

· 工艺材料进展 ·

X120 级超高强度管线钢生产工艺研究现状

赵英利^{1,2} 时捷² 包耀宗² 谢刚¹

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

摘要 X120 管线钢的碳含量一般为 0.05%, (Cu + Ni + Cr + Mo) ≤ 2%, 并加入微合金化元素 V、Nb、Ti、B。通过控轧和强控冷工艺, 该钢具有高强度、高韧性和良好的焊接性。介绍了生产 X120 管线钢的在线热处理工艺装置 JFE-HOP, 间断直接淬火(IDQ), 直接淬火 DQ-T 工艺和淬火-配分(Q&P)工艺技术。讨论了其存在问题和可能的发展方向。

关键词 X120 管线钢 控轧控冷

Recent Research Status of Production Process for Ultra-High-Strength Pipeline Steel X120

Zhao Yingli^{1,2}, Shi Jie², Bao Yaozong² and Xie Gang¹

(1 School of Material and Metallurgy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract Generally speaking, the carbon content in X120 pipeline steel is 0.05%, and (Cu + Ni + Cr + Mo) content in steel ≤ 2% with adding microalloying elements V, Nb, Ti, B. The steel has high strength, high toughness and nice weldability by control rolling and heavy accelerated cooling process. The in-line heat treatment process device JFE-HOP, the interrupted direct quenching (IDQ) process, the direct quenching DQ-T process and the quenching & partitioning (Q&P) technology for production of pipeline steel X120 are presented, and the possible existed problem and future development are discussed.

Material Index X120, Pipeline Steel, Control Rolling and Control Cooling

应用 X120 级管线钢的经济效益, 主要体现在节约材料、提高输送压力和运输量、减小施工量、降低维护费用、优化整体方案等方面^[1-5]。如使用 X120 取代 X70 级管线钢, 可使成本降低 38% 左右^[6]。国外开展 X120 级管线钢研究的企业主要有新日铁、住友金属、JFE、欧洲钢管等。新日铁公司与埃克森美孚公司合作首先试制成功, 并于 2004 年联合加拿大传输管线有限公司(TCPL)在北阿尔伯达安装了 116 km 的 X120 级管线, 以研究冬季严酷条件下的可施工性^[7-10]。国内开展 X120 级管线钢研究始于 2005 年, 武钢、鞍钢、宝钢、北科大、西钢管材所的科研部门正在开展该产品的研究^[5]。

1 X120 级管线钢的合金化设计

从图 1 中可以看出^[11], 随着管线钢级别的升高, 碳含量逐渐降低, 添加的微合金化元素种类增多, 工艺经历了从普通热轧到形变热处理, 再到形变热处理 + 加速冷却的过程, 可以看出冷却速率随管线钢级别提高而增大。X120 要求在具有高强度、高韧性的同时具有良好的焊接性, 因此其碳的质量分数不超过 0.1%^[12]。

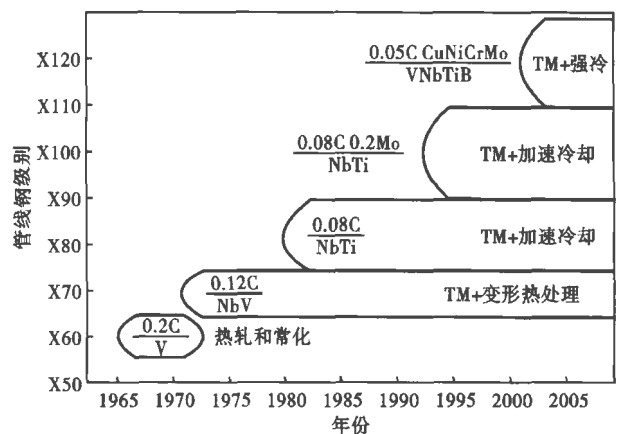


图 1 各级别管线钢的主要合金成分与生产工艺进展
Fig. 1 Alloy design and production process progress of different grade of pipeline steel

往钢中加入 Mo 会增加碳的扩散激活能, 降低碳的活度系数, 且 Mo 是强碳化物形成元素, 在钢中易形成 Mo-C 组合, 从而减少 C 向奥氏体晶界的偏聚, 即增加了奥氏体晶界处的有效固溶 B 量^[13], 这更有利于提高钢的淬透性, 进而提高钢的强度^[14]。

