

潜孔钻头用钢 18CrNi3MoA 锻制圆棒的生产实践

郑安雄¹ 徐素鹏² 王学玺¹ 王欢¹ 童利利¹ 黑志刚¹

(1 河南中原特钢装备制造有限公司技术中心, 济源 459000; 2 济源职业技术学院冶金化工系, 济源 459000)

摘要 根据潜孔钻头用钢 18CrNi3MoA 技术要求及钢种特性, 通过 40 t 电弧炉 (终点 [C] ≥ 0.05%、P ≤ 0.003%, 出钢温度 ≥ 1 630 °C) -LF (精炼渣碱度 3.0 ~ 4.5) -VD (≤ 70 Pa 时间 ≥ 25 min) -氩气保护 1.52 t 铸锭-钢锭 (1 250 ± 10) °C 15 h 均质化处理-锻坯 Φ140 mm, 780 ~ 810 °C 锻至 Φ110 mm-完全退火等工艺, 试制的 3 炉 18CrNi3MoA 钢圆棒的化学成分均满足技术要求, 锻材氧含量 12.0 × 10⁻⁶ ~ 13.5 × 10⁻⁶, 非金属夹杂物均 ≤ 1 级; 带状组织 2 级、奥氏体晶粒度 8.5 级, 力学性能测定均满足技术要求。

关键词 潜孔钻头 18CrNi3MoA 钢 生产实践 力学性能 氧含量 晶粒度

Production Practice of Steel 18CrNi3MoA Forge Round Bar for Depth Drill Bit

Zheng Anxiong¹, Xu Supeng², Wang Xuexi¹, Wang Huan¹, Tong Lili¹ and Hei Zhigang¹

(1 Technology Center, Henan Zhongyuan Special Steel Equipment Manufacturing Co Ltd, Jiyuan 459000; 2 Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 459000)

Abstract According to depth drill bit steel 18CrNi3MoA's technical requirements and steel properties, three heats steel 18CrNi3MoA round bars are produced by process of 40 t EAF (end [C] ≥ 0.05%, [P] ≤ 0.003%; tapping temperature ≥ 1 630 °C) -LF fining (refining slag basicity 3.0 ~ 4.5) -VD (≤ 70 Pa, ≥ 25 min) -argon shield 1.52 t ingot-casting-ingot homogenization treated at (1 250 ± 10) °C for 15 h-forging billet Φ140 mm at 780 ~ 810 °C forging to Φ110 mm-full annealing. The chemical constituents satisfied the technical requirements, oxygen content in forgings 12.0 × 10⁻⁶ ~ 13.5 × 10⁻⁶, non-metallic inclusions rating ≤ 1, rating of banded structure is 2, austenitic grain scale is 8.5, and mechanical properties test satisfy the technical requirements.

Material Index Depth Drill Bit, 18CrNi3MoA Steel, Production Practice, Mechanical Properties, Oxygen Content, Grain Scale

潜孔钻头服役在剧烈磨损和腐蚀介质的工况环境中, 承受高冲击力、高冲击频率、高扭矩、高转速等往复、交变应力, 潜孔钻头在工作中主要失效形式有掉齿、崩块、断裂等^[1], 为此要求该产品用钢 18CrNi3MoA 圆棒须具有良好的机械性能, 具备足够的耐磨、耐疲劳和耐冲击性能。这要求在生产工序中严格控制 18CrNi3MoA 钢的纯净度、晶粒细小均匀、带状偏析轻^[2]等性能。

本文叙述潜孔钻头用钢 18CrNi3MoA 锻制圆棒的生产实践, 重点介绍了控制钢水纯净度、钢液快速凝固、锻造变形量和锻造温度、以及锻后冷却速度等关键技术点。

40 t 电弧炉冶炼 → 40 t LF 钢包精炼 → 40 t VD 真空脱气 → 氩气保护模铸锭 (1.52 t) → 过冷红送 → 钢锭加热、高温均质化处理 → 精锻机控温控锻 (锻坯 Φ110 mm) → 热处理 → 精整 → 检验 → 入库。钢种化学成分要求见表 1。

