

# 大直径 06Cr13 马氏体不锈复合钢板 压力容器的制造

永鑫建设工程公司

傅 华

江阴市东发机械设备制造有限公司

徐 洪

**摘 要** 以直径 5 800 mm 的“Q345R + 06Cr13”不锈复合钢板压力容器制造为例,介绍了大直径马氏体不锈复合钢板压力容器的制造过程和质量控制。重点介绍了马氏体复合钢板材料控制,封头的热压成型、分瓣和组焊,筒体的成型、焊接、分片和现场组焊。制作过程中,采用了合适的焊接工艺和制作专用工装来有效地控制制作工艺,同时选择奥氏体不锈钢焊材作为填充金属,有效地避免了设备焊后的热处理,并经过严格的无损检测和压力试验,确保了马氏体不锈复合钢板压力容器的制造质量。

**关键词** 压力容器;大直径;06Cr13;马氏体不锈复合钢板;焊接;制造

随着我国煤化工项目的不断投建,煤化工装置开始向着规模化和大型设备产业化的方向发展,这种发展趋势使得大直径、厚壁容器不断增多,而同时随着世界能源的日趋紧张,节能减排给制造业也提出了更高的要求。为节约材料,复合板容器逐渐增多,对压力容器的制造、检验、运输及安装等提出了更高的要求。

某煤化工企业回炼油罐盛装介质为油气、油等,设备直径 5 800 mm,总高 20 700 mm,采用马氏体不锈复合钢板,材料的特殊性和设备的大直径且整体运输困难等原因要求工艺方案的制定要充分考虑设备的材质、焊接性、热处理、封头制作、现场组焊等一系列要求。为此,结合实际情况对工艺方案进行了详细地论证分析,最终制定了合理的制造工艺方案,并通过采取一系列工艺保证措施和加强材料及制造过程的质量控制,解决了设备制造过程中的难题,避免了容器焊后的热处

理,设备经最终检验合格并已顺利投用。

## 1 设备概况

回炼油罐盛装介质为油气、油等,筒体直径 5 800 mm,主体材质为“Q345R + 06Cr13”复合板,厚度为(20 + 3) mm,上、下封头均为椭圆形,厚度为(22 + 3) mm,其结构示意图 1。设计技术参数如下:

容器类别 一类(焊后不热处理);

设计压力 0.54 MPa;

工作压力 0.36 MPa;

设计温度 364 ℃;

工作温度 344 ℃;

水压试验压力 0.892 MPa(立式)/1.0 MPa(卧式);

焊缝系数 0.85。

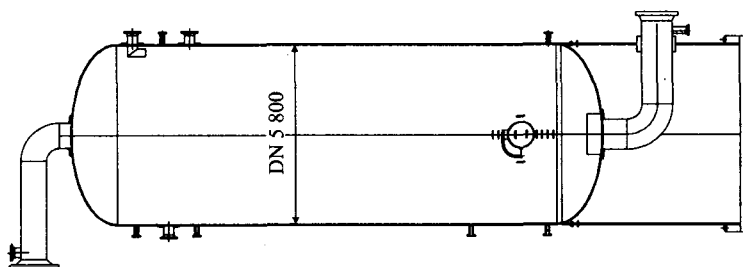


图 1 回炼油罐结构简图

## 2 材料的复验和试验

材料是容器制造质量控制的源头,考虑到该设备介质的特殊性和腐蚀性,选用了焊接性能较差的马氏体不锈钢作为复层金属。按图纸和技术协议要求,材料回厂后按 JB/T 4730.3—2005《承压设备无损检测》的规定对筒体复合板进行了100%超声波检测,按技术协议要求 II 级合格。

表1 06Cr13 的化学成分复验数据

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
标准值	0.08	1.00	1.00	0.040	0.030	11.50~13.50	(0.60)	—
质保书值	0.022 0	0.737 0	0.298 0	0.020 3	0.001 8	13.106	0.130 0	0.012 6
复验值	0.021 6	0.725	0.315	0.021	0.001 5	13.2	0.14	—

表2 06Cr13 的力学性能及复合板复合界面结合剪切强度复验数据

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	冲击功(0℃)/J	剪切强度/MPa	弯曲试验	
					内弯 D=1.5S	外弯 D=4S
标准值	≥325	≥490	≥31	≥210	弯曲部位外侧不得有裂纹,复合界面不得有分层	
质保书值	380	555	201	300	合格	
复验值	390	550	198	310	合格	

