

· 工艺技术 ·

### 30 t EAF-LF-VD-13 t 铸锭流程生产 14Cr1Mo 钢的工艺实践

祁庆花<sup>1,2</sup> 赵子文<sup>1,2</sup> 韩文科<sup>1,2</sup> 杨德生<sup>1,2</sup>

(1 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 兰州 730314; 2 甘肃省高端铸锻件工程技术研究中心, 兰州 730314)

**摘要** 试验 14Cr1Mo 钢 (/%: 0.12C, 0.57Si, 0.48Mn, 0.003P, 0.001S, 1.20Cr, 0.42Mo, 0.01V, 0.001Nb, 0.017Al, 0.003As, 0.001Sb, 0.002Sn) 64 mm × 160 mm 锻坯的冶金工艺流程为 30 t EBT EAF-LF-VD-13 t 铸锭-锻造。通过采用优质废钢, 控制 EAF 终点 [P] ≤ 0.002%, 终点 [C] 0.07% ~ 0.10%, 出钢加 Al 预脱氧, LF 白渣时间 ≥ 30 min, VD 67 Pa ≥ 25 min, VD 后喂 0.35 kg/t Ca-Si 线等工艺措施, 钢中 [H] 为 1.5 × 10<sup>-6</sup>, [O] 17 × 10<sup>-6</sup>, [N] 70 × 10<sup>-6</sup>, 各类非金属夹杂物为 0.5 级。经 930 °C 空冷预备热处理, 910 °C 水冷 + 700 °C 空冷回火, 690 °C 4 ~ 20 h 炉冷模拟焊后消除应力处理后的该钢力学性能满足参考标准 NB/T47008-2010 的要求。

**关键词** 14Cr1Mo 钢 30 t EAF-LF-VD 工艺实践 夹杂物 力学性能

### Practice of Process for Production of Steel 14Cr1Mo by 30 t EAF-LF-VD-13 t Casting Ingot Flowsheet

Qi Qinghua<sup>1,2</sup>, Zhao Ziwen<sup>1,2</sup>, Hang Wenke<sup>1,2</sup> and Yang Desheng<sup>1,2</sup>

(1 Research Institute, Lanzhou LS Energy Equipment Institute Co Ltd, Lanzhou 730314; 2 Gansu Province Engineering Research Center for High-End Casting and Forgings, Lanzhou 730314)

**Abstract** The metallurgical process flowsheet of 64 mm × 160 mm forged slab of tested steel 14Cr1Mo (/%: 0.12C, 0.57Si, 0.48Mn, 0.003P, 0.001S, 1.20Cr, 0.42Mo, 0.01V, 0.001Nb, 0.017Al, 0.003As, 0.001Sb, 0.002Sn) is 30 t EBT EAF-LF-VD-13 t casting ingot-forging. With the process measures including using quality scrap, controlling EAF end [P] ≤ 0.002% and end [C] 0.07% ~ 0.10%, adding Al in EAF tapping for pre-deoxidization of liquid, LF maintaining white slag ≥ 30 min and VD 67 Pa ≥ 25 min, and after VD adding 0.35 kg/t Ca-Si wire, the gas content in steel is 1.5 × 10<sup>-6</sup>[H], 17 × 10<sup>-6</sup>[O] and 70 × 10<sup>-6</sup>[N], the rating of each nonmetallic inclusions in steel is 0.5, and with conditioning treatment at 930 °C, A. C., quenching at 910 °C, W. C. and tempering at 700 °C, A. C., and simulate heat treatment after welding (PWHT) at 690 °C for 4 ~ 20 h, F. C., the mechanical properties of steel meets the requirement of reference standard NB/T47008-2010.

