



125ksi 超级马氏体油管成分-组织-性能-工艺 综合控制技术

赵吉庆¹, 万五霞², 李造宇², 杜丽萍^{1,3}

(1 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081; 2 大冶特殊钢有限公司, 黄石 435001;

3 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

摘要: 125ksi 钢级 15Cr 超级马氏体不锈钢具有优良的高强度、高韧性匹配与耐 CO₂ 腐蚀性能, 是深度 >7 000 m 深井油管管的候选材料。从成分设计、生产工艺、组织调控等方面, 论述了 15Cr 超级马氏体不锈钢油管的高强度高韧综合控制技术。成分控制方面, 采用无 δ 铁素体成分设计, $w[\text{Cr}]$ 取 15%, $w[\text{Ni}]$ 取 6.5%~7%, $w[\text{C}]$ 取 0.01%~0.03%, $w[\text{Cu}]$ 取 1.25%~1.5%, Cr、Ni 元素合理匹配是降低 δ 铁素体含量的主要因素, C、Cu 含量的合理匹配是获得高强度高韧性性能的关键因素。冶炼工艺方面, 研究了电弧炉钢杂质元素的影响, 结果表明, V、N、Al 杂质元素会增加 15Cr 钢的硬度, 将回火温度提高至 550~575 °C, 能够降低硬度保证韧性。热加工成型方面, 通过热变形试验, 获得了 15Cr 钢的动态再结晶规律, 制定了无缝管热穿孔成型变形温度 1 100~1 150 °C, 能够获得细小的再结晶晶粒。组织性能调控方面, 通过热处理工艺研究, 确定了正火温度采用 950~980 °C, 即能保证晶粒尺寸不明显长大, 又能获得高强度与高韧性的匹配。

关键词: 125 Ksi 钢级; 超级马氏体不锈钢; 成分设计; 强韧化匹配

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00262 **中图分类号:** TG142. 7

Composition-Structure-Properties and Process Comprehensive Control Technology of 125ksi Super Martensitic Oil Well Pipe Material

Zhao Jiqing¹, Wan Wuxia², Li Zaoyu², Du Liqing^{1,3}

(1 Special Steel Institute of Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

2 Daye Specific Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China; 3 Institute of materials & metallurgy,

Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The 125ksi grade 15Cr super martensite stainless steel exhibits excellent high strength and high toughness matching, and corrosion resistance to CO₂, which making it a promising material for oil well pipes exceeding a depth of 7 000 m. This paper comprehensively discusses the control technology for achieving high strength and high toughness in 15Cr super martensite stainless steel tubing through composition design, production process optimization, and microstructure regulation. In terms of composition control, a δ ferrite-free composition design is employed with a chromium content ($w[\text{Cr}]$) of 15%, nickel content ($w[\text{Ni}]$) ranging from 6.5% to 7%, carbon content ($w[\text{C}]$) between 0.01% and 0.03%, and copper content ($w[\text{Cu}]$) varying from 1.25% to 1.5%. The appropriate combination of chromium and nickel elements plays a crucial role in reducing the δ ferrite content, while the optimal balance between carbon and copper contents is key to obtaining superior mechanical properties characterized by high strength and high toughness. Regarding the smelting process, this study investigates the influence of impurity elements on electric furnace steel. The results show that vanadium (V), nitrogen (N), and aluminum (Al) impurities increase the hardness of the 15Cr steel alloy. and raise the tempering temperature to 550 °C-575 °C, which can reduce the hardness and ensure the toughness. Concerning hot processing and molding techniques, the dynamic recrystallization behavior are obtained through hot deformation tests conducted on the 15Cr steel alloy. The optimum hot perforation deformation temperature for seamless pipe manufacturing falls within 1 100 °C to 1 150 °C as it facilitates grain refinement via fine recrystallized grains formation. Microstructure regulation involves determining an appropriate normalizing temperature during heat treatment processes. The research results suggest that normalizing at temperatures ranging from 950 °C to 980 °C helps maintain grain size without significantly grown, while the match of high strength and high toughness can be obtained.

Key Words: 125ksi Steel Grade; Super Martensitic Stainless steel; Composition Design; Strength and Toughness Matching

油井管包括钻柱构件、套管和油管等,通过专用螺纹连接形成钻柱、套管柱和油管柱。钻柱的主要作用是油气开发,套管柱和油管柱则是封隔地层和开采油气的唯一通道,因此,套管寿命决定了油气井寿命。油井管普遍采用美国石油协会(API)标准生产,目前我国常规 API 标准油管和套管已经实现了国产化,产品达到了国外相当的水平^[1-16]。

我国陆上油气田地质条件复杂、埋藏深,尤其是西北塔里木、四川等油田,最大井深近 9 000 m,井下温度达 200 °C,压力高达 150 MPa,并常伴随 CO₂、H₂S、Cl 等复杂腐蚀介质及山前构造、盐膏层等地质环境,常规 API 产品无法满足服役要求,大量高耐蚀、高强韧性的非 API 油管获得推广应用。井下温度小于 170 °C 时,大量应用 95~110ksi 钢级的超级 13Cr 油井管,随着井深的不断增加,井下温度大于 180 °C 时,125ksi 钢级 15Cr 油管在地层水和酸化改造环境中的腐蚀速率明显低于 13Cr 材料,替代 13Cr 应用于温度大于 180 °C 的井段,更能保证井筒的安全性^[17]。

