

大型储罐焊接技术的现状与发展

大庆油田建设集团 刘家发

1 前言

随着我国经济的快速发展和人民生活水平的提高，能源消耗急剧增长，石油和成品油的需求剧增。目前我国已变成石油进口大国，石油已成为国家重要的战略物资，它直接关系到我国的经济、社会稳定和国家安全，增加原油储备迫在眉睫，因此，我国对国家石油储备库和成品油库的建设给予了高度重视，我国规划中到 2010 年将建成数千万立方米的石油战略储备能力，分期进行建设，大连国家石油储备库 30 台 10 万³罐群已开始建设，我国大型储罐的施工建设进入了一个新的高速发展期。

大型立式钢制储罐是石油化工行业非常重要的储运设备，越来越多地用于原油、成品油等储运工程。焊接是储罐建造的主要工序，对储罐的施工质量具有决定性意义。储罐的类型有很多，但在各类油库的建造中，广泛应用的是大型立式钢制圆筒形拱顶储罐和浮顶储罐，它引领着当今大型储罐建造技术的发展。本文以此为例，在简要介绍其结构特点和安装方法的基础上，分析大型储罐焊接技术的现状和发展趋势。仅供交流参考。

2 储罐的结构特点与安装方法

储罐有很多种类，按其形状可分为立式、卧式和球形储罐；按容积有大型和小型的区别（大型储罐是指公称容积为 100~30000m³平底、固定顶储罐和公称容积为 1 万m³以上浮顶储罐；小型储罐大多是公称容积小于 100m³的储罐，一般为卧式的小型容器）。在各类大型储罐中，绝大多数是建在地上的，用于储运原油、成品油、液态化工产品及其它液体的立式圆筒形钢制储罐。

立式圆筒形钢制储罐由罐底、罐壁和罐顶及附件等部分构成，按罐顶的结构可分为：无力矩顶储罐、拱顶储罐、锥顶储罐、浮顶储罐和内浮顶储罐等，其中以拱顶储罐（包括内浮顶拱顶储罐）和浮顶储罐应用最为广泛，技术成熟。其结构特点与安装方法如下：

2.1 储罐的结构特点

2.1.1 拱顶储罐的结构

拱顶储罐是指罐顶为球冠状，罐体为圆柱形的一种容器，其结构见图 1 所示。拱顶储罐除了罐顶板的制作较复杂外，其他部位的制作较容易，造价较低，故在国内外石油化工部门应用较为广泛。国内最大容积的拱顶罐为 3 万m³网壳拱顶储罐，最常用的容积为 1 万m³或再小些。

(1) 罐底：由多块薄钢板拼装而成，其排列方式一般由设计给定。罐底中部钢板称为中幅板，采用搭接焊缝形式；周边的钢板称为边缘板（边板），要采用对接焊缝形式。边缘板可采用条形板，也可采用弓形板，依储罐的直径、容量及与底板相焊接的第一节壁板的材质而定。

(2) 罐壁：由多圈钢板组对焊接而成，钢板厚度沿罐壁的高度自下而上逐渐减少，最小厚度为 4~6mm。目前，由于安装工艺的进步，罐壁板主要采用对接焊缝形式，已很少采用搭接。罐壁板底部与罐底板采用角接焊缝形式，双面连续焊接。

(3) 罐顶：由多块厚度为 4~6mm 的压制薄钢板和加强筋（通常用角钢或扁钢）组成的扇形罐顶板构成，或由构架和薄钢板构成，各扇形罐顶板之间采用搭接焊缝。

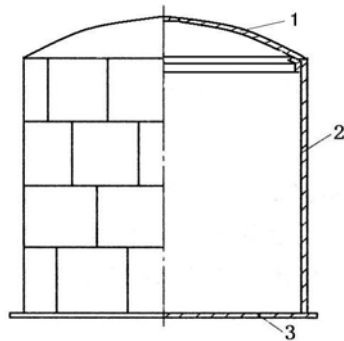


图 1 拱顶罐简图
1—罐顶；2—罐壁；3—罐底

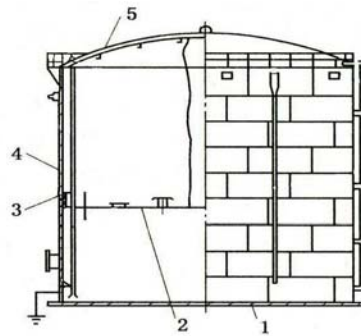


图 2 内浮顶罐
1—罐底；2—内浮盘；3—密封装置；
4—罐壁；5—固定罐顶

2.1.2 内浮顶储罐的结构

内浮顶储罐是在拱顶储罐内部加上一个浮动顶盖，使储液与空气隔离，减少蒸发和污染。其结构见图 2 所示，除了多一个内浮顶之外，其它与拱顶储罐结构基本相同。

2.1.3 浮顶储罐的结构

浮顶储罐是由浮在罐内液体介质表面的浮顶和立式圆筒形罐壁、罐底及附件所构成，其结构见图 3 和图 4 所示。浮顶直接浮在液面上，随着罐内储液量的增加或减少而上下浮动。浮顶储罐的容积都比较大，国外已建成容积为 20 万 m³ 的巨型储罐，我国最大的储罐容积为 12.5 万 m³。