**Material Index** Steel 14Cr1Mo, 30 t EAF-LF-VD, Practice of Process, Inclusions, Mechanical Properties

14Cr1Mo 钢是以 Cr 和 Mo 为主要合金元素的低合金钢, 属于 Cr-Mo 热强钢和抗氢钢。铬能够改善钢的耐腐蚀和抗氧化能力; 钼是较强的碳化物形成元素, 可以提高钢的高温强度, 两者复合强化时, 钢的综合力学性能可显著提高。该钢广泛适用于石油化工、核电、汽轮机缸体、火电等与氢或氢混合介质接触、高压高温的大型装备。由于工作环境的特殊性: 高压、高温、与氢或氢混合介质接触, 因此对该钢种提出了更高的性能要求: 高强度、耐高温、良好的韧性和塑性、以及良好的抗回火脆性和焊接性能<sup>[1-2]</sup>。兰州兰石集团铸锻公司设备工艺转型升级后, 与兰州兰石能源装备工程研究院联合开发了 14Cr1Mo 钢锭的生产工艺技术, 其锻件性能也达到了标准要求, 摆脱了铸锻公司长期对该钢种外购钢锭的依赖, 也为公司未来开发其他高附加值产品打下了良好的基础。

#### 1 主要技术要求

该厂采用“30 t EBT 电弧炉 → 45 t LF 精炼 → 30 t VD 真空精炼 → 模铸 → 锻造 → 热处理”工艺生产 14Cr1Mo 钢锭、锻件, 钢锭重 13 t, 锻件为试板, 试板尺寸如图 1 所示。14Cr1Mo 钢的标准成分和内控成分要求见表 1<sup>[3,4]</sup>。

14Cr1Mo 钢的化学成分还应满足式(1)、(2)、(3)规定的焊缝金属脆化敏感性系数:

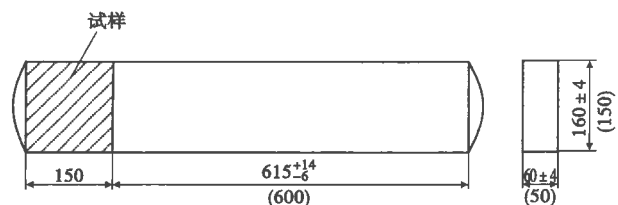


图 1 14Cr1Mo 钢锻件示意图  
Fig. 1 Schematics of forging of steel 14Cr1Mo

表 1 14Cr1Mo 钢的化学成分标准和内控要求 / %

Table 1 Standard and interior control requirement for chemical composition of steel 14Cr1Mo / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb	Al	As	Sb	Sn	H	O	N
标准	0.11 ~ 0.15	0.50 ~ 0.65	0.40 ~ 0.55	≤ 0.007	≤ 0.005	1.15 ~ 1.50	0.45 ~ 0.60	≤ 0.20	≤ 0.15	≤ 0.010	≤ 0.010	0.015 ~ 0.035	≤ 0.010	≤ 0.002 5	≤ 0.010	< 0.000 2	< 0.002 0	< 0.008
内控	0.12 ~ 0.15	0.55 ~ 0.63	0.44 ~ 0.52	≤ 0.007	≤ 0.005	1.25 ~ 1.40	0.47 ~ 0.50	≤ 0.18	≤ 0.12	≤ 0.010	≤ 0.010	0.015 ~ 0.035	≤ 0.010	≤ 0.002 5	≤ 0.010	< 0.000 16	< 0.001 8	< 0.008

$$X = (10[P] + 5[Sb] + 4[Sn] + [As]) \times 10^4 \leq 15 \quad (1)$$

$$[Si] + [Mn] \leq 1.2\% \quad (2)$$

$$([Cu] + [Sn] + [As]) \times 10^4 \leq 15 \quad (3)$$

按 GB/T10561-2005 标准中的 B 法评定 A、B、C、D、Ds 类夹杂物。结果应满足：A、B、C、D、Ds 类夹杂物均不大于 1.5 级，且应满足  $A + C \leq 2.0$ ， $B + D \leq 2.0$ ，总和  $A + B + C + D + Ds \leq 4.5$ 。

