

输气管道在役修复过程中 温度场分布的研究^{*}

刘迎来¹, 许彦¹, 张超¹, 魏祥和², 强富平²

(1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 西安 710077;

2. 国家管网西部管道公司, 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 针对高强度管线钢再热失强及角焊缝延迟开裂问题, 研究了不同气体流速下管线钢管感应加热温度的分布及不同中频加热功率对角焊缝堆焊处预热温度场分布的影响。结果发现, 在加热温度不高于 400 ℃ 的条件下, 管体强度未发生降低; 在气体流速不低于 10 m/s 的条件下, 控制中频加热功率不低于 200 kW, 可有效防止角焊缝处发生延迟开裂。研究表明, 管体表面温度场分布受气体流速的影响, 通过控制中频加热功率及再加热温度, 可有效改善 B 型套筒角焊缝处延迟裂纹的产生及管体再热失强问题, 从而确保在管体不停输状态下进行修复作业。

关键词: 输气管道; 管道修复; 再加热温度; 温度场控制

中图分类号: TG441.4

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2021.11.001

Study on Temperature Field Distribution during in-service Repair of Natural Gas Pipeline

LIU Yinglai¹, XU Yan¹, ZHANG Chao¹, WEI Xianghe², QIANG Fuping²

(1. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China;

2. PipeChina West Pipeline Company, Urumqi 830011, China)

Abstract: Aiming at the problems of reheating strength loss and delayed cracking of fillet weld of high-strength pipeline steel, the distribution of induction heating temperature of pipeline steel pipe under different gas flow rate and the influence of different medium frequency heating power on the distribution of preheating temperature field at fillet weld surfacing were studied. The results show that the strength of the pipe does not decrease when the heating temperature is less than 400 ℃; When the gas flow rate is not less than 10 m/s and the medium frequency heating power is controlled not less than 200 kW, delayed cracking can be effectively prevented at the fillet weld. The research shows that the surface temperature field distribution of the pipe is affected by the gas flow rate. By controlling the medium frequency heating power and reheating temperature, the problem of delayed cracks at the fillet weld of type B sleeve and reheat strength loss of the pipe can be effectively improved, so as to ensure the repair operation can be done without stopping the transmission.

Key words: natural gas pipeline; pipeline repair; reheating temperature; temperature field control

^{*} 基金项目: 中石油管道有限责任公司 2019 年第二批科技项目计划“天然气管道环焊缝修复用 B 型套筒维抢修关键技术及换管焊接工艺优化研究”(项目编号 2019E-23-0501); 国家管网集团联合管道有限责任公司西部分公司科研项目“西一二三线阀室清管三通永久性修复技术研究评价”(项目编号 GWLH31-2021-125)。

利用 B 型套筒对在役管道存在的缺陷进行不停输修复, 不仅可使管道完全恢复到原设计强度, 而且可规避在传统换管作业过程中因管内气体直排造成的环境污染及空气置换问题, 进而避免造成一定的经济损失。因此, 近年来, B 型套筒在国内高强度大直径管道缺陷修复治理作业中得到推广应用^[1-7]。据 PRCI 管线修复手册^[8]阐述, B 型套筒在运营管道上不停输装配有两个高风险点, 即易发生钢管壁烧穿和角焊缝延迟开裂事故, 当钢管壁厚大于 6.4 mm 时, 通过选择小直径焊材、控制焊接热输入等措施可有效解决管壁烧穿问题; 而通过检测套筒修复后的角焊缝, 发现角焊缝延迟开裂仍然是影响管道修复质量的主要因素^[9-10]。此外, X70、X80 管线钢是一种通过 TMCP 工艺获得的超低碳贝氏体钢, 其热稳定性较差, 再热失强问题近年来在一些工程案例中屡次被报道^[11-12], 选择合适的焊缝预热和焊后热处理温度对控制焊缝延迟开裂尤为重要。基于此, 本研究针对高强度管线钢再热失强以及输气管道在不同流速条件下感应加热、焊缝预热以及焊接施焊部位温度场的分布进行了研究, 期望对高强度管道缺陷的现场修复作业提供参考。

