



图片由CRC-Evans提供

技术应用简介

HTP (高温轧制工艺) 管线钢的诞生与发展



不断变化的发展格局

为扩展全球石油和天然气配送网络，重大的远距离输送管线基础设施项目在各大洲均呈现稳步发展态势。目前，此类项目一般需要强度更高的API 5L X70或X80级钢材，同时管径往往要求更大，管壁更厚。这些变化共同反映出对更高输送压力下快速输送烃类产品的日益增长的需求。

传统冶金设计的演变

几十年来，管线钢的冶金设计发生了翻天覆地的变化[1]。早年间，要达到中等强度需求，成本最低的方法是将碳和锰结合使用，在遇到强度等级为X52和X60时，碳含量则高达0.26%。其含碳量则高达0.26%。甚至直到上世纪七十年代初期，X60和X65钢级的碳

含量仍然高得惊人。但是，对低成本追求需要付出一定的代价，管道强度及更重要的可焊接性都因此受到了不利影响。

七十年代中晚期至八十年代初期，大多重要的管道项目已只采用X65或X70级钢[2]，而此时碳含量逐渐降低，真正的“变革”随之到来，八十年代中期碳含量首次下降到0.12%以下，用于制造管道的钢板或带钢在热机械控制轧制（TMCP）的协同作用下生产完成。在这一过渡时期，大部分X65/X70合金化策略仍然依靠常规铌钒合金化，或者偶尔使用加钼或不加钼的铌钒合金化的方法。

然而，到上世纪80年代，意大利Italsider钢铁公司证实至少对于X70级可以使用低碳镍-铌（0.14-0.16%）的成分设计，能够获得极佳的落锤性能和焊接性能。

九十年代，由于管线输送距离更长、输送压力更大以满足不断增长的大规模油气输送的需求，对X80级的技术需求开始增长。这个时期，包括加拿大的

STELCO公司在内的多个供应商，优化原有的低碳加铌加钼的方法，生产出目前被称之为“针状铁素体”的X80 管线钢[3]。

但是，在几十年前，铌和钒的价格波动难以预测，所以当时的关注重点很快回到低碳的潜在优势上，其中0.10%Nb的技术路线在1972年率先回到人们的视野。人们发现不使用铌和钒也能获得可靠的X80级别的强度，如需要仅适量添加铬和/或铜和镍即可[4]。

回溯既往

随着对强度更高、韧性更佳的管道的需求的日益增长，为增强钢的现场可焊接性，降低碳含量成为重中之重。但是，低碳的应用范围在相当程度上受到加钒的限制，因为后者作为强化剂在碳含量较高时效果更佳。因此，由于前文提及的大部分钢材通常添加了铌和钒，与其它合金化添加物共同提升了钢的强度，因此为恢复和重振尚未得到广泛认可的已存在的技术提供了一个机会。这些技术实际上为所有强度水平高于X65的管线钢提供了一个最优化的、符合经济效益的技术解决方案。

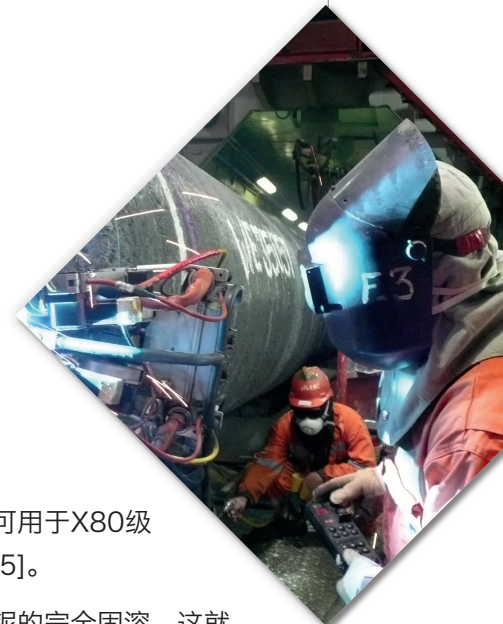
到了世纪之交，管道钢的碳含量已降至0.08%到0.10%，但这一水平仍然不利于铌在提高性能中的最有效利用，现在已经明确的是如果碳含量可降低到0.05%，那么含量显著提高的铌（至少0.11%）将会在再加热过程中固溶，并在使用中显示出巨大的作用。这种等级的钢材俗称HTP（高温轧制工艺）钢，因此逐渐成为行业关注的焦点。