实际晶粒度测定依据 GB/T6394-2002 标准，锻件的实际晶粒度要求在 5 级及以上。

锻件的取样和力学性能按照 NB/T47008-2010 标准执行，具体要求见表 2。

## 2 工艺控制

### 2.1 电弧炉冶炼

电弧炉冶炼采用全废钢冶炼，由于 Sn、As、Sb 等参与元素与 O 的亲合力比 Fe 低，在炼钢过程中无法有效去除，因此废钢选用低残余元素、低磷、低硫废钢；配加活性石灰 20 ~ 25 kg/t 钢进行造渣；碎电极（或焦炭粒）按 10 ~ 18 kg/t 配碳，铁矿石（或氧化铁皮）5 ~ 8 kg/t 作为氧化剂；熔化期进行流渣操作，并不断补加新渣料做好前期脱 P；氧化期做到高温氧化，激烈沸腾，自动流渣，补加渣料，确保  $[P] \leq 0.002\%$ ，以及脱碳量  $\geq 30\%$ 。

电弧炉采用偏心底出钢，出钢温度  $\geq 1660\text{ }^\circ\text{C}$ ， $[P] \leq 0.002\%$ ，严格控制终点碳含量。根据碳氧平衡图<sup>[5]</sup>，当钢水中的碳含量小于 0.1% 时，随着碳含量的减少，钢水中的溶解氧含量急剧增加，造成钢液过氧化，将增加夹杂物的生成数量<sup>[6]</sup>，提高脱氧铝的消耗，同时在 LF 精炼过程中增加增碳剂、脱氧剂的用量，增加渣料的消耗以及电极和耐火材料的

消耗，同时增加 LF 电耗，提高精炼时间<sup>[7-8]</sup>。因此，在冶炼 14Cr1Mo 钢，考虑电弧炉出钢后所加的合金中的碳含量，终点碳含量控制在 0.07% ~ 0.10%。

渣料（石灰 360 kg，萤石 90 kg）和合金料在出钢过程中随钢流加入到精炼包中，调整钢中合金成分（Si、Mn、Cr），合金 Mo 在 LF 中进行调整。

### 2.2 精炼控制

#### 2.2.1 LF 精炼

该钢要求 S 含量较低，脱硫的有利条件为：高温，高炉渣碱度，低（FeO），好流动性，良好的搅拌。为了达到良好的脱硫效果，措施如下：（1）电弧炉出钢采用留钢留渣操作；（2）电弧炉充分脱氧，出钢前包内加脱氧剂纯 Al 加强钢水的脱氧，进行钢液前期脱硫；（3）LF 精炼全程底吹氩，通过造高碱度渣（白渣）来进行脱硫、脱氧，渣量要求为钢液的 3% ~ 7%，白渣保持时间不小于 30 min，随时加入渣料进行调渣，每次调渣加入渣料后，加入粉状脱氧剂（Fe-Si 粉、SiC 粉、C 粉）脱氧。LF 出炉钢水化学成分达到内控标准，出钢温度  $T = 1680 \sim 1690\text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 2.2.2 VD 真空处理及夹杂物变形处理

LF 出炉钢水进入 VD 中进行真空精炼，当真空度小于 67 Pa 时进行真空保压，保压时间大于 25 min，精炼过程中根据情况调整氩气压力和流量。

研究表明，钢水经钙变性处理后，夹杂物球化率可达 85.7% ~ 92.3%，钙处理后形成的熔点低、密度较小的夹杂物（ $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）更容易上浮去除<sup>[9]</sup>。

VD 精炼破空后，按 0.35 kg/t 喂入 Ca-Si 线，进行夹杂物变性处理。

### 2.3 浇铸

开浇温度为 1560 ~ 1570  $^\circ\text{C}$ ，浇注时保证开流稳，跟流紧，逐增流，不断流。保护渣在开浇前 10 min 加入模内；当钢液升到冒口 2/3 以上可加入发热剂；钢液注满冒口后，加入 C 化稻壳。

### 2.4 锻造及热处理

锻造工艺路线：锻造-正火（预备热处理）-最终热处理（调质）-取样（模拟热处理）。模拟热处理是

表 2 14Cr1Mo 钢锻件力学性能标准要求

Table 2 Requirement of standard for mechanical properties of forging of steel 14Cr1Mo