1.2 主要技术措施

1.2.1 电弧炉冶炼

电弧炉冶炼通过优选原材料控制五害元素, 装料前根据配料情况炉底垫加石灰、增碳剂; 熔化过程加入适量石灰和萤石, 保持炉渣具有良好的流动性, 总渣量按钢水的 4.5% ~ 6.0% 控制, 熔化末期及时

表 1 18CrNi3MoA 钢的实际化学成分和气体含量

Table 1 Actual chemical composition and gas content of steel 18CrNi3MoA

| 炉锭号 | 化学成分 / % | | | | | | | | | 气体含量 / 10 ⁻⁶ | | |
|------|-------------|-------------|-------------|-------|---------|-------------|-------------|-------------|--------|-------------------------|------|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | [O] | [N] | [H] |
| 0367 | 0.25 | 0.29 | 0.74 | 0.006 | 0.003 | 1.40 | 3.70 | 0.43 | 0.07 | 12.0 | 77.5 | 1.3 |
| 2133 | 0.25 | 0.26 | 0.74 | 0.006 | 0.003 | 1.34 | 3.56 | 0.35 | 0.07 | 13.0 | 76.0 | 1.2 |
| 1978 | 0.26 | 0.29 | 0.69 | 0.010 | 0.004 | 1.34 | 3.60 | 0.33 | 0.07 | 13.5 | 72.0 | 1.1 |
| 标准要求 | 0.23 ~ 0.26 | 0.25 ~ 0.35 | 0.55 ~ 0.85 | 0.015 | ≤ 0.005 | 1.20 ~ 1.50 | 3.45 ~ 3.75 | 0.30 ~ 0.50 | ≤ 0.25 | ≤ 15.0 | ≤ 90 | ≤ 1.5 |

1 技术路线及主要技术措施

1.1 技术路线

潜孔钻头用 18CrNi3MoA 锻制圆棒生产的工艺技术路线如下:

吹氧提前造渣,早期去磷;熔清后按边吹氧边扒渣深脱磷以及防过氧化的方式操作,出钢时控制终点 $[C] \geq 0.05\%$ 、 $P \leq 0.003\%$,出钢温度 $\geq 1630\text{ }^\circ\text{C}$;出钢过程严禁下渣以提高钢液纯净度。出钢 $1/4 \sim 3/4$ 过程中随钢流加入铝块 $1.5 \sim 3.0\text{ kg/t}$ 、石灰 $4 \sim 6\text{ kg/t}$ 和适量的铬铁等合金进行脱氧预合金化。

1.2.2 LF 精炼

LF 精炼通过保持炉内还原气氛、氩气搅拌、电极埋弧加热、合成渣精炼等^[3]对钢水进行成分微调^[4]、脱氧、脱硫及去除夹杂物,提高钢水纯净度。精炼操作的核心在于白渣精炼,白渣形成时间越早,则有效精炼时间越长,脱硫、脱氧效果也就越好^[5],精炼渣成分及碱度如表 2 所示。精炼前喂入 $3.0 \sim 5.0\text{ m/t}$ 铝线加强脱氧;精炼包到位后接通氩气,送电化渣,合成渣料熔化后加入电石、硅铁粉或硅钙粉等脱氧剂 $3.0 \sim 4.0\text{ kg/t}$ 脱氧,渣白后取样查看钢液成分情况,根据取样结果按目标值调整合金元素化学成分。精炼期间用碳硅铁粉 $2.0 \sim 3.0\text{ kg/t}$ 小批量、多批次进行脱氧并保持还原气氛,白渣保持时间 $\geq 15\text{ min}$ 。

