

XGZT850 高强韧性非调质钻探钢管的研制

习小军¹ 赖朝彬¹ 冯小明³ 黎业生² 黄先亮² 刘伟¹

(江西理工大学 1 冶金与化学工程学院, 2 材料科学与工程学院, 赣州 341000; 3 新余钢铁有限责任公司, 新余 338001)

摘 要 通过微合金化成分设计, 2 t 中频感应炉-680 kg 锭-锻轧- $\Phi 94$ mm $\times$ 5.2 mm 管-冷拔至 $\Phi 89$ mm $\times$ 5.0 mm 管-880 $^{\circ}\text{C}$ 正火的中间试验, 和 50 t EBT EAF-LF-VD-210 mm $\times$ 280 mm 方坯连铸-轧成 $\Phi 75$ mm 管坯-穿孔成 $\Phi 75$ mm $\times$ 5.5 mm 毛管-冷拔 $\Phi 70.2$ mm $\times$ 5.05 mm 管-880 ~ 890 $^{\circ}\text{C}$ 正火工业生产, 成功开发 XGZT850 高强韧性非调质钻探钢管($\% : 0.35 \sim 0.41\text{C}, 0.20 \sim 0.40\text{Si}, 1.40 \sim 1.70\text{Mn}, \leq 0.010\text{P}, \leq 0.010\text{S}, 0.40 \sim 0.60\text{Mo}, 0.04 \sim 0.10\text{V}, 0.03 \sim 0.05\text{Ti}$)。检验结果表明, 钢管的抗拉强度 1 029 MPa, 屈服强度 931 MPa, 伸长率达到 13.5%; 组织为细小均匀的粒状贝氏体; 拉伸断口为韧性断口的特征, 冲击断口为准解理 + 韧性断口。该高强韧性非调质钻探钢管性能满足用户的要求。

关键词 微合金化 高强韧性 非调质 XGZT850 钻探钢管 研制

Development of XGZT850 High Strength-Toughness Non-Quenched-Tempered Drill Steel Tube

Xi Xiaojun¹, Lai Chaobin¹, Feng Xiaoming³, Li Yesheng², Huang Xianliang² and Liu Wei¹

(1 School of Metallurgical and Chemical Engineering, 2 School of Materials Science and Technology, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000; 3 Xinyu Iron and Steel Co Ltd, Xinyu 338001)

Abstract With microalloying composition design, intermediate test; 2 t medium frequency furnace-680 kg ingot-forging and rolling- $\Phi 94$ mm $\times$ 5.2 mm shell-cold drawn to $\Phi 89$ mm $\times$ 5 mm tube-normalizing at 880 $^{\circ}\text{C}$, and commercial production; 50 t EBT EAF-LF-VD-210 mm $\times$ 280 mm billet casting-rolled to $\Phi 75$ mm tube stock-piercing to $\Phi 75$ mm $\times$ 5.5 mm shell-cold drawing to $\Phi 70.2$ mm $\times$ 5.05 mm-tube-normalizing at 880 ~ 890 $^{\circ}\text{C}$, the XGZT850 high strength-toughness non-quenched-tempered drill steel tube ($\% : 0.35 \sim 0.41\text{C}, 0.20 \sim 0.40\text{Si}, 1.40 \sim 1.70\text{Mn}, \leq 0.010\text{P}, \leq 0.010\text{S}, 0.40 \sim 0.60\text{Mo}, 0.04 \sim 0.10\text{V}, 0.03 \sim 0.05\text{Ti}$) is successfully developed. Examination results show that of steel tube the tensile strength is 1 029 MPa, yield strength is 931 MPa and the elongation is 13.5%; the structure of steel tube is fine and uniform granular bainite; and the tensile fracture has the characteristic of ductile fracture, and the impact fracture is quasi-cleavage + ductile fracture. The properties of high strength-toughness non-quenched-tempered drill steel tube meet the requirement of user.