## 3 焊接工艺及焊工技能评定

### 3.1 焊接材料的选择和焊接顺序

基层焊接材料的选择主要考虑了强度匹配,焊条选用 J507,选用 H10Mn2 焊丝配焊剂 HJ431。过渡层和复层焊接材料的选择主要考虑化学成分和耐腐蚀性能要满足要求:鉴于基材含碳量较高,过渡层选用了低碳焊条 A302,以降低对复层金属的稀释,保证复层金属的耐腐蚀性能;因复层采用 06Cr13 马氏体不锈钢,如果焊接材料选用同质材料,则焊后必须进行消应热处理,而由于该设备直径太大,采用现场组焊无法进行焊后消应热处理,故复层的焊条选择了 A102,合理地避免了焊后消应热处理。

根据不锈钢复合钢板的特点,焊接采用“先焊接基层,再焊接过渡层(过渡层焊缝必须同时熔合基层和复层),最后焊接复层”的顺序。

### 3.2 焊接工艺试验和工艺评定

根据 JB 4708—2000《钢制压力容器焊接工艺评定》、JB/T 4709—2000《钢制压力容器焊接工艺规程》及产品标准和图纸的要求,制定了相应的焊接工艺试验方案,进行了多次试验,最终确定了

对复层 06Cr13 的化学成分、力学性能和复合板复合界面的结合剪切强度进行了复验,复验结果的相关数据(见表 1、表 2)显示,06Cr13 的化学成分和力学性能满足 GB/T 4237—2007《不锈钢热轧钢板和钢带》的规定,复合板复合界面的结合剪切强度满足 JB 4733—1996《压力容器用爆炸不锈钢复合钢板》及技术协议的要求。

焊接材料、焊接坡口、焊接工艺参数等,并对焊接工艺进行了评定。因封头的热压过程相当于进行了一次正火热处理,故焊接工艺的评定分成焊后进行正火热处理和不进行正火热处理 2 种情况进行;焊接工艺评定的材料为“Q345R + 06Cr13”,接头形式为对接焊缝,厚度为(22 + 3) mm,焊接方法为“SMAW + SAW”,基层采用 J507 焊条、H10Mn2 焊丝配 HJ431 焊剂。经工艺评定,各项检验指标全部符合要求,之后编制了产品的焊接工艺规程用于指导产品的焊接。

### 3.3 焊工技能要求

在进行焊接工艺试验和工艺评定的同时,对焊工进行培训和技能评定,让焊工了解新材料的焊接性能,掌握新材料的焊接技能,并按照《锅炉压力容器、压力管道焊接考试与管理规则》的要求取得奥氏体不锈钢和碳钢材料及耐蚀堆焊层相应项目操作资格证,以便从技能上确保产品的焊接质量。

## 4 封头的拼焊、压制和分瓣

由于容器复层采用焊接性较差的马氏体不锈钢,且直径大,因此,封头的整体热压成型和现场

组对是本设备制造的关键之一。拼焊过程中不仅要控制好热压成型的温度,同时还要尽量缩短复层焊缝金属在敏化区温度的停留时间,以防止产生贫铬区,降低复层的耐蚀性能。综合考虑,采用在封头成型前焊好基层和过渡层的焊缝,经热压成型后再焊接复层金属的加工工艺;同时,考虑到容器直径大,整体成型后运输困难,设计了一条工艺焊缝,在封头成型后,从工艺焊缝处剖开,运输到现场后再进行组焊。

#### 4.1 坡口的选择及加工

为保证焊缝质量,结合复合板的焊接经验及相关标准要求,选择坡口形式如图2所示。内侧采用阶梯型坡口,不仅能有效防止焊接基层时焊缝金属对不锈钢复层的污染,且还能有效避免碳钢成分熔入不锈钢复层中形成焊道裂纹等缺陷。

