

反应器格栅支撑件强度及稳定性核算和结构优化

常春芳

惠生工程(中国)有限公司, 上海 201210

[摘要] 主要论述了反应器格栅及其支撑件的强度、稳定性核算, 以及合理的结构优化, 并用工程实例论证了满足强度、稳定性要求的优化结构, 为工程上此类反应器支撑结构的设计提供了一定的参考意义。

[关键词] 反应器; 格栅及支撑件; 强度; 稳定性; 结构优化

DOI: 10.33142/ect.v2i10.13673

中图分类号: X773

文献标识码: A

Strength and Stability Calculation and Structural Optimization of Reactor Grid Support Components

CHANG Chunfang

Wiscon Engineering (China) Co., Ltd., Shanghai, 201210, China

Abstract: This article mainly discusses the strength and stability calculation of reactor grids and their supporting components, as well as reasonable structural optimization. It also uses engineering examples to demonstrate the optimized structure that meets the requirements of strength and stability, providing certain reference significance for the design of such reactor supporting structures in engineering.

Keywords: reactor; grille and supporting components; strength; stability; structural optimization

引言

目前, 国内外炼油、化工等装置的规模越来越大, 而为了实现这些装置的大型化, 关键设备反应器也必须逐步大型化, 这一发展趋势对反应器的格栅及其支撑件也提出了更高的要求。而设备直径越大, 每个支撑结构承担的载荷也越大。原有的适用于小、中型设备的支撑结构难以满足受力要求, 大型设备内部支撑结构的设计给工程设计人员提出了新的课题。反应器支撑格栅及其支撑件不仅要承担催化剂床层的自重, 还要承担催化剂床层产生的压差, 而且设备直径越大, 每个支撑结构承担的载荷也越大。在进行反应器格栅及其支撑件设计、计算时, 往往只计算支撑格栅及支撑梁的强度和稳定性, 但实际上支撑件和设备内壁连接处的局部应力是很大的, 很容易造成反应器壳体开裂^[1]。因此, 本文对格栅及其支撑件进行合理设计, 不仅核算了该结构在内压和外载荷作用下的强度和稳定性, 还计算了支撑件在反应器筒体处产生的局部应力, 并且还对催化剂床层顶部的压紧格栅进行了优化设计, 提出了既满足强度、稳定性要求, 又拆装方便的优化结构。

1 工程案例

某甲醇制烯烃装置中, 反应再生单元的 MTO 反应器装置检修时, 打开反应器下部人孔, 发现支撑格栅有几块已经掉到下方的分布器上, 旁边的一根格栅支撑梁一端也掉了下来, 并且支撑梁已经变形, 梁的中间部位明显向上拱起, 其他两根支撑梁也是中部向上拱起; 掉到下方分布器上的几块格栅板对应分布器喷射口的部位有明显冲刷损坏。上部格栅及支撑梁完好无损。从现场检查情况可以看

出, 掉落的几块格栅应该有很长时间了, 在格栅板对应分布器喷射口的部位有明显冲刷损坏痕迹, 有些部位的格栅条已经冲断, 有些部位已经明显冲刷减薄。

此 MTO 反应器, 下部的工作压力为 0.305MPa(g), 设计压力为 0.562MPa(g); 工作温度为 456℃, 设计温度为 520℃。反应器壳体及格栅材质为 S30409 不锈钢, 介质为甲醇、烃及催化剂。从破坏情况看, 格栅支撑梁受到很大的向上的力, 造成支撑梁向上弯曲拱起, 掉落的支撑梁应该是一端的螺栓被剪断。

经过深入讨论, 首先可以排除因反应器开车后升温产生的热胀原因造成格栅支撑梁的上弯及破坏, 因为螺栓孔采用的是长圆孔, 经核算, 长圆孔的长度完全可以满足梁的热胀量; 现场检查支撑梁及其连接板的螺栓孔, 并没有横向剪切和挤压的痕迹。

业主方技术人员介绍, 在此装置中, 工艺包提供方放宽了反应器开车条件。反应器开车后经历过两次停车, 停车后没有打开反应器, 也没有卸出催化剂。停车后催化剂沉积在反应器底部, 经核算催化剂的数量, 其堆积高度在上下两层格栅之间。再次开车时, 反应器底部进气, 要将沉积的催化剂吹起至悬浮状态, 此时需要的进气压力要比正常操作压力大很多, 业主方技术人员介绍开车时进气压力达到 0.7MPa(g), 由于下部格栅及其支撑梁整体埋在催化剂里面, 受到的向上的力会很大, 造成支撑梁上弯, 其中一根梁的一端连接螺栓剪断, 格栅板脱落。