能够应用于 CO₂ 腐蚀环境的 15Cr 油井管以 JFE 的 UHP1-15Cr-125 为典型代表,其主成分为 15Cr-6Ni-2Mo-1Cu, $w[C] \leq 0.04\%$ 。除此之外,住友公司也报道了一种 125ksi 钢级的专利,主成分为 17Cr-6Ni-2Mo-3Cu, $w[C] \leq 0.03\%$ ^[18-19]。相对于 13Cr 材料,15Cr 油管除了 Cr、Mo、Ni 含量提高外,还添加了 Cu 元素,具有了更高的强度等级^[20-21],同时由于合金体系的复杂化,也增加了成分—组织—性能—工艺控制的难度。因此,分析讨论成分设计、热处理工艺、冶炼与热加工工艺参数对强、韧性匹配以及组织的影响规律,为最终提出 125ksi 钢级 15Cr 油管材料的成分—组织—性能综合调控技术提供理论依据。

1 成分设计

15Cr 超级马氏体不锈钢要达到 125ksi 钢级的力学性能要求如下:屈服强度 862~1 034 MPa,延伸率 $\geq 16\%$, -10 °C 冲击功纵向 KV 值 ≥ 140 J、横向 KV 值 ≥ 120 J,硬度 ≤ 37 HRC。根据强度与韧性匹配的要求,成分设计需考虑几方面因素。

(1) δ 铁素体相控制

成分中 Cr 当量提高以后, δ 铁素体的形成倾向增加,大量 δ 铁素体会形成带状组织,降低横向冲击韧性,还会引起耐腐蚀性能的下降。因此,成分设计首先需考虑 Cr/Ni 当量的平衡,避免大量铁素体形成。通过热力学计算可以分析不同 Cr/Ni 当量

下 δ 铁素体的形成温度与含量,图 1 为 C、Cr、Ni、Cu 元素的影响规律,计算其他元素时,取 $w[C] 0.015\%$ 、 $w[Cr] 15.5\%$ 、 $w[Ni] 6.5\%$ 、 $w[Cu] 1.25\%$ 。由热力学相图 1(a)、(c)、(e)、(g) 可知,Cr、Ni 元素对 δ 铁素体的影响较明显,C、Cu 元素的影响略低。结合各元素相的析出温度图 1(b)(d)(e)(f) 可知,当 $w[Cr] > 15\%$ 时,在热加工加热温度范围(1 150 °C 左右),即可发生 δ 铁素体相转变, $w[Cr]$ 达到 17%,1 150 °C 下 δ 铁素体接近 20%,固溶温度范围(950~1 050 °C)也会发生 δ 铁素体相变。当 $w[Ni]$ 为 16% 时,在固溶处理温度范围(950~1 040 °C)即可发生 δ 铁素体转变,热加工温度范围会形成 10% 以上的 δ 铁素体。因此,从 δ 铁素体控制的角度出发, $w[Cr]$ 取 15%,要优于 17%,此时 $w[Ni]$ 取 6.5%~7%,以保证热加工加热保温时,不形成过量的 δ 铁素体。

图 2 分别为 0.025C-15.0Cr-6.5Ni-1.25Cu 试验钢、0.025C-15.5Cr-6.5Ni-1.25Cu 试验钢与 0.025C-17Cr-6.5Ni-3.0Cu 试验钢经正火+回火热处理后的 δ 铁素体形貌与分布,可见 $w[Cr]$ 为 17% 时,即使 Ni、Cu 含量较高,也存在约 10% 的 δ 铁素体,而 $w[Cr]$ 为 15%~15.5% 时, δ 铁素体含量较低,试验结果验证了 $w[Cr]$ 取 15% 的合理性。

(2) 强度与韧性匹配

油井管要求高的强度与韧性匹配,油管钢级提高至 125 ksi 以后,对塑、韧性的要求并没有降低,无异增加了成分控制的难度。125 ksi 钢级超级马氏体不锈钢中主要的强化元素有 C、Mo、Cu,韧化元素主要是 Ni,其中 C、Mo 元素主要起固溶强化作用,Cu 元素主要起沉淀析出强化作用^[22]。125 ksi 钢级材料中合金元素含量非常高,材料的 Ms 点会随之下降,因此,强韧性匹配还应从相变的角度调控合金元素配比,以实现在室温条件下发生较充分的马氏体相变,获得足够的强度,同时保留适量的奥氏体相,提高韧性。经试验研究,C、Cu 元素的匹配对相变的影响最为显著。

图 3 是 1 040 °C 淬火,500~550 °C 热处理,不同 C、Cu 含量对 15Cr 材料强度与韧性的影响。当 $w[C]$ 在 0.01%~0.03%, $w[Cu]$ 为 1.0%~1.5% 能达到 125ksi 钢级要求, $w[Cu]$ 大于 2.5%,强度显著下降,因此, $w[C]$ 在 0.01%~0.03%, $w[Cu]$ 应控制在 1.0%~1.5%。 $w[Cu]$ 为 1.0%,能够达到强度与韧性要求的回火温度区间 525~550 °C,525 °C 回火冲击功余量不大,550 °C 回火强度与韧性均有一定的余量。 $w[Cu]$

