

连铸电磁搅拌和轻压下对气瓶钢 34CrMo4 冶金质量的影响

卢秉军¹ 齐峰¹ 沈万林² 刘军³

(1 本钢板材股份有限公司产品研究院, 本溪 117000; 2 焦作金鑫恒拓新材料股份有限公司, 焦作 454450;

3 本钢板材股份有限公司炼钢厂, 本溪 117000)

摘要 气瓶钢 34CrMo4 的生产工艺流程为铁水预处理-180 t BOF-LF-RH-350 mm×470 mm 坯连铸。对 4 流连铸分别采用结晶器电磁搅拌 (M-EMS, 480 A, 2 Hz); M-EMS + 凝固末端电流搅拌 (E-EMS, 320 A, 6 Hz); M-EMS + 轻压下 (LR, 3 mm-4 mm-3 mm) 以及 M-EMS + E-EMS + LR 进行工业试验, 得出 M-EMS (480 A, 2 Hz) + E-EMS (320 A, 6 Hz) + 3-4-3 (mm) 轻压下工艺, 有效提升连铸坯内部冶金质量。9 炉生产结果表明, 该流程生产的气瓶钢 34CrMo4 的抗拉强度达 1 070 ~ 1 159 MPa, 钢中氧含量 ≤ 0.002 0%, 采用 M-EMS + E-EMS + LR 连铸工艺时, 该钢具有高致密度, 铸坯中心疏松级别 ≤ 1.0。

关键词 气瓶钢 34CrMo4 180 t BOF-LF-RH-CC 流程 电磁搅拌 轻压下 中心疏松

Effect of Casting Electromagnetic Stirring and Light Reduction on Metallurgical Quality of Gas Cylinder Steel 34CrMo4

Lu Bingjun¹, Qi Feng¹, Shen Wanlin² and Liu Jun³

(1 Products Research Institute, Benxi Steel Plates Co Ltd, Benxi 117000; 2 Jiaozuo Jinxin Hengtuo Advanced

Materials Co Ltd, Jiaozuo 454450; 3 Steel Plant, Benxi Steel Plates Co Ltd, Benxi 117000)

Abstract The production flowsheet for gas cylinder steel 34CrMo4 is hot-metal pretreatment- 180 t BOF- LF- RH- 350 mm×470 mm blooms casting. The pilot production is carried out on 4-strands casting respectively by using mold electromagnetic stirring (M-EMS, 480 A, 2 Hz); M-EMS + solidification end electromagnetic stirring (E-EMS, 320 A, 6 Hz); M-EMS + light reduction (LR, 3 mm-4 mm-3 mm) and M-EMS + E-EMS + LR process, it is obtained that the process with M-EMS (480 A, 2 Hz) + E-EMS (320 A, 6 Hz) + 3-4-3 (mm) light reduction is available to improve the internal metallurgical quality of casting bloom. 9 heats commercial production results show that the tensile strength of gas cylinder steel 34CrMo4 steelmaking by the flowsheet is up to 1 070 ~ 1 159 MPa and oxygen content in steel is ≤ 0.002 0%, and by using M-EMS + E-EMS + LR casting process the steel has high density and the rating of center porosity of bloom is ≤ 1.0.

Material Index Gas Cylinder Steel 34CrMo4, 180 t BOF-LF-RH-CC Flowsheet, Electromagnetic Stirring, Light Reduction, Center Porosity

34CrMo4 钢为德国牌号,用于生产供欧洲地区高压无缝气瓶。其生产的气瓶壁薄于普通气瓶,而工作压强可达到 23 MPa,高于目前主流气瓶 15 MPa、20 MPa 的工作强度。

34CrMo4 钢为国内某压力容器生产商使用,其产品取得了 ISO9001、美国 DOT、德国 TUV、加拿大 TC 等十余个国际认证,远销三十多个国家和地区^[1],在国内气瓶行业享有很高知名度。此前该公司一直使用模铸工艺生产的 34CrMo4 方钢作为生产欧洲气瓶的原料,虽然大锭模铸具备较高的压缩比,内部致密度较高,但其生产效率低,成本高。为满足市场需求,降低成本,本钢采用连铸工艺代替模铸工艺试制气瓶钢 34CrMo4。