针对上述问题, 现场采取的措施是, 修复支撑梁及其格栅, 重新安装。除了上述措施外, 建议工艺包提供方要尽可能地分析反应器各种工况; 反应器停车后再开车时也

应采取措施,例如停车后卸出催化剂,再开车时不使格栅受到过大的载荷。另外设备专业在设计支撑格栅及其附件时,要考虑此工况的受力,计算此工况下支撑梁及其格栅的强度和稳定性,设计出更加合理的结构。

2 格栅及其支撑件强度和稳定性核算

2.1 设计条件

某反应器催化剂和瓷球由格栅及其支撑件支撑(如图1),除去格栅、催化剂及瓷球质量约5000kg外,该床层有0.2MPa的压降,当量均布载荷约为41000kg,相当大。设备材质整体采用09MnNiDR,正常工作设计温度-45/65℃,设计压力为2.9MPa;再生工况设计温度310℃、设计压力0.35MPa。设计温度高、部件承受载荷大、材料许用应力低,这就要求对格栅及支撑件进行合理设计,并对其稳定性和强度进行校核,以确保设计质量。

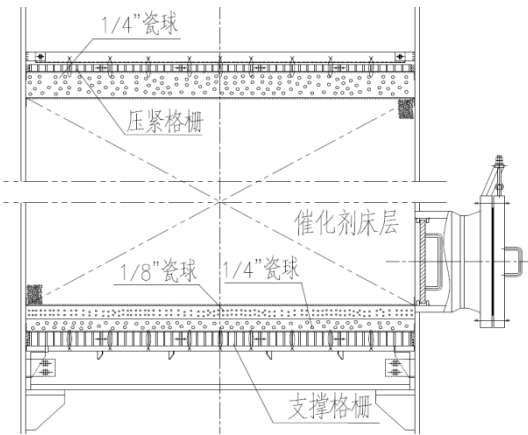


图1 反应器格栅及其支撑件

2.2 支撑梁的核算

2.2.1 支撑梁的强度核算

支撑梁自身的刚度和强度根据SH/T 3098—2011《石油化工塔器设计规范》之6.5节“填料栅板和支撑梁的强

度计算”。用到的主要公式如下：^[2]

$$\text{最大弯矩: } M_{\max} = \frac{qL^2}{8}。$$

$$\text{弯曲应力: } \sigma_M = \frac{M_{\max}}{W} \times 10^{-5} \leq [\sigma]^t。$$

$$\text{挠度: } y = \frac{5qL^4}{384EJ} \times 10^{-3} \leq [y]。$$

L—梁的跨度, m;

W—梁的抗弯界面模数, m³;

[σ]^t—梁在设计温度下的许用应力, MPa;

E—材料设计温度下的弹性模量, MPa;

[y]—梁的许用挠度, mm;

J—梁截面轴惯性矩(不包括腐蚀余量), m⁴。

2.2.2 支撑梁的稳定性核算

根据GB 50017—2017的4.2.1条规定,需要对支撑梁的整体稳定性进行校核,并按下列公式进行计算：^[3]

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{\phi_b W} \leq [\sigma]^t$$

φ_b—梁的整体稳定性系数, GB 50017—2003附录B。

输入设计条件,依据上述公式,把梁的强度和稳定性计算结果汇总如下表2:

2.3 格栅的核算

在确定催化剂格栅扁钢条尺寸时,应对扁钢条进行强度校核。计算时将扁钢条作为一承受均布载荷的两端简支梁,且略去催化剂及瓷球对反应器壁的摩擦阻力^[4]。为满足工艺对格栅开孔率的要求,采用栅条形格栅,并根据《金属设备》第三篇附录四部分及SH/T3098-2011《石油化工塔器设计规范》之6.5节“填料栅板和支撑梁的强度计算”进行核算,主要根据如下公式进行核算:

表1 梁的强度计算表

梁的弹性模量	184600	MPa	梁的许用应力	136	MPa
梁的屈服限	217	MPa	梁的截面惯性矩	1163920.43	mm ⁴
梁的截面模数	143744172.5	m ³			
梁自身重量 m ₁	2641.62	N	梁承载填料重量 m ₂	72943.34	N
梁承载持液重量 m ₃	1002.27	N	梁承载压降重量 m ₄	57036.	N
梁承载格栅重量 m ₅	2388.4	N			
梁承载总重量 m ₀ =m ₁ +m ₂ +m ₃ +m ₄ +m ₅			136011.63		N
梁上线载荷	70.11	N/mm	梁最大弯矩	44618749.26	N·mm
梁许用弯曲应力[M _{max}]	136.		MPa	(基于GB 150—2011许用应力)	
梁最大弯曲应力 M _{max}	38.33		MPa	合格	
梁最大挠度 f _{max}	0.49		mm	合格	
梁许用挠度 [f]=L/1000	1.94		mm		
◆结论	合格				

