

X65 管线钢管成分与性能关系的分析研究*

李立豪^{1,2}, 张永清³, 韩秀林⁴, 谷雨⁵, 乔桂英⁶, 肖福仁^{1,2}

- (1. 燕山大学材料科学与工程学院亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
2. 河北省金属产品工艺与性能综合优化重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
3. 中信微合金化技术中心, 北京 100004; 4. 渤海装备华油钢管公司, 河北 青县 062658;
5. 周口师范学院 机械与电气工程学院, 河南 周口 466000;
6. 燕山大学 环境与化学工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 利用某钢管厂生产的不同批次三种成分体系 X65 管线钢管的检测数据, 分析了钢管成分与性能的关系。结果表明, 无论采用传统 Mn-Mo-Nb 系管线钢, 还是 Mn-Nb 及 Mn-Cr-Nb 系管线钢, 钢管的性能均能满足 GB/T 9711—2017 及 API SPEC 5L 等相关技术规范的要求。传统 Mn-Mo-Nb 系管线钢在低 Mo、Nb 条件下即可获得高的韧性; Mn-Nb 及 Mn-Cr-Nb 系管线钢, 管体及焊缝的强度随 w (Nb) 增加而增加; 然而, 管体、热影响区及焊缝的韧性则随 w (Nb) 增加到 0.050%~0.060% 时获得较大的改善效果; Cr 对韧性有一定改善作用, 但作用不显著。

关键词: X65 管线钢管; 管体性能; 焊缝; 热影响区

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.12.001

Analysis of the Relationship between Chemical Composition and Mechanical Properties of X65 Pipeline Steel Pipe

LI Lihao^{1,2}, ZHANG Yongqing³, HAN Xiulin⁴, GU Yu⁵, QIAO Guiying⁶, XIAO Furen^{1,2}

(1. Key Lab of Metastable Materials Science & Technology, College of Materials Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 2. Hebei Key Lab for Optimizing Metal Product Technology and Performance, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 3. Citic Microalloying Technology Center, Beijing 100004, China; 4. North China Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Qingxian 062658, Hebei, China; 5. School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466000, Henan, China; 6. School of Environment and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: Based on the test data of X65 pipeline steel pipes of different batches with three systems of chemical composition produced by a steel pipe factory, the composition and performance of the steel pipes were analyzed. Results show that the mechanical properties of the steel pipes, either by the traditional Mn-Mo-Nb series pipeline steel or Mn-Nb and Mn-Cr-Nb series pipeline steels, can meet the requirements of GB/T 9711—2017, API SPEC 5L and related technical specifications. The traditional Mn-Mo-Nb pipeline steel can obtain high toughness under low Mo and Nb conditions. For Mn-Nb and Mn-Cr-Nb pipeline steels, the strength of pipe bodies and weld increases with the increase of Nb content. However, the toughness of the tube bodies, the heat affected zones and the weld metals were significantly improved when the Nb content increased to 0.050%~0.060%. Cr may also improve toughness, but the effect is not significant.

Key words: X65 pipeline steel pipe; pipe performance; weld; heat affected zone

*基金项目: 河北省自然科学基金-高端钢铁联合基金“双相高强高应变海洋管线钢强塑化机制及组织性能调控”(项目编号 E2021203069); 河北省创新能力提升计划项目“河北省金属产品工艺及性能优化控制实验室绩效补助经费”(项目编号 22567609H); 国家自然科学基金“高强海底管线环焊缝的疲劳裂纹萌生扩展及断裂行为研究”(项目编号 52001340); 中信金属-CBMM R&D 项目“不同组织类型 X65 和 X70 管线钢大数据分析和焊接评价研究”(项目编号 2020FWNB-30091)。

0 前 言

自 20 世纪 70 年代初, 微合金 Mo-Nb 针状铁素体管线钢的出现^[1], 低 C-Mn-Mo-Nb 管线钢几乎成为高强韧性管线钢的基本体系^[2-3]。21 世纪初, Gray 等^[4]提出高 Nb 管线钢概念, 其以 Nb 替代 Mo (无 Mo 或低 Mo) 而由此具有成本优势, 显著推动了低成本高 Nb 管线钢的开发和应用^[5-6], X80 管线钢也扩展出 C-Mn-Cr-Nb、C-Mn-Mo-Nb、C-Mn-Cr-Mo-Nb 等体系, 并在西气东输等工程中得到广泛应用^[7], 同时该理念也被应用于 X65、X70 等管线钢。由于不同企业装备及 TMCP 工艺的不同, 其采用的管线钢体系也存在一定的差异。这种成分的差异不仅影响管线钢板材的性能, 而且显著影响钢管的性能。但到目前为止, 关于不同成分体系对管线钢管性能影响的研究较少, 进而很难获得统一成分设计思想。本研究利用某钢管厂生产的 X65 钢管数据, 系统分析了钢管成分及性能, 进一步探讨了管线钢成分与性能的关系, 从而提高 X65 管线钢管的稳定性, 保证管线安全运行。