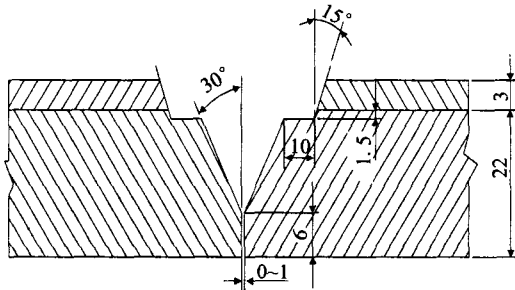


图2 封头坡口示意

坡口在刨床上加工,将复层端部离基层坡口边缘各刨掉10 mm,并往基层厚度方向刨掉1.5

mm。坡口表面应平整,不得有裂纹、分层等缺陷。同时,因材料的特殊性,为了确保封头的焊接和热压质量,特别制作了一付封头产品焊接试板,并随炉热处理。

#### 4.2 封头拼缝的焊接

因封头直径太大,必须进行拼板,因此先模拟画出封头的展开图,然后根据复合板的尺寸设计工艺焊缝及拼接焊缝的位置(设置了FA<sub>1</sub>、FA<sub>2</sub>、FA<sub>3</sub>共3条拼缝,其中FA<sub>2</sub>为工艺焊缝,FA<sub>1</sub>和FA<sub>3</sub>为永久性连接焊缝),最后按拼板图(见图3)尺寸下料。

对于焊接方法的选择,考虑到复层金属的特殊性,为避免焊接基层时对复层金属造成影响,先用焊条电弧焊焊接复层一侧的基层,然后背面用碳弧气刨清根并用砂轮打磨,之后采用埋弧焊接焊完基层金属后焊接过渡层焊缝,复层金属待封头热压成型后再进行焊接。焊接工艺参数见表3。

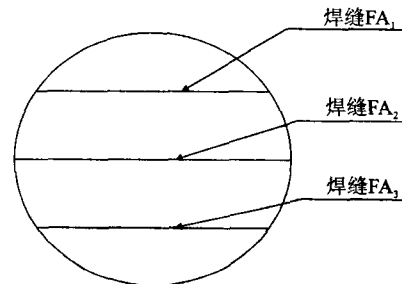


图3 封头拼板示意

表3 封头焊接工艺参数

焊接顺序	焊接层	焊接材料	焊条规格/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min <sup>-1</sup>
1	复层一侧基层	J507	4	160~180	25~26	14±2
2	清根后焊接剩余基层	H10Mn2/HJ431	4	700~750	36~38	44±2
3	过渡层	A302	3.2	100~120	22~24	14±2
4	复合层	A102	3.2	90~110	21~23	14±2

#### 4.3 封头的热压成型

(1) 热压成型前,将复层表面的油污及其它附着物清理干净,入炉加热前将毛坯冷压至封头曲面深度的1/3,为避免封头加热时复层表面发生氧化,复层表面应涂上抗氧化涂料。

(2) 为了加快工件的升温速度并保证受热均匀,需待炉膛升温到400℃左右时方可将工件入炉加热,并按图4所示的炉温曲线升温,使工件在15 min内达到(920±10)℃。在加热工件的同时,将模压的下模圈预热至450~550℃。

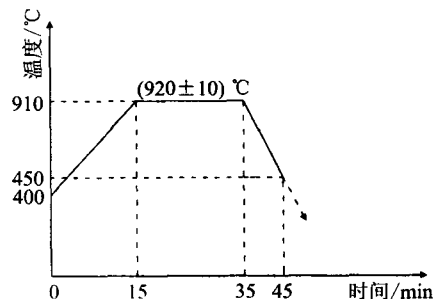


图4 炉温曲线图

(3) 将达到 $(920 \pm 10)^\circ\text{C}$ 并保温 20 min 的工件取出炉后迅速置于已预热好的下模圈上压制成型,控制热压时间以保证终压温度高于 $850^\circ\text{C}$ 。

(4) 为了保证复层的耐蚀性能,在封头成型后采用多台大功率风扇对封头复层进行强制冷却,使其壁温迅速降至 $450^\circ\text{C}$ ,之后置于静止的空气中缓慢冷却;待封头完全冷却后,焊接焊缝 $\text{FA}_1$ 、 $\text{FA}_3$ 的复层金属。

#### 4.4 封头的检验和分瓣

对封头的 $\text{FA}_1$ 、 $\text{FA}_3$  2条焊缝按 JB/T 4730—2005 进行 100% 射线检测,III 级合格;对复层表面进行 100% 渗透检测,I 级合格;同时对随炉焊接试板进行检验和相关性能试验,结果均符合要求。