1 再加热对高强度管线钢强度的影响

近年来随着高强度管线钢的广泛应用, 工程技术人员对管线钢再热失强的研究也在不断深入, 高惠临等^[13-14]分别选用 Q345R 容器钢和油气输送管道常用的 X60、X70 及 X80 等不同强度级别的管线钢材料, 利用箱式炉对其再加热空冷后的力学性能变化进行了模拟研究, 结果显示, Q345R 钢的抗拉强度、屈服强度在加热前后稳定性良好, 而长输管道用超低碳微合金管线钢 (X60、X70 及 X80) 的抗拉强度、屈服强度试验检测结果变化较为复杂; 在不高于 500 °C 加热空冷后, C-Mn 系添加 Mo、V 和 Nb 等微合金元素的管线钢强度呈上升趋势, 而不含 Mo、V 等微合金元素的管线钢强度则呈下降趋势; 且当加热温度高于 600 °C 后, 所有成分的管线钢强度指标全部呈快速下降趋势, 当加热温度高于 900 °C 后强度指标快速上

升。上述结果表明, 管线钢的热敏感性十分强烈, 材料稳定性弱于传统的容器钢, 这与其化学成分、再加热后材料显微组织中弥散强化和管线钢形变强化作用丧失等因素有关。国外在此方面也有公开的研究成果, PRCI 作业手册中基于欧洲早期建造的一些管道工程用材料再热研究成果发现, 加热温度高于 315 °C, 其屈服强度会明显下降, 为了防止管道现场修复作业导致钢管材料失强, 将此温度作为管道再加热推荐临界温度。

为了掌握再加热温度对高强度管线钢强度的影响, 在 25~600 °C 温度区间内进行了高温拉伸试验和热处理试验, 试验所用材料为西气东输用 C-Mn-Nb 系添加 Mo、V 等微合金元素的管线钢管, 直径为 1 219 mm, 钢级为 X80, 管材拉伸强度变化曲线如图 1 所示, 再次加热后管材抗拉强度和屈服强度变化曲线如图 2 所示。由图 1 可以看出, 在不高于 400 °C 条件下, 管体抗拉强度、屈服强度相对稳定; 450 °C 时, 试样屈服强度数值较为离散, 屈服强度降低了 30~50 MPa。当加热温度高于 450 °C 时, 随加热温度的升高, 屈服强度急剧下降。在 25~1 050 °C 温度区间内再次加热、空冷后, 进行拉伸试验, 当加热温度不高于 700 °C 时, 经加热、空冷后, 试样强度恢复到初始状态; 在 700 °C 下缓慢加热并缓慢冷却, 试样性能在低位区间发生变化, 且原材料强度等级愈高, 下降数值愈大。此外, 又选取库存 X70 钢级 $\Phi 711$ mm \times 18.4 mm 热涂覆 (180~250 °C) 钢管, 为 C-Mn-Nb 系未添加微合金元素的管线钢, 制取试样并进行拉伸试验, 结果发现, 该管道实测屈服强度较防腐前屈服强度下降 40~70 MPa。