除 Nb、V 微合金化元素外, 通常在添加 B 的同时添加 Ti, Ti 可以与 N 结合形成 TiN, 在高温加热时

起到阻碍晶粒长大的作用,并可起到“固氮护硼”的作用。

加入适量铜,可以显著改善管线钢抗 HIC 的能力^[15]。并且,铜在回火过程中,会有 ϵ -Cu 析出强化。在国内外主要研究机构研制的 X120 管线钢中,都添加了少量的 Cu。

2 X120 级管线钢的生产工艺

2.1 在线热处理(HOP)工艺

JFE 在西日本钢铁厂的 Fukuyama 厚板厂安装了 HOP(在线热处理工艺)装置,这是一种螺线管型感应加热设备,在生产线上临近热矫机,位于加速冷却装置之后,与 Super-OLAC(超级在线加速冷却工艺)相结合^[12](图 2a)。采用传统 TMCP 工艺时,钢板经过控轧、加速冷却、然后空冷;而采用 HOP 技术时,钢板快速冷却后立即通过感应线圈进行快速加热处理。结果,通过控制相变获得了多种性能,碳化物和第二相同时析出,这是传统工艺达不到的。

在线热处理工艺(HOP)由 3 个阶段组成(图 2): (1) ACC 停止与等温过程; (2) HOP 热处理过程; (3) 空冷。在贝氏体完全转变温度以上停止加速冷却(ACC),此时保留了未转变的奥氏体相,等温一段时间以控制贝氏体的量。在该阶段,显微组织由贝氏体和未转变的奥氏体组成。ACC 后立即利用在线加热(感应加热)设备进行热处理。在加热过程中,贝氏体中的碳向奥氏体中扩散,得到了回火贝氏体。由于部分碳扩散到了奥氏体,加热后,使得奥氏体含有更高的碳含量,可在空冷时形成 MA 组元。通过控制 MA 岛的体积分数,可以得到合适的屈强比。研究表明,通过 HOP 工艺得到的 MA 岛比传统 TMCP 工艺要多。

2.2 IDQ 工艺

新日铁公司开发的 X120 管线钢选用了以下贝

氏体(LB)为主的显微组织,通过采用间断直接淬火(IDQ)工艺(图 2b)^[16]获得。钢板经再结晶区和未再结晶区轧制后直接淬火,控制终冷温度在贝氏体转变区,终冷开始时表面温度低于中心,随后由于温度差,热量从中心向表面传递,最终表面和中心温度趋于一致,其实质相当于自回火过程。在此工艺中,板坯加热温度、未再结晶区变形量以及终冷温度都是很重要的技术参数。板坯加热温度决定轧制前的原奥氏体晶粒;未再结晶区变形量决定原奥氏体晶粒的扁平化(pancake)程度,随着扁平化程度增加,韧脆转变温度降低。

在较高温度终冷得到的是蜕化上贝氏体组织,而终冷温度较低时得到的是下贝氏体,由于下贝氏体较蜕化上贝氏体组织具有更好的强度和韧性,故采用较低温度终冷。

2.3 DQ-T 工艺

DQ-T 工艺^[5](图 2c)采用再结晶区与未再结晶区两阶段控轧,轧后直接淬火,450 °C 回火得到了最佳的力学性能。

研发的 X120 级管线钢组织为下贝氏体与回火马氏体,与 HOP、IDQ 相比,提高了相变强化的程度,同时在回火过程中,有 ϵ -Cu 的时效析出。在此工艺中,主要影响因素为板坯加热温度、轧制工艺、直接淬火过程中的板形控制与回火温度。采用两阶段轧制,应注意避免在部分再结晶区变形,防止出现混晶;直接淬火过程,要求钢板上下表面冷速相同,以免发生钢板翘曲,对设备有较高的要求。

2.4 Q&P 工艺

Q&P(Quenching and Partitioning)工艺^[17-19]机理是基于碳在马氏体/奥氏体混合组织中的扩散^[20]。其工艺原理如图 3(a)所示: C_i , C_γ , C_m 分别为合金初始碳含量、奥氏体和马氏体中碳含量。