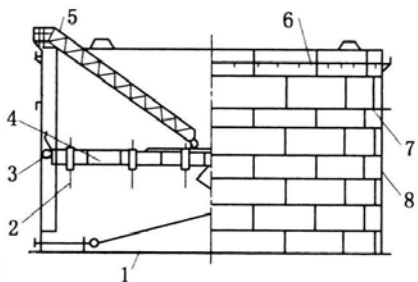


图 3 双盘式浮顶罐
1—罐底板；2—浮顶立柱；3—密封装置；4—双盘顶；
5—滑动浮梯；6—抗风圈；7—加强圈；8—罐壁

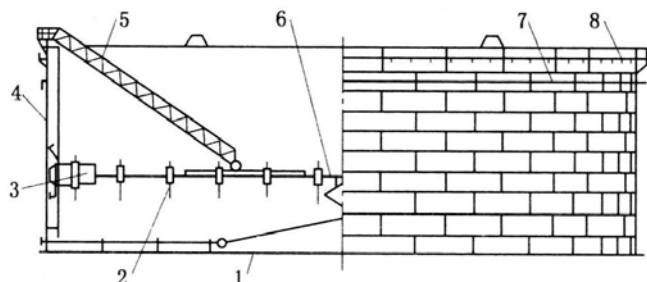


图 4 单盘式浮顶罐
1—罐底板；2—浮顶立柱；3—浮船；4—罐壁；
5—转动浮梯；6—单盘板；7—加强圈；8—抗风圈

(1) 罐底：浮顶储罐的罐底排板方式与拱顶储罐基本相同，但边缘板不采用条形板。对于 10 万 m³ 及以上浮顶储罐的罐底中幅板，采用带垫板的对接焊缝形式。

(2) 罐壁：采用对接焊缝，焊缝内表面要打磨光滑，防止划损浮顶密封装置。浮顶储罐上部为敞口，为增加壁板刚度，提高抗风载能力，罐壁顶部需设置抗风圈和加强圈。

(3) 浮顶：常见的结构形式是单盘式和双盘式。单盘式浮顶是由环形船舱和圆形单盘顶板所构成。双盘式浮顶是由上盘板、下盘板和环形船舱所组成，均由钢板拼焊而成。

2.2 储罐的安装方法

大型立式储罐主体安装方法有正装法和倒装法两种。正装法是指以罐底为基准平面，罐壁板从底层第一节开始，逐块逐节向上安装。倒装法是指以罐底为基准平面，先安装顶圈壁板和罐顶，然

后自上而下，逐圈壁板组装焊接与顶起，交替进行，依次直到底圈壁板安装完毕。国外施工企业大都采用正装法；国内企业大都是拱顶储罐采用倒装法，浮顶储罐采用正装法。

2.2.1 拱顶储罐的安装方法

拱顶储罐是最常见的固定顶储罐，国内普遍采用倒装法安装。正装法除了用于组装某些特殊结构的拱顶储罐外，在普通的立式拱顶储罐施工中极少采用。实际应用的倒装法有中心柱提升、空气顶升、手动倒链起升、电动倒链群体起升、液压提升等多种倒装法。目前，采用较多的是手动倒链起升和电动倒链群体起升倒装法，液压提升倒装法正在逐步推广。

2.2.2 浮顶储罐的安装方法

5万 m^3 及以上大型浮顶储罐的安装主要采用正装法，其优点是可以充分利用大型吊装设备，加大预制深度，易于掌握，便于推广储罐的自动焊接技术，其缺点则是要求有较大的施工场地，技术难度大，高空作业多，不安全等。2万 m^3 及以下大型浮顶储罐也有施工企业采用倒装法。

3 储罐的焊接工艺程序

储罐建造对焊接的质量要求是：焊接强度达到设计要求，焊接变形控制在规定范围之内，焊缝外观及内在质量符合设计标准等。

3.1 拱顶储罐的焊接程序

3.1.1 罐底板的焊接

(1) 罐底中幅板为搭接焊缝，采用焊条电弧焊施焊。先焊短焊缝，后焊长焊缝。焊接长焊缝时，由中心开始向两侧分段退焊。

(2) 边缘板焊接，采用焊条电弧焊施焊。先焊外边缘300mm部位的焊缝，外端加引弧板，由罐内向外施焊，采用隔缝对称施焊法，焊工对称均布。

(3) 焊接顺序为：边缘板外300mm焊接（在第一圈壁板安装之前焊完）→罐底中幅板焊接→边缘板焊接（待大角缝焊接完）→龟甲缝（指罐底边缘板与中幅板之间焊缝）焊接。

3.1.2 壁板对接焊缝的焊接

(1) 先焊纵焊缝，后焊环焊缝。当焊完相邻两圈壁板的纵焊缝后，再焊其间的环焊缝；先焊外侧焊缝，后焊内侧焊缝，在焊接内侧前，应清焊根（使用碳弧气刨清根并砂轮打磨）。

(2) 壁板纵缝焊接：采用焊条电弧焊或气体保护焊工艺，分段退焊。壁板纵缝下端留出50~100mm，在环缝组对后焊接。

(3) 壁板环缝焊接：主要采用焊条电弧焊，多层多道焊。对于板厚10mm以上的环缝，也可采用埋弧自动横焊工艺，由多台焊机沿罐壁圆周对称均布（参见图6），同一方向施焊。自动焊前，内侧用焊条电弧焊进行封底焊接。

3.1.3 大角缝焊接

(1) 大角缝（指底圈罐壁与罐底边缘板之间角焊缝）应在壁板焊缝全部焊接完、龟甲缝焊接前进行焊接。先焊内侧焊缝，后焊外侧焊缝。

(2) 焊条电弧焊施焊时，采用分段退焊法，焊工对称均布，沿同一方向施焊；当采用自动焊

时，多台焊机应沿罐圆周均布，同一方向施焊。

3.1.4 拱顶组装焊接

罐顶为分片组装，搭接焊缝采用焊条电弧焊施焊，先焊内侧焊缝，后焊外侧焊缝。拱顶外侧径向的长焊缝，由多名焊工均布，采用隔缝对称施焊方法，由中心向外分段退焊。

3.2 浮顶储罐的焊接程序

3.2.1 罐底板的焊接

与拱顶储罐罐底的焊接程序基本相同。但当罐底中幅板为带垫板对接焊缝时，一般采用焊条电弧焊或CO₂气体保护焊打底、埋弧自动焊或碎丝填充埋弧自动焊盖面焊接工艺。打底焊采用分段退焊法；自动焊盖面焊接采用隔缝同向焊。