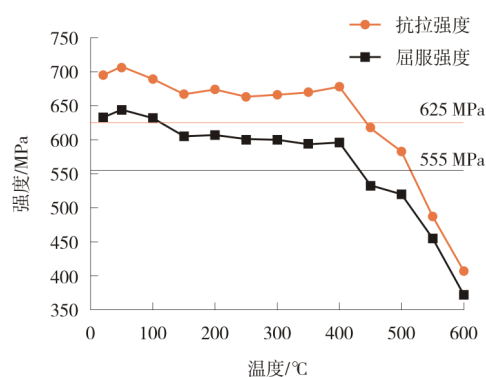


图 1 高温情况下管材拉伸强度变化曲线

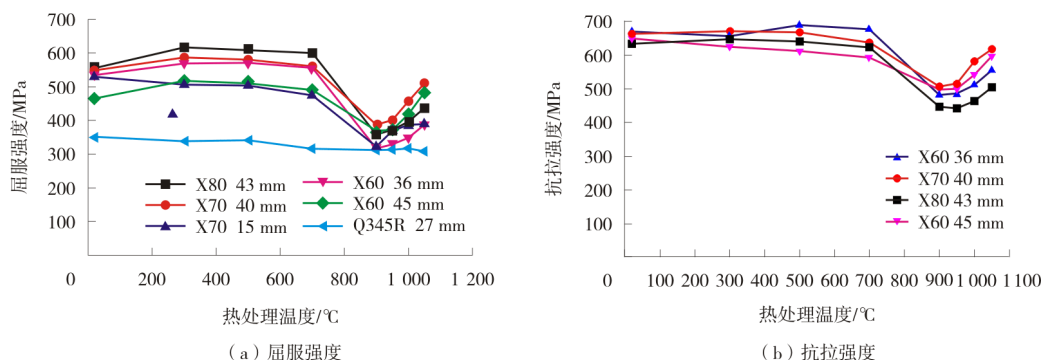


图 2 再次加热后管材拉伸强度变化曲线

X70、X80 钢管再加热后强度变化主要与其化学成分、板材 TMCP 工艺及制管工艺等因素有关。在最高加热温度不超过 400 °C 时，管体强度不会明显降低，同时可安全进行 B 型套筒不停输施焊维修作业；若温度超过 400 °C，则要进行降压处理；选用不同钢级、不同壁厚的板材再进行热处理，当加热温度高于 700 °C 时，管体性能下降，需对已完成焊接的在役管道承载能力进行评估。

2 钢管表面角焊缝堆焊处附近预热温度场的模拟

B 型套筒的壁厚通常远大于补强钢管的壁厚，在 B 型套筒焊接过程中，角焊缝处会产生结构应力，因此会使焊缝处壁厚发生变化。同时，管道内高速流动的气体会从角焊缝熔池内以热传导的方式带走大量的热量，加速焊缝、热影响区的冷却，使熔池金属温度快速降低到 500 °C 或更低温度。这一方面使得靠近钢管表面层堆焊焊缝、热影响区形成淬硬组织的可能性显著增大，进而增加氢损伤敏感性；另一方面，焊缝熔池内圈闭的残余氢扩散进程受阻，氢没有足够的时间充分逸出，使得套筒角焊缝焊趾、热影响区等部位易发生延迟开裂。基于此，开展了输送介质在静态和流动态两种工况下钢管预热温度场的模拟试验。

2.1 静态下管体外表面预热温度场的测试

2.1.1 测试点的布置

选取 X80 钢级 $\Phi 1016 \text{ mm} \times 14.6 \text{ mm}$ 规格带环焊接头的钢管，将加热线圈沿环向缠绕在

环焊接头两侧钢管外壁上，以最靠近测试点一侧的单根加热线圈边缘的某一点为参考点，分别沿管体环向和轴向按照图 3 所示在钢管外表面布置各温度测试点（图中括号内数值对应探头安装位置距外表面的深度），其中 1 号、4 号、5 号、8 号、11 号及 12 号平行于管体轴向方向，与加热线圈和管体外表面距离不同，2 号、3 号、6 号、7 号、9 号及 10 号垂直于管体轴向，距加热线圈和管体外表面距离不同。

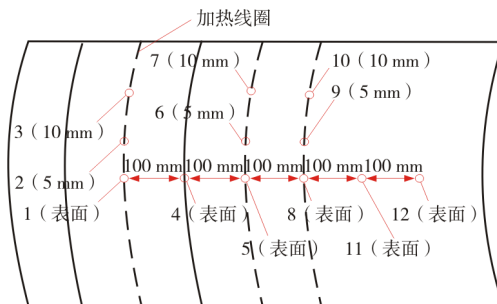


图 3 钢管外表面温度测试点示意图

2.1.2 试验结果与分析

首先选用镍铬-镍硅热电偶（K 型热电偶）、MESTL-WELD 热电偶碰焊机、HIOKI_LR8400 型函数记录仪，按照上述方案连接好测试电路，然后在钢管环接头外表面缠绕耐高温石棉毛毯，再加装感应线圈，并在不高于 400 °C 条件下加热环焊部位，升温到预定温度后，保温 30 min，使焊接接头受热均匀，最后关闭感应加热电源，在无强电磁场影响下获得各测试点的温度分布特征值。

环焊缝处加热温度场分布如图 4 所示。由管体表面温度与距加热带距离关系（图 4 (a)）

可知,加热带一侧管体表面的温度沿钢管轴向随着距离的增加逐渐降低,但在输出功率为 20 kW 时,位于距加热带边缘 200~500 mm 带宽内的管体外表面内,表面温度可基本控制在 90~120 ℃ 的焊接预热温度区间;此外,不同位置处沿壁厚方向温度变化如图 4 (b) 所示,可以看出,管体沿钢管环向、距加热带等距离