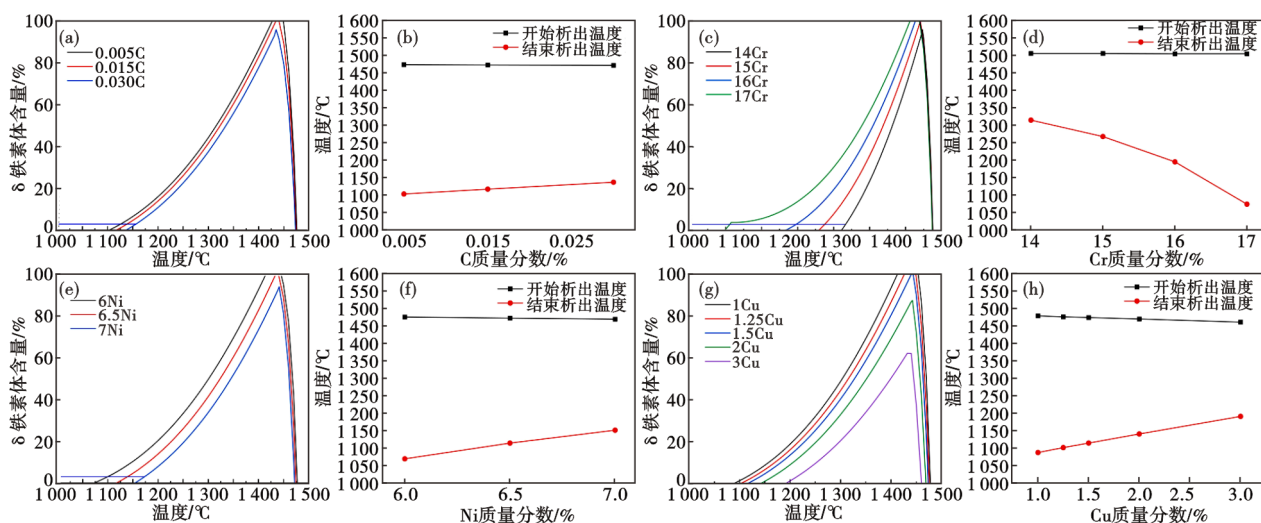


图 1 合金元素对 δ 铁素体的影响: (a) 不同 C 含量的热力学相图, (b) 不同 C 含量下 δ 铁素体的析出温度, (c) 不同 Cr 含量的热力学相图, (d) 不同 Cr 含量下相的析出温度, (e) 不同 Ni 含量的热力学相图, (f) 不同 Ni 含量下相的析出温度, (g) 不同 Cu 含量的热力学相图, (h) 不同 Cu 含量下相的析出温度

Fig. 1 Effect of alloy elements on the δ ferrite : (a) thermodynamic phase diagrams of different C contents; (b) the precipitation temperature of δ ferrite under different C contents, (c) thermodynamic phase diagrams of different Cr contents, (d) the precipitation temperature of phases under different Cr contents, (e) thermodynamic phase diagrams of different Ni contents, (f) the precipitation temperature of phases under different Ni contents, (g) thermodynamic phase diagrams of different Cu contents, (h) precipitation temperature of phase under different Cu contents

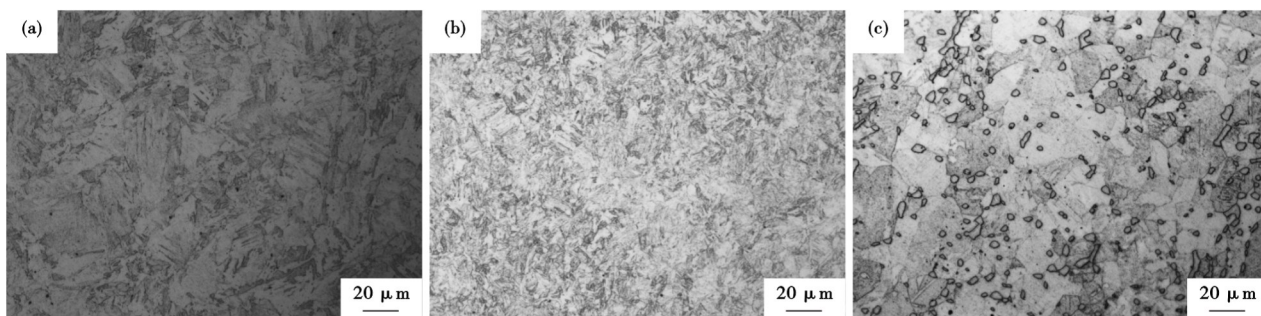


图 2 不同 Cr 含量试验钢 δ 形貌与分布: (a) 0.025C-15.0Cr-6.5Ni-1.25Cu, (b) 0.025C-15.5Cr-6.5Ni-1.25Cu, (c) 0.025C-17Cr-6.5Ni-3.0Cu

Fig. 2 The δ morphology and distribution of test steel with different Cr content : (a) 0.025C-15.0Cr-6.5Ni-1.25Cu, (b) 0.025C-15.5Cr-6.5Ni-1.25Cu, (c) 0.025C-17Cr-6.5Ni-3.0Cu