LF 通过底部吹氩搅拌加强传质确保钢液温度、成分均匀,促使钢中杂物聚集上浮,与熔渣接触被吸收以净化钢液;LF 精炼前期氩气压力控制在 $0.6 \sim 0.8\text{ MPa}$,后期氩气压力调整为 $0.3 \sim 0.4\text{ MPa}$ 。

1.2.3 VD 真空脱气

VD 真空处理温度 $1655 \sim 1670\text{ }^\circ\text{C}$,自 LF 吊包进入真空罐脱气,在真空度 $\leq 70\text{ Pa}$ 条件下处理时间 $\geq 25\text{ min}$,并适时调整吹氩强度,使钢水充分搅拌,促进钢液与钢渣的充分接触,扩大气-液反应界面;破空后在线定氢、氧,控制 $[O] \leq 5.0 \times 10^{-6}$ 、 $[H] \leq 1.5 \times 10^{-6}$;玻璃管取样分析 $[N]$,控制残 $[N] \leq 50 \times 10^{-6}$,真空处理结束后底吹氩对钢水进行弱搅拌,弱搅拌时间 $\geq 15\text{ min}$,保证夹杂物充分上浮,当温度达到 $1535 \sim 1545\text{ }^\circ\text{C}$ 时吊包模铸。

1.2.4 氩气保护模铸

模铸前确保浇注系统清洁干燥,模铸浇注时采用模内充氩气及大流量氩气保护浇注,采用低过热钢水浇注,使钢液快速凝固,使低熔点杂质来不及

聚集,从而减轻成分偏析。开浇温度 $1530 \sim 1540\text{ }^\circ\text{C}$,使用低碳保护渣;浇注上冒口 $2/3$ 后加入发热剂,浇完补加碳化稻壳保温,确保补缩效果。

1.2.5 钢锭加热、高温均质化处理

18CrNi3MoA 钢为低碳铬镍钼合金钢,采取钢锭过冷红送锻造车间加热,加热工序增加高温均质化处理,即在 $(1250 \pm 10)\text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 15 h 。在这种高温状态下长时间保温,可以使钢中的偏析元素得到充分地扩散、极大改善和减轻偏析。

1.2.6 精锻机控温控锻

钢锭经过加热后,在 1800 t 径向锻造机上锻造成型,使用七道次往复锻造,道次变形量按小-大-小的原则。第一道次变形量 $30 \sim 50\text{ mm}$,有利于焊合皮下气泡;中间道次变形量 $60 \sim 90\text{ mm}$,拉打速度不低于 6 m/min ,有利于破碎柱状晶、使心部锻透压实;最后一道次变形量 $\leq 30\text{ mm}$,拉打速度 $\leq 3\text{ m/min}$,并在最后一道次锻造前晾料控温锻造,尽可能地把所获得的细小组织保持在较细较均匀的状态。具体变形道次(规格 mm)为: 1.52 t 锭- $\Phi 470-\Phi 400-\Phi 330-\Phi 260-\Phi 200-\Phi 140-\Phi 110$,在锻至 $\Phi 140\text{ mm}$ 时空冷至温度 $780 \sim 810\text{ }^\circ\text{C}$ 后再锻造最后一道次。

1.2.7 热处理工艺

锻造结束及时转入水冷场地,进行水空交替冷却,采取水冷 $2 \sim 4\text{ min}$,出水空冷 $1 \sim 2\text{ min}$,如此往复进行,可有效抑制晶粒长大,得到细小晶粒组织,从而获得更高的机械性能,同时可以极大减轻铁素体析出,有效控制带状偏析。再通过 $(880 + 680)\text{ }^\circ\text{C}$ 的完全退火,组织发生重结晶,使晶粒细化、组织均匀,带状偏析得以进一步减轻,可显著改善钢的组织性能,锻后钢的热处理工艺曲线见图 1。

