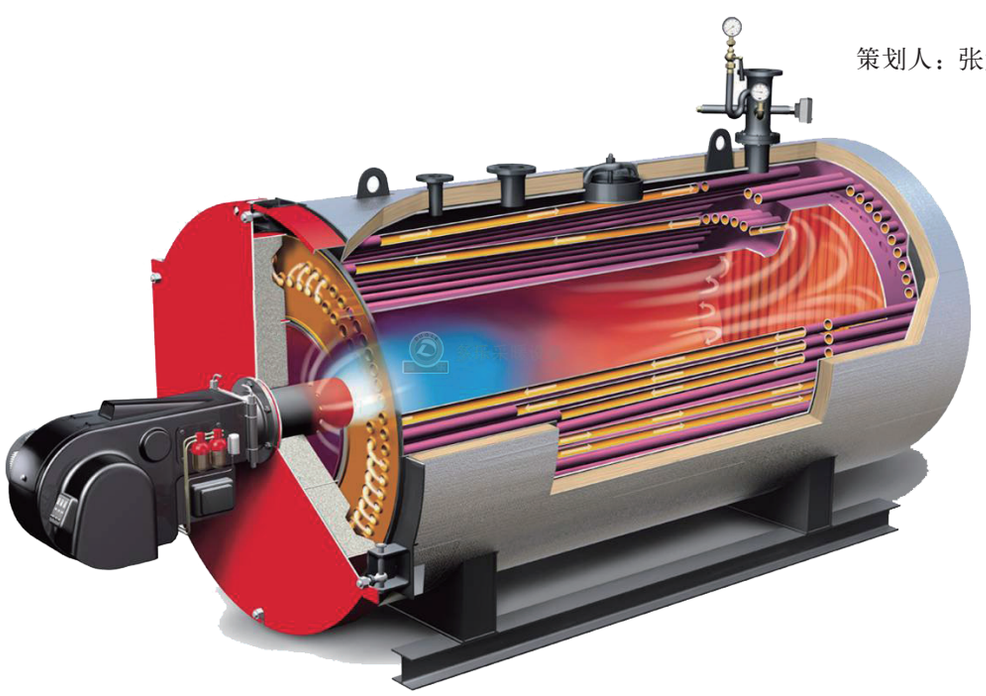
压力容器高效焊接技术

压力容器在石油化工、能源工业、制药、军工、航天等领域都有着重要的应用。近年来，伴随着自动化、智能化焊接与切割装备的发展，压力容器制造也相应提出了转型升级的要求。如何降低劳动强度、降低生产成本、提高焊接质量、提高经济效率，是压力容器生产制造企业亟需面对和解决的重要课题。

技术和装备的转型升级从来不是一蹴而就的事，压力容器因其用途、参数、材料、部件部位等不同，生产制造手段不尽相同。本期策划以“压力容器高效焊接技术”为主题，邀请了核电、石油化工等压力容器制造企业的负责人、专家、工程师等针对企业和产品特点，就压力容器高效焊接技术的现状和发展趋势进行了论述，供行业同仁参考和探讨。

期待您的关注！

策划人：张兰





装备中国　创造卓越

——从中国二重压力容器的制造能力浅谈压力容器制造的发展趋势

倪德重

1. 概述

压力容器是我国重要的基础工业之一，在石油化工、能源工业、制药、军工、航天等领域都有着重要作用，是体现我国工业水平的重要标志。近年来我国压力容器行业取得飞速发展，压力容器制造也随之成为中国二重主打板块和新的利润增长点。中国二重核电石化事业部以承制重型核电、石化容器为主导产品，依托各类自动化程度较高的焊接设备、高水平焊接作业队伍、高素质技术团队，不断向用户输出质量可靠的压力容器产品。

2. 压力容器发展趋势

随着科学技术的不断发展，压力容器制造技术的水平也越来越高，发展趋势体现在以下几个方面：

（1）压力容器向大型化发展　随着经济的增长和制造技术的进步，用户对压力容器设备生产能力提出更高要求，压力容器大型化能够降低投资，节约能源，降低生产成本，提高劳动生产率和经济效益。中国二重承制的锻焊容器最大壁厚为530mm，板焊设备壁厚最大为204mm，其中扬子石化超大直径超大壁厚加氢反应器国产化攻关研发项目单台重量达1 050t，直径为5 400mm，锻件壁厚340mm，代表了当今反应器制造技术的最高水平。为了适应大型压力容器产品的制造，制造装备也得到了极大发展。目前，二重行车具备1 600t重件起吊能力，160MN/125MN水压机（见图1、图2）最大锻件重量500t、最大环形件直径7 500mm，数控三辊卷板机最大冷卷能力为厚度180mm、板宽4 000mm、δ_s=360MPa，9～12MeV直线加速器透照厚度为76～450mm（见图3~图5），无不体现中国二重在极限装备制造领域的突出优势。