位置处,沿壁厚方向、不同位置处的管体温度测量偏差很小,这表明现场施焊温度控制同一位置可不考虑壁厚方向温度梯度对管壁加热温度的影响。

上述分析结果表明,通过控制管体的加热温度,可有效控制套筒两端角焊缝施焊处的预热温度场。

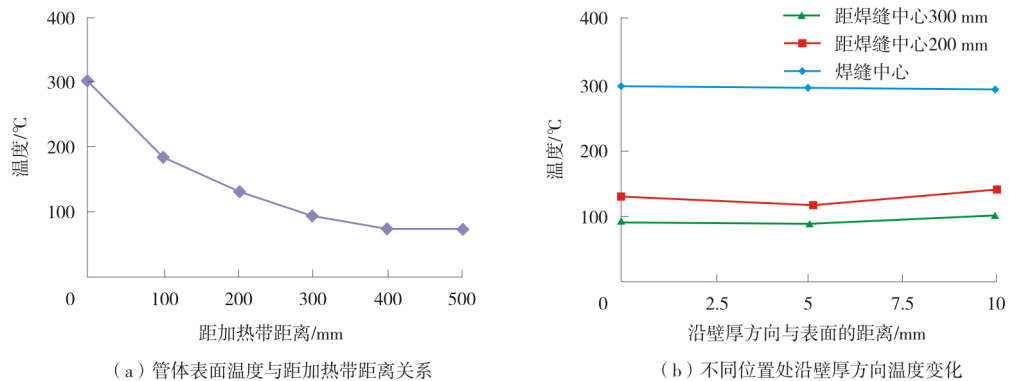


图 4 $\Phi 1\ 016\ \text{mm} \times 12.6\ \text{mm}\ \text{X80}$ 钢管短节环焊缝处加热温度场分布

2.2 不同流速状态下管体预热温度场的测试

2.2.1 服役管体温度测试点选取及测量

在 X70 钢级 $\Phi 1\ 016\ \text{mm} \times 14.6\ \text{mm}$ 输送管道上,分别选择气体流速为 4.6 mm/s、8.68 mm/s 及 9.82 mm/s 的管道穿越段,开挖出长度约 3 m 的管段进行管道外壁现场加热模拟试验。在其中心沿环向紧密缠绕 5~7 圈感应加热带,分别距加热带束左右两侧边缘约 30 mm 处的某一点为热电偶安装位置参考点,沿管体轴向,在外表面等间隔 10 mm 设置温度测试点,连接加热电源,每隔 10 min,等阶梯增加 20 kW 中频加热输出功率,再恒温 30 min,对选定的在役管段进行加热,并记录加热带两侧温度。

2.2.2 中频热输入功率对管体温度的影响

不同加热功率下,管体外壁温度变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,在多个动平衡加热状态下,随着中频加热功率的增大,加热带下管壁的测试温度逐渐增大;在同一加热功率条件下,气体流速越大,管体外壁温度越小。这是由于靠近管内壁流动气体的单位输送质量大,快速流动的气体持续与管壁进行热交换,进而存在热损耗。现场气体流速快,管壁被加热的峰值温度低,当中频加热设备额定功率为 200 kW、输出功率为

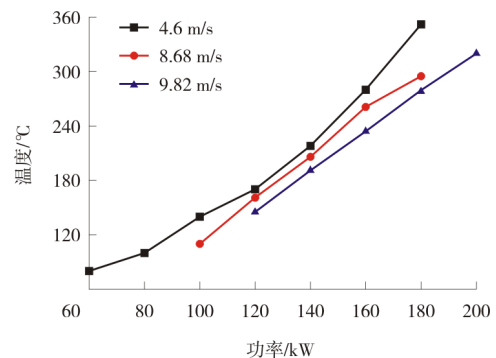


图 5 不同加热功率下管体外壁温度变化曲线

180 kW 时,三种流速条件下都将管壁的最高加热温度提升至 275~355 ℃ 范围内,同时也可进行角焊缝消氢热处理。

2.2.3 服役管体轴向温度场分布特点

图 6 所示为沿钢管轴向,加热带两侧不同位置处,管体外壁温度随加热功率的变化曲线。图中横坐标 0 点对应加热带正下方测温点,其左侧对应于输送管道的上游,右侧对应于管道的下游,管内气体从上游向下游输送。根据图 6 可知,在同一加热功率条件下,加热带上游处管道的温度低于下游位置,且随着加热功率的增大,上、下游对称位置的温度偏差逐渐增大,越靠近加热线圈边缘,温度偏差越