表 2 梁的整体稳定性表

$*\phi_b = \beta_b \cdot \frac{4320}{\lambda_y^2} \cdot \frac{A \cdot H2}{W_x} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_y \cdot t_1}{4.4 \cdot H2} \right)^2} + \eta_b \right] \cdot \frac{235}{\sigma_s} \cdot \zeta$ 如果 $\phi_b > 0.6$ 转换 $\phi_B = 1.07 - \frac{0.282}{\phi_b} \leq 1.0$					
梁计算长度 l_c	2440	mm	*参数 $\xi = \frac{l_c t_1}{b_1 h}$	1.46	
*等效临界弯矩系数 β_b	0.88		*平面外长细比 λ_y	51.05	
整体稳定系数 ϕ_b	1		修正系数 $\zeta = E/206 \times 10^3$	0.9	
临界弯曲应力 $\frac{M}{\phi_b W_x} \leq f$	38.33	MPa	许用应力 (基于屈服/1.6)	135.63	MPa
◆结论	合格				
翼缘外伸/厚度 b/t_1	2.83		许用值	12.81	
◆结论	合格				
腹板高厚比 h/t_2	6.33		许用值	72.85	
◆结论	合格				

表 3 格栅计算表

平面外长细比 λ_y		674.11			
强度计算					
栅条弹性模量 E	184600.	MPa	栅条许用应力 $[\sigma]^t$	145.2	MPa
栅条截面格栅惯性矩	190222.0	mm ⁴	栅条抗弯截面模量	4940.83	mm ³
栅条理论重量	0.01	kg/mm	栅条承载填料重量	1493.24	N
栅条承载持液重量	20.52	N	栅条承载压降重量	1167.6	N
栅条平均线载荷	2.81	N/mm	最大弯矩 M	442596.1	N·mm
栅条最大应力 σ	89.58	MPa			
◆结论	格栅条强度合格!				
栅条最大挠度 f	0.93	mm			
整体稳定性计算					
栅条剪切弹性模量 G	71000.	MPa	极惯性矩 J	3006.21	mm ⁴
栅条平面外惯性矩 I_y	802.08	mm ⁴			
弯矩临界值 $(M_{\max}) = \frac{2\pi}{l_1} \sqrt{EI_y GJ}$			1147972.08		N·mm
◆结论	格栅条稳定性合格				

$$\text{作用在扁钢上的均布载荷 } q = \frac{(m_p + m_L) \times 9.81}{L};$$

$$\text{其中 } m_p = (HLty) \times 10^{-4};$$

$$\text{格栅强度校核 } \sigma = \frac{qL^2 \times 10^{-2}}{(S-C)x(h-C)^2} \leq [\sigma]^t;$$

q—作用在扁钢上的均布载荷, N/cm;

m_L —催化剂床层及瓷球静持液质量, kg;

m_p —催化剂床层及瓷球质量, kg;

H—催化剂床层及瓷球高度, m;

L—扁钢条长度, cm;

t—扁钢条间距, cm;

y—催化剂及瓷球的堆积密度, kg/m³;

S—扁钢厚度, cm;

C—扁钢腐蚀余量, cm;

h—扁钢高度, cm;

$[\sigma]^t$ —格栅在设计温度下的许用应力, MPa。

根据上述公式, 输入工艺条件, 对支撑格栅进行强度校核, 汇总结果如下表 3。

2.4 支座的核算

支撑梁下设垫板及支撑筋板结构按《压力容器设计指导手册(上)》第 12 章第 4 节中无横向板耳式支座模型进行校核^[5], 并涵盖无横向板耳式支座筋板厚度、底板厚度、焊缝剪切应力等。

表4 支座计算表

支座本体承载					
筋板最大承载力	681.96	KN	基础板承载力	251.79	KN
支座最大承载力	251.79	KN	支座实际承受载荷	68.01	KN
◆ 结论	合格				
支座焊缝强度校核					
焊缝中的剪应力	6.17	MPa	最大弯曲应力	5.55	MPa
焊缝中的合应力	8.3	MPa	许用剪切应力	74.8	MPa
◆ 结论	合格				