1 技术难点及生产工艺

1.1 技术难点

为了保证高压无缝气瓶的使用安全性,对制造气瓶钢铁材料的化学成分及有害元素提出了很高的要求。化学成分窄带控制可以保证钢材力学性能稳定。降低有害元素 P、S 可以提高气瓶的强韧性能, Nb、V、Ti、B、Zr 等微合金元素对钢的组织、力学性能有影响^[2],严格控制其含量以保证气瓶用钢力学性能可控。向钢中添加 0.02% ~ 0.05% Al,可达到细化晶粒,提高冲击性能的目的。而因钢水中含 Al,影响钢水浇注性能。矩形坯生产 203 mm×203 mm 规格的气瓶钢压缩比仅为 3.99。要保证钢铁材料的致密度,需对凝固末端电磁搅拌和轻压下作用效果进行系统研究。

1.2 生产工艺

依据气瓶钢 34CrMo4 的技术标准要求,设计工艺路线为:铁水预处理→180t 转炉冶炼→LF 处理

表1 LF 精炼渣主要成分 / %

Table 1 Main ingredient of LF refining slag / %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TFe
4.17	39.64	48.65	4.61	0.099	0.948

→RH 真空循环脱气→连铸350 mm × 470 mm 矩形坯→800 初轧机轧制。

高炉铁水温度 ≥ 1300 °C、P $\leq 0.040\%$ 、S $\leq 0.020\%$ 。采用钝化镁粉进行铁水预脱硫及扒渣处理,入转炉铁水 S $\leq 0.003\%$ 。采用 180 t 顶底复吹转炉单渣法冶炼钢水,冶炼中期控制脱碳速度,吹炼终点控制 C $\geq 0.20\%$ 。采用挡渣标挡渣出钢,减少下渣量。出钢过程中加入铝锭脱氧,同时对钢水进行合金化。精炼使用 180 t 电极旋转式双工位 LF 设备,最大升温速度 5 °C/min。采用活性石灰、硅铁粉、铝球等材料造“白渣”,精炼渣成分见表 1。在调整钢水温度的同时合金化微调成分。精炼过程保持钢包底吹氩,保证钢水成分、温度均匀。钢水经 LF 精炼后需进行 RH 真空脱气处理。RH 处理时间 30 ~ 40 min,最低真空度 < 100 Pa,持续时间 ≥ 15 min。复压后根据温度进行吹氩,保证软吹氩时间在 15 min 以上。中间包烘烤,保证钢水温度。采用保护浇铸,避免钢水二次氧化。连铸机为四机四流弧形连铸机,拉坯速度为 0.46 ~ 0.50 m/min,连铸坯断面尺寸为 350 mm × 470 mm。连铸机配有结晶器电磁搅拌、凝固末端电磁搅拌、轻压压等设备。连铸坯热送,经三段式步进梁式加热炉加热至 1200 °C 进行轧制。203 mm × 203 mm 规格钢材采用 800 初轧机轧制,使用专用孔型以保证尺寸外形精度。

2 连铸工艺试验

2.1 工艺试验原理

为保证铸坯质量,本次试制在使用原有的结晶器电磁搅拌的同时投入了凝固末端电磁搅拌及动态轻压压设备。

方坯铸机结晶器配有电磁搅拌,即通过外加电磁场对钢液进行作用,在钢液中产生感应电流,载流钢水受到洛伦兹力作用,产生方向性流动,从而达到均匀成分及温度的效果^[3]。

方坯铸机还配有凝固末端电磁搅拌,其工作原理与结晶器电磁搅拌相同,安装在未凝固率 20% ~ 28% 位置,采用交流电流交替搅拌。单一采用结晶器电磁搅拌或凝固末端电磁搅拌均难以达到上述效果,通常同时采用两种电磁搅拌手段才能大幅提高铸坯质量^[4]。