3.2.2 壁板对接焊缝的焊接

(1) 与拱顶储罐壁板对接焊缝的焊接顺序基本相同。

(2) 壁板纵缝焊接：见图 5 所示，壁板厚度 10mm 以上纵缝采用气电立焊工艺，自下向上焊，纵缝上端加熄弧板。小于 25mm 的壁板为 V 型坡口，可一次焊接成型；25mm 及以上纵缝为 X 型坡口，双面焊接。为防止焊接熔池内的铁水从下部流失，焊接前需在第一节壁板纵缝下端 300mm 和其它各圈纵缝下端 50~70mm 范围采用焊条电弧焊焊接一段作为托底焊道。壁板厚度 10mm 以下纵缝采用焊条电弧焊或 CO₂ 气体保护焊。

(3) 壁板环横缝焊接：壁板厚度 10mm 以上环缝，采用埋弧自动横焊工艺，K 型坡口，多层多道双面焊，由多台埋弧横焊机沿罐壁圆周对称均布，同一方向施焊，见图 6 所示。壁板环缝在罐内侧坡口点焊，组对间隙大于 1mm 时，内侧进行封底焊接。

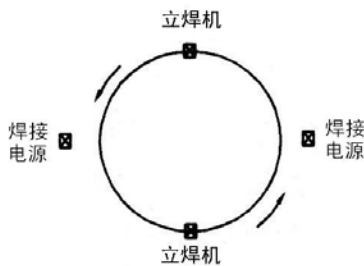


图 5 立缝自动焊机布置图

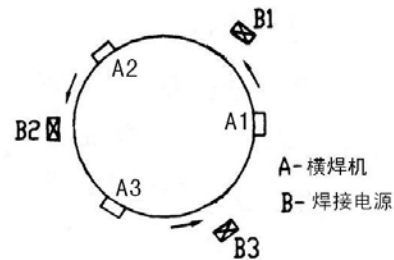


图 6 环缝自动焊机及电源布置图

3.2.3 大角缝焊接

大角缝焊接在第三~四（或二~三）圈壁板焊缝全部焊接完、龟甲缝焊接前进行。其余与拱顶储罐大角缝的焊接程序基本相同

3.2.4 浮顶焊接

(1) 浮顶底板为带板结构，呈“人”字形排布，为搭接接头形式，采用焊条电弧焊或半自动 CO₂ 气体保护焊。施焊原则与罐底基本相同。

(2) 焊接顺序：浮顶底板 → 中间环板、外边缘板 → 隔板 → 浮顶框架、桁架 → 由中心向四周逐舱焊接 → 浮顶顶板 → 支柱套管、附件。

4 储罐焊接技术现状

国内外在大型浮顶储罐的建造中，罐体普遍采用自动焊工艺，技术已相当成熟。我国在上世纪 80 年代初就引进了大型储罐自动焊接技术及设备，部分技术装备也实现了国产化。但在拱顶储罐的施工中，国内主要采用的焊条电弧焊，自动焊应用较少。目前，储罐施工应用最多的焊接方法是焊条电弧焊和埋弧自动焊（包括横焊、平焊、角焊），其次是CO₂气电立焊。此外，实芯或药芯焊丝的CO₂/MAG气体保护自动焊和半自动焊也得到应用，但应用范围还比较窄。

4.1 储罐的焊条电弧焊

国内拱顶储罐的焊接目前仍以焊条电弧焊为主，尤其是 1 万m³及以下储罐的焊接，各施工单位普遍采用。其主要原因是：这类储罐钢板相对较薄，且多采用倒装法组装，采用焊条电弧焊不仅施工方便、灵活，而且焊接变形小，焊接设备成本投入低，辅助工作量小。与自动焊相比，总体经济效益较好，但人员投入多，劳动强度大，人员成本高。

对于大型浮顶储罐的焊接施工，焊条电弧焊仍占有很大的比例，尤其浮顶焊缝、壁板的点固以及附件的焊接等，自动焊还不能代替焊条电弧焊。

4.2 储罐的埋弧自动焊

埋弧自动焊是大型储罐建造中应用最早的自动焊方法。主要应用在正装法施工的浮顶储罐的罐壁环焊缝，罐底对接焊缝和大角缝等方面。近年来，国内一些科研单位和技术开发公司，在借鉴正装储罐自动焊技术的基础上，开发出了倒装储罐自动焊设备及工艺，国内一些主要储罐施工企业相继引进并积极推广应用了这项技术，焊接倒装拱顶储罐罐壁环焊缝，取得了较好效果。

4.2.1 普通型倒装储罐埋弧自动横焊装置

拱顶储罐的埋弧自动横焊主要应用在罐壁的环焊缝，焊接效率高，是焊条电弧焊的 4 倍。但这种方法适合 10mm 以上中厚板，当板较薄时，一是焊缝收缩变形较大，储罐环焊缝形成比较明显的掐腰，二是焊缝要采用焊条电弧焊或CO₂半自动焊进行打底后，焊缝剩余焊接量较少，采用自动横焊不经济，效率没有明显的提高。

