 k_{ni} 的平均值 k_m , k_m 按式(30)计算:

$$k_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{ni} \dots\dots\dots (30)$$

式中:

k_{ni} ——同式(29)。

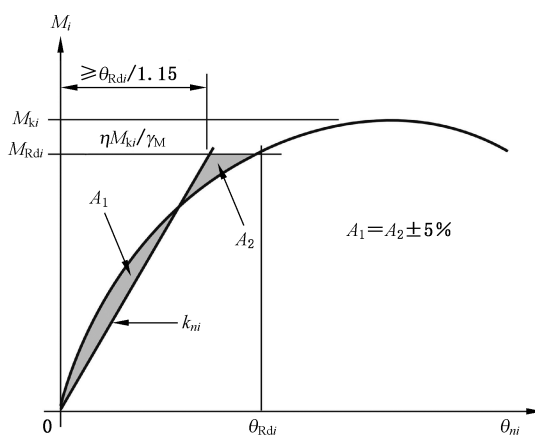


图 13 梁柱节点刚度的推导

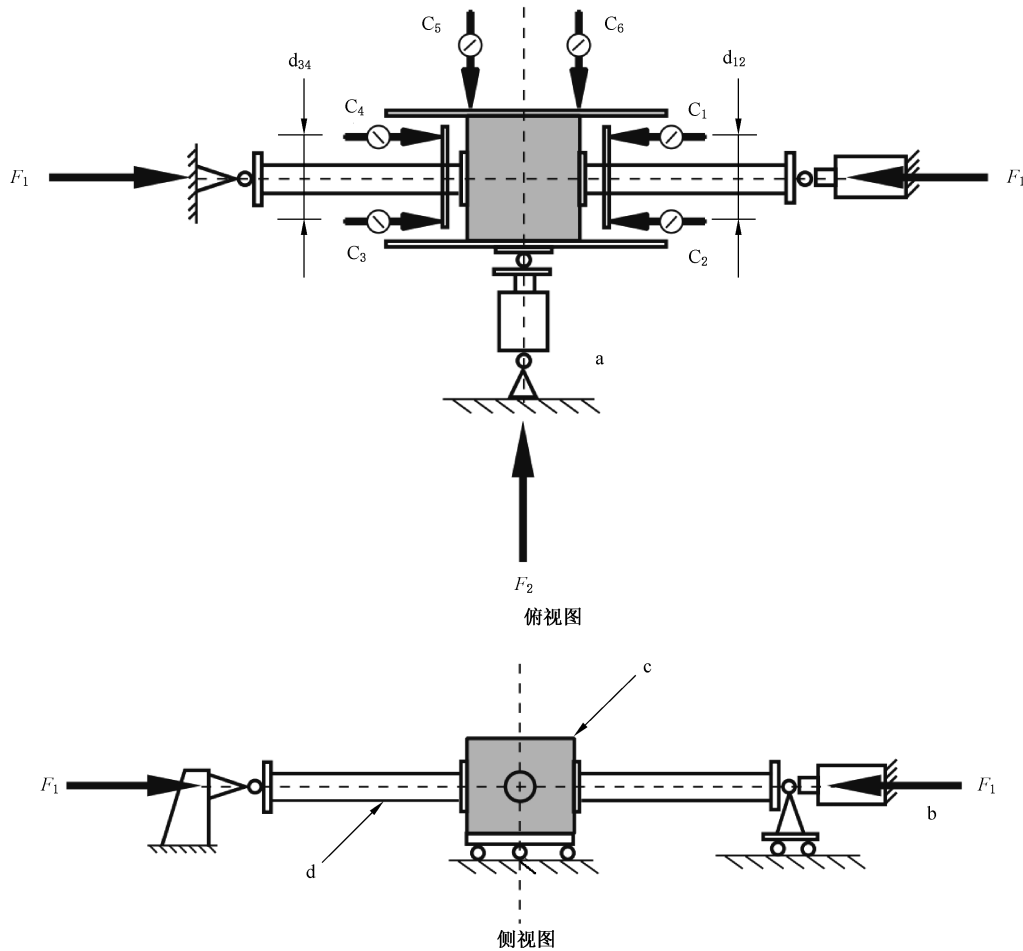
7.6 柱脚刚度 k_u 的获取

7.6.1 测试目的

柱脚刚度 k_u 通过柱脚组合弯曲测试获取, 测试目的是为了确定在最大轴向设计荷载 F_{sd} 下, 柱脚节点连接的弯曲强度及刚度。除最大轴向设计荷载外, 测试中轴向荷载也可按照比例加载, 以考察在不同荷载下, 柱脚节点的弯曲特性, 轴向荷载的比例宜等于 $0.25F_{sd}$ 、 $0.5F_{sd}$ 和 $0.75F_{sd}$ 。

7.6.2 测试方案

测试装置包含两段长度达到至少 4 倍立柱截面最大宽度的立柱,立柱一端安装于柱脚板上,并顶在一个相当于地面的混凝土块上,如图 14 所示,测试中的柱脚板形式及混凝土块强度均应与实际使用的情况一致。混凝土块测试面应保持平行,且要保证柱脚板四周与混凝土块边缘至少存在 50 mm 的间隙。两段立柱需要中心线重合。



说明:

- a —— 2 号千斤顶;
- b —— 1 号千斤顶;
