

石化关键装备用金属材料的开发和应用进展

张汉谦 刘孝荣 陆匠心

(宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要 本文简单介绍石化装备和所用金属材料,回顾了石化装备国产化历程,以对大型原油储罐、乙烯球罐用钢、临氢设备用钢、PTA 装置用材等为例,介绍所用材料的开发和应用进展,提出了目前形势下的大型石化关键装备国产化工作思路的建议。

关键词: 石化设备 金属材料 国产化 进展

1.前言

从广义上讲,石化行业包括石油和天然气开采业、石油加工及炼焦业、化学原料及制品制造业、化学纤维制造业、橡胶制造业、塑料制造业等。石化行业是我国经济的支柱产业。在国家经济发展和提高人民生活水平上有着举足轻重的地位,石油被称为“工业的血液”,化工产品称为“工业的粮食”。我国已经成为石化产品的生产和消费大国。2008年,我国原油加工量为3.42亿吨,成品油产量2.08亿吨和乙烯产量为1026万吨。在“十一·五”规划中,到2010年,原油加工能力达到3.7亿吨,轻油收率达到74%,2020年达到5亿吨,轻油收率76%,实现成品油满足国内需求;乙烯生产能力达到1700~1800万吨/年,产量1450万吨,乙烯自给率达到58%,2020年达到2600万吨,自给率提高到60%。

石油、天然气、煤等化工原料,通常要经过钻探、开采、输送、储存、加工、转化、产品储存等多个环节,每个环节又通过不同工艺和特定的装备来完成。因此,石化产品种类繁多,石化加工设备种类同样众多。石化的生产靠工艺,工艺靠装备完成,装备主要又由满足运行工况的金属材料制造而成。依产品的不同,所用装置按照其生产工艺、中间或最终产品的特点,所用的金属材料的又明显不同。所用材料不仅要满足设备的服役条件,还要满足装备的制造工艺需求。本文以大型原油储罐、临氢设备用钢、大型乙烯低温球罐用钢等石化关键设备所用的金属材料进行归纳和总结,说明其开发和应用进展,以期为这些设备进一步大型化和其他关键设备用金属材料的国产化提供有益的借鉴。

2.石化装备种类

石化装备通常分为专用设备、通用设备和仪器仪表。石化专用设备包括工业炉、反应设备、换热设备、塔器、储运设备、以及专用机械，如过滤机械、分离机械、干燥机械、造粒机械和包装机械等。石化通用设备包括气体压缩机组、泵、阀门等。仪器仪表包括控制仪表、测量仪表、在线分析仪器等。

按生产工艺流程中工艺装置来分，包括单元设备、主工艺管道系统、蒸汽、压缩空气和水等管道系统，电控系统、自动化仪表控制系统、以及其他辅助系统等。

也可按关键工序的装置功能来分，如炼油工序的常减压蒸馏装置、催化裂化装置、催化重整装置、加氢裂化装置、焦化装置等。百万吨级大型乙烯成套装置 80 万~100 万吨/年乙烯裂解装置、40 万~60 万吨/年聚乙烯装置、40 万~60 万吨/年聚丙烯装置，以及辅助配套设施如空分装置、热电站、空气压缩站、水循环系统、污水处理系统等。

石化设备和仪器的特点是成套性和配套性强，品种多、规格杂、通常需要单件小批量生产。

目前，我国将锅炉、压力容器和承压管道统称为承压类特种设备。石化专用和通用设备，多数属于承压设备，其设计、选材、制造、安装、检验、使用、管理等需要严格按照有关法律、规程和标准执行。对于大型石化装备，还必须考虑运输和吊装、现场组焊和检验等。

3.石化设备所用的金属材料

石油、石化设备和装置，主要在高温、高压、低温、易燃、易腐蚀的条件下服役，这些特点就决定了石化不同装置要采用不同的材质的材料来制造。既有金属材料，也有非金属材料。金属材料既包括黑色金属，如铸铁、碳钢、低合金钢、不锈钢，又包括有色金属，如镍和镍合金、铜和铜合金、铝及铝合金，还包括活性金属，如钛及钛合金、锆及锆合金、钽及其合金等。对石化设备所采用金属材料，涉及到不同的形状板材、棒材、锻材、丝材等。这些材料由钢铁企业和设备制造厂生产，涉及到冶金行业的各种主要生产工艺，如铸造、锻材、轧材、烧结。根据材料的特性，有的材料需要整体热处理、表面处理改性处理，或将不同金属材料复合在一起。