图 7 是中石油工程技术研究院研制的倒装储罐环焊缝专用的埋弧自动横焊机（普通型）。它由焊接电源、自动送丝机、焊接机头、焊接行走机架及控制箱、焊剂循环系统、轨道等部分组成。各个部分合理地集成在焊接行走机架上，电气综合控制系统协调各部分统一工作。操作时，在储罐基础四周铺设一条与罐壁板环缝平行的圆形轨道，横缝自动焊装置置于轨道之上，并靠着罐壁板沿轨道行走，启动焊机，进行焊接。

(1) 焊接电源 储罐环缝采用细丝埋弧焊工艺，焊丝直径为 $\phi 2.0\sim 3.2\text{mm}$ ，焊接电流不宜过大，因此，可以选择额定电流为 600~800A 的焊接电源，如林肯公司的 DC-600 可控硅多用途直流弧焊电源，它具有恒压和恒流特性外，还具有焊条电弧焊和碳弧气刨所需的下降外特性，可以充当储罐施工多面手，提高设备的利用率，降低成本。在施工现场，要制作专用的电焊机房放置焊接电源，配置配电箱和漏电保护装置，作好防风防雨措施。根据储罐现场的具体条件，连接焊接电源与机架之间的焊接和控制电缆长度应为 50~100m。

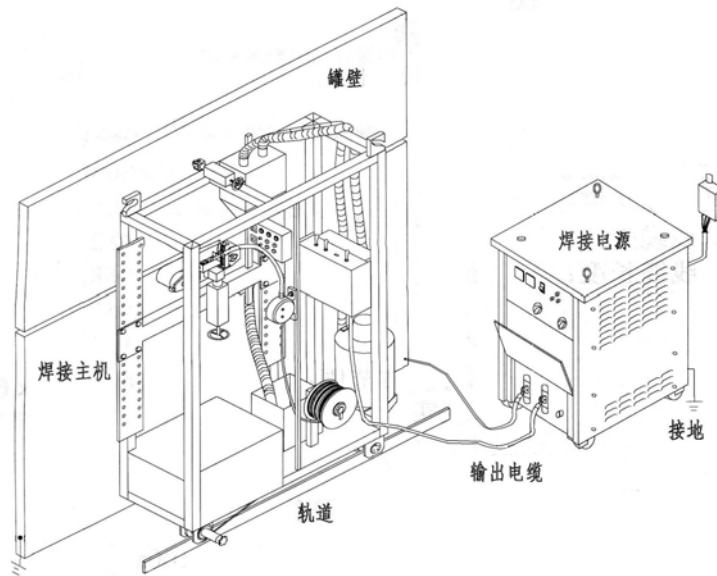


图 7 倒装储罐环焊缝埋弧自动横焊机示意图

(2) 焊机头和对中装置 埋弧焊机头与机头位置调节器一起安装在焊接机架上，具有上下左右调节功能。操作者在焊接过程中随时调节焊枪位置，保证焊接对中，满足横焊缝多层多道焊接工艺的要求。由于轨道的水平度与罐体的同心度不易保证，所以该装置采用光斑式跟踪方法，即：焊接前，在距被焊环缝上部一定距离，画一条与被焊环缝平行的细线，并在焊机头上安装跟踪用光斑灯。焊接过程中，焊工通过手工上下调节机头调节器，使光斑跟踪此细线，实现焊接对中。

(3) 焊接行走机架和轨道 焊接行走机架由型钢、钢管制作，并配有升降调整机构及驱动系统。驱动系统与底板装配，升降调整机构调节焊机头和焊剂托架位置，以适应不同板幅的焊接施工（倒装罐自动横焊适应的板幅，一般在 1400~2400mm 之间即可）。在罐基础外围安装环形轨道供机架行走，轨道由三角架、调节螺栓和环形路轨（一般用角钢或扁钢制作）组成，驱动系统驱动焊接机架行走，机架的行走速度即是焊接速度。

(4) 焊剂循环系统 焊剂循环系统多采用吸压式焊剂回收器。安装在机架顶部，焊接前先将焊剂桶吸满焊剂。焊接中，焊剂托轮靠机架自身的重量紧贴壁板，随着焊接机架的行走，焊剂依靠重力作用沿导管下落到焊剂托带上的焊接电弧区，实现对电弧的保护。托带上剩余的焊剂下落到机架下部的焊剂箱中，焊接后，再吸入焊剂桶中，实现循环利用。由于焊机头与焊剂桶都处于机架上部，焊剂输送管长度短，管内焊剂的重力无法克服焊剂桶内的负压作用，所以，焊剂的回收和输送不能做到同步。

4.2.2 带有自动跟踪的倒装储罐埋弧自动横焊装置

上述的普通型倒装储罐埋弧自动横焊装置，在实际使用中主要存在以下两个问题：

(1) 焊接对中不易控制，容易跑偏。因为施工时，环形轨道不仅要承担操作人员和自动焊设备的自重，而且还要作为储罐施工的工作平台，虽然轨道有足够的刚度，但因为较长，施工过程中，轨道水平度经常出现较大误差，轨道与所焊环缝很难保证平行，所以必须解决焊接过程的焊缝对中问题。图 7 横焊装置所采用的焊缝对中方式实际应用不太理想，一是画线有误差，二是焊工的注意力过度集中，易疲劳，经常出现跑偏现象。

(2) 焊接过程中, 焊剂没有实现回收/送给的自动循环, 容易造成焊剂浪费, 操作较麻烦。

为解决以上两个问题, 2004 年大庆石油管理局立项开展了“可自动跟踪的倒装储罐埋弧自动横焊机”研制工作, 目前已成功研制出了样机, 申报了国家专利。它与上述的普通型倒装储罐埋弧自动横焊装置的主要不同如下:

(1) 研制了接触式焊接自动对中装置, 实现了闭环控制。该装置成本低, 跟踪精度高, 使用简便、可靠。

(2) 改进了焊剂回收和送进系统, 实现了焊剂的辅助自动循环利用。

(3) 焊接机头和焊剂托架系统不仅可以上下调整, 而且也可以进行旋转调整, 运输和使用安全、方便。

4.2.3 正装储罐环焊缝的埋弧自动横焊装置

大型浮顶储罐由于壁板较厚, 焊接量大, 非常适合自动焊, 所以各施工单位普遍采用埋弧自动横焊工艺进行罐壁板环缝的焊接。目前所使用的焊接设备多数为国外进口。近年来, 国内一些公司开发出了一些不同型号的正装储罐环焊缝埋弧自动焊机, 但结构原理与国外设备基本相同, 而且焊接电源与送丝机构大都选用国外产品。浮顶储罐所使用的自动焊设备与倒装储罐用的自动焊设备在其工作原理和系统组成方面是相同的, 但结构上有以下主要区别:

(1) 行走驱动机构安装在行走框架的上部。焊接时, 焊接机架通过行走机构悬挂在罐壁板上端, 并以壁板上端作为焊接行走轨道, 焊缝对中容易。由于偏心作用, 焊剂托送机构将被紧贴在壁板上。图 8 所示为正装储罐环缝埋弧自动横焊示意图。

(2) 焊剂实现了回收/送给自动循环。由于所采用的负压式焊剂桶安装在机架顶部, 焊接部位在机架的下部, 两者距离很容易控制在 1.6m 以上, 所以焊剂回收器向上吸焊剂的同时, 筒内的焊剂可以依靠重力作用沿导管下落到焊剂托带上, 形成自动循环。而倒装储罐自动焊装置不易实现。

(3) 机架一般制作成伸缩式, 来适应不同的板宽需要, 且机架整体较倒装储罐自动焊体积大。

(4) 先焊接焊缝外侧, 外侧焊接结束后, 即进行内侧焊前处理; 采用同样的焊接方式焊接内侧。倒装储罐内侧则不能进行自动焊接。

为减少焊接机架的内外吊装次数, 提高焊接效率, 目前一些开发公司研制出了双面焊正装储罐环焊缝埋弧自动焊机, 一套装置, 内外各设置了一套焊接系统。

4.2.4 罐底板的埋弧自动焊

埋弧自动焊用于储罐底板的焊接, 主要是针对对接接头(包括对接式中幅板、对接式龟甲缝)、搭接接头(搭接式中幅板)和罐底大角缝(边板与壁板的角焊缝)等。

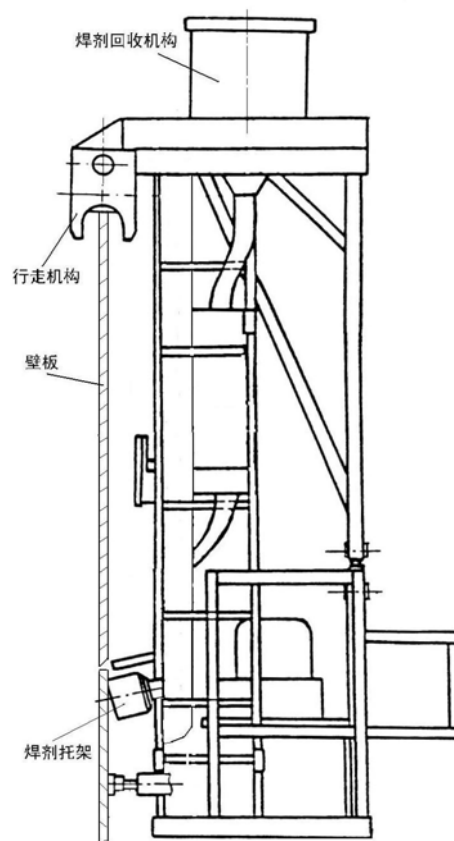


图 8 正装储罐埋弧自动横焊示意

罐底板对接接头的焊接有两种焊接工艺：一种是普通埋弧自动平焊，见图 9 所示。另一种是碎丝填充埋弧自动平焊，见图 10 所示。碎丝填充埋弧自动平焊在焊接前，先在坡口内放置一定厚度的碎焊焊丝，以提高焊接熔敷速度。

埋弧自动焊进行罐底板的焊接时，由于自动焊的热输入比较高，穿透力远远大于手工焊，虽然罐底板接头下都有垫板，但也很容易焊穿，所以自动焊接之前，必须进行手工焊封底。

罐底大角缝的埋弧自动焊接，其工作原理见图 11 所示。焊接小车依靠行走在罐底边缘板上的三个支撑轮支撑，依靠紧贴罐壁的两对磁吸附轮定位并驱动行走，进行焊接。搭接接头的罐底也可采用此方法进行焊接。

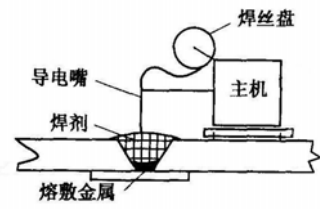


图 9 底板埋弧自动焊

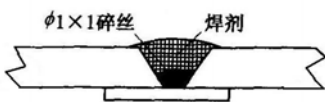


图 10 底板碎丝填充埋弧焊

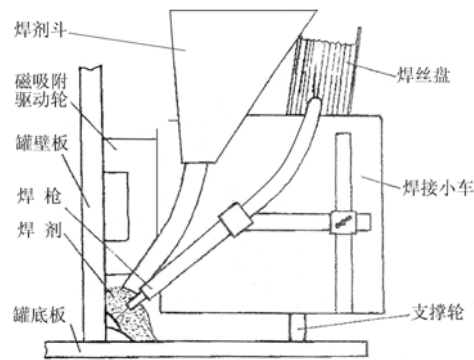


图11 储罐大角缝埋弧自动焊工作原理图

4.3 浮顶储罐的气电立焊

气电立焊是由普通熔化极气体保护焊和电渣焊发展而形成的一种熔化极气体保护电弧焊方法，焊缝一次成形，是一种高效焊接技术。它利用类似于电渣焊所采用的水冷滑块挡住熔融的金属，使之强迫成形，以实现立向位置的焊接。通常采用外加单一气体（如CO₂）或混合气体（如Ar+CO₂）作保护气体。在焊接电弧和熔滴过渡方面，气电立焊类似于普通熔化极气体保护焊（如CO₂焊，MAG焊），而在焊缝成形和机械系统方面又类似于电渣焊。图 12 所示为典型的气电立焊原理图，其焊接过程如下：