$R_{el}/$ MPa	$R_m/$ MPa	A/ %	Z/ %	HB 硬 度值	350 $^\circ\text{C}$ $R_{el}/\text{MPa}$	-20 $^\circ\text{C}$ $A_{KV}/\text{J}$ 平均值 最低值
$\geq 290$	490 ~ 660	$\geq 19$	$\geq 40$	$\leq 220$	$\geq 220$	$\geq 55$ $\geq 48$

事先模拟设备在制造过程中经历的所有的焊后热处理时间的总和,对材料的试样进行热处理,并对试样进行机械性能试验,要求材料性能仍能满足设计要求。一般压力容器用的 Cr-Mo 钢都需要做模拟焊后热处理。最小模拟焊后热处理 (Min. PWHT) 是容器成型后所需要焊后消除应力的时间,最大模拟焊后热处理 (Max. PWHT) 就是容器成型 + 返修 (一般考虑两次返修) 所需焊后消除应力的总时间, Cr-Mo 钢一般是 675 °C 或 690 °C, 具体时间根据材料厚度以及自身工艺确定。

13 t 钢锭经锻造开坯至直径  $\Phi 400$  mm 圆钢,用  $\Phi 400$  mm 圆钢下料锻造试板。试板锻造始锻温度为 1 220 °C, 终锻温度为 800 °C, 锻后冷却采用空冷的方式, 锻后预备热处理为正火, 最终热处理为淬火 + 回火。具体热处理工艺及参数如表 3 所示。

### 3 钢的质量

14Cr1Mo 钢多属于容器用钢, 在设备制造过程中经历热成型、设备返修热处理、焊后热处理等一系列热处理, 影响材料的各项性能, 所以对主体材料进行模拟热处理确保主体材料在长时间热处理下各项性能达到要求。通过以上工艺生产的 14Cr1Mo 钢

表 3 14Cr1Mo 钢锻件热处理工艺  
Table 3 Heat treatment process of steel 14Cr1Mo forgings

工序	装炉温度/°C	加热速度/(°C·h <sup>-1</sup> )	加热温度/°C	保温时间/h	冷却方式	
预备热处理	正火	≤400	≤100	930 ± 10	2	空冷
最终热处理 (水冷)	淬火	≤400	≤100	910 ± 10	2	水冷 (水温≤40°C)
	回火	≤400	≤100	700 ± 10	2	空冷
PWHT	Max	≤400	≤100	690 ± 14	14 20	炉冷
	Min	≤400	≤100	690 ± 14	4 8	炉冷

锭表面质量良好, 钢锭经过锻造-正火-热处理 (调质) 得到锻件, 锻件再进行模拟热处理。做成品化学成分分析, 晶粒度测定, 夹杂物评定, 以及力学性能检测。

#### 3.1 化学成分

14Cr1Mo 钢化学成分见表 4 所示, 化学成分均在内控范围内, 尤其是较低的微量元素 P、As、Sn、Sb 的含量及 [H]、[O]、[N] 气体元素。用表 4 中的数据计算 14Cr1Mo 焊缝金属脆化敏感性系数 X, 计算结果  $X = 4.6$ ,  $[Si] + [Mn] = 1.05\% < 1.2\%$ ,  $([Cu] + [Sn] + [As]) \times 10^4 = 4.5 < 15$ , 表明该工艺生产的 14Cr1Mo 钢残余元素含量低, 减小回火脆

表 4 14Cr1Mo 钢分析成分 / %  
Table 4 Analysis composition of steel 14Cr1Mo / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb	Al	As	Sb	Sn	H	O	N
内控	0.12 ~ 0.15	0.55 ~ 0.63	0.44 ~ 0.52	≤ 0.007	≤ 0.005	1.25 ~ 1.40	0.47 ~ 0.50	≤ 0.18	≤ 0.12	≤ 0.010	≤ 0.010	0.015 ~ 0.035	≤ 0.010	≤ 0.002 5	≤ 0.010	0.000 16	0.001 8	0.008
成品	0.12	0.57	0.48	0.003	0.001	1.20	0.42	0.09	0.04	0.01	0.001	0.017	0.003	0.001	0.002	0.000 15	0.001 7	0.007