Material Index Microalloying, High Strength-Toughness, Non-Quenched-Tempered XGZT850 Drill Steel Tube, Development

钻探用钢不仅要具备更高的强度水平, 而且必须具有一定的韧性储备, 以抵御钻探过程中过载操作造成的强拉、强扭、冲击振动以及各种交变载荷作用对钻杆产生的不利影响^[1]。目前, 按 GB/T9808-2008《钻探用无缝钢管》标准生产的性能最优的钻探管 ZT740 已不能适应钻探过程中地壳及海底深层地质条件, 钻杆每掘进 1 m, 消耗钻探管 2.5 ~ 3.0 kg^[2]。并且此钻探管主要用于 500 ~ 1 500 m 深度的钻探工程, 深度超过 1 500 m 时地质勘查单位大多采用进口钻杆^[2,4]。国内普通钻探管经过调质处理, 钢的抗拉强度、屈服强度、断面伸长率能满足钻探用钢对性能的要求^[5-7], 但调质处理不但造成能源浪

费、成本增加, 而且影响钢种的生产效率^[8-13]。

1 非调质钻探钢管 XGZT850 的成分设计

高强韧性钻探钢管 XGZT850 在满足用户对抗拉强度 $\sigma_b \geq 960$ MPa, 屈服强度 $\sigma_s \geq 850$ MPa, 伸长率 $\delta \geq 10\%$ 及冲击韧性 $a_k \geq 30$ J/cm² 等力学性能要求的基础上, 参照 GB/T9808-2008 标准的相关规定及国内外现生产钻探钢管的成分特点, 结合新余钢铁公司生产条件、效益等因素, 采用 C-Si-Mn-Mo-V-Ti 成分设计思路, 结合正火热处理工艺, 通过晶粒细化、沉淀强化、相变强化等方式生产高强度、高韧性非调质钻探钢管 XGZT850。

根据对钢中各元素的作用分析^[1,3-17], 并结合用

户对钻探钢管 XGZT850 的性能要求,设计了 XG-ZT850 钢的化学成分,见表 1。

2 半工业化实验

2.1 实验材料及方法

本实验在容量为 2 t 中频感应熔炼炉中试冶炼成 680 kg 的钢锭,成分如表 1 所示。

680 kg 钢锭经高温锻成(mm)160×180×3 000 中间坯后轧制成 Φ80 mm 管坯。制管工艺过程为:钢锭→锻打成方坯→轧制成管坯→毛管→回火(回火管)→冷拔(冷拔管)→正火(成品管)。毛管外径为 94 mm,壁厚 5.2 mm;开锻温度控制在 1 120 ~ 1 140 ℃,终锻温度在 910 ~ 950 ℃;回火工艺温度为 690 ℃,保温 30 min;正火温度为 880 ℃,保温 12 min。冷管加工工艺如表 2。

根据 GB/T9808-2008 标准,分别沿毛管、回火管、冷拔管及成品管的纵向取样进行拉伸试验测试,沿成品管的纵向取样进行冲击试验分析。

2.2 实验结果与分析

2.2.1 力学性能

从表 3 可以看出,经过热轧穿孔后,试验钢力学性能基本符合设计标准,只有屈服强度低于设计值 850 MPa。经过 690 ℃回火软化后,其屈服强度和抗拉强度均下降约 20%,伸长率提高到 14% 左右,为后序冷拔加工提高成品率。冷拔管强度超过 1 000 MPa,但伸长率仅为 7.47%,不能满足伸长率标准大于 10% 的要求。冷拔后的钢管经 880 ℃正火热处理得到成品管,伸长率为 12.76%。

2.2.2 金相组织

由图 1(a)可知,未回火毛管试样贝氏体组织中的 M-A 岛呈现一定的取向分布,此外贝氏体中的碳化物多以针条状态分布,钢内残余较大内应力,因此未回火毛管试样的强度较高,而塑性偏低,伸长率为 11.32%。图 1(b)表明穿孔后的钢管经过回火软化后,钢中碳化物相比较未回火毛管试样更加弥散细小并且分布均匀,伸长率达到 13.88%。图 1(c)为冷拔后钢管的组织,由于冷加工变形,伸长率仅为 7.47%。图 1(d)为冷拔钢管正火后的组织,钢中碳化物分布更加均匀,试验钢的强度远大于设计目标值,伸长率达到 12.76%,因此经过最终正火处理的

