

首钢 5500m³ 高炉热风炉板带焊后时效处理技术研究与应用

首钢集团首钢京唐钢铁联合公司 (河北唐山 063200) 周 雁 赵君岩 张劲皓
大连理工大学 (辽宁 116023) 房德馨 魏福群

【摘要】 通过对高炉热风炉高温段及拱顶板带振动消除应力的技术研究与实践, 证明了振动时效技术用于消除冶金设备的大型构件内应力是完全可行的, 并给出了具体的参数及检测结果。

正在建设中的地处唐山曹妃甸的首钢 5500m³ 高炉, 是目前我国有效容积最大的高炉。与之相配套的热风炉(4 座)采用了俄罗斯 KaluginYa P 改造型顶燃式技术, 设计风温为 1300℃。由于热风炉壳钢板比较厚(40mm 以上), 因此必须考虑焊接制造成形后, 壳体内存在的较大的内应力问题。该内应力包含焊接成形产生的焊接应力和由于拼装时采用强制拉、压成形, 焊后去掉强制成形设施时壳体内产生的较大的结构内应力。这两种应力在每条焊缝上叠加, 必然造成许多高应力区。这些高应力区如果不消除, 将是炉壳产生开裂和应力腐蚀的根源。因此, 炉壳焊后消除应力工艺是必不可少的。

由于热风炉炉体及其分段直径大, 重量重, 因此适于这种大型构件的时效处理工艺只有两种: 一种是电加热法; 另一种则是振动时效法。经过两种方法的反复对比论证, 最后确定对首钢 5500m³ 高炉 4 个热风炉的高温段及拱顶处相关的板带, 采用振动时效的方法消除内应力。

振动时效的原理是对被处理件施加一个较大的机械能, 使构件产生共振, 并按一定的振型振动。因此很容易使内应力大的地方产生较大的动应力, 并使这些点产生晶格滑移, 形成塑性变形而释放应力, 所以振动时效的主要技术特征之一是降低高应力和均化应力分布。

振动时效处理焊接构件与电加热法所耗用的时间相比, 振动时效处理一个构件只需 1~2h, 可以在施工间

隙进行。而电加热法处理每一构件都要经历加热、恒温到缓冷, 约需 20~30h, 所以振动时效的技术特征之二是可以大幅度缩短施工时间和节约电耗。振动时效的技术特征之三是适用性很强, 它可以在任何环境和条件下进行, 不受环境和场地条件制约。

1. 振动时效工艺规程的制定

振动时效工艺规程及实施程序都必须与现场条件及建造施工程序相符合。被处理的 4 座热风炉的施工程序为: 每座热风炉炉壳共由 25 带板带组成, 每一带都在地面上焊好纵向焊缝, 然后吊装到炉体上, 对好后焊接环向焊缝。就这样从 $\nabla \pm 0$ 第一带一直到拱顶 $\nabla + 52m$ 共 25 带板带。外面的环向焊缝全部焊好后, 再集中焊接炉体里面的环向焊缝。

根据上述工序, 为消除焊接应力可采用整体处理工艺。即在整体炉壳焊接完成后, 对整体进行大激振力、多点多频激振处理。但整体焊好后, 由于整个壳体太大, 总体处理有可能出现消除应力不均匀等现象。因此确定采用分带处理与整体处理相结合的方法。当每一带纵向焊缝焊好后, 就在焊接平台对已焊好的这一分带做振动消除纵向焊缝应力处理, 再将处理好的分带吊装到炉体上做环向焊接, 整体焊接好后再次做整体处理, 这样可消除环向焊缝的应力。

从受力分析可见, 当上一层壳体吊装到炉体上之后, 其自重对下层壳体产生较大的压力。这样会使下层

纵向焊缝在平行焊缝方向受压，而垂直焊缝方向受拉，增大了纵向焊缝垂直焊缝方向的应力。当热风炉工作时，由于内部压力的增大，也将使纵向焊缝垂直焊缝方向的应力增大。因此，纵向焊缝根部是高应力危险区域。