检验合格后按图 5 所示位置用角钢(为保证复层金属不被污染,角钢端部均采用不锈钢材料与复层接触)对封头进行加固,以防止分瓣后产生变形影响封头最终的组对成形质量,并做好工艺焊缝 $\text{FA}_2$ 的复原样冲印,以便现场组对焊接;用碳弧气刨刨去工艺焊缝 $\text{FA}_2$ 进行分瓣(气刨前复层表面需涂刷防飞溅涂料,以防止碳弧气刨飞溅损伤复层表面),刨开后,将 $\text{FA}_2$ 坡口修磨成如图 6 所示的 X 型阶梯状。

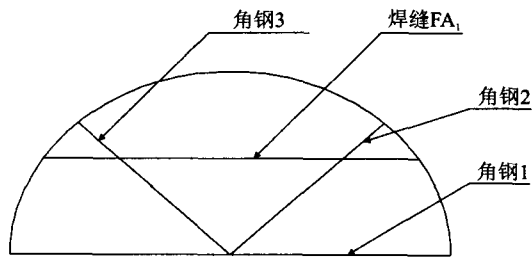


图 5 封头加强筋布置图

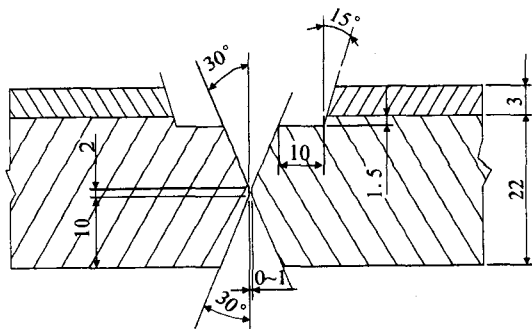


图 6  $\text{FA}_2$  坡口示意

## 5 筒体的制作

筒体的制作是本设备制作的重难点之一。筒体的椭圆度直接关系到容器的组装质量、焊接质量以及复层不锈钢的有效使用厚度。由于筒体直径太大、运输困难,因此,筒体的制作也采用的是工艺性焊缝卷制、校圆、分片运输,然后在现场进行组对焊接的工艺。

### 5.1 筒体下料和坡口设置

在已成型的封头未分瓣前,先测量封头的外围周长,以封头的外周长为参照,确定筒体的直径。在坡口的设计中,为避免基层焊接时基层材料对复层造成影响,考虑到筒体纵焊缝在自由状态下焊接收缩量大会引起坡口角度减小等因素,采用了增大坡口面角度的办法(坡口形式如图 7 所示),而筒体环焊缝的坡口仍按图 2 所示尺寸加工。

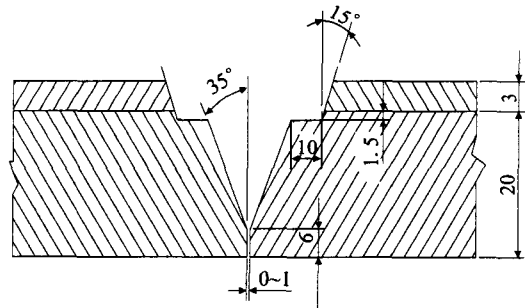


图 7 筒节纵焊缝坡口示意

### 5.2 筒体的组对成型与校圆

因设备直径太大,超限运输费用昂贵,因此考虑将每个筒节先在厂内组对焊接卷制成型后再分割成 3 片运输到现场进行组焊。每节筒体由 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 三条工艺焊缝拼接而成。筒体的组对成型与校圆按以下步骤进行:

(1) 拼接焊缝 $A_1$ 、 $A_2$ ,使 3 块板连接成整体,因该焊缝仅作为工艺性焊缝,因此,在 $A_1$ 、 $A_2$ 的两端和中部各焊接 300 mm 基层焊缝,能保证成型强度即可,不必满焊;

(2) 用焊条电弧焊焊接复层一侧的基层,外侧碳弧气刨清根后再进行焊接;

(3) 将复层表面的油污及其它附着物清理干净,用于卷制的卷板机的轴辊需作防护,以防止铁离子对复层造成污染,卷好后焊接焊缝 $A_3$ 的两端和中部各 300 mm 长的基层焊缝;

(4) 对筒节进行校圆处理,校圆时用内、外检验样板进行多点测量,以保证筒节的椭圆度等符合标准要求。

### 5.3 检验和刨除工艺性焊缝

(1) 检验合格后,按图 8 所示位置用角钢(为保证复层金属不被污染,角钢端部均采用不锈钢材料与筒体接触)对筒体进行加固,以防止筒体分片后产生变形,影响现场组对的质量,同时做好焊缝  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  的复原样冲印,以便现场的组对焊接。