1 试验材料

本研究选取了 6 个钢厂 1 087 批次钢管, 钢管的原料生产厂家、钢管规格、批次及化学成分见表 1。由表 1 可知, 不同钢厂及批次所采用的成分体系存在一定差异, A 钢厂所采用的是传统 Mn-Mo-Nb 系, 而且 Nb 含量很低, 平均 $w(\text{Nb})$ 仅为 0.038%; B 钢厂采用两种成分体系, 即 Mn-Cr-Nb 和 Mn-Nb 系, 但 Nb 含量有一定差异, 随板厚的增加, Nb 含量呈增加的趋势, 平均 $w(\text{Nb})$ 由 0.039% 分别增加到 0.042% 和 0.054%; C 钢厂则采用 Mn-Nb 系, 平均 $w(\text{Nb})$ 为 0.044%; D 钢厂因钢板壁厚较大, 采用 Mn-Cr-Nb 系, 且平均 $w(\text{Nb})$ 为 0.049%; E 钢厂也采用 Mn-Cr-Nb 系, 但 Cr、Nb 含量较高, 平均 $w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{Nb})$ 分别为 0.24% 和 0.056%; F 钢厂两种规格钢管均采用 Mn-Cr-Nb 系, 但在 Cr、Nb 含量上略有差异, 一种低 Cr-Nb, 平均 $w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{Nb})$ 分别为 0.11% 和 0.057%, 另一种则采用高 Cr-Nb, 平均 $w(\text{Cr})$ 、 $w(\text{Nb})$ 分别为 0.26% 和 0.065%。

表 1 X65 原料生产厂家、钢管规格、批次及化学成分

编 号	钢 厂	钢管规格/ (mm×mm)	批 次	化学成分/%							
				$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{Ti})$	Pcm
1	A	Φ813×12.5	35	0.046~0.067	0.15~0.20	1.36~1.46	-	0.07~0.17	0.036~0.042	0.011~0.016	0.13~0.16
2	B	Φ508×7.1	115	0.052~0.076	0.14~0.18	1.50~1.59	0.12~0.16	-	0.035~0.043	0.017~0.023	0.15~0.17
3	B	Φ711×8.8	61	0.052~0.070	0.14~0.19	1.47~1.57	0.02~0.16	-	0.038~0.050	0.017~0.023	0.14~0.16
4	C	Φ711×8.0	44	0.044~0.064	0.20~0.26	1.42~1.54	-	-	0.043~0.046	0.009~0.013	0.13~0.15
5	D	Φ813×12.5	56	0.051~0.075	0.16~0.22	1.47~1.56	0.12~0.15	-	0.042~0.054	0.014~0.022	0.14~0.17
6	B	Φ711×10.3	118	0.049~0.076	0.13~0.19	1.43~1.57	-	-	0.041~0.060	0.018~0.024	0.13~0.16
7	E	Φ559×11.1	105	0.063~0.078	0.12~0.18	1.43~1.62	0.22~0.27	-	0.032~0.062	0.013~0.024	0.15~0.18
8	F	Φ813×14.2	329	0.043~0.078	0.15~0.24	1.55~1.72	0.07~0.15	-	0.049~0.070	0.012~0.020	0.14~0.18
9	F	Φ813×12.5	224	0.028~0.075	0.14~0.25	1.57~1.72	0.22~0.30	-	0.058~0.076	0.013~0.019	0.13~0.18

所选用钢管产自同一螺旋焊管生产线, 钢管的性能 (管体、焊缝) 按 GB/T9711—2017 和 API SPEC 5L 等标准进行取样、测试。

2 试验结果与分析

2.1 管体性能

图 1、图 2 给出了采用不同钢厂原料生产钢管管体的屈服强度和冲击韧性的统计分析结果。

由图可见, A 钢厂 1# 钢管管体的屈服强度主要集中在标准下限, 平均屈服强度为 472 MPa; 相反, 管体在 -20 °C 下的冲击韧性较好, 平均低温冲击功达到 360 J。对 B 钢厂, 虽然 2#、3# 钢均采用 Mn-Cr-Nb 系, 但屈服仍集中在标准的下限, 平均屈服强度为 479 MPa 和 473 MPa, 但韧性则相差较大, 2# 钢 0 °C 下的冲击功仅为 142 J, 而 3 号钢在 -5 °C 下的冲击功则到达 253 J; 相对采用 Mn-Nb 的 6# 钢, 其屈服强度和 0 °C 下的冲击韧性

均有所提高，平均屈服强度和冲击功分别达到 480 MPa 和 261 J。对比 B 钢厂三种钢的化学成分，Nb 含量的差异最大，这表明微量 Nb 含量对钢的强度和韧性有显著的影响。C 钢厂的 4# 钢采用 Mn-Nb 系，但 Nb 含量有所增加，其强度较低，平均屈服强度仅为 462 MPa，而韧性有所改善，-19 ℃下的冲击功则达到 240 J。D 钢厂的 5# 钢采用 Mn-Cr-Nb 系，且 Nb 含量有所增加，其强度和低温韧性均有所改善，平均屈服强度和-20 ℃下的冲击功分别达到 471 MPa 和 322 J。E 钢厂的

6# 钢采用了与 D 钢厂相同的成分体系，但 Cr、Nb 含量均有所提高，管体的屈服强度提高，平均屈服强度为 497 MPa，但其在-20 ℃下的冲击功略有降低，平均低温冲击功为 309 J。F 钢厂的 8# 和 9# 钢虽然均采用了 Mn-Cr-Nb 系，但 Cr、Nb 含量有所差异，通过提高 Cr、Nb 含量，钢的强度和韧性均有所改善，低 Cr、Nb 含量 8# 钢的平均屈服强度和-20 ℃下的冲击功为 491 MPa 和 299 J；而高 Cr、Nb 的 9# 钢平均屈服强度和-20 ℃下的冲击功则为 493 MPa 和 315 J。