性倾向, 工艺合理。

#### 3.2 非金属夹杂物、晶粒度及组织

晶粒度测定和非金属夹杂物评定结果如表 5 所示。按 GB/T10561-2005 标准中的 B 法评定 A、B、C、D、Ds 类夹杂物, 结果 A、B、C、D、Ds 类夹杂物均不大于 1.5 级, 且  $A + C = 1$ ,  $B + D = 1.5$ , 总和  $A + B + C + D + Ds = 3$ , 均满足标准要求。

实际晶粒度测定按照 GB/T6394-2002 标准进行测定, 晶粒度为奥氏体晶粒度, 晶粒度等级为 7.5, 满足标准要求。组织为贝氏体回火组织和少量

铁素体组织。

综上, 非金属夹杂物得到有效控制, 锻件奥氏体晶粒度细小, 有利于改善钢的综合力学性能。

#### 3.3 力学性能

两组试样分别进行最大模拟焊后热处理 (Max. PWHT) 和最小模拟焊后热处理 (Min. PWHT), 通过常温拉伸、高温拉伸、布氏硬度检测及 -20 °C 冲击试验, 得到 14Cr1Mo 钢锻件力学性能, 力学性能试验前的热处理工艺参数见表 3。如表 6 所示, 其性能均满足 NB/T47008-2010 标准要求。因此, 现行工艺满足生产的 14Cr1Mo 钢的质量需求。同时, 从表 6 中两组试样数据对比看出, 模拟热处理对钢的力学性能有很大的影响。

模拟热处理保温时间对冲击影响: 对比得出, 模拟热处理保温时间过长, 冲击功降低, 材料韧性不好。因为较长热处理保温时间, 会使析出相数量增

表 5 14Cr1Mo 钢非金属夹杂物和晶粒度级别

Table 5 Rating of nonmetallic inclusions and grain size of steel 14Cr1Mo

非金属夹杂物/级					奥氏体晶粒度/级
A	B	C	D	Ds	
0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	7.5

表 6 14Cr1Mo 钢锻件力学性能  
Table 6 Mechanical properties of forgings of steel 14Cr1Mo

项目	试样编号	$R_{el}/$ MPa	$R_m/$ MPa	$A/$ %	$Z/$ %	350 °C $R_{el}/$ MPa	HBW 5/750	-20 °C $KV_2/J$	
第 1 组	试样 A (Max. PWHT)	458	611	23.5	72	390	195	93.1	208 257
	试样 B (Min. PWHT)							215	188 78.7
第 2 组	试样 C (Max. PWHT)	437	591	27.5	77	370	181	205	90 250
	试样 D (Min. PWHT)							234	88 196
NB/T47008-2010 标准		$\geq 290$	490 ~ 660	$\geq 19$	$\geq 40$		156 ~ 207		$\geq 47$

注: 试样 A: 淬火(水冷) + 回火 + 模拟热处理(690 ± 14) °C 保温 14 + 2 h; 试样 B: 淬火(水冷) + 回火 + 模拟热处理(690 ± 14) °C 保温 4 - 1 h; 试样 C: 淬火(水冷) + 回火 + 模拟热处理(690 ± 14) °C 保温 20 + 2 h; 试样 D: 淬火(水冷) + 回火 + 模拟热处理(690 ± 14) °C 保温 8 - 2 h。