(2) 用碳弧气刨刨除工艺性焊缝  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  (气刨前复层表面需涂刷防飞溅涂料,以防止损伤复层表面),将每节筒体分成 3 片,将坡口修整成如图 2 所示的 V 型阶梯状。

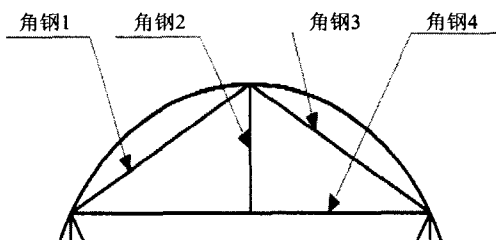


图 8 筒节分片加固示意

## 6 现场组焊

### 6.1 封头组焊

为了保证封头的组装质量,需对封头组对制作一件专用工装。工装采用不锈钢制作,以免污染复层金属。按照分瓣前所划出的样冲印复划出调整焊缝宽度的位置线,根据封头的拼接位置,结合现场的组对条件进行焊接,焊接方法均采用焊条电弧焊,焊接时采用间断法(由 2 名焊工同时采用小线能量、对称爬坡方式施焊,以尽量减小焊接变形),焊接过程中用内、外检验样板进行多次、多点测量,及时调整焊接位置,以保证封头的尺寸符合标准要求。

### 6.2 筒体组焊

现场制作 2 个  $\Phi 5\ 800\ \text{mm}$ 、 $\Phi 5\ 400\ \text{mm}$  的不锈钢加强圈,2 个加强圈之间采用角钢连接,使其形成 1 个立式圆柱体,把成型后分片的筒体按编号顺序依次围绕在 2 个加强圈内,根据分片前所划的样冲印复划出调整焊缝宽度的位置线,利用合理的工装调节,并在基层外侧进行定位焊。筒体制作 1 付产品焊接试板,并带在首节筒体上一

并施焊,在产品试板各项性能指标检验合格后才能进行筒体其余焊缝的焊接。

各筒节组对并检验合格后,再进行筒节间环缝的组对。组对时以复层为基准,焊接时先进行基层的焊接,再进行过渡层的焊接,最后焊接复层。焊接时注意采用小线能量间断、对称施焊,以尽量减小焊接应力和焊接变形,有效地保证焊接接头的质量。各筒节间现场组焊要严格控制筒体的直线度,保证垂直度等达到要求。

### 6.3 内件组焊

复合板容器制造时,内件与筒体内壁的焊接既要避免污染复层,又要避免复层产生剥离。因此,根据设计图纸的要求,先进行预组对,划好切割线,用碳弧气刨把复层部分剥开,将热影响区用砂轮打磨掉,内件不锈钢托架采用过渡层焊条 A302 直接焊在基层壳体上,过渡层焊接完成后,再采用复层焊条 A102 完成面层焊接,并圆滑过渡至母材。

### 6.4 焊接注意事项

(1) 焊接时注意复层不锈钢表面的保护,施焊前在焊缝坡口两侧 200 mm 范围内涂刷防飞溅涂料,以防止焊接飞溅物损伤复层表面。

(2) 定位焊时,只允许采用基层焊接材料在基层侧进行点焊,不得在复层进行点焊。

(3) 当从复层一侧焊接基层时,应严防复层金属熔化到基层焊缝中,以免少量高铬、高镍的不锈钢成分稀释到碳素钢焊缝中形成马氏体组织而发生硬化。

(4) 焊接过渡层以前,应先对基层焊缝进行打磨,并对基层表面和经打磨过的基层焊缝进行磁粉检测,确保无裂纹等缺陷存在,然后用不锈钢丝刷将待焊接面清理干净。

(5) 过渡层的焊接应尽量减少母材对焊缝的稀释,在保证焊透的情况下,尽量采用小直径焊条进行小电流焊接;焊接过渡层焊缝时,必须盖满基层焊缝,且要高出基层与复层交界线约 1 mm,焊缝成形要平滑,不可凸起,否则需打磨平滑。