表 1 XGZT850 钢设计化学成分和 680 kg 锭分析成分

Table 1 Designed chemical composition of steel XGZT850 and analysis composition of 680 kg ingot / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Mo	V	Ti	O	N	H
设计	0.35 ~	0.20 ~	1.40 ~	≤	≤	0.40 ~	0.04 ~	0.03 ~	≤	0.006 ~	≤
XGZT850	0.41	0.40	1.70	0.010	0.010	0.60	0.10	0.05	0.002 5	0.007	0.000 15
680 kg 锭	0.41	0.30	1.50	0.011	0.008	0.46	0.08	0.028			

表 2 坯管、成品管规格和处理工艺

Table 2 Size and heat treatment process of shell and finished tube

冷管样品	规格(外径×壁厚)/mm	加工工艺
毛管	Φ94×5.2	穿孔后毛管
回火管	Φ94×5.2	毛管+690 ℃回火 30 min
冷拔管	Φ89×5.0	毛管+690 ℃回火 30 min+冷拔
成品管	Φ89×5.0	毛管+690 ℃回火 30 min+冷拔+正火(880 ℃,保温 12 min)

表 3 XGZT850 钢坯管和成品管的力学性能

Table 3 Mechanical properties of shell and finished tube of steel XGZT850

处理工艺	屈服强度(σ _s)/MPa	抗拉强度(σ _b)/MPa	伸长率(δ)/%	断面收缩率(Ψ)/%	冲击韧性(a _k)/(J·cm ⁻²)
毛管	823.55	966.44	11.32	32	
回火管	663.88	786.89	13.88	51.3	
冷拔管	1 013.13	1 013.51	7.47	28.1	
成品管	865.42	1 045.95	12.76	40	31.86

成品管具有良好的强韧性匹配。

2.2.3 断口形貌

由图 2(a)可以看出,成品管拉伸断口出现许多韧窝,韧窝的形成表明材料发生较大的塑性变形,因而材料的塑性较好。由图 2(b)可以得知,冲击断口呈现河流花样,断口出现明显的撕裂棱并伴有少量的浅韧窝,表现为解理面+浅韧窝的混合断口特征。由此可说明新钢种 XGZT850 钢具有较好的韧性。

3 XGZT850 钢工业试制工艺

根据新余特殊钢公司现有生产设备,制定 XG-ZT850 钻探钢管工业试生产工艺流程为:50 t EBT 电炉冶炼→LF 精炼→VD 脱气→连铸 210 mm×280 mm 方坯→Φ650 mm 轧机开坯轧制成 Φ75 mm 管坯→Φ90 mm 穿孔机穿孔成 Φ75 mm×5.5 mm 毛管→酸洗→润滑→冷拔成 Φ70.2 mm×5.05 mm 钢管→正火→精整→打包→入库。

3.1 冶炼及连铸工艺

电弧炉精选优质废钢和切头料进行冶炼,冶炼过程中 EBT 冶炼工序主要作用是升温熔化以及对钢水初步脱碳、脱磷。出钢温度在 1 630 ~ 1 660 ℃,碳含量在 0.10% ~ 0.26%,磷含量 ≤ 0.008%,以确