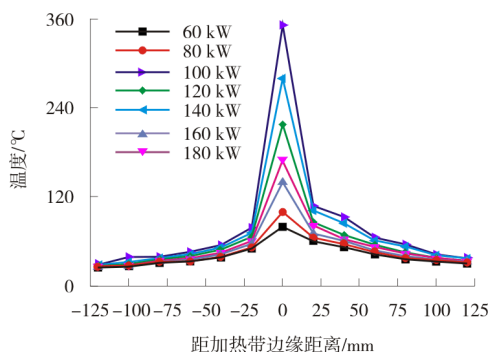


图 6 不同加热功率下加热带附近管体测试温度分布

大。此外，在非停输工况下，随着管外壁中频加热功率的增大，加热带下管体温度也逐渐升高，上、下游对称位置处管壁的温度虽有所升高，但增幅不大，当加热功率为 160 kW 时，加热带下管壁温度升高至 355 °C，距加热带 50 mm 处上游加热温度可达 52.8~63 °C，下游管道加热温度可达 59~82 °C。上述现象表明，加热带外部管体表面的温度与管内气体流动密切相关，随着与加热带距离的增大，沿管体轴向的温度迅速降低，但在距加热带 30~70 mm 范围内，在 160 kW 热输入功率下，气体流速不高于 9.82 mm/s，管壁测试温度保持在 49 °C 以上。

套筒产品技术规格书规定，需合理设计套筒内径尺寸，确保其可装配在含缺陷的管道上，套筒内壁与钢管外壁间的装配间隙控制在 4~5 mm，即两者之间属于非直接接触。针对这种特殊焊接工况，在焊接过程中，靠近钢管侧的角焊缝在焊前预热时，其温度场与管道内气体流动密切相关，而角焊缝组对的套筒侧，因套筒与钢管间属于非直接接触，套筒侧预热温度场的分布与套筒暴露在空气中的温度场分布相同，由于温度场是非对称温度场，角焊缝靠近套筒一侧温度场明显偏高，极易提高加热温度。因此，采用额定功率不小于 200 kW 的中频感应加热设备，仅能使钢管角焊缝施焊部位上游的温度达到 52.8~63 °C，下游加热温度达到 59~82 °C。但在现场焊接作业过程中，同时对钢管和套筒实施预热，后者在较低的功率下就可使相邻的管体温度提升至预定加热温度，并可减少管体温度的热损耗，从而确保套

筒角焊缝两侧预热温度不低于 50 °C。

3 套筒安装实践

某 X80 钢级 $\Phi 1\ 016$ mm 输送管道，管体内天然气流速为 5 m/s，选定 7 处有缺陷的 18.4 mm 与 22 mm 变壁厚对接环焊缝，分别进行 Q345 34 mm B 型套筒在役施焊安装作业。现场施工分两组，作业规程除是否进行焊前预热和焊后热处理外，其余技术要求完全相同，其中第一组共 3 处，预热温度不低于 50 °C，焊后热处理温度不低于 280~300 °C；第二组共 4 处，不进行预热和焊后热处理，在装配完成 24 h、48 h、72 h 后分别进行探伤检测。结果发现，相同作业条件下，第一组 3 处采取预热和后热处理措施的套筒角焊缝全部合格，而第二组没有采取预热和后热处理措施安装的 4 处套筒，有 2 处在 24 h 后探伤发现角焊缝处存在延迟裂纹，1 处在 48 h 后探伤发现有延迟裂纹，1 处在 72 h 探伤发现存在延迟裂纹。工程实践说明，对高强度管道进行 B 型套筒在役施焊作业，预热和后热处理可有效预防角焊缝延迟开裂。

4 结 论

(1) X80 钢级管线钢管在最高加热温度不超过 400 °C 的条件下，管体强度不会明显降低，在不高于此加热温度下可安全进行 B 型套筒不停输施焊作业；在加热温度高于 700 °C 下，管材性能下降，需对管道运行承载能力进行评估。

(2) 套筒在役焊接安装时，采用预热和后热处理方法可有效防止角焊缝延迟开裂。不同流速条件下，钢管壁厚方向温度梯度变化可以忽略，钢管表面温度场分布与管内气体流速密切相关，感应加热带上游预热温度低于下游，在管道内气体流速不大于 10 m/s 的工况条件下，采用额定功率不低于 200 kW 的中频感应加热设备，可确保角焊缝两侧预热温度不低于 50 °C。

参考文献:

- [1] 陈玉华,王勇,董立先,等. 高压油气管线的在役焊接修复技术进展[J]. 压力容器,2005(2):36-40.
- [2] 郝建斌,武新娟,张水清,等. 在役管道修复与抢修焊接工艺模拟试验方法[J]. 油气储运,2006(2):37-40,62.
- [3] 陈玉华,王勇,韩彬. X70 管线钢在役焊接局部脆化区的组织及精细结构[J]. 材料热处理学报,2007(1):79-82.
- [4] 叶海明,顾福明,薛小龙,等. 管道不停输焊接的发展现状和研究重点[J]. 机械制造,2009,47(2):57-61.
- [5] 付威,吕宇玲. 油气管道在役焊接修复技术综述[J]. 热加工工艺,2017,46(19):15-18,23.
- [6] 王长罡,姜征锋,卢启春,等. 油气管道在役焊接研究进展[J]. 油气储运,2015,34(6):586-589.
- [7] 邓峰,李哲,郭利峰. 在役期间焊接修补要求与建造期间的差异性和特点[J]. 金属加工(热加工),2021(6):43-46.
- [8] JASKE C E,HART B O,BRUCE W A. Pipeline repair manual[M]/Virginia Arlington:Pipeline research council international, Inc, 2005.
- [9] Welding of Pipelines and Related Facilities: API 1104: 2013[S/OL]. [2013-09-01]. <https://www.doc88.com/p-2032517085397.html>.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. 钢质管道焊接及验收: GB/T 31032—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [11] 刘迎来,池强,王鹏. 加热温度对 X80 弯管钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2010,35(10):29-32.
- [12] 张小立,冯强,刘迎来,等. 二次加热对高钢级管线钢韧性及其组织的影响[J]. 材料热处理学报,2008,29(6):66-69.
- [13] 刘迎来,王高峰,聂向辉,等. 正火温度对汇管用控轧钢组织及力学性能的影响[J]. 天然气与石油,2015,33(5):79-83.
- [14] 高惠临. 管线钢组织性能焊接行为[M]. 西安:陕西科学技术出版,1995:60.

作者简介: 刘迎来 (1964—), 男, 高级工程师, 主要从事输送管道工程用高强度弯管及管件新产品的研制开发、失效分析、技术支撑服务及重要输送管线现场事故处理等工作。

收稿日期: 2021-06-24

编辑: 董 超

全球氢能产业加速发展

国际能源署预测,到2070年全球氢气需求将达到5.2亿t。国际氢能委员会近期报告显示,自2021年2月以来,全球范围内启动了131个大型氢能开发项目,预计2030年全球氢能领域投资总额将达到5 000亿美元。世界能源理事会预计2050年氢能在全球终端能源消费量中的占比可达25%。

目前,氢能已成为许多经济体碳中和投资计划的核心要素。世界各国正围绕快速扩大清洁技术规模的需求积极采取行动。截至2021年初,全球已有30多个经济体发布氢能路线图。

截至2021年2月,欧洲已拥有商业化运营加氢站200座。许多经济体之间不断强化双边协作关系,确保稳定的供应伙伴关系,推动全球氢供应链的形成。欧盟委员会承诺加强欧洲和非洲合作伙伴在可持续发展方面的创新合作,包括专注于氢的欧洲—非洲绿色能源倡议;智利与荷兰鹿特丹港签署框架协议,未来将向荷兰乃至整个欧洲出口绿氢;阿联酋马斯达尔城与德国西门子能源、日本丸红株式会社等公司达成绿氢生产合作意向,将在马斯达尔建立一个氢气生产示范工厂;德国和沙特将在绿氢的生产、加工、应用和运输领域进行密切合作。

据悉,目前中国石油氢气产能超过260万t/a。按照“清洁替代、战略接替、绿色转型”三步走总体部署,中国石油氢能产业链与天然气产业链及可再生能源协同发展,近期将发挥现有制氢能力和副产氢资源与二氧化碳捕集利用相结合,实现“蓝氢”供应,部署建设20个氢提纯项目,覆盖环渤海、陕甘宁、华南、西南、新疆、黑龙江、吉林等7个区域,重点满足城市交通用氢需求。

为加快实现碳达峰、碳中和目标,中国石油成立氢能研究所,加入中国氢能联盟,充分发挥其在化学化工和新材料领域的基础优势,构建蓝氢、绿氢多元供氢,氢-电、电-氢转化,建立氢气储存、运输、终端加注供应链。

(摘自 人民网)