(6) 焊接复层前,必须将过渡层焊缝表面和坡口边缘清理干净。

(7) 对于纵缝和环缝的 T 型接头焊接,由于纵缝全部焊完后再进行环缝焊接,很容易使纵缝端部的过渡层金属熔入环向基层焊缝,而该处焊

接应力比较复杂,可能产生裂纹或较严重的焊接质量隐患。因此,纵缝两端端部附近的过渡层和复层焊缝必须在环向基层焊缝焊完后再焊接。

(8) 禁止在容器的非焊接部分引弧,若有因电弧擦伤而产生的弧坑和焊疤,必须打磨平滑。

## 7 检验、检测

### 7.1 无损检测

不锈钢复合钢板焊缝无损检测程序通常有2种:一种是在基层、过渡层和复层焊缝全部焊接完成后,按设计要求分别进行射线检测和复层表面渗透检测;另一种是在满足焊接接头处基层厚度不小于设计计算厚度和复层为非空气淬硬的不锈钢材料等条件时,在基层焊缝焊接完后按图纸设计要求进行射线检测,合格后再进行过渡层和复层的焊接,复层金属表面作渗透检测。

考虑到本设备的复层金属为马氏体不锈钢,焊接性能较差,若控制不好容易产生裂纹等缺陷,为确保焊缝质量,采用第一种方法进行无损检测:所有的A、B类焊缝根据设计要求均按JB/T 4730—2005进行无损检测,焊缝焊接完成后对其进行 $\geq 20\%$ 射线检测,III级合格;所有丁字焊缝全部作射线检测,复层表面作100%渗透检测,I级合格。与基层相焊的不锈钢角焊缝,进行100%渗透检测,I级合格;碳钢角焊缝进行100%磁粉检测,I级合格;与复层相焊的角焊缝以及复层上割除工卡具、拉筋等临时附件后遗留的焊疤在打磨光滑后进行100%渗透检测,I级合格;在离焊缝边缘100mm的范围内进行超声检测,I级合格。

### 7.2 水压试验

按照设计要求,设备制作完成并按规定的项

目全部检验合格后须进行水压试验。水压试验严格按照《压力容器安全技术监察规程》的要求进行:试验压力0.892 MPa,试压用水的氯离子浓度不大于15 mg/L。水压试验后立即将水渍清除干净,并封闭全部开口。

## 8 结 语

综上所述,由于受客观条件的限制,大型马氏体不锈钢复合钢板容器采用了制造厂内成型、现场组焊的方式进行制作,有效地缩短了制作周期;同时,通过合理地调整焊接材料,选用奥氏体焊材,避免了焊后热处理带来的诸多问题,并通过采用焊接工艺性焊缝及相应的工装,合理地控制了焊接的各个参数和关键环节,确保了大型马氏体不锈钢复合钢板压力容器的制造质量。

## 参考文献

- [1] 国家质量技术监督局. 压力容器安全技术监察规程[M]. 中国劳动和社会保障出版社,1999.
- [2] 国家机械工业局,国家石油和化工工业局. 钢制压力容器焊接工艺评定[M]. 云南科技出版社,2000.
- [3] 国家机械工业局,国家石油和化工工业局. 钢制压力容器焊接工艺规程[M]. 云南科技出版社,2000.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册——材料的焊接[M]. 机械工业出版社,2004.
- [5] 陈茂爱,陈俊华,高进强. 复合材料的焊接[M]. 化学工业出版社,2005.
- [6] 郑传祥. 复合材料压力容器[M]. 化学工业出版社,2006.
- [7] 国家和石油化学工业局. JB 4733—1996 压力容器用爆炸不锈钢复合钢板[S]. 2000.
- [8] 国家和石油化学工业局. SH/T 3527—1999 石油化工不锈钢复合钢焊接规程[S]. 1999.

(收稿日期 2010-01-08)

## 加快氮肥企业结构调整 促进产业升级

由中国氮肥工业协会主办的“2010年氮肥行业工作会暨中国氮肥工业协会第四届理事会第五次会”于4月26—27日在北京召开,会议主题是加快氮肥工业调整、促进产业升级。国家发改委、商务部、工信部等部委有关领导以及全国氮肥生产和经销企业的近200名代表出席了会议。与会领导介绍了为促进化肥产业结构调整、提升整体水平的相关政策和意见。中国氮肥工业协会理事长潘德润作了《加快转变发展方式,提升氮肥工业发展水平》的主题报告,并对行业发展提出了4点意见。大会还介绍了《氮肥行业产业结构调整指导意见》(讨论稿)、《合成氨行业准入条件》(讨论稿)的起草过程及主要内容,与会代表对2个讨论稿进行了认真讨论,并提出了修改意见。