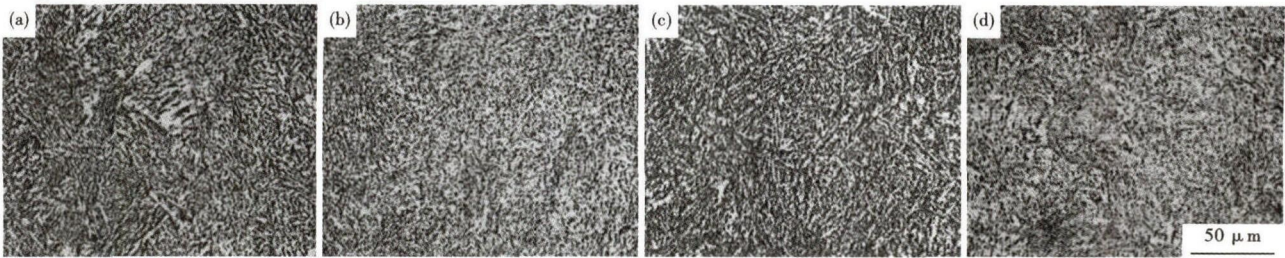


图 1 XGZT850 钻探管的组织形貌: (a) 未回火毛管; (b) 690 °C 回火管; (c) 冷拔管; (d) 880 °C 正火后成品管

Fig. 1 Morphology of structure of XGZT850 drill steel tube: (a) non-tempered tube shell; (b) tube tempered at 690 °C; (c) cold-drawn tube; and (d) finished tube normalized at 880 °C

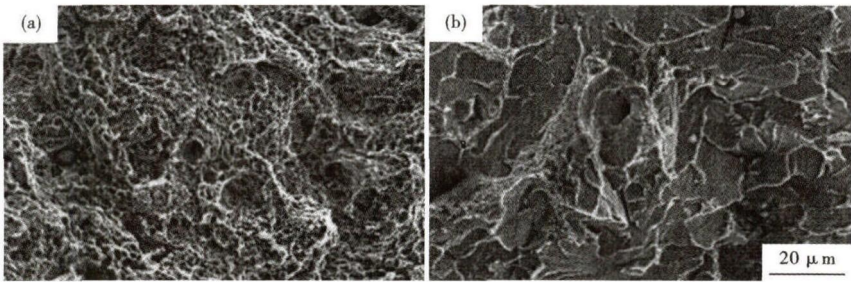


图 2 XGZT850 钻探钢管拉伸断口 (a) 和冲击断口 (b) 形貌

Fig. 2 Morphology of tensile fracture (a) and impact fracture (b) of XGZT850 drill steel tube

保后续精炼工序的稳定进行。LF 精炼工位对钢水进行脱氧、脱硫及合金化等操作,LF 出站前进行喂 Ca-Fe 线处理,防止钛合金的烧损,促使夹杂物的变性。VD 真空冶炼目的是脱氧和去除夹杂物,促进钢水温度和成分均匀化,表 4 为 VD 精炼终点钢水成分。

为了避免结晶器液面波动过大导致的卷渣,采用结晶器液面自动控制技术,使液面波动在 ±5 mm 范围内。浇铸全程采用保护浇铸技术,确保铸坯中 $N \leq 59.04 \times 10^{-6}$ 、 $H \leq 0.7 \times 10^{-6}$ 、 $O \leq 19.1 \times 10^{-6}$ 。钢水过热度为 15 ~ 25 °C,结合动态轻压下技术,有效改善铸坯中心偏析、疏松等缺陷,提高了铸坯质量。此外,采取深熔池、双挡墙加湍流控制器以及加入碱性覆盖剂等中间包冶金措施确保中间包钢水温度维持在 1 546 °C 左右,钢液中夹杂物易于上浮去除。结晶器采取弱冷却,进水温度 ≥ 25 °C,进出水温差为 8 ~ 10 °C,保证铸坯在结晶器中均匀冷却,促进出生坯壳均匀生长,防止铸坯表面缺陷的产生^[18]。

表 4 VD 精炼终点钢水成分 / %										
Table 4 Analysis composition of liquid at VD refining end / %										
C	Mn	S	P	Si	Mo	V	As	Ti	Al	
0.37	1.48	0.004	0.009	0.30	0.49	0.07	0.019	0.022	0.016	

3.2 控轧控冷工艺

连铸 210 mm × 280 mm 方坯在加热炉中加热至 1 200 °C 后保温 5 h,将铸坯在 Φ650 轧机上轧制成为 Φ75 mm 管坯,其开轧温度控制在 1 130 ~ 1 150 °C,终轧温度控制在 910 ~ 950 °C,轧制后的管坯进行堆冷处理。轧制后的管坯热工艺制度如表 5 所示。