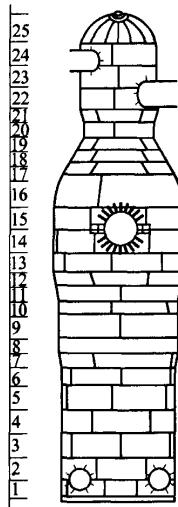
我们在 $\nabla \pm 0$ 处理分带壳体，其主要目的在于消除纵向焊缝根部垂直焊缝方向的应力，以保这些危险区域不产生破坏。因此，分带处理是合理和必要的。

根据上述分析，确定了该热风炉壳体，消除应力处理程序为：每一分带的处理与焊后总体处理相结合的工艺路线。

2. 热风炉高温段各带及拱顶板带的消应力处理

在热风炉的工作状态下，高温段及拱顶段的工作环境比较复杂。因此对高温段各带（12带至19带）及拱顶（25带）均在地面上焊好之后即做振动时效处理，使这些部位的纵向焊缝的焊接应力及拼装时的结构约束应力得到较好的释放，见下图。

从图中可见，第12带至顶部第25带每一带形状各不相同，其中有下锥型（11带、12带）、直筒型（13带、14带、15带）、半球型（16带、25带）、上锥型（17带、18带、19带）。由于形状不同、高度不同、重量不同、刚度不同，因此振动时效处理时各带的处理参数也不相同。



热风炉壳体结构示意图

另一方面，由于现场条件及工期要求，各带很少能够做到标准的4点支撑，一般都是在每一带拼装并焊好

后，去掉拼装约束即开始振动处理。由于支撑条件的差别，被处理件之间处理参数也不相同。

由于设备本身具有自动处理功能，因此我们对每一件被处理构件均采用两次处理，即自动处理35min左右，再变换频率做手动的二次处理。在自动处理之前，先用手动调频，根据指示表读数找出要处理频率的频数，并根据此读数确定峰值后沿的某一读数（相当于峰值的1/3读数所对应的频数）做为扫频的最高频数。其激振器档级的调整一般控制在使共振峰值达到3.5~6g之间所对应的激振器档级。经验证明，在这个档级的激振力不会造成被处理件的损坏。

当激振力和最高扫频数确定后，即可进行第一次处理。在自动处理过程中，设备自动给出如下曲线：振动处理前的扫频曲线，振动处理时的时间-振幅曲线、振动处理后的扫频曲线。

振动处理前的扫频曲线给出了构件在现有条件下（支撑、内应力等）所具有的振动特性，是我们选择处理频率的依据。振动处理后的扫频曲线，给出了构件在振动处理后的振动特性，与振前曲线相比较，其共振峰值可能升高或下降，其峰点所对应的频率可能增大或减小。

振动处理过程中给出的时间-振幅曲线，则是反映构件在处理过程中，构件刚度的变化使构件的振动幅度增大或减小。

构件动态参数的这些变化，都反映了构件内应力的变化，都说明在振动处理过程中和振动处理之后，构件内应力在降低和均化。一般来说15min之后，时间-振幅曲线将不再发生变化，说明在这个激振力作用下，构件的内应力已不再发生变化。

由于这些曲线直接反映了振动处理过程中内应力的变化，因此国家机械行业标准JB/T 5926—1991及JB/T 10375—2002均用它作为衡量振动时效效果的标准。

表1 2#热风炉高温段各带处理参数的变化量

参 数	12带	13带	14带	15带	16带	(17+18)带	19带
共振频率变化量 /r·min ⁻¹	-8	-12	+9	+10	+17	+57	-13
共振峰值变化量 /g	+0.9	+0.2	+0	+0	+0.5	+0.3	-1.1
时间振幅变化量 /g	+2.9	+0.8	+0.4	+0.5	+1.6	+0.8	+1.2