为 1.25%, 强度变化不大, 冲击韧性大幅度提高, 485~550 °C 回火区间, 均能够满足强度与韧性的要求, 余量均较大。w[Cu] 为 1.5%, 550 °C 回火后的强度达到下限值, 485~525 °C 区间, 具有较高的强度与韧性匹配。因此, 当 w[C] 在 0.01%~0.03%, w[Cu] 按 1.25%~1.5% 控制具有更好的强度与韧性匹配, 热处理的温度区间也较大, 可选择 1 040 °C 淬火+500~550 °C 回火热处理。1%w[Cu] 的情况下, 降低 C 含量, 强度虽有一定程度的下降, -10 °C 冲击功提高显著, 485~550 °C 回火区间也能满足强度与韧性的要求, 但 550 °C 回火时强度已达到下限, 可选择 1 040 °C 淬火+485~525 °C 回火热处理。w[Cu] 在

1.0%~1.5%, 降低 C 含量但能够获得更好的强度与韧性的匹配, 但 C 含量下降后, δ 铁素体的含量可能会增加, 工业化生产冶炼的难度也随之增加。

当 w[C] < 0.01%, w[Cu] 在 2.0%~2.5% 能够达到 125 ksi 钢级强度要求, 485~550 °C 温度区间回火, 均能达到强度与韧性匹配要求, -10 °C 冲击功余量非常大, 550 °C 回火时, 强度余量下降, 可选择 485~525 °C 回火处理。w[Cu] 为 3.0%, 强度非常高, -10 °C 冲击韧性下降显著。因此, 当 w[C] < 0.01%, w[Cu] 可以按 2.0%~2.5% 控制, 可选择 485~525 °C 回火热处理。

15Cr 油管材料要求非常高的耐腐蚀性能, 降低 C 含量, 有利于提高耐蚀性, 但工业化生产一般采用

电弧炉+炉外精炼冶炼,将 $w[C]$ 控制在 0.01% 以内,冶炼难度较大,也不利于控制成本,因此, $w[C]$ 不推荐按 $<0.01\%$ 控制。建议 $w[C]$ 按超低控制在 0.01%~0.03%, $w[Cu]$ 控制在 1.0%~1.5%,通过热处理工艺的调控,可以获得理想的强度与韧性匹配。

不同 C、Cu 配比成分热处理后,通过 XRD 衍射,测试了钢中的残余奥氏体含量,结果见表 1。15Cr 材料热处理后,残余奥氏体含量随着 C、Cu 含量的提高而增加,C 元素的影响大于 Cu 元素,强度、韧性匹配较好的试验钢,热处理后残余奥氏体的含量大约为 10%~15%。不同成分试验钢的强度随着奥氏体相含量提高,强度下降,韧性提高,合适的马氏体-奥氏体相比,使材料具备了较好的强韧性匹配,其中 C 与 Cu 元素的合理匹配最为关键。

2 电弧炉冶炼 V、N 元素对力学性能的影响

油井管材料多采用电弧炉+炉外精炼的冶炼工艺,可采用连铸或模铸,13Cr 材料的连铸技术已经比较成熟,15Cr 超级马氏体不锈钢由于合金元素含量更高,偏析后产生的带状组织不容易在后续的热加工与热处理中消除,目前采用模铸工艺更为合理。冶炼过程中,除了要对成分进行窄范围控制,降低 P、S 及五害元素^[13]等,还应注意脱氧元素的控

表 1 不同 C、Cu 配比试验钢热处理后的残余奥氏体含量
Table 1 Residual austenite content of test steel after heat treatment with different C and Cu ratios

成分	热处理工艺	奥氏体体积分数/%
0.025C-15.5Cr-16.5Ni-1.0Cu	1 040 °C×1 h 油冷 +525 °C×2 h 空冷	16.69
0.025C-15.5Cr-16.5Ni-1.25Cu	1 040 °C×1 h 油冷 +525 °C×2 h 空冷	10.58
0.025C-15.5Cr-16.5Ni-1.5Cu	1 040 °C×1 h 油冷 +525 °C×2 h 空冷	17.01
0.015C-15.5Cr-16.5Ni-1.0Cu	1 040 °C×1 h 油冷 +525 °C×2 h 空冷	7.76
0.007C-15.5Cr-16.5Ni-3Cu	1 040 °C×1 h 油冷 +525 °C×2 h 空冷	7.41
0.02C-15.5Cr-16.5Ni-2.5Cu	1 040 °C×1 h 油冷 +525 °C×2 h 空冷	47.03
0.02C-15.5Cr-16.5Ni-3Cu	1 040 °C×1 h 油冷 +525 °C×2 h 空冷	34.05
0.02C-15.5Cr-16.5Ni-3Cu	1 040 °C×1 h 油冷 +525 °C×2 h 空冷	40.37
0.02C-17Cr-16.5Ni-3Cu	1 040 °C×1 h 油冷 +525 °C×2 h 空冷	66.63

制,以及废钢中不可避免的杂质元素,如 V、Ti、Nb、Al 等,同时,还会存在 0.015% 左右的 N 元素。这些元素导致材料热处理后的硬度高于预期,一方面需要在冶炼过程中尽量去除,另一方面需对材料热处理制度进行调整,以满足强度、韧性的匹配要求。