管坯穿孔在斜轧穿孔机上进行。穿孔后的管坯保证壁厚均匀、椭圆度小以及几何尺寸精度高,并且不出现裂纹、结疤和折叠等缺陷。冷拔之前,毛管在 15% 的 H₂SO₄ 中进行酸洗并进行磷化处理,使钢管表面形成厚度有 8 ~ 12 μm 的磷化膜,然后将钢管浸入到皂化液中使表面磷化膜皂化形成硬脂酸锌。冷拔后的钢管经正火热处理,其加热段为 880 ~ 920 °C,均热段为 850 ~ 870 °C,

表 5 XGZT850 钢管坯加热参数				
Table 5 Heating parameters of tube stock of steel XG-ZT850				
预热/°C	加热/°C	均热/°C	出坯温度/°C	总加热时间/min
650 ~ 860	1 230 ~ 1 250	1 190 ~ 1 220	1 190 ~ 1 210	55

表 6 正火炉内各区段温度控制		
Table 6 Temperature control at each zone in normalizing furnace		
区段	温度/°C	进出炉总加热时间/min
加热一区上	855	25 ~ 30
加热一区下	923	
加热二区上	892	
加热二区下	836	
均热一区上	790	
均热一区下	893	
均热二区上	882	
均热二区下	871	

表 7 成品钻探钢管 XGZT850 的力学性能

Table 7 Mechanical properties of finished XGZT850 drill steel tube

试样	屈服强度 (σ_s)/MPa	抗拉强度 (σ_b)/MPa	伸长率 (δ)/%	断面收缩率 (Ψ)/%	冲击韧性(a_k)/ (J·cm ⁻²)
XGZT850	931	1 029	13.5	33	33.14

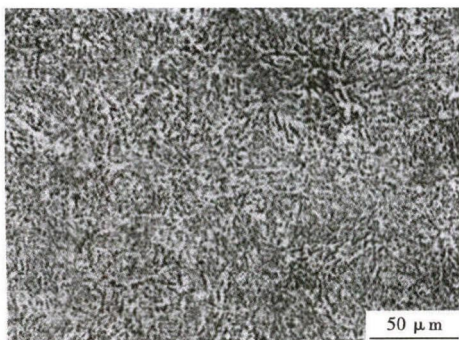


图 3 Φ70.2 mm × 5.05 mm 正火成品 XGZT850 钻探钢管的组织形貌

Fig. 3 Morphology of structure of Φ70.2 mm × 5.05 mm normalized finished XGZT850 drill steel tube

总时长 30 min。正火加热炉内温度控制如表 6 所示。

3.3 钻探管 XGZT850 钢力学性能检测

对批量生产的成品钻探管 XGZT850 钢抽样进行力学性能测试及金相组织观察。成品钻探管的规格尺寸为 Φ70.2 mm × 5.05 mm, 主要力学性能见表 7。由表 7 可知, 成品钻探管 XGZT850 钢满足抗

拉强度 $\sigma_b \geq 960$ MPa, 屈服强度 $\sigma_s \geq 850$ MPa, 伸长率 $\delta \geq 10\%$ 的设计要求。图 3 表明成品钻探管的组织为细小均匀的粒状贝氏体。粒状贝氏体组织特点是在高密度位错的铁素体基体上弥散分布着粒状 M-A 岛^[19], 通过弥散强化的方式提高钢材的强度^[20]。然而, 尽管 M-A 岛能够强化粒状贝氏体钢, 但它的存在会破坏钢基体的连续性, 使其周围的钢基体产生点阵畸变, 影响钢材的断裂行为, 从而影响钢材的韧性^[21]。但是, 成品钻探管的冲击韧性达到设计标准, 满足用户要求, 其主要原因在于粒状 M-A 岛能够减小应力集中^[20], 并且 M-A 岛弥散分布在细小的铁素体板条内部, 岛与岛之间为具有良好韧性的板条铁素体。