从温度来讲，不同石化工艺的介质温度从-196℃超低温到 1100℃高温。对于-196~-20℃低温，主要选用不锈钢、Ni 合金低温钢、低合金低温钢等；对于-20℃~99℃常温区间，通常选用低合金钢、碳钢（热轧、正火、调质钢板）等；对于 100℃~

400℃中温区间，通常选用 Cr-Mo 耐热钢、不锈钢；对于 400℃~800℃高温区间，通常选用高合金 Cr-Mo 钢、Cr-Ni 钢不锈钢等；800℃以上超高温，通常选用镍基高温合金。

石油化工和化工装置要在高温、高压、低温、易腐蚀条件下长时间运行。大型炼油、石化装置的连续生产状态要求达到 3~5 年才能大修。这对所用的金属材料也提出更高要求。

石化装备设计时，选择材料要结合设备的服役环境和运行条件，考虑介质、服役温度、压力、流体速度、材料的加工工艺性（重点使材料焊接性和消除焊接应力热处理特性）、成本（材料采购成本、加工工艺成本等）。当出现多种材料同时可以满足设备的服役要求的情况，综合考虑材料的成本、加工难易、设备寿命等。

目前，国内钢铁企业经过几十年的发展，从石化装备所用金属材料种类以及加工工艺来讲，已经完全可以生产。现在主要问题是金属材料的系列化上不能完全满足石化装备的需求，尤其是随着石化设备大型化，所用金属材料的单重、厚度、强度、腐蚀性能等不能满足需求设备的制造要求。冶金企业解决材料的单重、厚度等问题，也需要通过设备和工艺改造才能实现。

焊接材料作为设备制造时必不可少的工艺材料，起着举足轻重的作用。有些关键设备的国产化进程中，最后的难点往往就是焊接材料。在大型设备难以整体热处理时，焊缝金属作为铸态组织直接服役，其均匀性和性能决定着接头的服役寿命。

对于石化通用设备，设备制造商与冶金企业联合设计选材，提高设备的可靠性和运行周期，对于重大关键设备，设计、制造企业，向冶金企业交底，生产出满足设计要求的优质金属材料，保证关键设备的可靠性。对于关键重大装备，科研、设计、制造和业主单位，与冶金企业联手攻关，加速国产化。期间，也要考虑解决好石化单件设备用材量小，不适合冶金企业批量大生产问题。

4.石化重大装备的国产化促进着金属材料开发和应用

自二十世纪八十年代早期，为了促进石化工业的发展，在国务院、政府部门、装备制造企业、石化企业、设计、科研院所、高校等通力合作下，在石化成套装置引进的基础上，不断地消化和创新，致力于石化设备的国产化，取得了令人瞩目的成绩。经过近六十年的积累和发展^{[1][2][3][4][5]}，我国已经初步建立了较完善的石油化工和化工

设备设计、制造、运行和改造经验，尤其是近二十年来，大型石化关键设备的国产化不断取得标志性成就。

我国大型炼油装备的国产化率已经达到 90%左右，化工设备国产化率已经达到 70%左右。我国石化装备总体上与国外的先进水平相比仍存在一定的差距。主要是石化装备的可靠性和稳定性还有待提高，石化装备的集成能力还较差，专业化和系列化程度较低；装备制造业的发展跟不上石化技术发展及装备大型化的要求，对引进技术和装备的消化、吸收、再创新能力不足等^[6]。