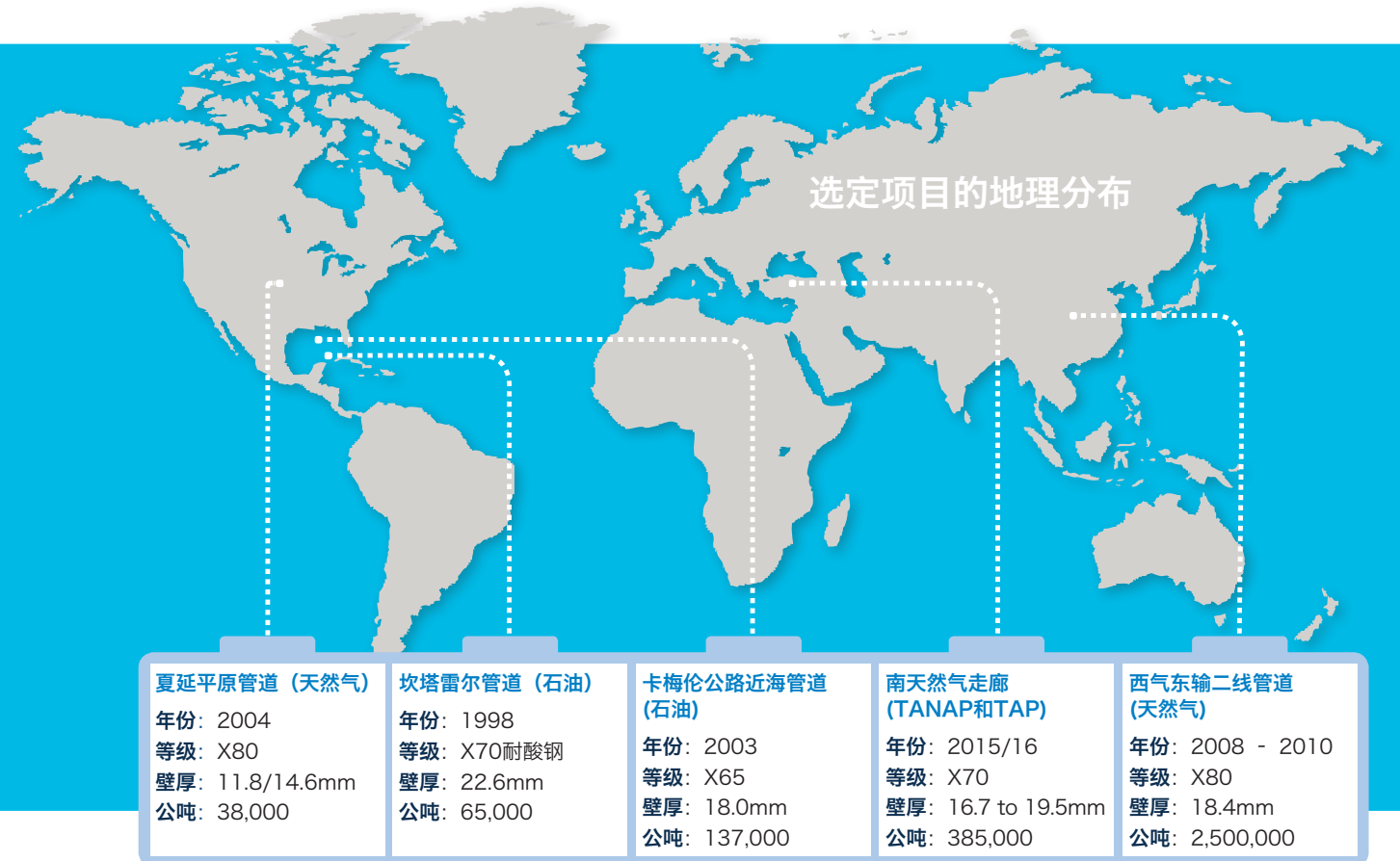
我们要想使用铌含量达0.12%的X70和X80级低碳（<0.05%）管道钢，需要基础冶金研究的支持。这些研究成果来自于50年前，而现代HTP概念实际上出自近40年前。HTP钢包括了低于0.05%的碳含量和0.11%铌含量的使用，同时依据需求添加适量的铬，以“适应”实际强度的需求。当时这种组合在经济效益上颇具吸引力，现在也是如此，为轧钢厂带来大量额外效益，包括缩短待温时间、降低负载等，它们代表了钢板或

卷板的最佳解决方案，最低可用于X80级高强度、大口径管道的制造[5]。

低碳能够促进再加热过程中铌的完全固溶，这就使得在高温轧制过程中随后的铌有益作用最大化。这些效果均有据可查，但在较高的轧制温度下，再结晶的延迟成为降低轧机负荷的关键，同时，沉淀强化和奥氏体相变温度降低的组合作用可以减少对其它合金元素的依赖，从而生产出更为经济的钢材。

常规铁素体珠光体型的铌钒钢的精轧范围通常在710°C-830°C，低碳贝氏体HTP钢则采用840-910°C或更高的精轧温度。在开始轧钢前，只有大幅度削减碳含量才能确保足够的铌含量处于固溶状态，方可获得上文提到的有利作用。铌是唯一真正有助于可在高于常规轧制温度进行高温轧制的元素。