从表1我们可以看出：

- (1) 构件经振动时效后，其共振峰值均有所增加或下降。
- (2) 构件经振动时效处理后，共振峰对应的频率均有增加或减少。
- (3) 构件在振动时效处理过程中，幅值随时间逐渐，增高或降低，但规律是上升-变平、下降-变平。特别是在前15min变化较大，然后变平。

上述这些变化，完全符合国家行业标准JB/T 5926—1991及JB/T 10375—2002的有关规定，说明构件处理有效。

3. 热风炉高温段板带的总体振动处理

热风炉壳体高温段及拱顶不是做为一个独立的分段在 $\nabla \pm 0$ 焊接成形后再吊到炉体上的，而是一带一帶焊好后逐带吊到炉体上焊接成形的。因此高温段的总体处理就是热风炉炉壳的总体处理。

表2 17~18带组合段残余应力测试数据

测点号	振动时效前/MPa			振动时效后/MPa			$\sigma_{\text{平行}}/\text{MPa}$		$\sigma_{\text{垂直}}/\text{MPa}$		消除率	
	σ_0	σ_{45}	σ_{90}	σ_0	σ_{45}	σ_{90}	振前	振后	消除率	振前	振后	
1	-188	-322	-98	-120	-55	-60	216	137	-36.5	154	96	-37.8
2	-292	-206	-94	-135	-71	-70	318	155	-51.3	181	110	-39.5
3	-212	-329	-90	-263	-36	47	237	187	27.3	153	97	-36.6
4	-212	-193	-200	-186	-112	-120	270	221	-18.4	262	175	-33.3
5	-392	-486	-194	-275	-437	-352	320	254	-33.6	166	129	-28.6
6	-507	-326	-289	-362	-207	-196	323	226	-30.0	266	186	-30.1
7	-264	-167	-25.3	-142	-73	-105	252	146	-42.0	248	152	-38.7
8	-230	-108	-163	-173	-103	-100	202	145	-28.1	178	118	-33.3
9	-238	-123	-88	-193	-133	-49	185	143	-22.5	130	91	-30.4
应力水平	—	—	—	—	—	—	260.3	179.3	-31.1	193.1	128.2	-33.6

从表2可以看出，17带与18带组合件在振动处理前平行焊缝方向的应力 $\sigma_{\text{平行}}$ 和垂直焊缝方向应力 $\sigma_{\text{垂直}}$ 分别为260.3MPa和193.1MPa，而振动时效处理后两个方向的应力分别为179.3MPa和128.2MPa，消除应力的比率分别为31.1%和33.6%。本次处理已达到国家机械行业标准的要求，说明处理有效。

5. 结语

(1) 通过处理数据及应力检测数据分析，说明本次热风炉壳体消除应力的振动时效处理完全达到国家机械行业标准JB/T 10375—2002中的有关规定，处

热风炉炉壳板带的总体处理确实存在较大的难度。由于现场条件不适于顶部处理，在下部激振时必须选好激振力和激振频率。经过反复试验，确定了总体振动处理参数并采用多点多频激振方法，完成了4座热风炉壳体的总体处理。

从处理的结果可知，各种参数均发生了较大变化，处理是有效的。

4. 壳体振动处理效果的残余应力检测

为衡量本次热风炉壳体振动消除应力的效果，对被处理构件做了抽样的应力检测。被检测的构件为17带与18带的组合体，因为该件既有纵向焊缝，又有环向焊缝。测点的选择是在两条纵向焊缝上各选择三个测点，在中间环焊缝上选了3个测点。共9个测点分别测其振动处理前的残余应力和振动处理后的残余应力。表2所示为残余应力测值及其换算出的振前、振后的应力变化率。

理合格。

(2) 实践证明在这种大型结构上，用分段处理与总体处理相结合的工艺程序是合理的，工艺方法是有效的。

(3) 与电加热法相比，在处理这样大型工程设备时，振动消除应力法具有简单、方便、快速及节能等突出优点。

(4) 本次炉壳时效处理，具有显著的经济效益和社会效益，应该在冶金设备制造中加以推广应用。MW

(20080810)