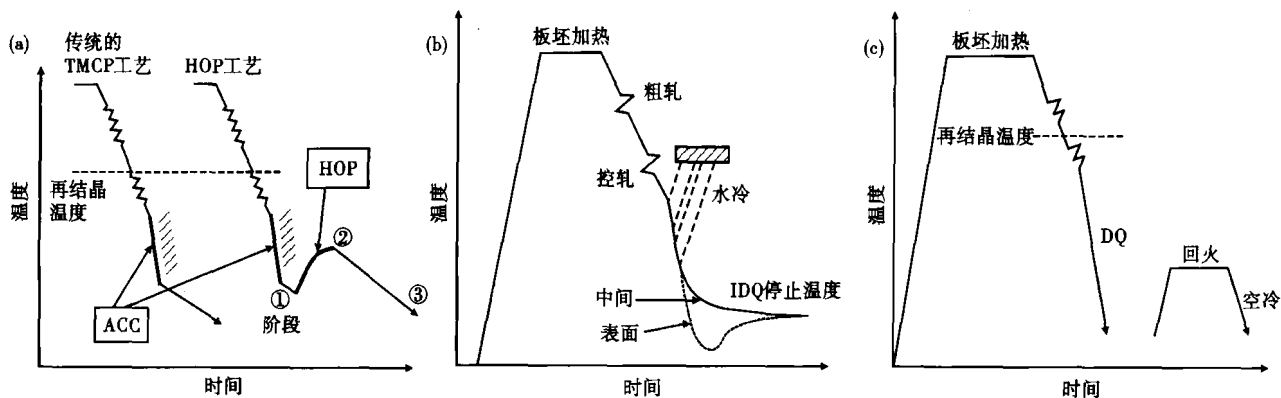


图 2 JFE-HOP 工艺(a), IDQ 工艺(b), DQ-T 工艺(c)示意图

Fig. 2 Schematics of JFE-HOP process (a), IDQ process (b) and DQ-T process

Q&P 工艺分为一步法和两步法, QT 与 PT 是同一温度为一歩法, QT 与 PT 不同则为两步法。

首先, 基体在奥氏体区或临界区温度保温一段时间后快速冷却到 M_s 和 M_f 之间的淬火温度 (QT) 并短时等温, 产生适量的马氏体, 随后升温到配分温度 (PT) 并处理一段时间, 确保残余奥氏体富碳过程的完成^[20]。

尽管在 Q&P 工艺与传统 Q&T (Quenching and Tempering) 工艺下, 马氏体形成热力学机制相

同, 但两者微观组织的演变机理及最终构成完全不同。在 Q&T 工艺中, 回火马氏体形成时, 渗碳体的形成消耗了部分碳, 而且残余奥氏体分解。而 Q&P 工艺却有意地抑制了 Fe-C 化物的析出, 并使残余奥氏体稳定而不被分解, 从而保持了良好的韧性。

利用 Q&P 工艺得到了符合 X100 级管线钢的性能(图 3b)^[21]。从图 3(b) 可见, 与其它传统工艺相比, Q&P 工艺显著改善了钢的强韧性。

参考文献

- 李鹤林. 油气输送钢管的发展动向与展望. 焊管, 2004, 27(6): 1
- Okaguchi S. Development and Mechanical Properties of X120 Linepipe. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(1): 14
- Asahi H, Hara T. Development of Plate and Seam Welding Technology for X120 Linepipe. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(1): 34
- Hans-Georg Hillenbrand. Development of High Strength Material and Pipe Production Technology for Grade X120 Line Pipe. Proceedings of IPC 2004 International Pipeline Conference. Calgary, Canada, 2004
- 王路兵, 武会宾, 任毅, 等. X120 级管线钢 DQ-T 工艺试验研究. 金属热处理, 2007, 32(10): 44
- Hans-Georg Hillenbrand, Andreas Liessem, Karin Biermann, et al. Development and Production of Linepipe Steels in Grade X100 and X120. In: Seminar Forum of X100/X120 Grade High Performance Pipe Steels. Beijing, 2005
- Mauro Pontremoli. A New Generation of Ultra High Strength X100/X120 Pipelines. The Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. USA, 2005, 15: 31
- Shuji Okaguchi. Production and Development of Linepipe Steel in Grade X100 and X120. Report of Seminar Forum of X100/X120 Grade High Performance Pipe Steel. China, Beijing, 2005
- Zajac S, Schwinn V, Tacke K H. Characterization and Quantification of Complex Baintic Microstructure in High and Ultrahigh Strength Linepipe Steels. Materials Science Forum, China, 2005, 500: 387
- Doug Fairchild. X120 Pipeline Development for Long Distance Gas Transmission Lines. Report of Seminar for use of X100/X120 Grade High Performance Pipe Steel, China, Beijing, 2005
- Pontremoli M. 高性能 X100-X120 管线钢开发的冶金和技术挑战. 世界钢铁, 2004(5): 35
- 郑磊, 傅俊岩. 高等级管线钢的发展现状. 钢铁, 2006, 41(10): 1
- Hara T, Asahi H, Uemori R, et al. Role of Combined Addition of Ni-