为进一步提高连铸坯致密度,本次工艺试验还投入轻压压设备。轻压压是在铸机扇形段对带液芯的铸坯进行适量压下的手段^[5]。其基本原理是在铸机扇形段连铸坯液相穴末端对铸坯施加压力,产生一定的压下来补偿铸坯的凝固收缩量。一方面可以减少或消除铸坯收缩形成的内部空隙,防止晶间富集溶质的钢液向铸坯中心横向流动;另一方面轻压压产生的挤压作用还可能促使液芯中心富集溶质的钢液沿拉坯方向反向流动,使溶质元素在钢液中重新分配。

2.2 试验方案

为保证铸坯心部质量,提高等轴晶率,减轻中心偏析程度,进行了凝固末端电磁搅拌及动态轻压压下的对比试验。试验方案为采用转炉冶炼及浇铸状况相同的同一炉钢,结晶器电磁搅拌全部投入,电流为 480 A,电流频率为 2 Hz。1 流不投入轻压压也不投入凝固末端电磁搅拌;2 流仅投入凝固末端电磁搅拌;3 流仅投入轻压压;4 流同时投入轻压压和电磁搅拌。连铸工艺试验方案见表 2。

图 1 分别为连铸工艺 1 流 ~ 4 流的连铸坯纵向酸浸低倍组织。

图 1(a)生产工艺为未投入凝固末端电磁搅拌及轻压压,低倍组织存在 3 处 1 ~ 2 mm 缩孔,8 处 1 ~ 3 mm 疏松点。

图 1(b)生产工艺为投入凝固末端电磁搅拌,未投入轻压压,连铸坯厚 350 mm,连铸坯等轴晶率较高,中心偏析程度较低,低倍质量得到改善。

图 1(c)生产工艺为投入轻压压,未投入凝固末端电磁搅拌,连铸坯厚 343 mm,未发现严重的缩孔缺陷,疏松情况得到改善,轻压压实现补缩效果,低倍质量得到改善。

图 1(d)生产工艺为同时投入凝固末端电磁搅拌及轻压压,连铸坯厚 342 mm,连铸坯未发现缩孔缺陷,等轴晶率明显提高,疏松缺陷级别较图 1(a ~

表 2 4 流 350 mm × 470 mm 坯连铸工艺试验方案

Table 2 Test scheme of 4-strands 350 mm × 470 mm bloom casting process

连铸工艺	结晶器电磁搅拌		凝固末端电磁搅拌		轻压压工艺
	电流/A	频率/Hz	电流/A	频率/Hz	
1 流	480	2	无	无	无
2 流	480	2	320	6	无
3 流	480	2	无	无	2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 辊分别压下 3、4、3 mm
4 流	480	2	320	6	2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 辊分别压下 3、4、3 mm

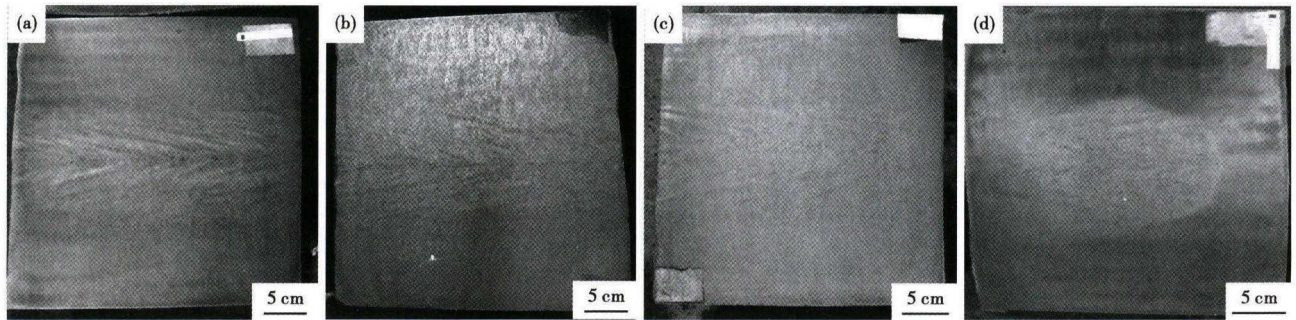


图 1 铸坯纵向低倍组织,连铸工艺:(a) M-EMS;(b) M-EMS + E-EMS;(c) M-EMS + LR;(d) M-EMS + E-EMS + LR