图 4 为试验钢 0.015%C-1%Cu 中添加 0.10% $w[V]$ 与 0.015% $w[N]$ 元素后,在不同回火温度下的力学

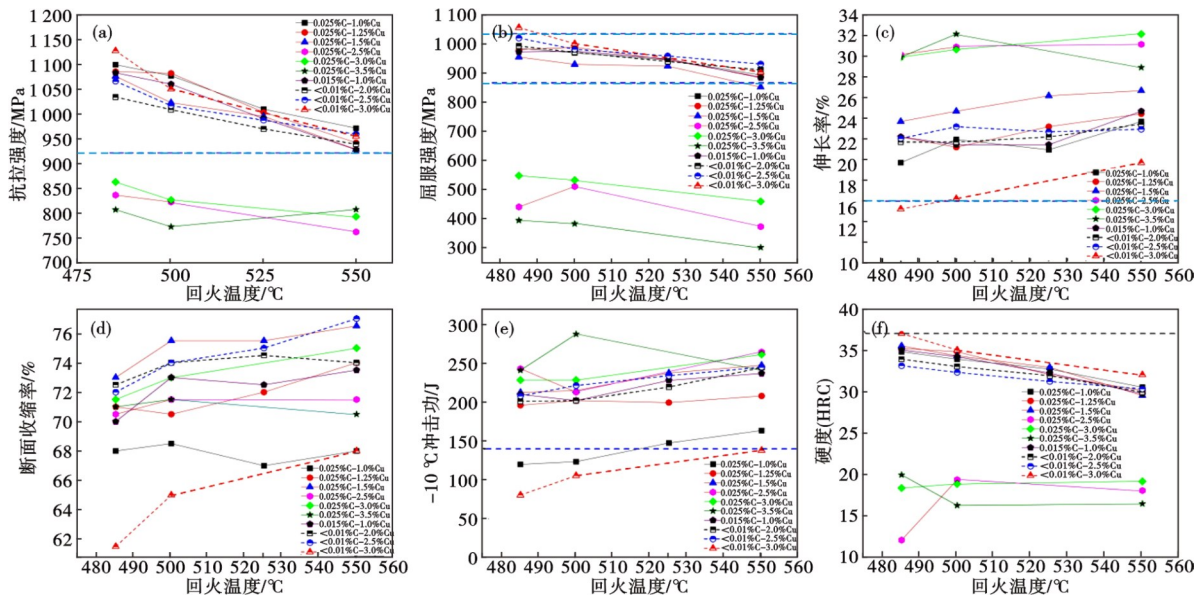


图 3 1 040 °C 淬火+500~550 °C 热处理时不同 C、Cu 含量对 15Cr 材料强度与韧性的影响:(a) 抗拉强度,(b) 屈服强度,(c) 伸长率,(d) 断面收缩率,(e) -10 °C 冲击功,(f) 硬度

Fig. 3 Effects of different C and Cu contents on the strength and toughness of 15Cr materials during 1 040 °C quenching +500 °C~550 °C heat treatment : (a) tensile strength, (b) yield strength, (c) elongation rate, (d) surface shrinkage rate, (e) -10 °C impact energy, (f) hardness

性能。与 0.015%C-1.0%Cu 试验钢成分相比, 添加了 V、N 等电弧炉钢冶炼容易残留的元素后, 相同热处理制度下, 试验钢的强度、硬度有所提高, 塑性、韧性有所下降。由此可见, 添加 N 元素与 V 元素后, 较为明显的增加了回火后的硬度与屈服强度, 尤其高温回火后的屈服强度与硬度提高较为显著, 主要是 N 的固溶强化作用与 V 在 525 °C 以上温度的析出强化作用。但由添加 V、N 试验钢不同回火温度下的力学性能可知, 试验钢中增加强化作用的残余元素后, 可通过提高回火温度, 来降低硬度, 当回火温度 550~575 °C, 硬度可下降至 32HRC 以下, 同时保证强度与冲击韧性达到技术指标的要求。因此, 工业化生产过程, 应根据材料实际的杂质元素水平, 在实验室基本规律的基础上, 制定现场热处理制度。

3 无缝管生产与组织性能调控

试验室分别设计冶炼钢材, 采用 25 kg 真空感应炉冶炼, 开坯后锻造成 $\phi 30$ mm 的棒材, 始锻温度 1 150 °C, 终锻温度不小于 900 °C。

油井管通常采用热穿孔+热轧工艺成型, 轧制前的坯料应尽量提高成分均匀性, 避免轧制后沿纵向产生带状组织, 成本不显著增加的前提下, 可在钢锭开坯后进行均匀化处理或通过坯料镦拔等方式来提高成分与组织均匀性。由成分偏析引起的块状残奥是 15Cr 超级马氏体不锈钢中常见的带状组织类型, 如图 5 所示, 会导致材料力学性能不均

匀, 如果大量存在, 还会影响尺寸稳定性。一般情况, 采用两次回火, 可以充分消除残奥, 大幅度降低其含量, 以及对力学性能的影响程度; 采用正火+高温回火预处理, 则可以完全消除残奥。

对于无缝管, 现场整体热处理多采用二次回火, 即可达到大幅度消除残奥的目的, 减小其对组织均匀性的影响。图 6 为无缝管采用二次回火前后的组织形貌, 二次回火后, 虽然还能观察到带状组织的痕迹, 但有效的消除了大块状的残奥组织。

油井管性能热处理时, 还需控制晶粒度, 晶粒度越细小, 越有利于同时获得高强度与高韧性, 同时也能一定程度提高耐腐蚀性能。晶粒度的控制主要从热加工动态再结晶与热处理正火制度两个工艺过程控制。高合金马氏体不锈钢淬透性强, 正火过程中一般不发生 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变, 一旦发生混晶或粗晶, 粗大的原奥氏体晶粒会随着马氏体相变遗传到最终组织中, 因此, 热加工成型过程, 必须保证发生充分的动态再结晶, 获得均匀的组织。