石化行业多项关键设备，如乙烯成套装置等，一直处于引进——国产化——再引进——再国产化的循环中。为此，国内有识之士不断地呼吁实现石化重大装备的国产化^{[6][7][8][9][10]}，并全力推进国产化进程^{[11][12]}。自 1983 年以来，国家和行业也适时推出了相关方案 and 政策措施。1995 年前，政府牵头，企业联合攻关，推进着关键设备用金属材料的国产化。如临氢设备用 Cr-Mo 钢锻件实现了国产化。1500 立方米大型乙烯球罐 CF-62 钢板的国产化等。1995 年后，行业牵头，企业间主动参与、配合、协作，推进着关键设备和装置的国产化。如 30 万吨乙烯装置改造和国产化为龙头的石化装备，实现了 30-45 万吨乙烯装置的国产化。近年来，更是从规划和政策上，加强不断地推进大型成套关键设备的国产化。如《国务院关于印发实施〈国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）〉若干配套政策的通知》、《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》（国发（2006）8 号）、2009 年 5 月国务院发布的《装备制造业调整和振兴规划》等。

在推进大型石化装置国内制造过程中，也促进着部分金属材料和焊接材料的国产化。

在追求低成本推动下，随着工艺技术、工程技术和设备制造技术的进步，石油化工装置加速趋向大型化和规模化¹³。如委内瑞拉的帕拉瓜炼油中心的炼油能力达到 4700 万吨/年。石化装置的大型化，不是简单的设备外形的放大。需要重新设计、计算，考虑多种因素，如选材、加工制造、检验、运输、现场安装、检验等。这要求掌握大型化装置的设计技术，搞清楚现有的制造装备和工艺技术能否满足装备的制造要求，了解所用材料的研发和生产能力等。石化装置的大型化，对材料的单重、厚度和性能均匀性等提出了更为苛刻的要求，增加材料的生产难度，尤其是所用大单重、大壁厚的锻件和板材，以及特殊材质材料等生产。装置大型化后，原来已经国产化的金

属材料必须提出新的开发目标。尚未国产的装置用金属材料国产化难度进一步加大。

根据以往重大装备的国产化经验，有效的协调和组织是加快国产化进度的关键。2004年7月，国家发改委牵头，中石化组织，相关企业、研究单位、行业协会、业主和施工企业共同参与，2006年底基本上实现了10万立方米大型原油储罐用高强度钢板的国产化，是一个成功例子。在此基础上，宝钢与国内设计、业主等密切合作，实现了15万立方米大型原油储罐钢板和建造技术的国产化。

5. 几种石化关键设备用金属材料开发和应用进展

5.1 大型原油储罐用高强度钢的开发和应用进展

原油储存一是应对能源危机，保证石油和供应的前提。二是满足成品油和石化产线连续生产要求。2004年前，我国原油储备主要是企业生产性用油储备。2004年7月，国家正式启动石油战略储备计划，首期建造164台工程容积10万立方米的大型钢制浮顶原油储罐。储罐的罐底边缘板和下部数圈主要采用高强度钢板制造、上部壁板和浮顶板采用低合金钢或碳钢钢板和热卷板。对于10万立方米大型原油储罐来说，关键金属材料就是高强度钢板。

日本大型原油储罐施工中，引进高效率的气电立焊，提高了储罐焊接效率，使储罐主体施工周期从一年缩短两个月以内。为此，日本钢厂开发的高强度钢板具有了耐大热输入焊接的高强度钢板SPV490Q。我国1986年从日本引进10万立方大型原油储罐的设计和建造技术，其所用的高强度钢板主要从日本进口。武钢2000年开发了与SPV490Q相当的钢板，首次在国内采用该钢板建造了5台10万立方米原油储罐。

为了满足国内石油储备迅速发展的需要，2004年7月，国家发改委组织国内石化设计、研究、施工、业主和国内钢厂、焊材企业等单位，开展联合了大型原油储罐用高强度钢板国产化攻关。到2006年底，武钢、舞钢、鞍钢、宝钢、济钢等具备了大型原油储备用钢板的生产资质，基本上实现了10万立方大型原油储罐国产化。目前，国内规模建设10万立方米原油储罐用高强度钢板几乎全部采用国产钢板。到2007年底，宝钢开发和生产的大型原油储罐用大热输入焊接B610E高强度钢板，以裂纹敏感系数低，力学性能指标高，实物力学性能稳定，耐大热输入优良、表面质量和板型好、工程应用稳定，成为国内最大的高强度钢板供应单位。