工业化试验和商业化

1983年，CBMM赞助了铬铌HTP方案的工业化试验示范炉次，该试验炉次由日本住友商事生产[6]。来自北美、欧洲和前苏联的十三家公司的轧钢厂展开系统性协作，共同完成了厚板的轧制。这种钢材的平均碳含量低于0.03%，铌含量约为0.10%。这次取得的巨大成功的尝试还为此种钢材在酸性介质中的应用理念提供了依据，因为这种钢材的硫含量低于0.001%，同时含有适量的铜、铬和镍。

北美地区轧制试验的成功最终促进了“纯粹”HTP概念的首次商业化实践，即1997/98年代表墨西哥石油公司的36英寸的大型设备Cantarell X70酸性气体 (pH=5) 管道铺设于墨西哥湾[7,8]。几年之后，即2003年El Paso能源合作伙伴卡梅隆公路380英里海底石油管道也成功铺设，其墨西哥湾的技术和政策环境恰好适合美国第一个重要的X80级管道的建设。在科罗拉多国际天然气公司夏延平原项目中，重达38,000公吨 (82英里) 的36英寸直径管道由加州纳帕管道公司承建，该项目采用以低碳及0.10%铌-铬含量的设计理念的钢材建造。

通过与常规X70/X80合金化途径的直接对比，坎塔雷尔油田和夏延平原气田的材料评估均显示出显著的轧制和可焊性优势。随着这项技术的迅速普及，安赛乐米塔尔公司 (ArcelorMittal) 于2008年采用了HTP方法为长达1323英里的金德摩根 (落基山高速路) 42英寸天然气管道建设提供了所需的半数钢材。目前该管道每年为700万个美国家庭提供能源[10]。

基于坎塔雷尔油田和夏延平原项目的成功经验，中石化 (CNPC) 公司为厚壁X80级西气东输二线高压天然气管道制定了规格，也许这才是这项技术所实现的最重要的商业突破，这个项目消耗了以宝钢为主供应的250万吨HTP的含0.10%铌-铬的低碳钢 [11]。

最近，安赛乐米塔尔公司供了一份非常相似的分析数据，显示约有310,000吨的无Cr的X70用在了土耳其、Tosçelik和跨安纳托利亚 (TANAP) 部分工程，还有75,000吨用于跨亚得里亚海天然气管道项目 (TAP)。

HTP钢的优势和业绩

避免较低温度下奥氏体区的轧制可减少轧机负荷、提高生产率和减少设备磨损。此外，铌会抑制组织恢复和再结晶，进而降低奥氏体向铁素体相变的起始温度。较高的终轧温度可根本上消除了低温轧制时造成的所不期望的严重形变的织构组织，从而获得优良的综合力学性能，同时也提升了延性裂纹扩展的止裂能力。这一冶金学“奇迹”以独特的方式获得贝氏体型铁素体组织，实现了钢的高强、高韧及高可焊性。

正如时间轴图所示，自上世纪七十年代起，HTP钢已经积累大量可靠服役记录，包括陆上的和海上的[12]。

在上页顶部的地图上标示出选定项目的地理分布。



20世纪60年代

研究结果促进了铌含量高达0.12%的低碳钢的发展。

1971年

‘无珠光体’的含铌和钼的低碳X70级钢在加拿大得到应用。

1972年

基于低碳、0.10%Nb概念为基础的首个“北极”级的无钼X80管线钢诞生。

1980年

意大利开发了性能卓越的低碳、含镍X70/X80，铌含量为0.14%到0.16%。

1983年

日本生产由CBMM赞助的铬-铌HTP钢工业化示范炉次在全球范围内接受评估。

上世纪90年代

进一步优化低碳无珠光体钢，现在通常称为针状铁素体或贝氏体型铁素体钢。

1998年

墨西哥国家石油公司坎塔雷尔项目在墨西哥湾的一段工程中采用了纯正HTP概念的厚壁耐酸(pH=5) X70管线钢。

2003年

HTP概念管道用于墨西哥湾的卡梅隆高速路原油工程。此项目为美国最大的离岸管道系统。

2004年

夏延平原——美国首个陆上X80管道，大部分输气管道使用了HTP低碳铌铬钢。

2008年

金德摩根1323英里输气管道中的半数钢材采用了与夏延平原管道相似的HTP管线钢。

2010年

中国采用HTP技术，将其成功应用于长达5500英里的X80西气东输二线高压输气管道。

2015/16

31,000吨低C含Nb的HTP管线钢用于跨安纳托利亚(TANAP)输气管道工程的关键区段，另有75,000吨用于跨亚得里亚海天然气管道项目(TAP)。

2017年以来

通过精心设计化学成分将提供低锰耐“酸性介质”的HTP钢和优化的“OHTP”钢。



图片由CRC-Evans提供

国际标准和未来前景

各国标准和国际标准规定了管道工程用钢材的化学成分，但这些标准并非都能及时全面的反映HTP技术，但聪明的终端用户并未因此而受限，在企业个人的指导下他们制定了专有技术规范，把新技术应用到具体优势中去。本文已列举了中国石油集团和其他重大项目实例。