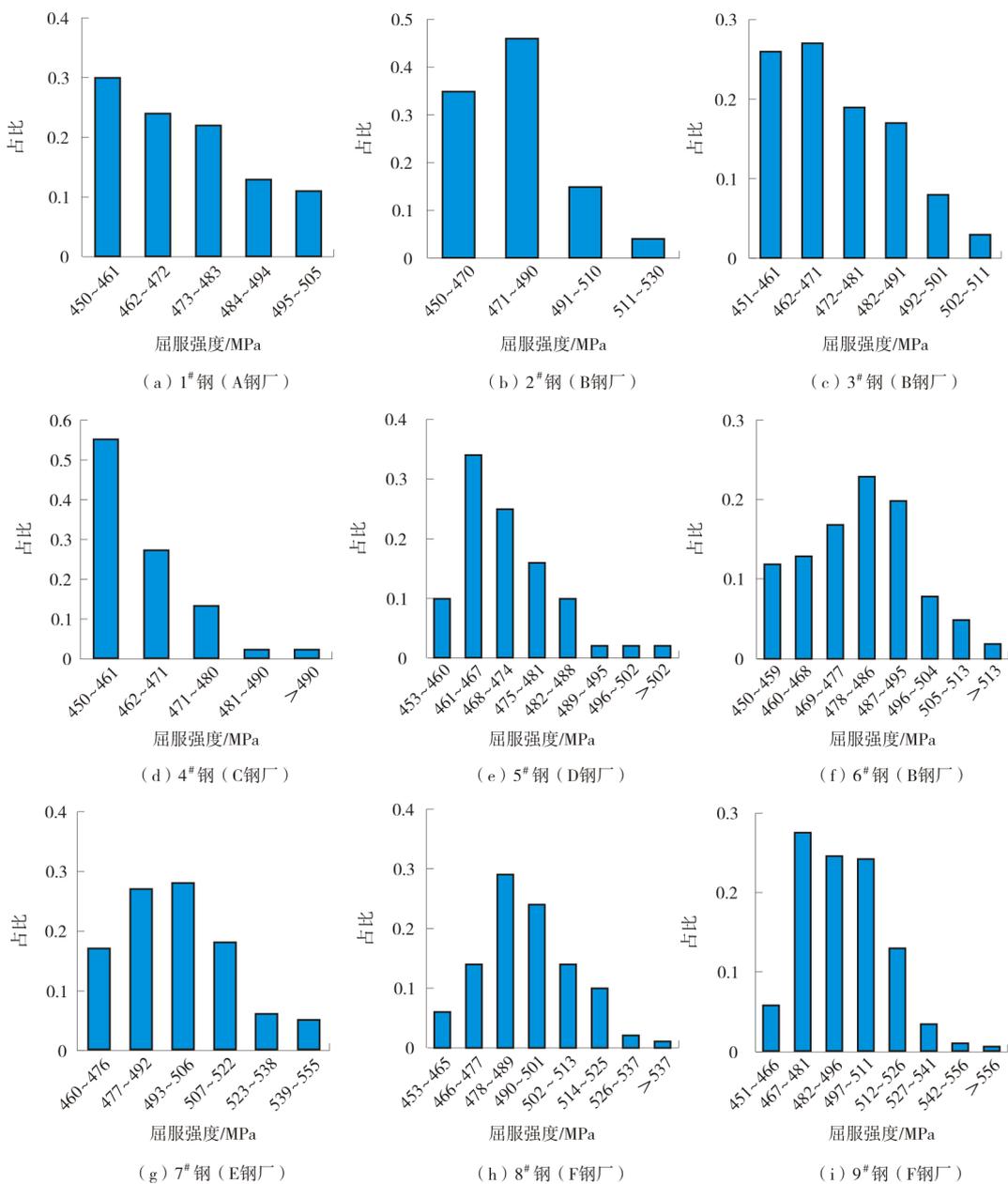


图 1 钢管管体屈服强度统计分析结果

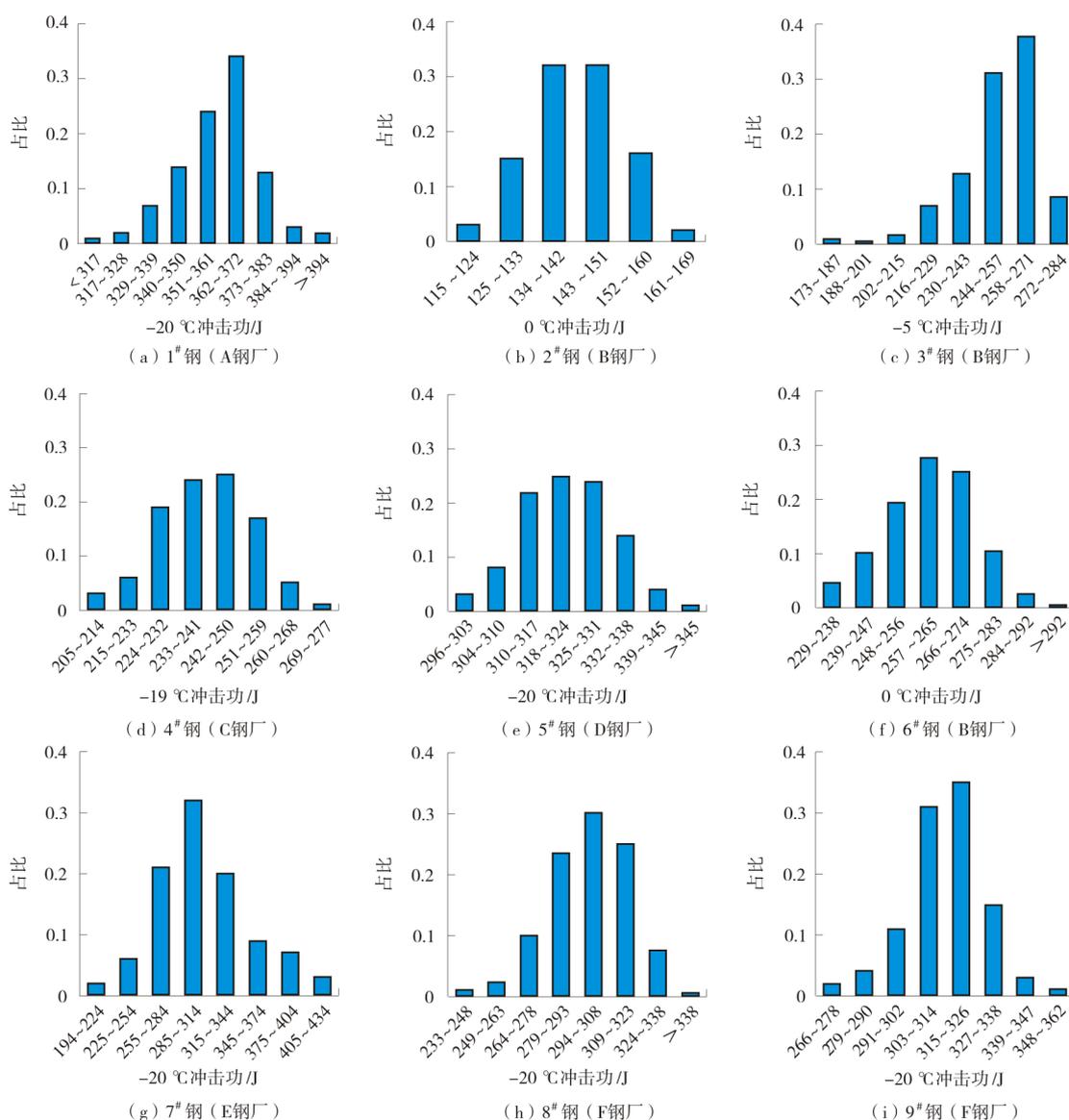


图2 钢管管体低温冲击功统计分析结果

2.2 焊缝性能

图3~图5为不同钢管焊缝强度、热影响区和焊缝金属低温冲击韧性统计结果。从结果看,各批次性能均符合正态分布。然而对比不同钢性能分析结果,焊缝强度、热影响区和焊缝金属低温冲击功的变化规律与管体的性能变化规律一致,但与管体相比,焊缝抗拉强度增加;而热影响区和焊缝金属的低温冲击功明显降低,这主要是由于在焊接过程中,焊缝受到了焊接热循环的作用,这也表明管线钢的化学成分对钢管性能具有重要影响。

2.3 管线钢组织

图6为不同钢厂及钢板的金相组织。所有

钢的组织均为针状铁素体,但不同钢厂及批次钢的组织略有差异。A钢厂生产的1#钢组织主要由均匀的准多边形铁素体、粒状贝氏体及少量马氏体/奥氏体岛构成;B钢厂生产的3#钢主要为粒状贝氏体和少量准多边形铁素体;C钢厂和D钢厂生产的4钢和5#钢的组织则为粒状贝氏体和准多边形铁素体,而5#钢的粒状贝氏体量增加;E钢厂生产的7#钢的组织主要为粒状贝氏体;F钢厂生产的9#钢组织仍为粒状贝氏体和粒状贝氏体构成,而随Cr、Nb含量增加,粒状贝氏体量增加。这种组织的差异和钢的成分及轧制工艺有关。