2007年3月，宝钢开发成功15万立方米原油储罐用高强度钢板。中石化协同下，

SEI、合肥通用机械研究院、中石化徐州管道储运公司、中石化第十建设公司、中石化宁波工程公司等密切配合，实现了 15 万立方原油储罐用高强度钢板和建造技术国产化。2008 年底，上海白沙湾 4 台 15 万立方米原油储罐全部采用宝钢钢板建成，并投入运行。进入 2009 年，国内的 15 万立方原油储罐陆续选用宝钢钢板建造，实现替代进口。

目前，大型原油储罐用焊接材料，除高强度钢板配套的气电立焊焊丝外，其它焊丝已经实现国产化和工程应用。国内已有企业试制出气电立焊焊丝，正在进行工艺适应性评价。

目前，10 万立方米浮顶式原油储罐已在我国批量建设，15 万立方米浮顶式原油储罐已有国产钢板的工程业绩，并在扩大工程业绩。当前，我国应尽早开展 17.5~20 万立方米大型原油储罐的设计、高强度钢板的试制和生产，形成自主知识产权，建设示范工程。

5.2 大型乙烯、丙烯球罐用高强度钢板

乙烯是重要的炼化产品。乙烯工业是国民经济重要的基础原材料产业。乙烯的生产能力被看作是一个国家石化实力的体现。百万吨级大型乙烯成套装置基本配置有 3 套主要生产装置，即 80 万~100 万吨/年乙烯裂解装置、40 万~60 万吨/年聚乙烯装置、40 万~60 万吨/年聚丙烯装置。乙烯装置中的介质温度从 1100℃~-170℃，其主要反应过程中的物料以烃类物为主，介质具有可燃性强、腐蚀性弱的特点。因此，选用的金属材料以碳素钢、合金钢、不锈钢为主。服役温度在 400℃以下的部件用碳素钢，丙烯管线(-40℃)用低温碳素钢，乙烯管线(-101℃)用 3.5Ni 钢。裂解气管线采用 TP304H 不锈钢，500℃左右的工艺物料和高压蒸气管线应采用 P11 材料的钢管。

乙烯（丙烯）球罐作为关键设备之一，所用的金属材料要求耐-50℃低温的高强度钢板。2007 年前，国内大型炼油、乙烯项目等用乙烯、丙烯球罐主要采用进口材料，如日本钢板 JFE-HITEN610U2 建造。2005 年，茂名石化用武钢产 530MPa 级 15MnNiNbR 建成一台丙烯球罐。2006 年 6 月，宝钢开发成功球罐 610MPa 级用 B610CF 系列低焊接裂纹敏感性高强度调质钢，服役温度分别为-20℃、-40℃和-50℃，并通过全国锅炉压力容器标准化技术委员会的技术评审。2007 年 9 月，中海油惠州炼化，在国外钢厂不供应工程大型丙烯球罐用钢板，设计者更改设计选材，选用宝钢-50℃的 B610CF-L2

钢板，在国内首次建成 2 台 3000 立方米丙烯球罐。随后，中石化在国内天津百万吨乙烯工程和镇海炼化工程，3000 立方米的乙烯和丙烯球罐，分别采用 44mm、48mm 厚 B610CF-L2 钢板，建造了 5 台乙烯球罐，8 台丙烯球罐。至此，大型低温（丙烯、乙烯）球罐用 610MPa 级高强度钢板实现国产化和工程应用。

在开发乙烯丙烯球罐用板材国产化的同时，国内锻件企业也开发成功了配套的 -50℃10Ni3MoVD 锻件。宝钢与国内的天津金桥、大西洋焊材企业联合也开发出了乙烯、丙烯球罐配套专用焊条，这些企业试制焊条的熔敷金属和所焊接头的性能满足乙烯、丙烯球罐的技术要求。

当前，应开展 3000 立方米以上乙烯、丙烯、LPG 大型球罐、8000 立方米以上天然气球罐的设计、应力分析，钢铁企业加快更高强度级别钢材的开发，加快大型球罐的建设。