- c —— 混凝土块;
- C₁~C₆ —— 位移测量仪;
- d —— 立柱;
- F₁、F₂ —— 1 号千斤顶和 2 号千斤顶处的荷载。

图 14 测试底座组合测试测试方法

7.6.3 测试方法

初始时松开 2 号千斤顶,通过 1 号千斤顶施加样件最大设计荷载的 20%。注意观察混凝土块偏离测试装置中心线的趋向,以便确定该趋向方向为 2 号千斤顶施加荷载的方向。

将 1 号千斤顶的荷载减小到某数值使底座组合与混凝土刚好保持接触,将传感器数值归零。然后

使 1 号千斤顶上的荷载逐渐增加到最大设计荷载 F_{sd} 并保持恒定,而后 2 号千斤顶按照先前观测到的趋向方向进行加载,直到荷载达到最大值,观测位移并计算旋转量。

测试系统中的各个力如图 15 所示。

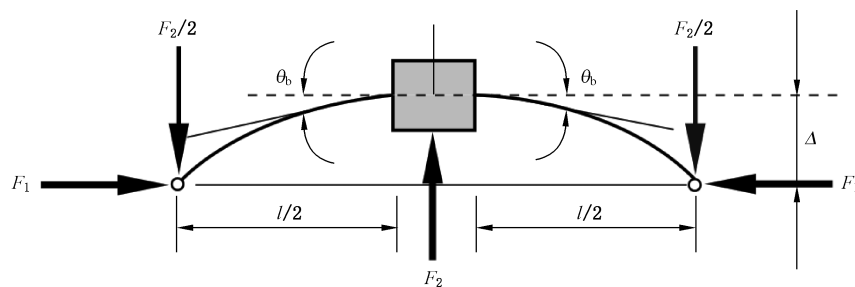


图 15 测试系统中的各个力

底板上的力矩 M_b 和转角 θ_b 按式(31)和式(32)计算:

$$M_b = \frac{F_2 l}{4} + F_1 \Delta \quad \dots\dots\dots(31)$$

$$\theta_b = \frac{1}{2} \left[\frac{\delta_1 - \delta_2}{d_{12}} + \frac{\delta_3 - \delta_4}{d_{34}} \right] \quad \dots\dots\dots(32)$$

式中:

Δ —— C_5 、 C_6 两传感器测量位移的平均值;

$$\Delta = \frac{\delta_5 + \delta_6}{2}$$

F_1 、 F_2 ——1 号千斤顶和 2 号千斤顶处的荷载;

l ——2 个立柱样件的总长,见图 15;

$\delta_1 \sim \delta_6$ ——位置 1 到位置 6 处的位移;

d_{12} 、 d_{34} ——传感器 C_1 到 C_2 的距离, C_3 到 C_4 的距离,如图 14 标注。

7.6.4 柱脚刚度的计算

根据 7.5.4 的方法对数据进行处理,可不考虑数据修正,即可得到柱脚刚度设计值 k_u , k_u 可取 k_{mi} 的平均值 k_m 。

8 组合式货架单元整体测试

8.1 本测试的目的是模拟组合式货架结构的实际工况,以确定其承载能力及额定荷载。测试货架由不少于两层单元货物横梁相连接的三片货架片组成,底层横梁与货架片的结构组合与实际货架相同,顶层横梁及其货架片的结构组合均较实际货架有所加强,以使其能承受高于整体框架破坏荷载的测试荷载。货架片底座平放于混凝土地面上。测试装置如图 16 所示。

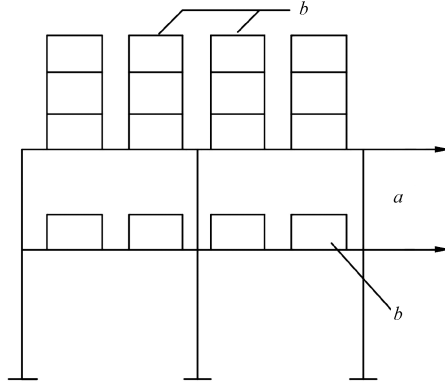
8.2 组合式货架单元整体测试采用托盘施加垂直荷载,采用千斤顶或悬吊重物的绳索及滑轮施加水平荷载。需按荷载的不同组合,以下列三种方式加载:

- a) 在每层托盘梁上施加垂直荷载至 1.5 倍设计荷载后,再在各层横梁与柱的连接节点处沿横梁方向施加水平荷载,其值为该层竖向荷载总量的 1.5%,以后仅在顶层托盘梁上及其节点水平处分别逐级增加竖向荷载及相应的水平荷载,直至组合式货架单元整体破坏。
- b) 仅在底层一个货格的托盘上施加相当于梁的设计荷载 1.5 倍的竖向荷载和相应的水平荷载,而后按 a) 方式仅在顶层梁上逐级施加竖向荷载和相应的水平荷载,直至组合式货架单元整体

破坏。

c) 按 a) 中所述施加荷载,但水平荷载作用方向改在(垂直于巷道方向)货架片平面内,加载方式、顺序及量值、比例等均与 a) 相同。

8.3 组合式货架单元整体的极限荷载取 8.2 所列三种加载方式相应的破坏荷载中的最小值,组合式货架单元整体的额定荷载取为极限荷载的 1/2。



说明:

a —— 水平荷载;

b —— 竖向荷载。

图 16 组合式货架单元整体测试装置示意图

附录 A
(资料性附录)