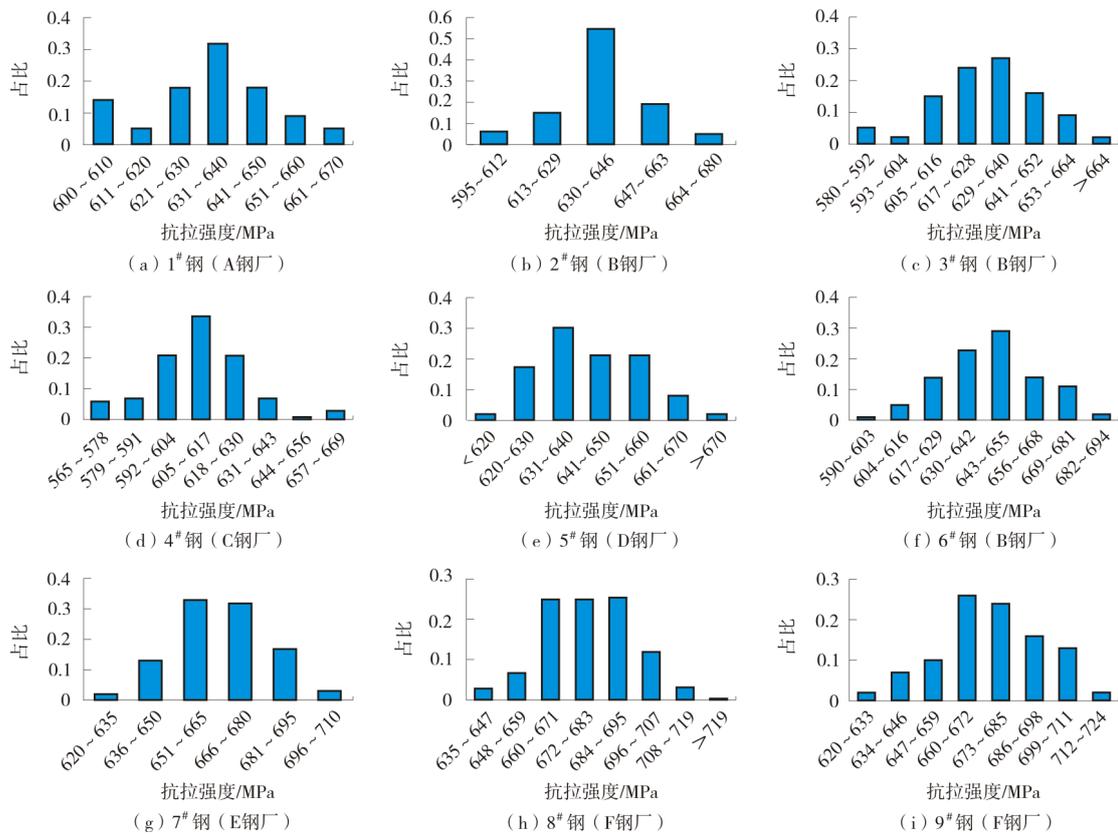


图 3 钢管焊缝抗拉强度统计分析结果

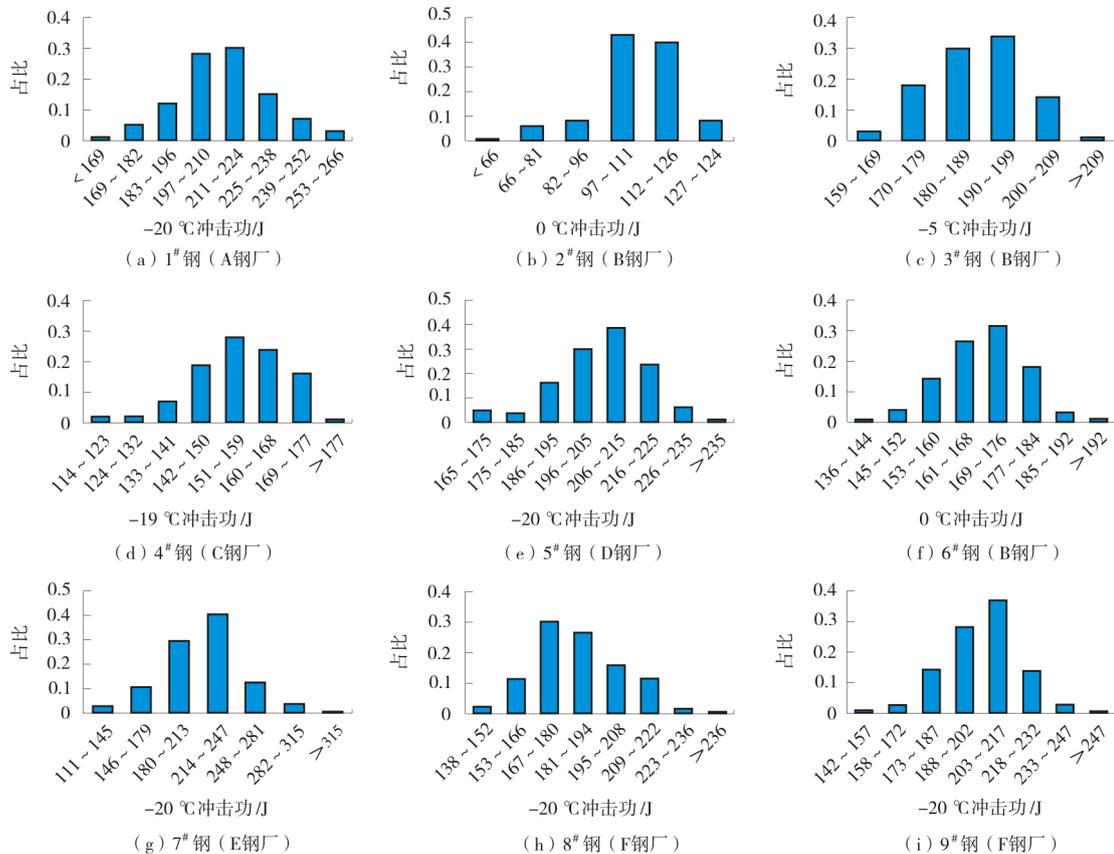


图 4 钢管焊接热影响区低温冲击功统计分析结果

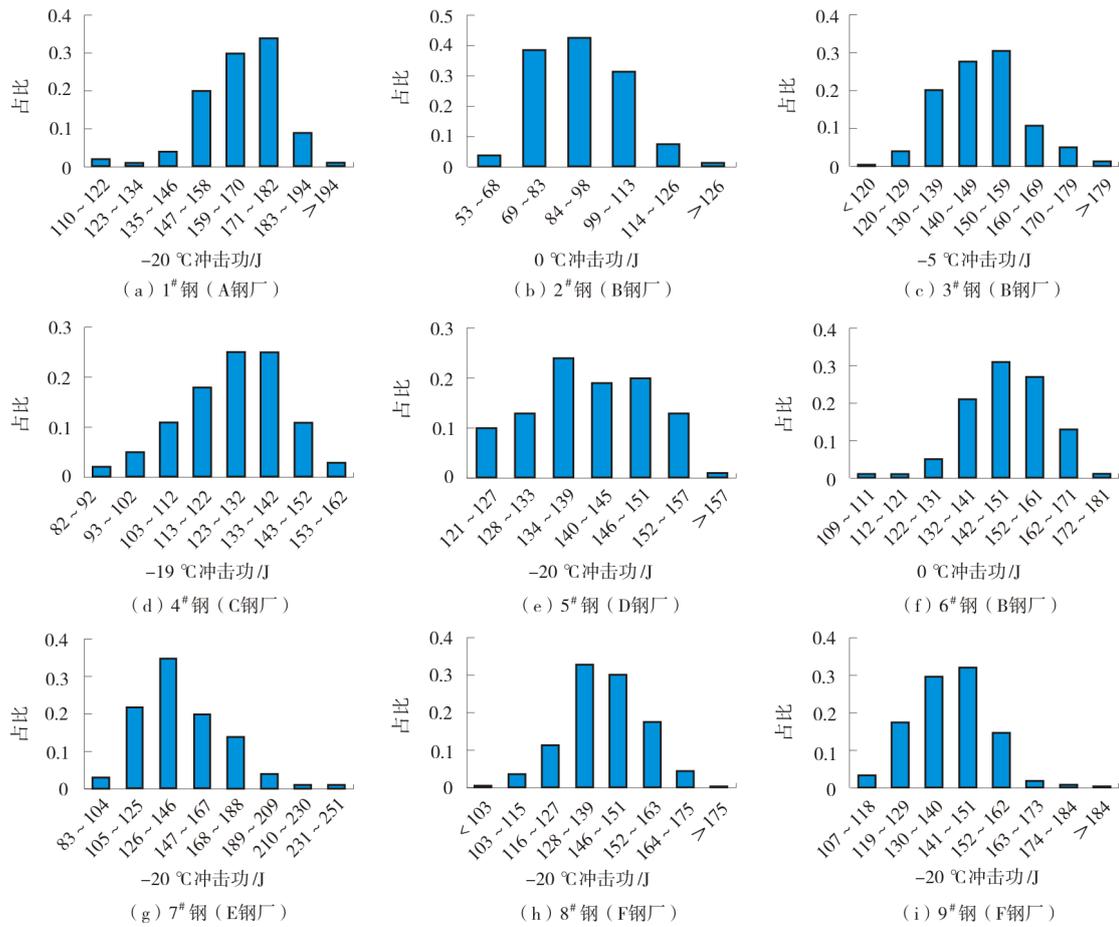


图5 钢管焊缝金属低温冲击功统计分析结果

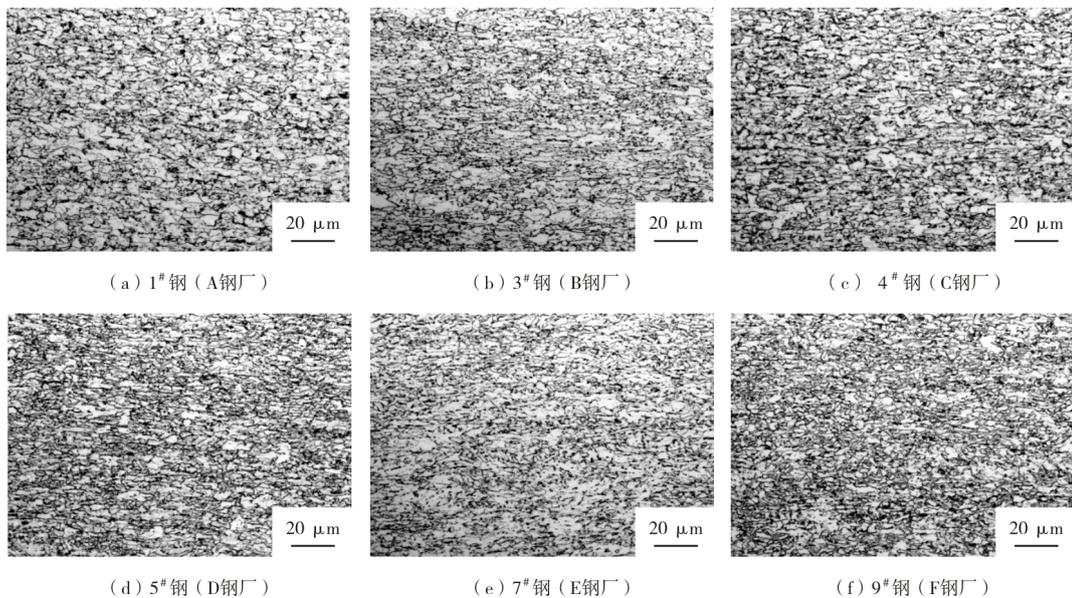


图6 X65 管线钢显微组织

3 讨论

由上述统计分析结果看,不同钢厂、不同批

次生产的 X65 管线钢管性能存在较大差异,为能够清晰分析影响管体性能的关键因素,图7给出了不同钢厂及批次钢管性能的平均统计结果。

尽管不同钢厂生产的钢管规格不同,其钢的轧制工艺、钢管成型及焊接工艺有所差异,但除了 Mn-Mo-Nb 系具有较低的强度和高韧性之外, Mn-Nb 和 Mn-Mo-Nb 系钢管的性能似乎与钢的成分有很大的关系。如 Mn-Cr-Nb 系的 2# 钢、3# 钢具有良好的强度和韧性;而 Mn-Cr 系的 4# 钢具有强度和韧性略有降低。而 Mn-Cr-Nb 系的 5# 钢,钢管的强度和韧性均有所提高;虽然 6# 钢仍采用了 Mn-Nb 系,但钢管的强度和韧性变化不大;相反, Mn-Cr-Nb 系 7# 钢、8# 钢、9# 钢强