2.5 支撑梁及连接板在壳体处产生的局部应力的核算

在以往反应器的设计过程中,并未考虑壳体与催化剂床层支撑件连接处的局部应力,设计时通常将梁置于支座上,而支座直接与反应器壳体相焊。对于大直径的反应器,催化剂及瓷球较重,且支座与反应器接触面积较小,会导致反应器壁的局部应力过大,进而引起反应器壳体变形。特别是压力不高、反应器壁厚较薄时,更容易在此处产生变形。

所以对支座处反应器进行局部应力校核就显得十分有必要,并且校核时应注意以下几个方面:

2.5.1 确定支撑梁的设计载荷

根据 SH/T 3098—2011 中第 6.5.2.1 条规定,采用单梁支撑时,按填料、持液和格栅总质量的 65% 确定梁的均布载荷;采用双梁支撑时,按填料、持液和格栅总质量的 45% 确定梁的均布载荷。

2.5.2 选择合适的力学模型

支座与支撑梁的连接视为简支,支座处只受一个压力;垫板与塔体的焊接视为固支,支座将所受压力传给垫板,并在垫板根部产生一个弯矩^[6]。

2.5.3 选择合适的局部应力计算模型

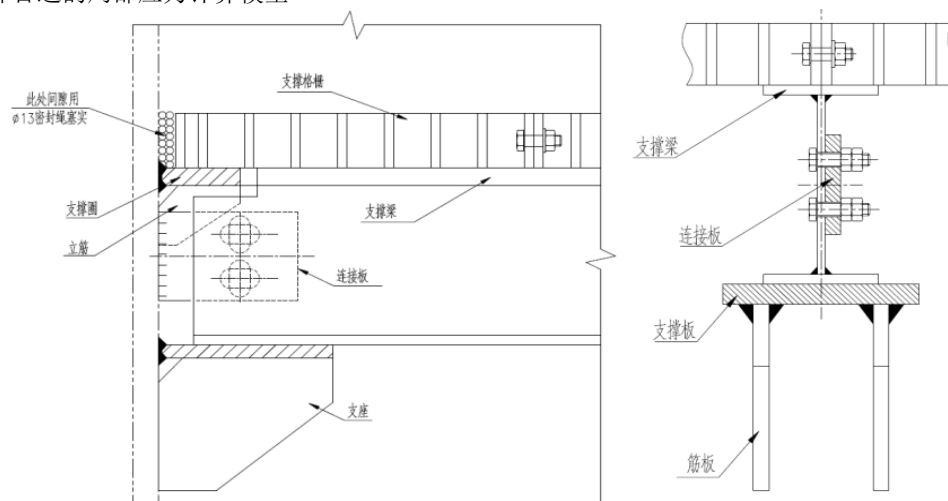


图2 支撑梁与筒体的连接结构

采用 PV Desktop 软件中受压元件“矩形空心附件”模型,根据 WRC bulletin 537,可对梁支座的垫板及支座在筒体处的局部应力进行计算。

与此同时,还应进行垫板角焊缝的强度校核。反应器在正常操作工况下会有振动,需校核垫板焊缝,防止垫板脱落。

3 格栅及其支撑件结构优化

3.1 支撑梁与壳体的连接结构

考虑高温状态的膨胀,将支撑梁与壳体的连接设计为可拆滑动型,即支撑梁设置长圆孔通过耳板和壳体连接。为确保承载能力,支撑梁下设置垫板及支撑筋板(详细结构见下面附图 2)。连接板和支撑梁上开的都长圆孔,连接板上开横向长圆孔,支撑梁上开竖向长圆孔,既能吸收高温产生的膨胀,又能在再生或者吹扫工况在下方进气时,在竖直方向上不产生那么大的剪贴力。

3.2 支座与筒体的连接结构

为保证反应器强度,避免反应器壳体变形,根据前面筒体处局部应力的核算,需要将支座处的反应器筒体局部增厚,也可以在支座和反应器之间增设垫板。显然,增设垫板比较经济,目前已经在结构上做了优化设计,在支座和筒体之间加了垫板,如图 2 所示。

3.3 格栅的结构设计

在进行格栅设计时,不仅要核算格栅的强度,格栅的设计还要便于拆卸,特别是催化剂床层上方的压紧格栅,由于要装卸、更换催化剂和瓷球,拆卸频率比较大,所以压紧格栅及其组件之间最好是活连接,如下图 3 所示,压紧格栅和反应器筒体之间就是采用螺栓连接,拆卸比较方便。以前的设计,立筋和支撑圈与反应器筒体都是焊接的,不方便压紧格栅的拆卸。