无垂直拉杆货架的等效计算长度系数 K

无垂直拉杆的货架立柱,在垂直货架片方向的平面内弯曲计算长度系数 K 值可通过式(A.1)~式(A.4)算得的 G_A 、 G_B 然后由图 A.1 查得。

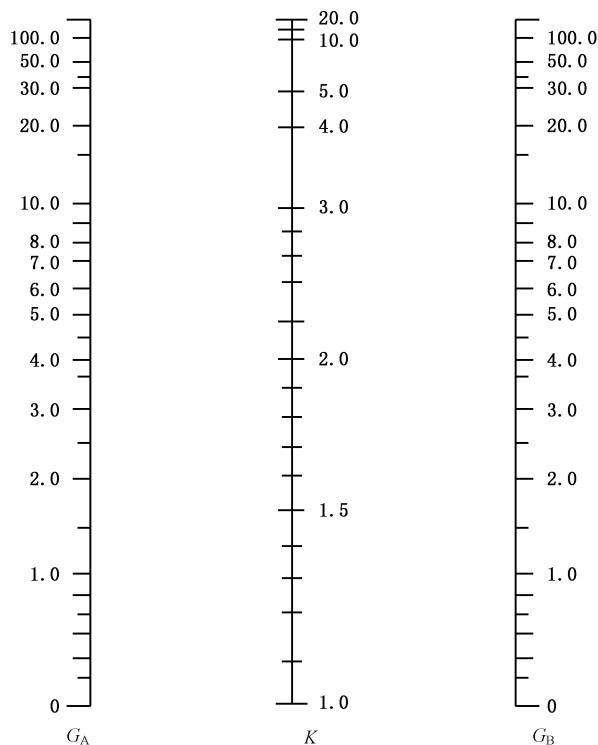


图 A.1 组合式货架单元整体测试装置示意图

$$G_A = \frac{I_c \left(\frac{1}{L_{c1}} + \frac{1}{L_{c2}} \right)}{2 \left(\frac{I_b}{L_b} \right)_{red}} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$G_B = \frac{I_c}{\left(\frac{I_f}{L_f} \right)} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

G_A ——相交于第一层梁柱节点处立柱线刚度之和与横梁线刚度之和的比值;

G_B ——柱脚处立柱线刚度之和与等效地梁线刚度之和的比值;

I_c ——立柱绕截面对称轴的惯性矩;

L_{c1} ——第一层横梁到地面的距离;

L_{c2} ——第一层横梁到第二层横梁的间距。

其中：

$$\left(\frac{I_b}{L_b}\right)_{\text{red}} = \frac{\frac{I_b}{L_b}}{1 + 6\left(\frac{EI_b}{L_b k_b}\right)} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

I_b ——横梁绕弯曲轴的惯性矩；

L_b ——横梁的跨距；

k_b ——梁柱节点刚度,单位为牛米每弧度(Nm/rad)。

等效地梁线刚度：

$$\left(\frac{I_f}{L_f}\right) = \frac{d_u b^2}{1\ 440} = \frac{k_u}{6E} \dots\dots\dots (A.4)$$

d_u ——立柱在货架片方向的宽度；

b ——立柱在垂直货架片方向的宽度；

k_u ——柱脚刚度,可按 7.6 进行测定,单位为牛米每弧度(Nm/rad)；

E ——弹性模量。

式(A.4)为经验公式,需要立柱柱脚板直接固定于混凝土地面之上,如果柱脚板与地面之间采用单个可调螺杆固定且无浇灌水泥,此时立柱柱脚接近铰接形式,不可使用该经验公式,此时等效地梁线刚度仅可通过试验获得,或者近似取 $G_B = 10$ 。

附录 B
(资料性附录)

均匀受压板件的宽厚比要求

货架中构件的截面局部屈曲可通过宽厚比 b_p/t 的最大限值来控制,宽厚比的最大限值可参照表 B.1。

表 B.1 均匀受压板件的最大宽厚比

板件公称屈服强度/MPa	宽厚比限值	
	双边支撑板件	单边支撑板件
215	39.5	13
235	38	12
275	35	11.5
320	32	10.5
345	31	10
390	29	9
420	28	9
460	27	9
500	26	8

双边支撑板件是指计算板件的两边均有邻接板件,单边支撑板件指计算板件仅有一边有邻接板件。单边支撑板件一般以截面中的翼缘卷边形式出现,卷边的最小宽厚比可根据邻接板件的宽厚比进行确定,具体见表 B.2。

表 B.2 卷边的最小宽厚比

板件	板件宽厚比					
	15	20	25	30	35	40
邻接板件	15	20	25	30	35	40
卷边	5.4	6.3	7.2	8.0	8.5	9.0