度和韧性均有所提高。结合钢的成分看,所有管线钢的 C、Mn 含量相差不大,主要的成分差异为 Cr、Nb,但对 Mn-Nb 系和 Mn-Cr-Nb 系钢, Cr 含量并不是影响钢管性能的决定因素,如 2# 钢、3# 钢、5# 钢和 8# 钢, Cr 含量基本相同,但 5# 和 8# 钢的强度和韧性明显高于 2# 和 3# 钢,同时无 Cr 的 4# 钢和 6# 钢虽然强度略有降低,但 6# 钢的强度和韧性也明显高于 2# 钢、3# 钢;另外,对比 Cr 含量相同的 5# 钢和 8# 钢,5# 钢的强度低于 8# 钢,但韧性高于 8# 钢。

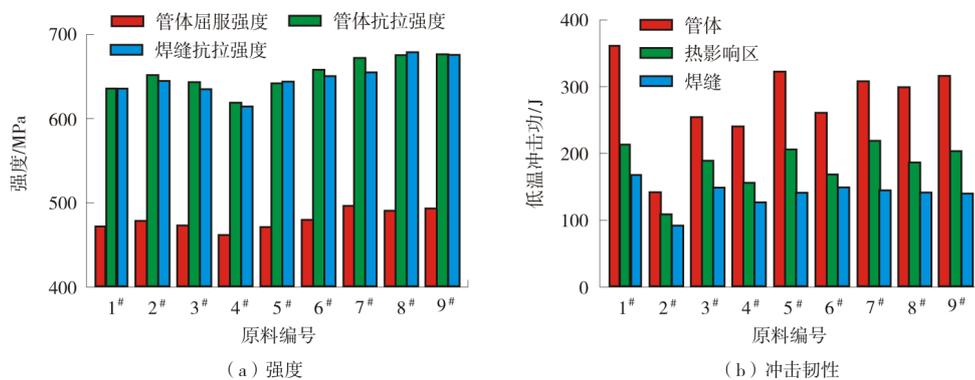


图 7 不同 X65 管线钢管性能对比

钢的成分和工艺决定钢的组织,从而影响钢的性能^[8]。对低碳微合金钢,微合金元素 Nb 对钢的组织 and 性能有显著的影响^[9-10]。由表 1 可见,在不同体系钢中,除 Mo、Cr 含量较大外,其余合金元素中变化最大的主要是微合金元素 Nb,意味着 Nb 对钢管的性能有显著的影响。图 8 给出了不同钢管性能与平均 Nb 含量的关系,由图 8 可见,除 Mn-Mo-Nb 系的 1# 钢外, Mn-Nb、Mn-Cr-Nb 系钢的性能与 Nb 含量存在一定关系,对 Mn-Mo-Nb 系管线钢,虽然添加了 Mo 元素,但 Nb 含量较低,钢管管体的屈服强度较低,但韧性最高,这表明 Mn-Mo-Nb 系管线钢能够获得最佳的强韧性匹配;而对于 Mn-Nb、Mn-Cr-Nb 系管线钢,随着 Nb 含量的增加,钢的强度和韧性增加,但当 $w(\text{Nb})$ 增加到 0.055% 时,随着 Nb 含量的增加,其韧性变化不大。

焊缝的强度、热影响区的韧性也表现出与管体性能相同的规律。但由于焊接热循环的作用,焊接接头强度的分散性减小,而热影响区低温冲击功分散度增大,且与钢管管体相比,热影响区

的冲击功显著降低。此外,从结果看, Cr 含量对钢管的强度和韧性也有一定的影响,在 Nb 含量相近的条件下,随 Cr 元素的添加及其含量的增大,对钢管管体的强度和韧性、焊缝的强度和热影响区的韧性均有一定改善作用。但在高的 Cr、Nb 含量的条件下,合金元素对韧性的影响作用减弱。然而,对焊缝金属,管线钢成分对韧性的影响作用不大,但由现有的数据看,当 $w(\text{Nb})=0.050\% \sim 0.060\%$ 时,焊缝表现出良好的韧性。

综上所述,从 Mn-Mo-Nb、Mn-Nb、Mn-Cr-Nb 系 X65 管线钢管的性能结果看,传统 Mn-Mo-Nb 系管线钢具有良好的综合力学性能。而对于 Mn-Nb、Mn-Cr-Nb 系管线钢,随着 Nb 含量的增加,钢管的强度和韧性得到显著改善。管体和焊缝强度随 Nb 含量的增加几乎呈线性关系;随 $w(\text{Nb})$ 增加到 0.050%~0.060% 时,管体和热影响区的韧性得到最大的改善,进一步增加 Nb 含量,对韧性的影响不大。同时焊缝金属的韧性也在 $w(\text{Nb})$ 为 0.050%~0.060% 时获得良好的稳定性。