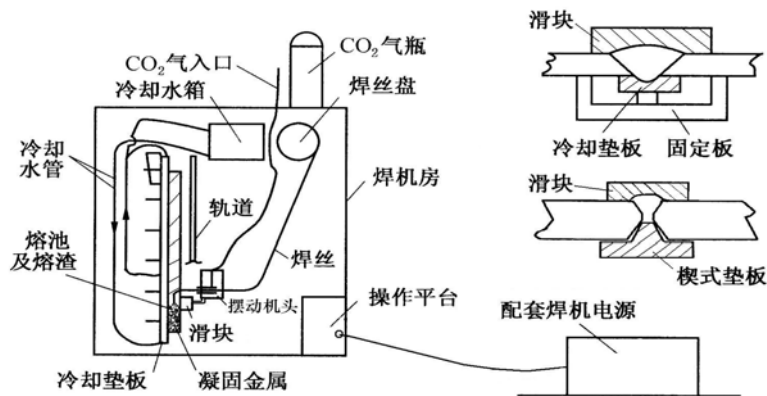


图12 纵缝气电立焊示意图

- (1) 焊接时，罐壁板的背面要垫上玻璃带和水冷铜衬垫，焊缝表面采用滑动水冷铜块；
- (2) 弯曲成形的焊枪深入到由滑动水冷铜块和水冷铜衬垫所围成的坡口内，并沿板厚方向进

行简谐振动，振动频率为 50~80 次/分往复；

(3) 焊丝采用 $\phi 1.6\text{mm}$ 的气电立焊用药芯焊丝；焊丝的干伸长度保持在 40mm 左右；

(4) 保护气体采用 100%的 CO_2 ，从滑动水冷铜块上部的套管内导入；

(5) 焊枪、滑动水冷铜块和简谐振动装置都随焊接的进行而同步自动上升。

气电立焊通常焊接的板材厚度在 12~80mm 最适宜。单面焊厚度一般在 25mm 以下，带摆动时可焊接到 35mm 左右，超过 35mm 应采用双面焊。当板材厚度大于 80mm 时，难获得充分良好的保护效果，导致焊缝中产生气孔、熔深不均匀和未焊透。大型浮顶储罐的壁板厚度一般在 10~40mm 之间，并且采用正装法，气电立焊非常适合。

目前，气电立焊在大型立式浮顶储罐建造中被广泛应用，主要焊接壁板的纵缝。它焊接生产率高，质量好，成本低。其焊接速度约是药芯焊丝气体保护自动立焊的 1.5 倍，是焊条电弧焊的 15 倍。气电立焊采用的坡口角度比之其他焊接方法要小得多，其熔敷效率相当高，非常节约焊材。相同条件下，其焊材的用量只有 MAG 焊的三分之一，是一种非常有潜力的焊接方法。

4.4 储罐的 CO_2 半自动焊

熔化极 CO_2 气体保护焊在 20 世纪 70 年代末期就开始应用于大型储罐的焊接，最初主要应用在角焊缝上。近年来，国内一些施工单位将 CO_2 半自动焊应用到储罐的罐底板、壁板、罐顶板、浮顶和附件等部位的焊接施工中，均取得了较好效果。不仅焊缝美观，质量好，变形小，而且减少了打磨量，效率高，在储罐施工中应进一步推广。

储罐的 CO_2 半自动焊主要采用实芯焊丝，成本低，但也有采用药芯焊丝的，以进一步提高焊接效率。但 CO_2 焊对风非常敏感，施工现场常年存在风的袭扰，因此野外使用时，焊接区域需增加防风设施。另外， CO_2 焊的辅助机具较多，搬运麻烦，增加了辅助工作量，特别是高空作业不适用。

4.5 拱顶储罐的 CO_2 气体保护自动焊

拱顶储罐壁板较薄，且采用倒装法安装，纵缝不适合 CO_2 气电立焊。近年来，国内一些施工单位尝试采用 CO_2 气体保护自动焊进行中薄板拱顶储罐壁板纵缝的焊接。与焊条电弧焊相比，可提高工效 2 倍，但应用不是很普遍。

CO_2 气体保护自动立焊机由焊接电源、自动送丝机、焊接小车及轨道、供气系统和行走机架等部分组成。各个部分合理地集成在焊接机架上，将机架进行整体封闭防风，并与环缝埋弧自动横焊机共用一条圆形轨道。操作时，机架置于轨道之上，并靠着罐壁板沿轨道行走至被焊立缝处，然后安装焊接轨道，并使之与纵缝平行，在焊接轨道上安装焊接小车，启动焊机，进行焊接。焊接小车在立式储罐上的安装结构如图 13。立焊机操作室如图 14 所示。

在实际使用时，焊接电源和气瓶可以安置在操作室内，也可安置在专门制作的电焊机房内，并配置配电箱和漏电保护装置，但连接焊接电源与机架之间的焊接和控制电缆的长度应达到 50m。