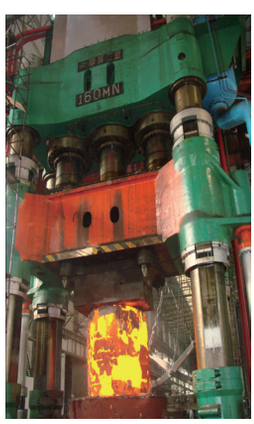


图1　160MN水压机

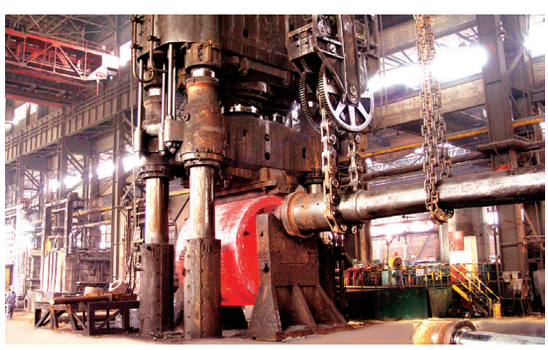


图2　125MN水压机

注：加氢反应器筒体锻件材料：2.25Cr-1Mo；尺寸：ϕ5 050mm×ϕ4 450mm×3 500mm；重量：123t。



图3　联合数控加工中心

注：ϕ260mm数控落地镗床：立柱行程28 000mm，主轴箱行程8 000mm；数控16m立车：最大车削直径16m，最大车削高度12.5m，最大承重600t。



图4　数控三辊卷板机

注：最大冷卷能力：厚度180mm，板宽4 000mm，δ_s=360MPa。



图5 局部热处理炉

注：30m长度以内使用台车式热处理炉。

（2）压力容器用钢发展 由于压力容器的大型化以及生产过程中的工艺条件越来越苛刻，导致对压力容器用钢的要求日益严格，促使材料技术不断发展。冶金工业整体技术水平和装备水平的提高，极大地提高了材料的纯净度，提高了压力容器用材料的力学性能指标，提高了压力容器的整体安全性。中国二重具备一次性冶炼1 000t级优质钢液、可提供700t级优质铸件、650t真空钢锭、锻造400t级优质锻件的能力。近年来研发出超纯净钢冶炼和铸锭技术，严格控制钢中$w_P \leqslant 0.004\%$、$w_S \leqslant 0.001\%$、氧$w_O \leqslant 15ppm$（$1ppm=10^{-6}$）等有害元素和夹杂物的含量，冶炼和铸锭水平已经达到世界先进水平（见图6）。掌握了防止特大型钢锭凝固过程的偏析方法，确保特大型核电、容器用钢锭的均质性。

3. 焊接自动化技术的发展和应用

自动焊接技术使大型容器的焊接实现了自动化，提高了焊接质量和效率，降低了工人的劳动强度。焊接自动化技术包括硬件因素和软件因素。硬件因素主要指压力容器自动焊接设备和方法；软件因素主要指计算机技术、电子技术、自动控制技术以及信息技术等进入压力容器焊接领域而形成的焊接控制技术、人工智能技术及专家系统等。

（1）自动焊接设备 压力容器焊接过程中，涉及到多种焊接设备的应用，如埋弧焊机、电渣焊机、氩弧焊机、CO_2气体保护焊机等，而逆变焊机以其高效、节能、工艺性能优良、焊缝成形美观、抗拉强度高及电磁干扰较小等优点，在国内压力容器制造领域应用前景十分乐观。

（2）自动化焊接方法 埋弧焊是目前压力容器制造中最常用的焊接方法之一，其特点是生产效率高、焊接质量高且稳定、焊接表面美观平整、劳动条件良好等。而随着压力容器壳体厚度的增加，坡口的体积也随之增加，单位长度上的焊缝金属填充量急剧增加，不仅焊接效率降低，而且焊材消耗量明显增加，因此发展了窄间隙埋弧焊。与宽坡口埋弧焊相比，窄间隙埋弧焊具有坡口窄、焊材消耗量少、焊接时间短、热输入量低、焊接变形和焊接应力小等特点，不仅降低了本体应力开裂倾向，而且实现了低成本、高效率、高质量焊接。

窄间隙埋弧焊的自动化程度较高，其控制系统已经实现了焊接参数的设置、实时检测、动态显示等，并设有高度和横向自动跟踪系统，提高了焊接参数的稳定控制程度，保证了焊接质量（见图7）。该工艺方法主要应用在本体厚度＞50mm的容器产品筒节及封头的环、纵缝焊接，壁厚较大的产品开I形或U形坡口，间隙在28mm左右。我厂近年成功实施了对深度530mm，U形坡口最大间隙32mm的容器产品的窄间隙埋弧焊。