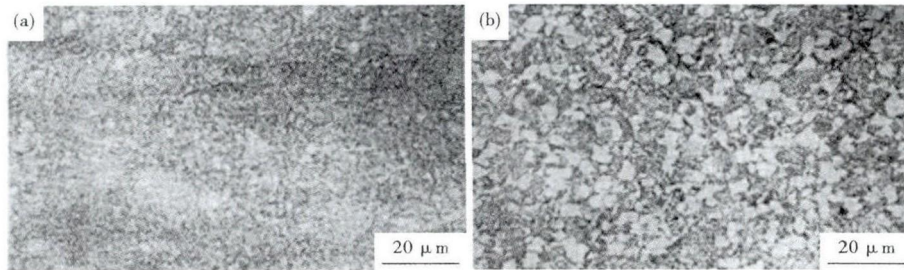


图 2 14Cr1Mo 钢锻件正火 + 回火(a) 和正火 + 回火 + 模拟热处理(b) 组织形貌  
Fig.2 Morphology of structure of steel 14Cr1Mo forgings quenched + tempered (a) and quenched + tempered + PWHT (b)

多, 或使原有析出相或碳化物长大并向晶界聚集, 晶界内部强化, 晶界薄弱, 降低材料抵抗变形的能力, 在受到冲击载荷作用时, 吸收很小的冲击吸收能量就断裂, 导致锻件的低温冲击韧性下降。

模拟热处理保温时间对强度、塑性、硬度的影响: 热处理保温时间较长, 材料的屈服强度和抗拉强度降低, 延伸率升高, 提高材料的塑性, 硬度降低。

模拟热处理对高温强度的影响: 如图 2 所示, 锻件经正火 + 回火热处理后组织为贝氏体回火组织, 经过长时间高温模拟热处理, 出现了铁素体组织, 降低材料的高温强度, 随着模拟热处理保温时间延长, 高温强度随之降低。

#### 4 结论

(1) 14Cr1Mo 钢锭表面质量良好, 化学成分含

量均在内控范围内, 残余元素含量低, 减小回火脆性倾向, 工艺合理。

(2) 14Cr1Mo 钢锻件非金属夹杂物和晶粒度级别、力学性能均满足标准要求, 现行的工艺可以满足 14Cr1Mo 钢生产的需要。

(3) 模拟热处理保温时间对材料的强度、塑性、韧性具有很大的影响。长时间的模拟热处理降低材料的韧性, 材料的屈服强度和抗拉强度降低, 延伸率升高, 提高材料的塑性, 硬度降低; 同时模拟热处理保温时间长, 材料的显微组织发生变化, 降低其高温强度。

甘肃省科技计划资助项目  
(2015GS05896)

#### 参考文献

- [1] 扶利群, 刘小林, 范红梅. 14Cr1MoR 钢板的研制开发[J]. 江西冶金, 2010, 30(1): 1-3.
- [2] 崔政阳, 段飞虎, 王鹏飞. 12Cr2Mo1 钢的冶炼工艺实践[J]. 炼钢, 2013, 29(06): 9-11.
- [3] NB/T47008-2010. 承压设备用碳素钢和合金钢锻件[S]. 北京: 新华出版社, 2010.
- [4] 王祖芳, 杨海林. 临氢设备用 14Cr1MoR 钢板性能研究[J]. 压力容器, 1998, 15(3): 15-20.
- [5] 朱苗勇. 现代冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [6] 宋平, 翟晓峰, 潘宏涛. 25Cr2Ni4MoV 大型风机轴用钢的研制[J]. 炼钢, 2014, 30(1): 6-9.
- [7] 吴全明, 李瑛, 刘广君, 等. 高碳钢转炉冶炼过程高拉碳工艺研究[J]. 炼钢, 2015, 31(3): 1-4.
- [8] 傅杰, 李晶, 徐晓达, 等. 电弧炉冶炼终点碳的控制[J]. 钢铁, 2001, 36(6): 18-20.
- [9] 郭玉民, 许中波, 王海涛. 铝镇静钢 LF 精炼过程中夹杂物行为研究[J]. 钢铁钒钛, 2007, 28(3): 14-18.

祁庆花(1985-), 女, 硕士(2014 年辽宁科技大学), 工程师, 2007 年东北大学(本科)毕业, 钢铁冶金及金属材料研究。  
E-mail: qiqinghua\_118@163.com

收稿日期: 2016-10-05