2 试验结果

2.1 试验钢成分

表 2 LF 精炼渣成分和碱度

Table 2 LF refining slag ingredient and basicity

| 精炼渣成分 / % | | | | | 前期炉渣碱度 | 后期炉渣碱度 |
|-----------|--------|--------------------------------|------------------|-----------|------------|-----------|
| CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | FeO + MnO | | |
| 45 ~ 60 | 7 ~ 11 | 20 ~ 30 | 8 ~ 14 | < 0.8 | ≥ 4.0 | 3.0 ~ 4.5 |

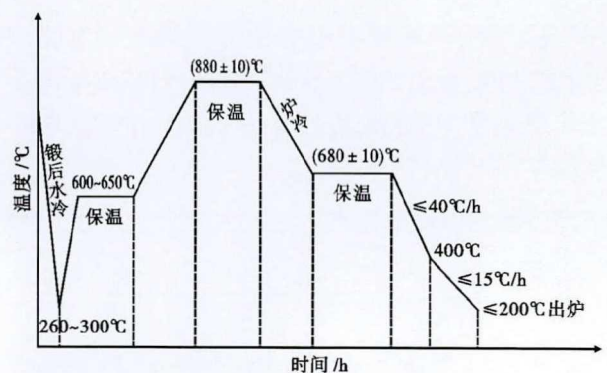


图 1 18CrNi3MoA 钢的热处理工艺

Fig. 1 Heat treatment process of steel 18CrNi3MoA

试验共进行了3炉,18CrNi3MoA钢的成品化学成分见表1。从表1可以看出,3炉试验钢的化学成分和气体含量均在潜孔钻头用钢18CrNi3MoA圆棒标准要求范围内。

2.2 低倍组织

依据GB/T1979-2001标准对3炉钢锻件进行检测,横向酸浸低倍组织和低倍缺陷评级见表3。结果显示,锻制成 $\Phi 110$ mm圆棒后,质量优良,疏松都小于2.0级,无锭型偏析或小于2.0级,无一般点状偏析和边缘点状偏析,无肉眼可见的缩孔、气泡、夹杂物、翻皮、白点、针孔和晶间裂纹等缺陷。

2.3 非金属夹杂物

依据GB/T10561-2005标准对3炉钢锻件进行非金属夹杂物检测,成品钢锻件的非金属夹杂物控制结果见表4。从表4可以看出,非金属夹杂的控制效果较好,A、Ae、Be、C、Ce类夹杂物均为0级,B、De类夹杂物均为0.5级,D夹杂物均为1.0级。

2.4 力学性能

按GB/T229-2007、GB/T228.1-2010标准对3炉钢锻件进行力学性能测定,任意锻制圆棒在相当于钢锭的冒端(头部)1/2半径切取试样,加工成小样试棒后,经过 $(900 \pm 5)^\circ\text{C}$ 油冷淬火+ $(200 \pm 5)^\circ\text{C}$ 回火热处理后,结果见表5。

2.5 带状组织与奥氏体晶粒度

按GB/T6394-2017标准、GB/T13299-1991标准抽取炉锭号为0367圆棒分别进行奥氏体晶粒度和带状组织检测,带状组织检测结果为2.0级,带状偏析轻,冲击韧性好;奥氏体晶粒度检测结果为8.5

表5 18CrNi3MoA钢 $\Phi 110$ mm锻材的力学性能检测结果
Table 5 Test results of mechanical properties of steel 18CrNi3MoA $\Phi 110$ mm forged bar

| 炉锭号 | R_m/MPa | R_{e1}/MPa | $A/\%$ | $Z/\%$ | A_{KU2}/J |
|------|------------------|---------------------|-----------|-----------|--------------------|
| 0367 | 1485 | 1187 | 15 | 59 | 110/113/111 |
| 2133 | 1469 | 1210 | 14 | 60 | 111/119/120 |
| 1978 | 1472 | 1222 | 13 | 58 | 118/114/114 |
| 技术要求 | ≥ 1350 | ≥ 980 | ≥ 10 | ≥ 50 | ≥ 110 |