如今，随着本行业对HTP技术的认识不断提高，全球大部分有影响力的管线钢板或钢卷的API和ISO标准均在修订当中。相信在不久的将来，更高强度含铌管线钢中的碳含量将受到严格限制。

展望未来

毫无疑问，HTP技术已经给本行业带来了变革，并且仍在不断地贡献力量，发挥着举足轻重的作用，推动烃类产品从全球各资源储藏地到各扩展市场间的有效运输。这场‘变革’仍在继续，如今这种合金化方法的优势已得到更泛仍同，因此这种变革的脚步势必会越走越快。

最后，HTP的合金化理念将迎来两大振奋人心的新机遇。第一，通过优化钛、氮和铌的含量而使每一个钢板或卷板生产企业获得最大化的技术效益，并且极有可能使得钢材性能进一步提升，今年或许会看到OHTP(优化)管线钢全面投产并应用到特定需求中去。第二个机遇则是同属HTP体系的而锰含量大幅降低（降至0.25%）的HTP钢。目前已面向市场公

布，该系列产品至少可以满足X65的强度水平，在多种pH条件下均显示出显著提升的抗酸性气体的能力[13]。锰会造成管线钢中锰和硫的中心偏析，锰的去除自然预示着可观的益处。就与常规HTP钢比较而言，钢中的铌和铬可补偿Mn含量显著降低造成的强度损失。

高温轧制工艺HTP的发展历程引人注目，好似一场无法阻挡的“变革之风”，如能加以利用，必将带来巨大的技术和经济效益，而忽视这一点并非明智之举。

更多信息

欢迎访问网站了解详情：technology@cbmm.com

参考文献

1. P. R. Kirkwood, “平静的变革-现代石油和天然气传输管道的HTP合金设计”, 《石油与天然气技术杂志》2016年秋季刊, 50-51。
2. J. M. Gray和F. Siciliano, “高强度管道: 半个世纪的演变”, 《管道技术会议记录》, 比利时奥斯坦德, (2009年10月)。
3. A. J. Afaganis等, “STELCO公司开发并生产大口径、高强度X80管线钢管道”, ISS第39届机械加工与钢材加工会议, 印第安那波利斯 (1997年)。
4. J. M. Gray和G. W. Wilson, “莫利公司开发X80北极管道钢”, 《管道与天然气杂志》, 1972年12月。
5. S. Bremer等, “大口径螺旋两步式管线钢管热轧带钢的新合金化概念”, 第七届国际管道会议的会议记录, 加拿大阿尔伯塔卡尔加里, 2008年9月3日。
6. Hulka等, “铌含量为0.06%-0.1%的低碳HSLA钢的应用经验”, HTP钢研讨会, 巴西阿拉沙, (2003年10月)。
7. D. G. Stalheim, “高温轧制 (HTP) 钢在高压油气传输实践中的应用”, 第五届国际低合金高强度钢会议的会议记录, 中国海南三亚 (2005年11月)。
8. M. Lin和R. L. Bodnar, “成分和加工条件对0.03%铬-0.09%铌X70管道钢的影响”, AIST 1998机械加工钢加工会议的会议记录, (宾夕法尼亚州沃伦代尔市: 美国钢铁技术协会 (AIST), 1998年), PR-311-065。
9. W. J. Fazackerley等, “美国首个X-80 HSLA管道”, 石油天然气行业微合金钢研讨会的会议记录, TMS, (2007年), 353。
10. ArcelorMittal, “安塞乐米塔尔高强度管道钢的生产”, CBMM研讨会, 中国北京, 2007年8月20-22日。
11. Z. Lei等, “西气东输二线管道工程X80管线钢板的研发”, X80钢国际研讨会的会议记录, 中国西安, 2008年6月23-24日。
12. P. R. Kirkwood, “现代石油和天然气传输管道HTP合金设计的评估” 《石油和天然气杂志》, 2016年冬季刊, 56-57。
13. J. M. Gray, “超低锰高强度HTP酸性介质管道钢”, 石油天然气行业微合金管道钢, 俄罗斯莫斯科, 2013年4月2-3日。



本文技术内容由P. R. Kirkwood
博士提供，文字编辑支持由贝塔技术支持提供

版权© 2018 CBMM

www.cbmm.com