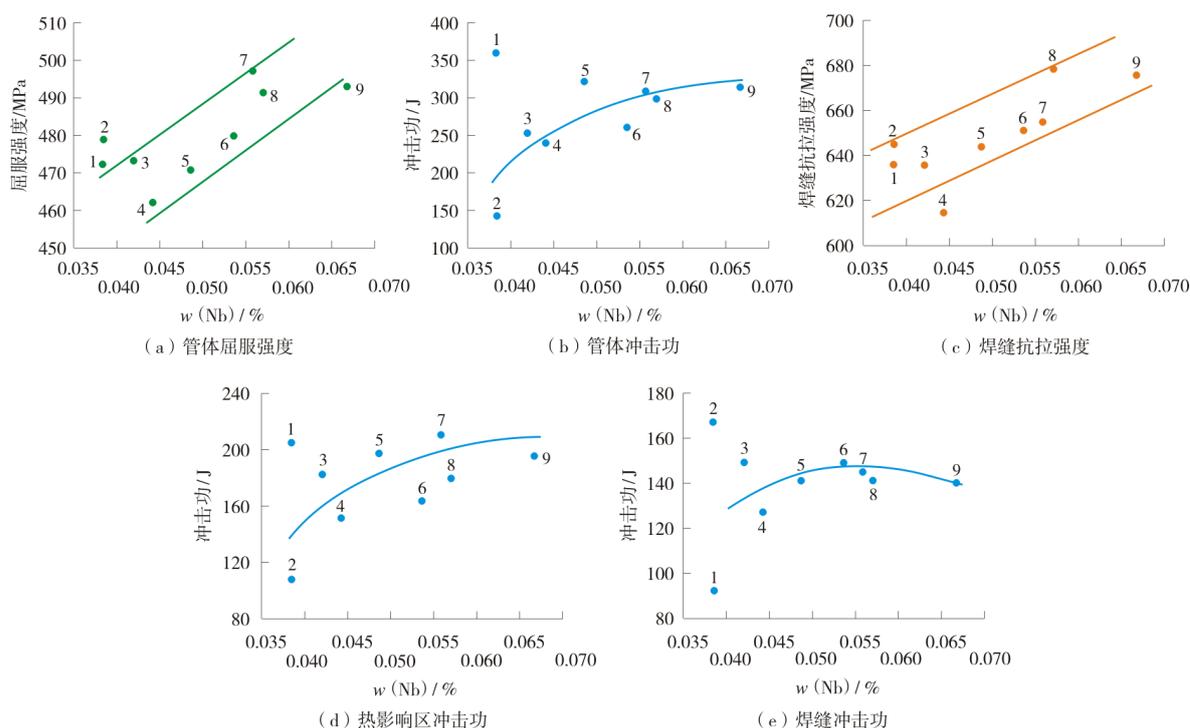


图8 不同钢管性能与平均Nb含量的关系

4 结论

(1) 不同钢厂及批次的 Mn-Mo-Nb、Mn-Nb 和 Mn-Cr-Nb 三种体系 X65 管线钢管均有良好的性能, 均能满足相关技术规范要求。

(2) 对于传统 Mn-Mo-Nb 系管线钢管, 在低 Mo 和 Nb 含量条件下, 虽然钢管的强度略低, 但能够获得高的低温冲击韧性。

(3) Mn-Nb 及 Mn-Cr-Nb 系钢管管体及焊缝的强度与 Nb 含量呈线性关系; 而管体、热影响区的低温冲击韧性则随 $w(\text{Nb})$ 增加到 0.05%~0.06% 时获得最大的改善效果; Nb 含量对焊缝金属的影响不大。

参考文献:

- [1] SMITH Y E, COLDREN A P, CRYDERMAN R L. Toward improved ductility and toughness[M]. Tokyo: Climax Molybdenum Company Ltd., 1992.
- [2] 曹文俊. 高强高韧性管线钢的开发[J]. 山西冶金, 2022(1): 43-45.
- [3] 叶晓瑜. Nb、Mo 元素对 X70 级管线钢组织和硬度的影响[J]. 钢铁, 2012, 47(3): 80-83.
- [4] HULKA K, BORDIGNON P, GRAY J M. Experience

with low carbon HSLA Steel containing 0.06%~0.1% Niobium[J]. Niobium Technical Report, 2004(4): 102-122.

- [5] BAEK J H, KIM Y P, KIM W S, et al. Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference [C]// International Pipeline Conference. America, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2007.
- [6] 郑磊, 高珊, 章传国, 等. 西气东输二线用高 Nb X80 级管线钢宽厚板的开发[J]. 焊管, 2009, 32(4): 25-29.
- [7] QIAO G Y, CHEN X W, ZHANG Z E, et al. Mechanical properties of high-Nb X80 steel weld pipes for the second west-to-east gas transmission pipeline project [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 70(1): 9-28.
- [8] 贺信莱, 尚成嘉, 杨善武, 等. 高性能低碳贝氏体钢成分、工艺、组织、性能与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [9] QIAO G Y, CAO Y B, LIAO B, et al. Effect of dissolution and precipitation of Nb on phase transformation, microstructure, and microhardness of two high-Nb pipeline steels [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71(3): 627-637.
- [10] 雍歧龙, 马鸣图, 吴宝榕. 微合金钢-物理和力学冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.

作者简介: 李立豪 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事管线钢的研究工作。

通讯作者: 肖福仁 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事管线钢及焊接研究开发等工作。

收稿日期: 2022-08-11

编辑: 董超