

国能集团宁煤公司煤基烯烃项目CO变换装置次高压蒸汽管道串设备试压试验压力的确定

曾付喜

国家能源集团宁煤公司煤制油指挥部MTP项目部 宁夏 银川 750000

摘 要：通过对宁煤公司煤基烯烃CO变换装置5.72MPa次高压蒸汽串设备（次高压蒸汽废热锅炉及汽包）进行压力试验，重点分析了管道工程中次高压蒸汽管道串设备试压试验压力的确定，提出了有效的应对措施及建议，为后续类似工程的强度试验提供了依据。

关键词：次高压管道；水压试验；设计温度；设计压力；许用应力

1 概况

宁煤煤基烯烃项目CO变换装置整个系统工艺特征是高温、高压、易燃、易爆，装置内次高压蒸汽废热锅炉温度高，压力大，与次高压蒸汽管道系统全部为焊接连接，焊接方式为手工电弧焊，氩弧焊打底，阀门也是焊接连接，无法通过添加盲板进行切断，因此，次高压蒸汽管道必须与设备连接为一个试压系统进行试压^[1]。

次高压蒸汽管道管径12”，壁厚SCH80，材质为ASTM A335GR.P11(以下简称P11)，材质为12Cr1MoVG，P11管道设计压力5.72MPa，设计温度480℃。

次高压蒸汽废热锅炉、汽包设计压力5.72MPa，试验压力7.54MPa。

2 次高压蒸汽管道试验压力的计算

依据GB50235-2019《工业金属管道工程施工规范》规定，当管道的设计温度高于试验温度时，管道的试验压力应下表进行修订。

$$P_s = 1.5P[\sigma]_t/[\sigma]_d$$

式中：P_s— 试验压力(表压)(MPa)；

P— 设计压力(表压)(MPa)；

[σ]_t— 试验温度下，管材的许用应力(MPa)；

[σ]_d— 设计温度下，管材的许用应力(MPa)。

当[σ]_t/[σ]_d大于6.5 时，取6.5。

当P_s在试验温度下，产生超过屈服强度的应力时，应将试验压力P_s降至不超过屈服强度时的最大压力。

依据GB 150-1998(钢制压力容器)，钢管许用应力详细规定如下表：

表1：钢管许用应力表

钢号	钢管标准	壁厚 mm	常温强度指标	在下列温度(C)下的许用应力，MPa																注
			MPa	≤ 20 100 150 200 250 300 350 400 425 450 475 500 525																
			MPa	550 575 600																
碳素钢钢管																				
10	GB 8163	≤ 10	335	205	112	112	108	101	92	83	77	71	69	61	41			--		--
10	GB9948	≤ 16	335	205	112	112	108	101	92	83	77	71	69	61	41	-	-	-	-	-
10	GB 6479	16	335	205	112	112	108	101	92	83	77	71	69	61	41					
		17~40	335	195	112	110	104	98	89	79	74	68	66	61	41					
20	GB8163	≤ 10	390	245	130	130	130	123	110	101	92	86	83	61	41		-		-	-
20	GB 9948	≤ 16	410	245	137	137	132	123	110	101	92	86	83	61	41		-			
20G	GB6479	≤ 16	410	245	137	137	132	123	110	101	92	86	83	61	41					
		17~40	410	235	137	132	126	116	104	95	86	79	78	61	41		--			
低合金钢钢管																				
6Mn	GB 6479	≤ 16	490	320	163	163	163	159	147	135	126	119	93	66	43		—			—
		17~40	490	310	163	163	163	153	111	129	119	116	93	66	43					
15MnV	GB 6479	≤ 16	510	350	170	170	170	170	166	153	141	129								
		17~40	510	340	170	170	170	170	159	147	135	126								

续表:

钢号	钢管标准	壁厚 mm	常温强度指标	在下列温度(C)下的许用应力, MPa																注	
			MPa	≤ 20	100	150	200	250	300	350	400	425	450	475	500	525					
			MPa	550	575	600															
低合金钢钢管																					
09MnD		≤ 16	400	240	133	133	128	119	106	97	88		-	-		-	-		—	—	
12CrMo	GB9948	≤ 16	410	205	128	113	108	101	95	89	83	77	75	74	72	71	50	—	—	—	
12CrMo	GB 6479	≤ 16	410	205	128	113	108	101	95	89	83	77	75	74	72	71	50		—		
		17~40	410	195	122	110	104	98	92	86	79	74	72	71	69	68	50				
15CrMo	GB9948	≤ 16	440	235	147	132	123	116	110	101	95	89	87	86	81	83	58	37			
15CrMo	GB 6479	16	440	235	147	132	123	116	110	101	95	89	87	86	81	83	58	37			
15CrMo	GB6479	17~40	440	225	141	126	116	110	104	95	89	86	84	83	81	79	58	37			
12Cr1MoVG	GB5310	616	470	255	147	144	135	126	119	110	104	98	96	95	92	89	82	57	35		
10MoWVNb	GB6479	≤ 16	470	295	157	157	157	156	153	147	141	135	130	126	121	97					
		17~40	470	285	157	157	156	150	147	141	135	129	124	119	111	97					
12Cr2Mo	GB6479	≤ 16	450	280	150	150	150	147	144	141	138	134	131	128	119	89	61	46	37	—	
		17~40	450	270	150	150	147	141	138	134	131	128	126	123	119	89	61	46	37	—	
Cr5Mo	GB 6479 17~40390185	≤ 16	390	195	122	110	104	101	98	95	92	89	87	86	83	62	46	35	26	18	
		17~40	390	185	116	104	98	95	92	89	86	83	81	79	78		46	35			

次高压蒸汽管道材质为ASTM A335GR.P11, 相当于国标材质12Cr1MoVG, 查表根据内插法计算可得:

设计温度下材料的许用应力 $[\sigma]_1 = 92 + (89 - 92) \times (500 - 475) / (480 - 475) = 91.4 \text{MPa}$

查表可得试验温度下材料的许用应力 $[\sigma]_2 = 147 \text{MPa}$

P是设计压力, 所以 $P = 5.72 \text{MPa}$

把各个数据代入公示:

$P_s = 1.5P[\sigma]_1 / [\sigma]_2 = 1.5 \times 5.72 \times 147 / 91.4 = 13.799 \text{MPa}$

通过计算所得的试验压力很高, 强行试压安全风险非常大, 由于整个试压系统压力、温度非常高, 而

$[\sigma]_1 / [\sigma]_2 = 1.61$ 数值也很高, 必须对管道系统液压试验时内壁的许用应力进行核算^[2]。

依据GB 150-1998(钢制压力容器), 管壁许用应力计算公式:

$$\sigma_1 = P_s(D_i + S) / 2S\Phi$$

式中 P_s — 试验压力(表压), MPa; D_i — 管子内直径, mm; S — 管子的公称壁厚, mm; Φ — 管子的壁厚系数, 单面焊接, 局部无损检测, $\Phi = 0.8$ 。

英制12" 管道相关于国标DN300, 外径为323mm, 管道壁厚等级SCH80, 壁厚换算成国标详细见下表:

表2: 壁厚等级对照表

壁厚表GB 12459、GB/T13401																	
Wall Thicknesses Schedule																	
公称通径 Nominal Pipe Size DN	外径 Outside Diameter		公称壁厚 T Nominal Wall Thickness														
	A系列 Series A	B系列 Series B	sch5s	sch10s	sch20s	LG	sch20	sch30	STD	sch40	sch60	xs	sch80	sch100	sch120	sch140	sch160
15	21.3	18	1.6	2.1	2.6	---	---	---	---	2.9	---	---	3.6	---	---	---	4.5
20	26.9	25	1.6	2.1	2.6	---	---	---	---	2.9	---	---	4	---	---	---	5.6
25	33.7	32	1.6	2.8	3.2	---	---	---	---	3.2	---	---	4.5	---	---	---	6.3
32	42.4	38	1.6	2.8	3.2	---	---	---	---	3.6	---	---	5	---	---	---	6.3
40	48.3	45	1.6	2.8	3.2	---	---	---	---	3.6	---	---	5	---	---	---	7.1
50	60.3	57	1.6	2.8	3.6	---	3.2	---	---	4	---	---	5.6	---	---	---	8.8
65	76.1	76	2	3	3.6	---	4.5	---	---	5	---	---	7.1	---	---	---	10
80	88.9	89	2	3	4	---	4.5	---	---	5.6	---	---	8	---	---	---	11

续表:

壁厚表GB 12459 、GB/T13401																	
Wall Thicknesses Schedule																	
公称通径 Nominal Pipe Size DN	外径 Outside Diameter		公称壁厚 T Nominal Wall Thickness														
	A系列 Series A	B系列 Series B	sch5s	sch10s	sch20s	LG	sch20	sch30	STD	sch40	sch60	xs	sch80	sch100	sch120	sch140	sch160
90	101.6	---	2	3	4	---	4.5	---	---	5.6	---	---	8	---	---	---	12.5
100	114.3	108	2	3	4	---	5	---	---	5.9	---	---	8.8	---	11	---	14.2
125	139.7	133	2.9	3.4	5	---	5	---	---	6.3	---	---	10	---	12.5	---	16
150	168.3	159	2.9	3.4	5	---	5.6	---	---	7.1	---	---	11.1	---	14.2	---	17.5
200	219.1	219	2.9	4	6.3	---	6.3	7.1	---	8	10	---	12.5	16	17.5	20	22.2
250	273	273	3.6	4	6.3	---	6.3	8	---	8.8	12.5	---	16	17.5	22.2	25	28
300	323.9	325	4	4.5	6.3	---	6.3	8.8	---	10	14.2	---	17.5	22.2	25	28	32
350	355.6	377	4	5	8	8	8	10	10	11	16	13	20	25.8	28	32	36
400	406.4	426	4	5	8	8	8	10	10	12.5	17.5	13	22.2	28	30	36	40
450	457.2	478	4	5	8	8	8	11	10	14.2	20	13	25	30	36	40	45
500	508	529	5	5.6	8	8	10	12.5	10	16	20	13	28	32	40	45	50
550	559	---	5	5.6	---	8	---	---	10	---	---	13	30				
600	610	630	5.6	6.3	---	8	---	---	10	17.5	---	13	32				

根据上表查得，SCH80壁厚为17.5mm。
 $P_s = 13.799\text{MPa}$ ，管子外径323mm， D_i = 管道外径-两倍壁厚 = $323-2 \times 17.5 = 288$
 $S = 17.5\text{mm}$ ， $\Phi = 0.8$ （管道的壁厚系数，单面焊接，局部无损检测，系数取0.8）把数据代入公式：
 $\sigma_t = 13.799 \times 305.5 \div 28 = 150.56\text{MPa}$
实验温度下材料的屈服点 $\sigma_s = 255\text{MPa}$ 。
管道系统液压试验时的应力值，工程经验是不超过试验温度下管材屈服点的90%， $255 \times 0.9 = 229.5\text{MPa}$ 。
根据计算所得， $150.56\text{MPa} < 229.5\text{MPa}$ ，即： $\sigma_t < 0.9 \times \sigma_s$ ，说明12寸P11壁厚SCH80的管线可以选用13.799MPa的试验压力^[3]。

3 管道串设备试压试验压力的分析、选择

经核算，本装置次高压蒸汽12寸壁厚等级为SCH80的P11管线可以选用13.799MPa的试验压力，但由于此系统无法与设备断开单独试压，所以必须串设备进行试压，试验压力必须重新核算。
根据次高压蒸汽废热锅炉和汽包的设计参数，壳层设计压力为5MPa，壳层试验压力为7.54MPa。管道的试验压力13.799MPa，大于设备的试验压力7.54MPa。
设备试验压力 $7.54 > 1.15 \times 5.72$ （管道设计压力）= 6.578（设备名称：次高压蒸汽废热锅炉）；设备试验压力 $7.54 > 1.15 \times 5.72$ （管道设计压力）= 6.578（设备名称：次高压废热锅炉汽包）。
设备的试验压力均不小于1.15倍的管道设计压力，

符合GB50235-2019第7.5.3.6条规定（当管道与设备作为一个系统进行试验，管道的试验压力等于或小于设备的试验压力时，应按管道的试验压力进行试验；当管道试验压力大于设备的试验压力，且设备的试验压力不低管道设计压力的1.15倍时，经建设单位同意，可按设备的试验压力进行试验）管道的试验压力按设备的试验压力7.54MPa进行试验^[4]。
最终，次高压蒸汽管道系统串设备(次高压蒸汽废热锅炉、汽包)试压，试验压力最终确定为7.54MPa。
结论
通过次高压蒸汽串设备试压试验压力详细计算，并进行详细的对比、分析，试验压力最终确定为7.54MPa，水压试验顺利完成，取得了很好的经济、社会效益。高温、高压管道强度试验压力的确定，应保证“管道系统液压试验时的应力值，不得超过试验温度下管材屈服点的90%。”这条工程经验，一旦超过风险就会加大，容易发生安全事故，对管道试压系统百害无一利。
参考文献
[1]美国机械工程师协会标准ASMEB31.3-2002 PROCESS PIPING
[2]SH3501-2011《石油化工剧毒、可燃性介质管道施工及验收规范》；
[3]GB50235-2019《工业金属管道工程施工规范》；
[4]GB50236-2011《现场设备、工业金属管道焊接工程施工规范》。