4 结论

(1) 经过微合金化成分设计结合中频感应炉试验及工业试制工艺成功开发了高强韧性非调质钻探钢管 XGZT850, 其力学性能均达到设计目标要求, 其中抗拉强度 σ_b 为 1 029 MPa, 屈服强度 σ_s 为 931 MPa, 伸长率 δ 达到 13.5%。

(2) 钻探钢管 XGZT850 组织为细小均匀的粒状贝氏体, 拉伸断口呈现大量韧窝, 冲击断口为解理面 + 浅韧窝的混合断口。

科技部科技计划项目资助(SQ2009GJC5005722)

参考文献

- [1] 赖朝彬, 冯小明, 张春斌, 等. 高品质非调质钻探用无缝钢管及其制造方法: 中国, CN104532168 A[P]. 2015-04-22.
- [2] 黄先亮. 高品质非调质钻探钢管 XGZT850 的研制及开发应用[M]. 赣州: 江西理工大学出版社, 2013.
- [3] 崔占全, 王昆林, 吴润. 金属学与热处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [4] 郭太雄, 邓函, 赵孝章. 冷轧板制管麻点缺陷成因及其预防措施[J]. 轧钢, 2010, 27(5): 49-52.
- [5] 方鸿生, 冯春, 郑燕康, 等. 新型 Mn 系空冷贝氏体钢的创制与发展[J]. 热处理, 2008, 23(3): 2-19.
- [6] 王勇围. 低碳 Mn 系空冷贝氏体钢的强韧性优化[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [7] Li Qingfen, Yang Shanglin, Li Li, et al. Experimental Study on Non-Equilibrium Grainboundary Segregation Kinetics of Phosphorus in Industrial Steel[J]. Scripta Materialia, 2002, 47(6): 389-392.
- [8] 陶进长. 绳索取心钻探管的强韧化研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2009.
- [9] 孔君华, 郑琳, 郭斌, 等. 钼对低碳微合金钢组织和性能的影响[J]. 轧钢, 2005, 22(4): 27-29.
- [10] 迟宏宵, 马党参, 刘建华, 等. 不同 Nb-V 含量对 Cr8 型冷作模具钢微观组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2010, 46(2): 206-212.
- [11] Hidenon N, Yoshitomi O, John G S. Acicular Ferrite Formation on Ti-Rare Earth Metal-Zr Complex Oxides[J]. ISIJ International, 2015, 55(1): 250-256.
- [12] Shi M H, Zhang P Y, Zhu F X. Toughness and Microstructure of Coarse Grain Heat Affected Zone with High Heat Input Welding in Zr-Bearing Low Carbon Steel[J]. ISIJ International, 2014, 54(1): 188-192.
- [13] 金友林, 杨丽珠. 高碳抗疲劳应力钢 TiN 夹杂物形成机理及控制研究[C]. //2011 年华东五省炼钢学术交流会论文集, 马鞍山, 2011.
- [14] 陈慧琴, 刘建生, 郭会光. 氮对 Mn18Cr18N 护环钢高温力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2005, 26(6): 20-22.
- [15] 刘伟. 高品质钻探管冶炼工艺研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- [16] 龙毅, 彭碧草. SAVE25 钢高温时效性能研究[J]. 锅炉技术, 2015, 46(Z2): 12-18.
- [17] 王新华. 钢铁冶金-炼钢学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [18] 卢盛意. 连铸坯质量[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [19] 于庆波. M/A 岛对粒状贝氏体钢冲击韧性的影响[J]. 材料热处理技术, 2012, 41(24): 41-42.
- [20] 于庆波, 段贵生, 孙莹, 等. 粒状贝氏体组织对低碳钢力学性能的影响[J]. 钢铁, 2008, 43(7): 68-72.
- [21] 仝珂, 庄传晶, 刘强, 等. 高钢级管线钢中 M/A 岛的微观特征及其对力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2011, 35(2): 4-7.

习小军(1992-), 男, 硕士生, 江西理工大学(本科)毕业, 洁净钢研究。

收稿日期: 2016-02-03