双丝窄间隙埋弧焊机是厚壁压力容器的专用焊接设备，具有焊接效率高、消耗焊接材料少、



图6 400t以上超纯净钢锻件钢锭的浇注

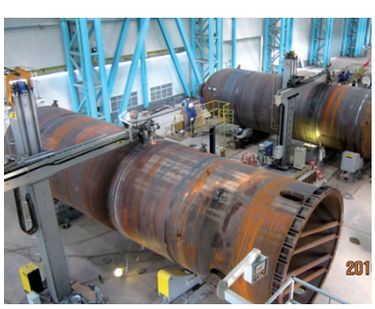


图7 窄间隙埋弧焊作业

焊接质量可靠、焊接自动化高等优点，所焊接的焊缝坡口宽度一般为22～24mm（坡口底部），坡口角度（总角）1°～2°。

中国二重使用的双丝窄间隙埋弧焊机采用的是两根焊丝纵向串列的布置形式，使用不等径前丝、后丝，两根焊丝共同形成一个熔池，其中一根焊丝（弯丝）指向侧壁，确保侧壁熔合，因此热输入量低，接头的力学性能，特别是热影响区的韧性比常规埋弧焊提高一倍。双丝设备的焊接效率比单丝窄间隙埋弧焊提高一倍多，焊丝熔化速度为9～10kg/h，而且接头力学性能不低于单丝窄间隙埋弧焊，是容器产品主体焊缝焊接方法的发展趋势。

马鞍形自动焊机可实现接管与壳体、封头相贯焊缝的埋弧焊接（见图8、图9）。采用该方法焊接时，确定合理的坡口形式、控制接管的装配精度、选择合理焊接参数能获得性能优良的焊接接头，降低生产成本，提高生产效率。而对于特殊结构的斜交、偏交相贯接头，需借助计算机辅助计算出运动轨迹，选用多轴联动马鞍形焊机实现焊枪的空间曲线运动，得到合格焊接接头。

带极堆焊是一种效率极高的堆焊方法，分为：带极埋弧堆焊和带极电渣堆焊（见图10）。由于采用了薄板式宽电极和高的焊接电流，故在稀释率和熔敷速度上比丝极埋弧焊有了长足的进步，在压力容器行业得到迅速发展和较普遍的应用。焊带的宽度也从窄带向90mm、120mm、150mm的宽带方向发展。

弯管内壁堆焊（见图11）可使用弯管内壁自动堆焊机进行，采用CO_2药芯焊丝堆焊工艺，堆焊采用沿弯管内壁纵向母线排列焊道的方式。此方法可应用于弯管曲率半径450~750mm的内壁堆焊，较高的自动化程度降低了劳动强度，提高了焊接效率，大大提高了焊接质量。

4. 焊接材料的发展

随着压力容器用钢的迅速发展，高纯净度、高性能的压力容器用钢得到大量使用，对压力容器焊接材料提出了更高的要求。目前，压力容器行业使用的高技术和高性能的焊接材料主要依赖进口，国产焊接材料主要应用在非受压元件的焊缝。经过国内各大焊材制造厂多年努力，国产焊材在技术指标、质量控制、类别品种方面逐步缩小与进口焊材的差距，也在逐步赢得设计院和制造厂的认可和信任。中国二重加钒钢容器主体焊接材料年使用量为200t左右，堆焊焊材用量为600t左右。



图8　容器筒身接管的马鞍自动焊接



图9　全封闭容器内部异形接管的马鞍焊接



图10　筒体内壁不锈钢堆焊

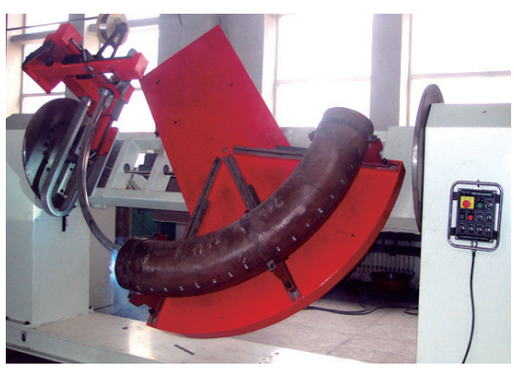


图11　90°弯管内壁堆焊

5. 结语

中国二重坚持大力加强企业自主创新，加强技术改造和企业管理，在推动极限石化容器及其他大型石化容器国产化攻关中发挥着重要作用，为中国从装备大国走向装备强国做出不懈努力。

作者简介：倪德重，中国二重重装股份公司总经理助理，二重核电石化事业部总裁、党委副书记，二重镇江公司执行董事、经理、法人代表。

MW 20150729