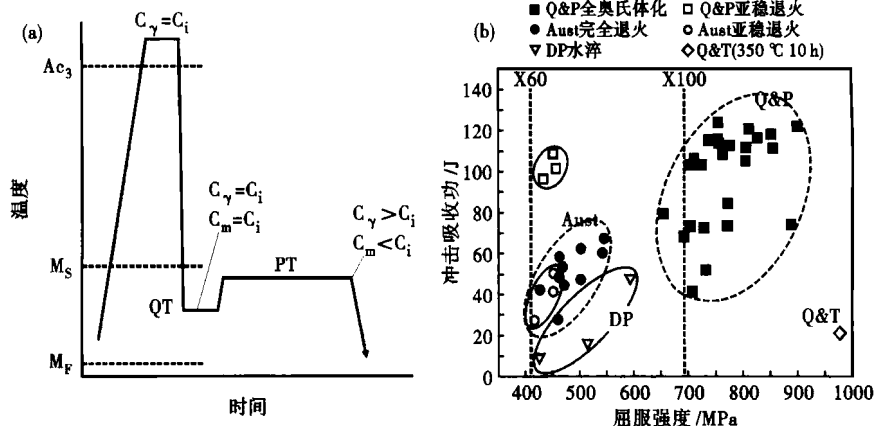


图 3 (a) Q&P 工艺示意图; (b) 不同组织管线钢的屈服强度与室温冲击韧性
Fig. 3 (a) Schematics of quenching & partitioning process; (b) yield strength and impact energy of pipeline steel with different structure at ambient temperature

3 结语

目前研制的 X120 管线钢化学成分特点为碳含量低于 0.1%, 低 Si 高 Mn, 其他合金元素为 Cr、Ni、Mo、Nb、Ti、B、Cu。为了得到高强度, 必须提高冷却速率, 以便得到贝氏体或马氏体组织; 同时, 通过对冷却工艺的精细化控制 (碳分配), 又保证了韧性。因此, 为了得到良好强韧性匹配的超高强度管线钢, 冷却工艺的精细化控制是研究的主要方向。

- bium and Boron and of Molybdenum and Boron on Hardenability in Low Carbon Steels. ISIJ Int, 2004, 44(8): 1431
- 魏伟, 单以银, 杨柯, 等. 添加 Mo-B 对超高强度管线钢相变组织的影响. 金属学报, 2007, 43(9): 943
- Hirosuke Inagaki, Masayuki Tannimura, Iwao Matsushima, et al. Effect of Cu of the Hydrogen Induced Cracking of the Pipeline Steel. Transactions ISIJ, 1978, 18(3): 149
- Asahi H, Hara T. Development of Plate and Seam Welding Technology for X120 Linepipe. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(1): 19
- Matlock D K, Brautigam V E, Speer J G. Application of the Quenching and Partitioning (Q&P) Process to a Medium-Carbon, High-Si Micro-Alloyed Bar Steel. Materials Science Forum, 2003, 426-432: 1089
- Speer J G, Rizzo F C, Matlock D K, et al. The "Quenching and Partitioning" Process: Background and Recent Progress. Materials Research, 2005, 8(4): 417
- Speer J G, Matlock D K, De Cooman B C, et al. Carbon Partitioning into Austenite After M Artensite Transformation. Acta Materialia, 2003, 51(9): 2611
- 江海涛, 唐获, 米振莉. 汽车用先进高强度钢的开发及应用进展. 钢铁研究学报, 2007, 19(8): 1
- Seung Chan Hong, Jae Cheon Ahn, Sang Yong Nam, et al. Mechanical Properties of High-Si Plate Steel Produced by the Quenching and Partitioning Process. Metals and Materials International, 2007, 13(6): 439

赵英利 (1981-), 男, 博士生, 微合金化及控轧控冷研究。

收稿日期: 2009-04-13