Fig. 1 Macro longitudinal structure of casting bloom, casting process: (a) M-EMS; (b) M-EMS + E-EMS; (c) M-EMS + LR; and (d) M-EMS + E-EMS + LR

c) 更低,轻压下补缩效果显著,低倍质量得到改善。

综上所述,同时投入凝固末端电磁搅拌(电流 320 A、频率 6 Hz)及轻压下操作(连铸机 2[#]、3[#]、4[#] 辊分别压下 3、4、3 mm)工艺效果理想,有效的提升了连铸坯的内部质量。

2.3 探伤检验情况

为进一步验证轻压下及凝固末端电磁搅拌对连铸坯致密度的影响,对本次试制的 203 mm × 203 mm 规格钢材进行了超声波探伤检验,检验按 GB/T 4162-2008 中 B 级要求执行。检验结果见表 3。

探伤检验表明,本次试验采用的凝固末端电磁搅拌及轻压下措施有效提高了连铸坯及方钢的内部质量,同时投入轻压下及凝固末端电磁搅拌解决了连铸坯出现缩孔的质量问题,为解决连铸工艺钢材压缩比不足这一技术难题起到关键作用。

3 生产检验结果及讨论

根据制定的 34CrMo4 气瓶钢标准,采用本地优质矿石生产的铁水作为原料,冶炼 9 炉钢,并轧制成材。随后对钢材进行了各项检验。结果如下。

3.1 化学成分

首次生产的 9 炉 34CrMo4 气瓶钢化学成分全部都满足气瓶标准的要求,几个主要元素控制精确,Nb、V、Ti、B、Zr 等残余元素及标准中未做要求的 H、O、N 等气体元素含量极低,保证了钢水成分

纯净,凸显本钢本地矿石资源的优势。表 4 为已生产的 9 炉钢标准成分及实际成分。

3.2 低倍组织

采用提高结晶器电磁搅拌强度,合理二冷制度、拉速配合相应的末端电磁搅拌制度,合理的铸坯轻压下制度,保证在压缩比仅为 3.99 的情况下得到较高的钢坯低倍质量。按照 GB226-1991 和 GB1979-1980 标准规定,对 9 炉钢材的横向酸浸低倍组织级别进行评定,检验结果为一般疏松 0~1 级,中心疏松 0~1 级,偏析 0~1 级,点状偏析 0 级,没有缩孔、内部裂纹及皮下气泡、皮下夹杂等缺陷。

3.3 高倍组织

良好的脱氧、钢包吹氩、LF 造还原渣及 RH 真空精炼,为连铸提供了纯净的钢水,方坯连铸采取保护浇铸和结晶器电磁搅拌,一方面防止了钢液的二次氧化,另一方面可以促使部分夹杂物上浮,因此获得了非金属夹杂含量较低的无缝气瓶钢坯,非金属夹杂按照 GB10561-2005 中 JK 图评级^[6],9 炉钢的

表 3 4 流连铸坯生产的 203 mm × 203 mm 钢材探伤结果

Table 3 Nondestruction test results of 203 mm × 203 mm products produced by 4-strands casting bloom

连铸工艺	探伤支数	不合格支数	点状缺陷数	连续缺陷数
1 流(M-EMS)	10	6	3~5 点	3 处
2 流(M-EMS + E-EMS)	10	3	2~3 点	1~2 处
3 流(M-EMS + LR)	12	2	1~2 点	0~1 处
4 流(M-EMS + E-EMS + LR)	12	0	无	无

表 4 34CrMo4 钢的标准化学成分和试验钢成分,9 炉 / %

Table 4 Standard chemical composition and analysis results of steel 34CrMo4, 9 heats / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Alt	H	O	N	Nb	V	Ti	B	Zr
标准	0.32~0.36	0.17~0.35	0.60~0.80	≤0.015	≤0.010	0.90~1.20	0.15~0.30	≤0.20	≤0.10	0.020~0.050	-	-	-	-	-	-	-	-
试验钢	0.33~0.35	0.20~0.25	0.65~0.70	0.005~0.010	0.002~0.007	1.00~1.10	0.25~0.28	0~0.01	0~0.01	0.030~0.038	≤0.0002	≤0.0020	≤0.0050	0.0008~0.0014	0.0047~0.0075	0.0028~0.0046	0.0001~0.0002	0.0001~0.0003