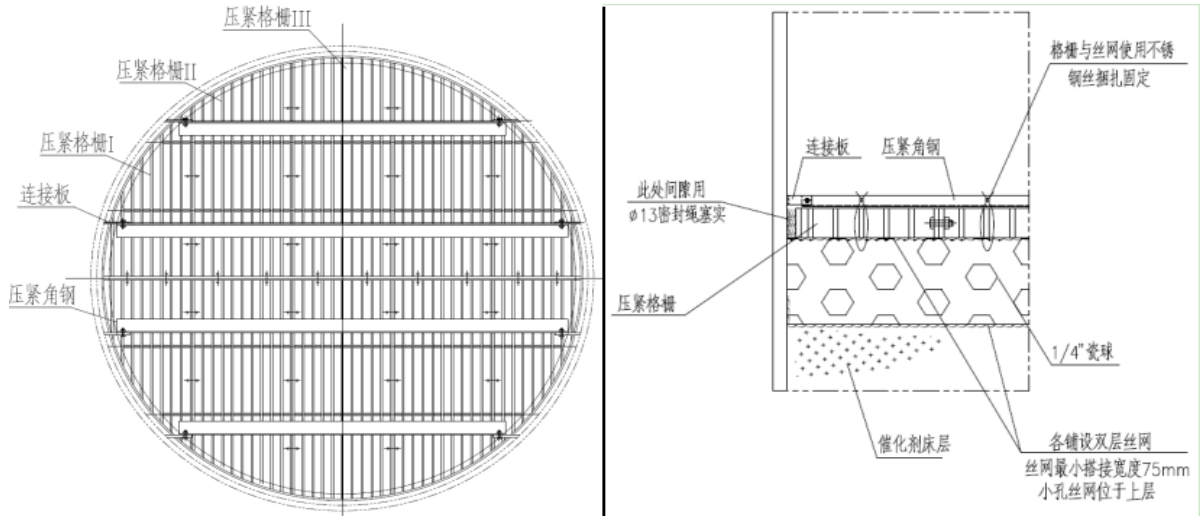


图3 优化后的压紧格栅结构

4 结论

(1) 反应器催化剂床层支撑件, 需要进行强度和稳定性校核, 并且需要校核各个工况下的强度和稳定性, 尤其是停车再开车时的工况和催化剂再生工况比较容器遗漏; 本文通过工程实例, 说明了对催化剂床层支撑件强度和稳定性校核的必要性, 列举了如何校核支撑的强度和稳定性, 以及如何校核支撑格栅的强度, 为支撑结构的校核提供了一定的参考依据。

(2) 反应器催化剂床层支撑件在反应器壳体处的局部应力, 需要核算, 在实际工程应用中, 此处的局部应力很容易被忽略, 但是催化剂及瓷球较重, 且支座与反应器接触面积较小, 会导致反应器壁的局部应力过大, 进而引起反应器壳体变形。特别是压力不高、反应器壁厚较薄时, 更容易在此处产生变形。

(3) 根据工程实例中反复研究、总结得出的经验, 对反应器催化剂床层支撑件进行结构优化, 发现支撑梁和连接板之间采用长圆孔结构能有效吸收高温产生的膨胀; 梁的支座和反应器筒体之间采用垫板结构连接, 能大大降低反应器壳体处的局部应力, 而且基本上不增加什么成本; 压紧格栅和反应器壳体之间采用螺栓连接, 很方便后续的检修、维修拆卸工作。

[参考文献]

- [1] 徐君臣等. 大型反应器催化剂床层支撑结构的有限元分析[J]. 化工设备与管道, 2019(1): 8.
 - [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准: GB/T150-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 105-109.
 - [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准: GB50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 37-53.
 - [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 中华人民共和国石油化工业行业标准: SH/T3098-2011[S]. 北京: 中国石化出版社, 2011: 8-12.
 - [5] 全国化工设备设计技术中心站. 压力容器设计人员培训教材: 压力容器设计指导手册(上)[S]. 昆明: 云南科技出版社, 2006: 310-345.
 - [6] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 工程师培训教程: 压力容器设计工程师培训教程[S]. 北京: 新华出版社, 2019: 143-150.
- 作者简介: 常春芳(1984.8—), 女, 河南周口人, 现就职于惠生工程(中国)有限公司, 工程师, 硕士, 主要从事压力容器设计、金属材料的腐蚀与防护等工作。