级,晶粒大小均匀。

3 结论

(1)通过40t电弧炉冶炼-LF-VD-氩气保护模铸锭(1.52 t)-过冷红送-钢锭加热、高温均质化处理-精锻机控温锻(锻坯 $\Phi 110$ mm)-热处理等工艺生产的锻制圆棒,化学成分均在技术要求范围内。

(2)通过优选原料,控制电弧冶炼过程终点 $[C] \geq 0.05\%$ 、 $P \leq 0.003\%$,出钢温度 $\geq 1630^\circ\text{C}$,出钢过程严禁下渣;控制LF精炼渣成分及碱度(3.0~4.5)、底部吹氩搅拌;控制VD真空脱气真空度(≤ 70 Pa)、处理时间(≥ 25 min)及真空结束后底吹氩弱搅拌;快速凝固、氩气保护模铸等技术措施提高了钢液纯净度,非金属夹杂物均 ≤ 1.0 级,气体含量较低(三炉锻材上 $[O]$ 、 $[H]$ 、 $[N]$ 平均含量分别为 12.8×10^{-6} 、 1.2×10^{-6} 、 75.2×10^{-6}),减少钢锭的枝晶偏析,保证了钢材良好的内部质量。

(3)通过钢锭 $(1250 \pm 10)^\circ\text{C}$ 下保温15 h高温均质化处理,径向七道次锻造、最后一道次锻造前晾料控温锻造的变形方式和锻后水空交替冷却+完全退火热处理工艺等技术措施,带状偏析2.0级、奥氏体晶粒度8.5级,钢的机械性能指标优良。

参考文献

- [1] 冯一璟,张来斌.潜孔钻头研究现状及展望[J].机械工程,2015,25:38-41.
- [2] 华公平,晁国强.20CrNi2Mo钢带状组织的形成与消除[J].机车车辆工艺,2003(5):7-10.
- [3] 周黎晖,杨鑫.LF钢包精炼炉造渣脱硫工艺分析[J].酒钢科技,2013(4):37-39.
- [4] 李维华,林致明.90 t电弧炉冶炼Q235B生产实践[J].中国设备工程,2020,16:226-227.
- [5] 志亮,裴林.LF精炼炉脱硫研究与应用[J].金属热加工,2014(7):30-31.

郑安雄(1984-),男,工程师,2008年太原科技大学(本科)毕业,特种钢铁材料的热加工技术研究及产品开发。

E-mail:327140861@qq.com

收稿日期:2020-09-26

表3 18CrNi3MoA钢的低倍检测结果/级

Table 3 Test results of macro-structure of steel 18CrNi3MoA /rating

| 炉锭号 | 中心疏松 | 一般疏松 | 锭型偏析 | 一般(斑)点状偏析 | 边缘(斑)点状偏析 | 其它缺陷 |
|------|------------|------------|------------|-----------|-----------|------|
| 0367 | 0.5 | 0.5 | 0 | 无 | 无 | 无 |
| 2133 | 1.0 | 0.5 | 0 | 无 | 无 | 无 |
| 1978 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 无 | 无 | 无 |
| 技术要求 | ≤ 2.0 | ≤ 2.0 | ≤ 2.0 | 不允许有 | 不允许有 | 不允许有 |

表4 18CrNi3MoA钢的非金属夹杂物检测结果/级

Table 6 Test results of nonmetallic inclusion in steel 18CrNi3MoA /rating

| 炉锭号 | A | Ae | B | Be | C | Ce | D | De |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0367 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 1.0 | 0.5 |
| 2133 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 1.0 | 0.5 |
| 1978 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 1.0 | 0.5 |
| 技术要求 | ≤ 1.0 | ≤ 1.0 | ≤ 2.0 | ≤ 2.0 | ≤ 1.0 | ≤ 1.0 | ≤ 2.0 | ≤ 2.0 |