(1) 焊接电源可选用 CO_2 气体保护焊专用电源或多功能电源，送丝机应选择推丝式送丝机。

(2) 焊接小车是实现自动焊接过程的驱动机构，它安装在焊接轨道上，带着焊枪沿罐壁上下运动，是实现罐壁自动立焊的重要环节之一。核心部分是行走机构和焊枪摆动调节机构。它的焊枪

姿态（即焊枪的位置）应能在立式储罐的环向、轴向、径向上调整，还应能在立式储罐横截面和纵截面内调整角度。摆动机构可使焊枪按直线形、锯齿形、梯形、矩形等波形摆动，通过对其参数调节可实现各种摆动方式，以满足焊接工艺的要求。焊接小车应体积小、重量轻、操作方便。目前，国内外开发出的多种型号的焊接小车均可用于储罐纵缝的焊接。

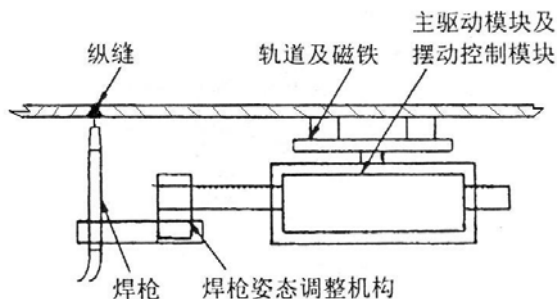


图13 焊接小车及轨道安装示意（俯视图）

(3) 轨道是通过某种方式（如永久磁铁、电磁铁）吸附在罐壁上供焊接小车行走和定位的专用机构。轨道的结构和质量直接影响到焊接小车行走的平稳程度和位置的准确性，即影响到焊缝质量及外观成形。可采用铝合金刚性轨道。

(4) 立焊机操作室可以自行设计制作。要做到既要保证人员和设备的安全，又要防风，以保证焊接质量。

4.6 药芯焊丝 MAG 气体保护焊

药芯焊丝富氩保护焊可以用在焊接工作温度 $-33^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$ 左右的大型低温储罐，由于受焊接材料及热输入的限制，尚未见到有关阐述采用该方法进行低于该温度工况储罐的焊接的资料。对于工作在 -60°C 以下的储罐。如采用9Ni钢建造的储罐，自动焊的方法首选MIG焊或自动TIG焊。

富氩保护气的组成，一般为 $80\% \text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$ ，提高氩气的混合比例，可相应提高焊缝的低温冲击性能。

4.7 储罐建造的其它焊接技术

有些用于储存液态化工产品的内浮顶储罐，为了防止原料污染，储罐建造后，还要进行储罐内壁不锈钢衬里或有色金属材料（如铝）防护等。薄壁（ $0.5 \sim 2\text{mm}$ ）不锈钢衬里的安装主要采用焊接方法，常用的方法有：焊条电弧焊、TIG焊和MIG焊等。铝金属的防护层可采用热喷涂的方法，实际应用有：线材火焰喷涂和电弧喷涂方法等。

5 储罐焊接技术发展趋势

5.1 储罐建造的发展趋势

最近三四十年来，储罐向大型化发展的趋势已成定局，1962年美国首先建成了 10万m^3 浮顶储罐，1967年在委内瑞拉建成了 15万m^3 的浮顶储罐。1971年日本建成了 16万m^3 的浮顶储罐，其直径

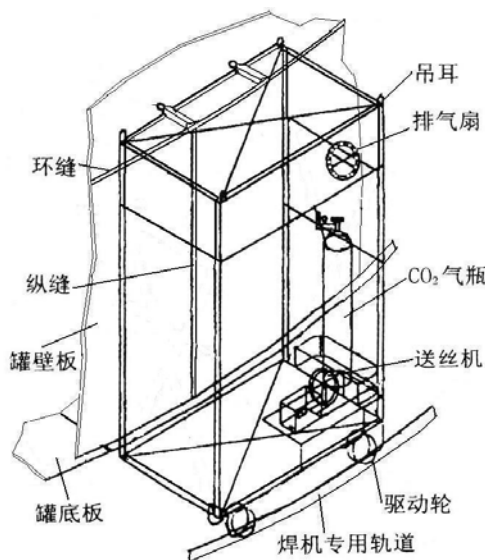


图14 立焊机操作室示意

达 109m、高 17.8m，沙特阿拉伯建成 20 万³巨型储罐，其直径达 110m、高 22.5m。我国自 1985 年从日本引进 10 万³浮顶储罐的设计和施工技术并在秦皇岛建造之后，在全国各地相继建成 10 万³大型储罐近 30 台；于 2003 年在茂名石化公司建成两座 12.5 万³浮顶储罐，目前在仪征已开始建设国内最大的 15 万³原油储罐。此外，储存石油液化气和天然气（液化）的低温储罐也是储罐建造的发展方向，在国外已较普遍应用，我国目前还是处于刚起步阶段。

大型储罐建设的经济性已经成为人们日益重视的课题，根据有关资料分析：储罐容积越大，单位容积的钢材耗用量指标越低，建罐投资相应节省，同时罐区总占地面积也越小。但最为经济的是 12.5 万³浮顶储罐，15 万³和 10 万³次之，容积 5 万³储罐的经济性最差。从目前我国现有储罐来看，绝大部分原油储罐的容积不超过 5 万³，因此，我国的储罐必须向大型化方向发展，应以 12.5 万³为首选对象，尽可能避免建造 5 万³及其以下的小容积原油浮顶储罐。