5.2 加氢装置用 Cr-Mo 钢的开发

加氢技术作为提高油品质量和改变油品结构的二次深加工的先进水平，是一个国家石油提炼技术发展水平的标志。炼化和煤加工中关键设备就是临氢设备。我国临氢设备制造已经立足于国内。临氢装置用金属材料主要是 Cr-Mo 低合金耐热钢。我国早期设计和制造的热壁加氢反应器主要采用锻焊结构。即由 2.25Cr1Mo 锻件，经过冶炼、锻造、机加工、焊接、堆焊、无损检测等工序制作而成。以第一重型机器厂为代表的国内锻件生产企业，解决了主体材料的 X 系数、J 系数、回火脆性、S、P 杂质含量控制问题，钢板的性能不断提高，将锻件的材料由 2.25Cr1Mo 拓展到 3Cr1Mo0.25V，扩大了可制造的反应器的直径和单重，实现了厚壁锻件的制造。对于超过 600 吨的大型加氢设备，解决了公路运输、现场吊装、焊接和检验等问题。目前，我国大型石化设备制造企业，向沿海沿江迁移制造基地，目的就是解决大型临氢反应器工厂制造完成后的运输问题。

在临氢设备壁厚在 130~180mm 之间即可以采用锻件，也可以采用板材，板材的成本更低。对于小型加氢设备，采用板焊结构。舞阳钢铁公司于 2007 年试制成功 137mm 厚 12Cr2Mo1R 钢板，并用于临氢设备的制造。2008 年底宝钢已经试制成功 146mm12Cr2Mo1R 钢板，满足临氢反应器的用钢板技术要求。

5.3 PTA 装置用材

精对苯二甲酸（PTA）与对二甲苯（PX）主要作为聚脂原料，是生产涤纶纤维服装面料的基础原材料。PTA 成套设备总计 350 台。反应器 20 多台；塔器 8 台；换热器 90 台；废热锅炉 52 台；容器 67 台；压缩机和风机 15 台；泵 91 台；料仓 13 台，专用机械 44 台，输送设备 29 台。DCS 自动控制系统 1 套。其中关键设备：氧化反应器、空气压缩机组、回转干燥机、结晶器、真空过滤机、氢气压缩机、钛材换热器等。生产介质含有醋酸和溴化物，对设备有极强的腐蚀作用。PTA 设备和管道多用不锈钢、镍基合金和钛材制造^[14]。装备制造业调整和振兴规划中，将 60 万吨至 100 万吨级 PTA 成套装备列为关键重点之一。这要求设备制造业和材料企业，继续加大镍基合金和钛及其合金开发和生产，满足国产 PTA 装备的制造需要。

6. 金融危机影响下我国石化关键设备的制造和所用金属材料的开发

2007 年 4 月 9 日，国家发改委重大技术装备协调办公室在沈阳召开了大型石化装备国产化工作会议，发布《关于加快推进大型石化装备国产化的实施方案》，确定大型石化装备国产化目标。我国“十一五”期间大型石化装备国产化的重点是：新建或改扩建的百万吨乙烯及深加工成套设备、60 万吨至 100 万吨级 PTA 成套装备、千万吨级炼油厂配套的加氢裂化和加氢精制装备、天然气长输管线成套设备等。到“十一五”末期，大型石化装备将基本立足国内生产。

自 2008 年下半年，我国又受到世界范围内金融危机的影响，石化行业也受到明显的影响。国内市场萎缩，生产持续下降，行业效益下滑，生产经营出现困难。为了应对金融危机对我国的影响，2008 年第四季度和 2009 年，国务院陆续发布了 2009 年到 2011 年期间实施的包括石化行业在内的十大行业调整和振兴规划。在《石化产业调整和振兴规划》^[15]中到 2011 年，我国原油加工量要达到 4.05 亿吨，成品油和乙烯产量分别达到 2.475 亿吨和 1550 万吨；将建成 3-4 个 2000 万吨级炼油、200 万吨乙烯生产基地。在这些目标要求下，千万吨以上炼油、百万吨级乙烯、大型煤制合成氨等成套技术装备实现本地化，煤制油、烯烃、乙二醇等示范工程要建成投产。2009 年 5 月初，国务院公布的《装备制造业调整和振兴规划》中，明确以千万吨炼油、百万吨级大型乙烯、对苯二甲酸（PTA）、大化肥、大型煤化工和天然气管道输送、液化气储运等成套设备，大型离心压缩机组、大型容积式压缩机组、关键泵阀、反应热交