图 7 为 0.03C-15.5Cr-6.5Ni-1Cu 试验钢在不同温度与应变速率下的晶粒度形貌, 试样压缩量为 70%。可以看出, 当变形温度小于 1 100 °C 时, 宜采用 0.1 s⁻¹ 的变形速率以获得均匀细小的再结晶组织。当变形温度大于 1 100 °C 时, 在两种变形速率下均发生了完全再结晶现象, 此阶段宜采用 1 s⁻¹ 的变形速率, 以避免再结晶晶粒尺寸过大, 温度达到 1 200 °C 晶粒长大较为明显。无缝管热穿孔是一个

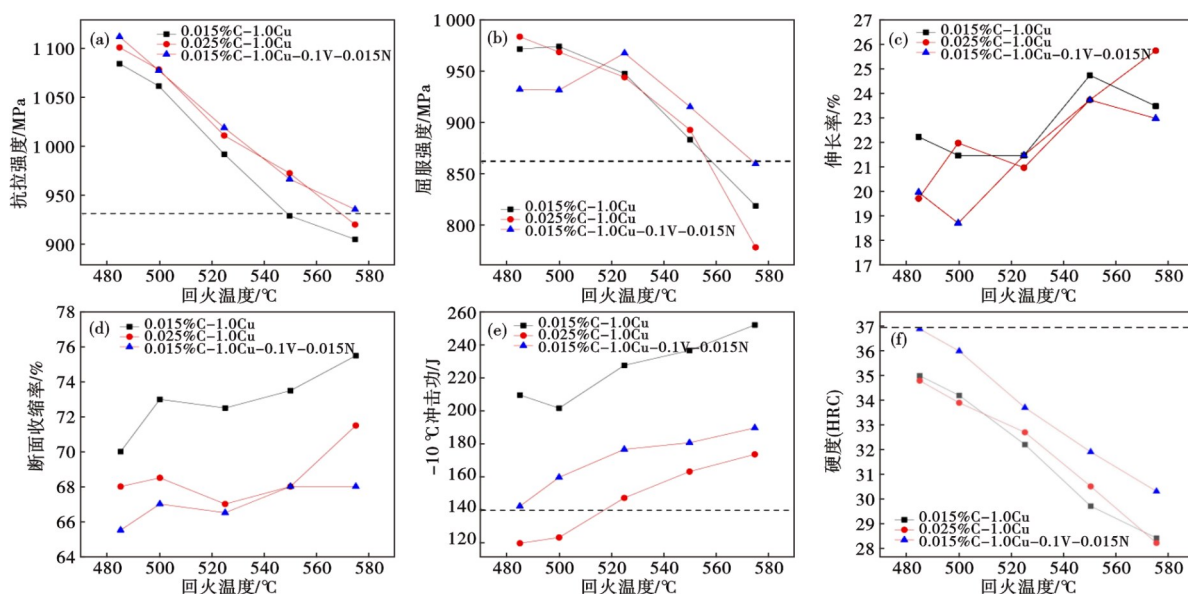


图 4 15Cr 钢中添加杂质元素 V、N 后的力学性能: (a) 抗拉强度, (b) 屈服强度, (c) 伸长率, (d) 断面收缩率, (e) 冲击功, (f) 硬度
Fig. 4 Mechanical properties of 15Cr steel with added impurity elements V and N : (a) tensile strength, (b) yield strength, (c) elongation rate, (d) surface shrinkage rate, (e) impact energy, (f) hardness

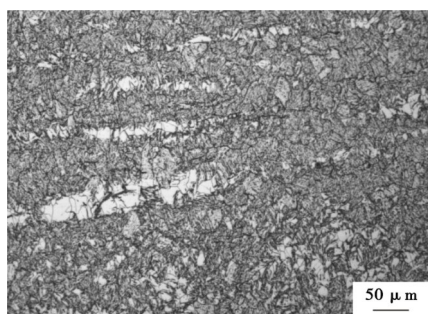


图 5 15Cr 超级马氏体不锈钢中呈带状分布的残余奥氏体
Fig. 5 Residual austenite with banded distribution in 15Cr super martensitic stainless steel

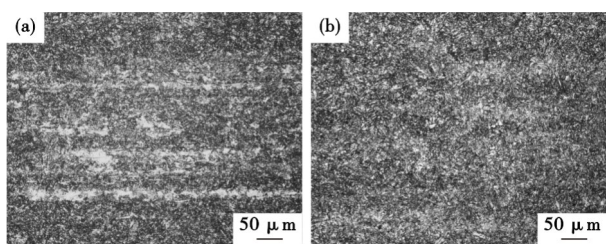


图 6 二次回火对 15Cr 超级马氏体无缝管组织的影响:(a) 一次回火,(b)二次回火

Fig. 6 Effect of secondary tempering on the structure of 15Cr super martensitic seamless pipe : (a) primary tempering, (b) secondary tempering

快速形变的过程,更接近快应变速率下的动态再结晶规律,因此,建议在低于 1 200 °C 温度下热穿孔成型。

正火加热温度对晶粒度的影响也较大,正火温度提高有利于合金元素充分固溶,回火时的析出相在马氏体板条界面析出,细小而弥散,但正火温度过高会导致晶粒粗大,因此,合适的正火温度要兼顾固溶效果与晶粒尺寸。图 8 为 15Cr 超级马氏体不锈钢无缝管 950~1 040 °C 固溶处理后的晶粒尺寸。980 °C 以下温度正火处理,晶粒尺寸比较细小,评级结果为 7~8 级,1 040 °C 正火后晶粒尺寸长大较明显,评级结果为 5 级。