建造大容积储罐，需用高强度钢板。目前我国建造 5 万³及以上储罐所使用的高强钢板，大多是日本产 SPV490Q 钢，极少部分是国产钢材。国产钢材主要是 16MnR，因其强度较低，使 5 万³浮顶储罐下部第一节壁板厚达 34mm，给大型储罐的建造带来了很大困难。由武汉钢铁设计院、北京燕山石化公司、合肥通用机械厂、中国石化北京设计院组成的攻关小组，对 07MnCrMoVR 钢进行研究开发，并用于北京燕山石化公司 3 台 10 万³浮顶储罐。今后，为了满足我国大型储罐建设发展的需要，应进一步研制高强度钢材，提高国产高强度钢材的质量和产量。

5.2 储罐焊接技术的发展趋势

根据我国石油及化工企业的发展需求，今后储罐的发展方向是大容积、国产化、自动焊（包括与国产钢材、进口钢材焊丝匹配以及焊接设备）。在储罐施工方面，尽管我们根据日本及有关国家的规范，结合我国具体情况，首创了各种大型储罐的施工方法，近几年我国的储罐施工队伍也不断发展，但总的来看，目前我国的储罐建设，不论是储罐的容积、数量还是国产化水平，均处于起步的初级阶段。

（1）埋弧自动横焊技术国内经过十多年的攻关，已取得了突破性进展，单丝埋弧焊技术已基本成熟，操作简单，焊接质量稳定，将在大型储罐焊接中发挥重要作用。今后，要开展双丝或多丝埋弧横焊技术的研究，进一步提高焊接效率。双丝埋弧焊应用于大型储罐焊接的历史很短，实际应用的例子很少，应进一步进行研究。

（2）在大型储罐的自动焊设备与焊材方面，国产化程度还不够高，特别是与引进的高强钢板相匹配的自动焊焊丝，尚依赖进口，价格高，这是今后我国建造大型储罐所必须解决的课题。

1）尽快使储罐自动焊机国产化，相关焊机制造业厂商应该将研制储罐自动焊机作为一种重要的结构产品来发展。

2）尽快使储罐自动焊配套焊材国产化，相关焊材制造业重点开发适应不同钢材焊接的 CO₂ 气保药芯焊丝、自保护药芯焊丝、实芯焊丝、焊剂等，并提供相应的指导工艺参数。

（3）用于纵缝焊接的气电立焊的研究，国内尚处于起步阶段。应研究开发用于储罐纵缝焊接的气电立焊技术，实现国产化，对打破国外技术垄断，降低工程成本，满足储罐建设的需要具有重

要意义。此外，应解决目前所采用的气电立焊的焊机结构改造，使之能适用于储罐倒装施工工艺，进一步提高拱顶储罐的焊接质量和建造速度，缩短施工周期，提高经济效益。

(4) 倒装储罐埋弧自动横焊的研究和应用历史不长，还有许多问题需要解决，如：

1) 应进一步研究带有自动跟踪功能的埋弧自动横焊机，适应倒装储罐的焊接特点要求。采用的跟踪方法和装置，要做到成本低，使用方便，跟踪可靠。

2) 应进一步研究焊剂自动循环系统，在不增加输送管长度的情况下，实现焊剂的回收与输送同步。埋弧自动横焊机均配有焊剂回收系统，其工作原理是依靠重力作用来输送焊剂，依靠负压作用来回收焊剂。但这种传统系统要做倒焊剂的回收和输送应能同步进行，则焊剂桶内必须要有一定数量的焊剂，以保证焊剂输送口不受负压作用的影响，如果焊剂桶内焊剂较少时，桶内焊剂由于负压作用，会处于悬浮状态而影响焊剂的顺利输送。为保证焊剂的顺利输送，目前常用的方法是增加焊剂输送管的长度，来增加管内焊剂的压力，克服负压作用的影响。这种方法对于倒装储罐施工，自动焊机头处于机架的上部，靠增加焊剂输送管长度的方式已经不可行。因此，可以研究应用一种新型的焊剂回收系统，可以根据焊剂桶内焊剂的多少，自动调节回收的吸力，使焊剂的回收和输送保持最佳的动态平衡，同时不需要调整焊剂输送管的长度，实现自动循环。

3) 应开展研究具备双向焊接功能的横焊机和焊接工艺。由于倒装储罐施工中，焊接机头、控制箱、焊剂桶、焊丝盘等均位于自动焊机架的上部，会导致自动焊机重心的提高而影响快速回车的稳定性。研究具备双向焊接功能的横焊机和焊接工艺，就可避开快速回车操作，同时能缩短工时，减少自动焊辅助人员的拖拉焊接电缆的工作量。

(5) CO₂半自动气体保护焊接技术相对于传统的焊条电弧焊无疑有着明显的优势，但这种方法要大面积推广应用在室外，还有许多问题需要解决。一是辅助配套机具要轻便、灵活，配线要有足够的长度。根据不同的焊件或部位，要研制相应的防风辅助装置等。可以预测，CO₂气体保护焊接技术在石油化工等焊接领域具有较好的应用前景。

(6) 药芯焊丝的气体保护焊将是大型储罐建造的发展方向。在低温储罐焊接中，采用自动焊有利于保证热影响区低温冲击性能的稳定。

(7) 自保护药芯焊丝半自动焊成功用于大口径长输管道的焊接。这种方法焊接效率高，质量好，抗风能力强，非常适合野外环境下的焊接作业，也是今后大型储罐建造应深入研究应用的焊接方法，重点解决的问题是焊丝的国产化和降低焊接材料成本。焊丝的价格高是目前储罐焊接领域没有推广应用这种方法的关键所在。

总之，在我国大型储罐建造中，焊条电弧焊还将长期存在，自动焊是今后的发展方向。国外大型储罐的建造已基本实现机械化作业，我国赶上发达国家的水平还有很长的路要走。