(Nb + V + Ti + B + Zr) ≤ 0.15

检验结果见表5。

从非金属夹杂物级别上分析,转炉+LF(RH)工艺氧化物控制比较稳定,满足气瓶钢要求。高倍夹杂物A类和B类满足标准要求,C类和D类夹杂物均为0级。钢材的纯净度达到了较高的水平。

表5 34CrMo4 钢非金属夹杂物级别,9炉

Table 5 Rating of nonmetallic inclusion of steel 34CrMo4, 9 heats

项目	A类	B类	C类	D类
标准要求	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5
实际检验	0.5~1.5	0.5	0	0

表6 34CrMo4 钢的力学性能,9炉

Table 6 Mechanical properties of steel 34CrMo4, 9 heats

项目	淬火工艺	回火工艺	R_{σ} /MPa	R_m /MPa	A/%	K_{U2} /J
标准要求	(880±10)℃	(540±50)℃	≥835	≥980	≥12	≥63
试验钢检验	保温30 min,水或油冷	保温60 min,水或油冷	955~1 070	1 070~1 159	14.5~16.5	106~138

3.4 力学性能

用调质处理试样毛坯制成的试样测定钢的力学性能结果见表6。

从模拟热处理工艺检验结果可以看出,气瓶钢具备较高强度的同时,保证了很高的塑性和冲击性能,为制作高强度气瓶奠定了基础。

3.5 用户使用情况

本钢生产的34CrMo4气瓶钢,经国内公司制作高强度高压气瓶,成品高压气瓶通过了气密性试验、水压爆破等试验。经用户批量试验生产,本钢气瓶钢加工过程冲裂率为0.021%,该指标远优于国内其他钢厂同类产品。采用本钢生产的34CrMo4钢制造的气瓶已通过欧洲地区气瓶用户的认证,气瓶质量得到欧洲市场的认可。

4 结论

(1)转炉连铸生产的气瓶钢34CrMo4通过化学成分窄带控制并依靠独特的矿产资源,有效控制Nb、V、Ti、B、Zr等残余元素, $(Nb+V+Ti+B+Zr) \leq 0.015\%$ 。

(2)采用结晶器电磁搅拌配合凝固末端电磁搅拌及轻压手段保证了方钢具备较高致密度,低倍组织中心疏松≤1级,34CrMo4气瓶钢生产可以用

连铸工艺代替模铸工艺。

(3)采用“转炉冶炼+LF精炼+RH真空循环脱气+矩形坯连铸+连轧”工艺流程生产的气瓶钢34CrMo4, R_m 达到1 070~1 159 MPa, $[O] \leq 0.002 0\%$,现已实现工业化生产。

参考文献

- [1] 武建军. 北京天海工业有限公司领军气瓶行业目标世界三强[J]. 中国机电工业, 2003, (24): 43.
- [2] 杨作宏, 陈伯春. 谈微合金元素 Nb、V、Ti 在钢中的作用[J]. 甘肃冶金, 2000, 12(4): 20-22.
- [3] 施阔循, 邢玉禄, 王寿同, 等编. 钢铁冶金工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [4] 王彪, 谢植, 贾光霖, 等. 凝固末端电磁搅拌参数确定及其对中心偏析的影响[J]. 钢铁, 2007, 42(3): 18-21.
- [5] 陈永, 李桂军, 杨素波. 大方坯连铸动态轻压下技术应用研究[J]. 钢铁, 2004, 39(s1): 180-183.
- [6] 朱学仪, 陈训浩. 钢的检验[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.

卢秉军(1972-),男,教授级高级工程师,1993年辽宁工学院毕业,特殊钢产品研究与开发。
E-mail: Honghe7825758@163.com

收稿日期: 2017-04-27