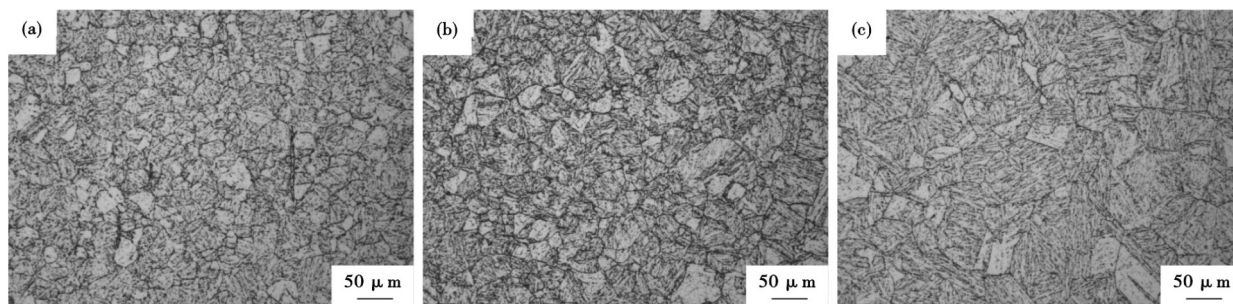


图 8 15Cr 超级马氏体不锈钢不同正火温度下的晶粒尺寸:(a) 950 °C,(b)980 °C,(c)1 040 °C

Fig. 8 Grain size of 15Cr super martensitic stainless steel at different normalizing temperatures : (a) 950 °C, (b)980 °C, (c)1 040 °C

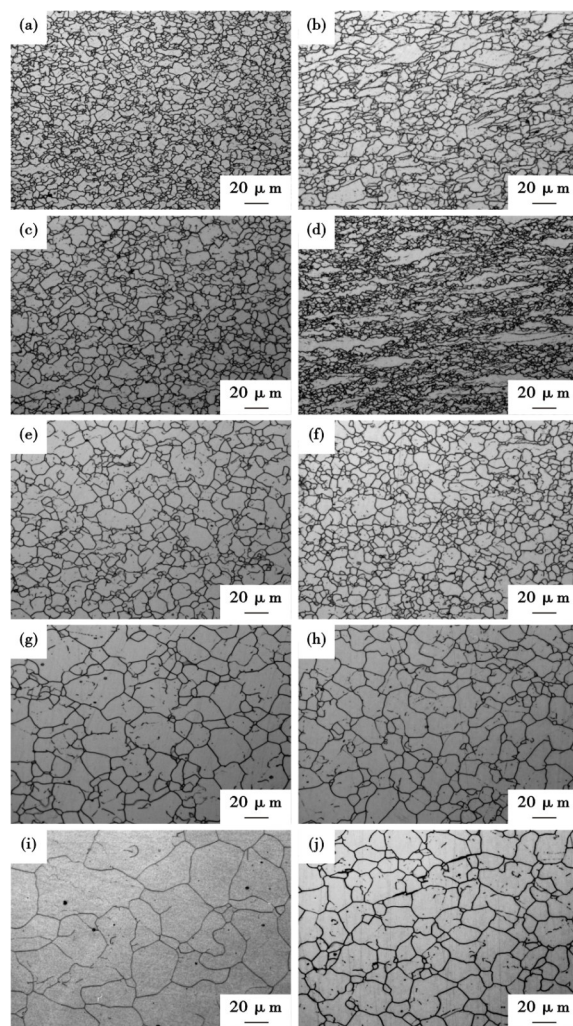


图 7 0.03C-15.5Cr-6.5Ni-1Cu 试验钢在不同温度与应变速率下的晶粒度形貌:(a)1 000 °C,0.1 s⁻¹;(b)1 000 °C,1 s⁻¹;(c)1 050 °C,0.1 s⁻¹;(d)1 050 °C,1 s⁻¹;(e)1 100 °C,0.1 s⁻¹;(f)1 100 °C,1 s⁻¹;(g)1 150 °C,0.1 s⁻¹;(h)1 150 °C,1 s⁻¹;(i)1 200 °C,0.1 s⁻¹;(j)1 200 °C,1 s⁻¹

Fig. 7 Grain size morphology of 0.03C-15.5Cr-6.5Ni-1.0Cu test steel at different temperatures and strain rates : (a) 1 000 °C, 0.1 s⁻¹; (b)1 000 °C, 1 s⁻¹; (c)1 050 °C, 0.1 s⁻¹; (d)1 050 °C, 1 s⁻¹; (e)1 100 °C, 0.1 s⁻¹; (f)1 100 °C, 1 s⁻¹; (g)1 150 °C, 0.1 s⁻¹; (h)1 150 °C, 1 s⁻¹; (i)1 200 °C, 0.1 s⁻¹; (j)1 200 °C, 1 s⁻¹