换器、挤压造粒机、大型空分设备、低温泵等为重点，推进石化装备的自主化。

这些装置中，有的设备的设计技术仍未掌握、有的是设备用材料本地化问题、有的是制造和加工问题。重大石化工程项目业主，应充分利用国家政策，推进所用关键装备的国产制造，联合钢铁企业、设备制造企业做好所需关键材料的开发。对钢铁企业来说，通过加工能力配套，实现大单重、大厚度、超宽材料，或膜状和薄壁材料极限规格制造。对于大型装备制造企业来说，主要是增大冶炼原料坯重、提高锻造设备能力、锻件的热处理和机加工能力。对于石化行业设备的急需的双相不锈钢、镍基合金、钛合金，要加强新产品的开发力度。加强复合材料的研发和生产，降低贵金属消耗。作好配套锻件、焊接材料、焊接工艺的同步开发和应用。

对于个别单件和少批量生产石化关键装备，所用的金属材料不适应钢铁企业的大批量生产，建议采取同质材料储备制，满足不同设备和工程对该材料的需要。

7.结束语

经过六十年发展，我国石化装置关键装备国产化取得了显著的进步，所用金属材料开发、生产虽有所进展，但仍不能满足石化设备和工艺的快速发展需求。建议在国家政策的推进下，以大型石化工程及其关键装备为依托，按照“装置本地化，设计先行，材料优先、制造保证”的工作思路，国内大型石化企业牵头，对于已经国产化过的设备，设备的设计、制造企业，与钢铁、冶金企业密切配合，不断地实现金属材料的极限规格制造，满足设备大型化对材料的需要。对于首次国产化的设备，设计、制造、材料、研发联合攻关，重视设备制造全过程的协同，重视配套焊接材料的开发和评价，重视一揽子解决方案。

参考文献

- ¹ 王廷俊。石油化工装备与石油化工工业（上篇）。通用机械，2005，（4）：10~13
- ² 王廷俊。石油化工装备与石油化工工业（下篇）。通用机械，2005，（5）：8~9
- ³ 周海成。我国石油化工和化工设备制造业走过辉煌的五十年。机电新产品导报，2007，（7）：33--44
- ⁴ 焉永青，胡志明，王志槐。我国石油和石化设备行业的现状和发展前景。机电新产品导报，2002，（8）：3-21
- ⁵ 王廷俊。从我国石油化工行业的发展看装备国产化进度。机电新产品导报，2002，（7）：10~21
- ⁶ 王基铭。中国石化工业现状与发展及重大石化装备的国产化。当代石油石化，2006，14（4）：1-6
- ⁷ 王廷俊。石化重大装备国产化的艰难历程和未来（上篇）。通用机械，2005，（10）：10~13
- ⁸ 王廷俊。石化重大装备国产化的艰难历程和未来（下篇）。通用机械，2005，（11）：10~15
- ⁹ 邱明杰。谁来推动重大技术装备的国产化。通用机械，2005，（6）：12
- ¹⁰ 贾清芳。石化装备国产化之路该怎么走？石油石化物资采购，www.pmweb.com.cn
- ¹¹ 王廷俊。百万吨级大型乙烯成套设备国产化。通用机械，2007，（3）：8~12
- ¹² 张国宝。装备制造业的自主创新问题。中国装备。2008，（1）：76~79
- ¹³ 仇恩沧。石油化工设备的大型化——压力容器行业的机遇和挑战。石油化工设备技术，2004，25（1）：6~10
- ¹⁴ 王富海。PTA装置的选材。石油化工腐蚀与防护。1999，16（2）：6~9
- ¹⁵ 国务院办公厅。石化产业调整和振兴规划。2009.5