从晶粒控制来看,正火温度应按 980 °C 以下控制,正火温度最终确定,还需综合考虑合金元素的固溶效果,即正火温度对强度与韧性匹配的影响。15Cr 超级马氏体不锈钢无缝管不同正火温度下的力学性能见表 2。950~1 040 °C 正火处理,强度与韧性的差异都不大,均能达到 125ksi 钢级的技术要求,可见即使采用 950 °C 正火处理,材料的固溶效果也是足够的,因此,无缝管的正火温度可以采用 950~980 °C,兼顾强韧性匹配与晶粒尺寸。

4 结论

15Cr 超级马氏体不锈钢成分设计的关键在于 C-Cu 配与 Ni/Cr 当量,一方面获得合理的马氏体与奥氏体比例,另一方面时效处理时析出纳米强化相,使材料具备良好的强度与韧性匹配基础。电弧炉冶炼生产过程的关键在于控制偏析与 S、P 等杂质含量。无缝管晶粒度控制是热加工成型与热处理过程的重点,建议采用低于 1 200 °C 的温度轧制,同

表 2 15Cr 超级马氏体不锈钢无缝管不同正火温度下力学性能

Table 2 Mechanical properties of 15Cr super martensitic stainless steel seamless pipes at different normalizing temperatures

热处理工艺	室温拉伸				-10 °C 冲击功		硬度 (HR C)
	Rm/MPa	Rp0.2/MPa	A/%	Z/%	横向 Akv2/J	纵向 Akv2/J	
950 °C×1 h 空冷 +525 °C×2 h 空冷	979	934	24	81	222	230	32.9
	984	946	23	78	229	255	
980 °C×1 h 空冷 +525 °C×2 h 空冷	976	908	25.5	79	215	229	33.1
	989	929	24.5	80	213	246	
1 040 °C×1 h 空冷 +525 °C×2 h 空冷	993	937	22.5	79	213	224	33.6
	994	941	21	79	213	227	

时按 950~980 °C 正火热处理。按上述工艺参数进行生产控制,由大冶特钢生产的无缝管,实现了非常高的强度与韧性匹配,硬度也能够控制在较低的水平,以提高抗应力腐蚀能力。

参考文献

- [1] 冯耀荣,李鹤林,韩礼红,等.我国油井管国产化技术进展及展望[J].石油科学通报,2022,7(2):229-241.
- [2] 张忠铎.我国油井管产业的发展及思考(上)[J].钢管,2022,51(5):1-7.
- [3] 张忠铎.我国油井管产业的发展及思考(下)[J].钢管,2022,51(6):6-14.
- [4] 高杰,郭克星.油井管材料腐蚀研究现状[J].特种设备安全技术,2023(6):33-35.
- [5] 李效华,丁然,高志明,等.抗CO₂腐蚀马氏体不锈钢无缝管的研究进展[J].钢管,2023,52(1):8-20.
- [6] 徐婷,方伟,陈俊峰,等.中国油井管技术助力国际标准化新发展[J].中国标准化,2022(1):150-154+163.
- [7] 毕宗岳,王桐,苑清英,等.新型高钢级超深井用油套管强韧性研究[J].热加工工艺,2022,51(6):69-73+78.
- [8] 高建忠.我国石油管材国产化回顾与思考[J].石油管材与仪器,2021,7(2):1-8+14.
- [9] 刘亚旭,李鹤林,杜伟,等.石油管及装备材料科技工作的进展与展望[J].石油管材与仪器,2021,7(1):1-5.
- [10] 方伟,张华,许晓锋,等.石油管材标准体系现状及建设规划[J].石油管材与仪器,2021,7(1):88-93.
- [11] 张银,王林珠,李军旗,等.国内外油井管钢中非金属夹杂物的对比分析[J].钢铁,2021,56(2):69-75+104.
- [12] 陈辉,喻异双,吴彬彬,等.超高强韧油井管合金设计与高强韧机制[J].钢铁,2019,54(12):96-103.
- [13] 李鹤林,韩礼红.刍议我国油井管产业的发展方向(续)[J].焊管,2009,32(5):11-14.
- [14] 李鹤林,张亚平,韩礼红.油井管发展动向及高性能油井管国产化(上)[J].钢管,2007,36(6):1-6.
- [15] 李鹤林,张亚平,韩礼红.油井管发展动向及高性能油井管国产化(上)[J].钢管,2007,36(6):1-6.
- [16] 李鹤林,韩礼红,张文利.高性能油井管的需求与发展[J].钢管,2009,38(1):1-9.
- [17] 张国信,熊建新,龚宏等.石油石化金属材料应用与发展[M].北京:中国石化出版社,2018.
- [18] 邢娜,何立波,黄宝,等.非API 13Cr 系马氏体不锈钢油套管的发展现状[J].特殊钢,2012,33(3):22-25.
- [19] 邢娜,何立波,黄宝,等.国外非API高耐蚀油套管品种开发现状[J].世界钢铁,2012,12(4):42-49+65.
- [20] LUO H, YU Q, DONG C, et al. Influence of the aging time on the microstructure and electrochemical behaviour of a 15-5PH ultra-high strength stainless steel [J]. Corrosion Science: The Journal on Environmental Degradation of Materials and its Control, 2018,139(Jul.):185-196.
- [21] Jang Y W, Hong J H, Kim J G. Effects of copper on the corrosion properties of low-alloy steel in an acid-chloride environment [J]. Metals and Materials International, 2009, 15(4): 623-629.
- [22] 李素芹,李士琦,熊国宏,等.钢中残余有害元素对油井管质量的影响[J].特殊钢,2003,24(4):31-33.