

汽车零部件用45Mn2R硫系易切削钢的开发

梁娜, 刘永昌, 王升
(山东钢铁股份有限公司, 莱芜271105)

摘要: 采用 $\geq 40\%$ 铁水-50 t EAF-LF-VD-180 mm \times 220 mm铸坯-轧制流程开发了45Mn2R钢 $\Phi 40\sim 50$ mm轧材。通过控制EAF终点 $[C]\geq 0.10\%$, $[P]\leq 0.015\%$, 出钢温度1620~1660 $^{\circ}\text{C}$, 出钢过程用“增碳剂+复合脱氧剂(15%Ca-12%Al-45%Si)+合成渣(50%CaO-34%Al₂O₃-4%MgO)”预脱氧, Ca处理前钢水S含量 $\leq 0.010\%$, Ca处理20 min后喂S线, VD后软吹25~30 min等工艺措施, 提升钢的纯净度和可浇性。结果表明, 生产的45Mn2R钢($\%: 0.43\sim 0.46\text{C}, 0.22\sim 0.27\text{Si}, 0.009\sim 0.017\text{P}, 0.065\sim 0.086\text{S}, 0.32\sim 0.36\text{Cr}, 0.003\sim 0.010\text{Ti}, 0.013\sim 0.034\text{Als}$)具有良好的综合性能, 各项指标满足用户要求。

关键词: 45Mn2R硫系易切削钢; $\geq 40\%$ 铁水-50 t EAF-LF-VD-CC流程; 硫化物控制; 洁净度

Development of 45Mn2R Sulfur Free-Cutting Steel for Automobile Parts

Liang Na, Liu Yongchang, Wang Sheng
(Shandong Iron and Steel Company Ltd., Laiwu 271105)

Abstract: The 45Mn2R steel $\Phi 40\sim 50$ mm rolled product is developed by $\geq 40\%$ hot metal-50 t EAF-LF-VD-180 mm \times 220 mm cast billet-rolling flow sheet. The cleanliness and casting ability are improved by controlling EAF end $[C]\geq 0.10\%$, $[P]\leq 0.015\%$, tapping temperature 1620~1660 $^{\circ}\text{C}$, preliminary deoxidation using "recarburizing agent + (15%Ca-12%Al-45%Si) compound deoxidation reagent + (50%CaO-34%Al₂O₃-4%MgO) synthetic slag" during tapping, S content in metal $\leq 0.010\%$ before Ca treatment, feeding S wire after Ca treatment for 20 min, soft blowing for 20 min after VD etc process measure. Results show that produced 45Mn2R steel ($\%: 0.43\sim 0.46\text{C}, 0.22\sim 0.27\text{Si}, 0.009\sim 0.017\text{P}, 0.065\sim 0.086\text{S}, 0.32\sim 0.36\text{Cr}, 0.003\sim 0.010\text{Ti}, 0.013\sim 0.034\text{Als}$) has better comprehensive properties to meet user requirement.

Material Index: 45Mn2R Sulfur Free-Cutting Steel; $\geq 40\%$ Hot Metal-50 t EAF-LF-VD-CC Flowsheet; Sulphide Control; Cleanliness

易切削钢主要是向钢中加入一些易切削元素, 如硫、磷、铅、铋、铍、碲、钙等, 以改善钢的切削性能, 达到降低机加工成本(主要是降低刀具磨损)、提高切削质量、降低切削抗力或者在机械加工的自动机床中改善切屑处理性的目的, 广泛的应用于仪器仪表、手表零件、汽车、机床和其他各种机器。目前国内年需求量为40~50万吨, 全球每年消耗易切削钢约400万吨, 一半以上由美国/日本消耗, 其中日本消耗的易切削钢有50%用于汽车零部件的生产^[1]。

莱钢特钢事业部采用50 t电弧炉生产线生产硫系易切削钢, 硫含量在0.060%~0.090%。研究其炼钢、连铸、轧钢生产工艺, 使材料的各项性能满足客户要求, 并为开发其他高端中、高硫系易切削钢奠

定基础。

1 钢的主要技术要求

1.1 牌号及化学成分

钢的牌号及化学成分(熔炼成分)应符合表1的规定。

1.2 低倍组织

钢材的横截面酸浸低倍组织试片上不得有肉眼可见的缩孔、气泡、裂纹、夹杂、翻皮及白点等缺陷。低倍组织缺陷按GB/T 1979-2001标准评级。酸浸低倍组织合格级别应符合表2的规定。

1.3 淬透性

用热处理过的毛坯制成 $\Phi 25$ mm标准试样, 并

表 1 45Mn2R 钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of 45Mn2R steel / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti	Alt
0.43 ~ 0.47	0.20 ~ 0.35	1.10 ~ 1.40	≤0.020	0.060 ~ 0.090	0.30 ~ 0.40	≤0.10	≤0.10	≤0.40	≤0.015	0.010 ~ 0.040

表 2 45Mn2R 钢材低倍组织要求/级
Table 2 Macrostructure requirement for 45Mn2R steel product / rating

一般疏松	中心疏松	锭型偏析	中心偏析
≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5

表 3 45Mn2R 钢淬透性要求
Table 3 Hardenability requirement for 45Mn2R steel

热处理制度	J1.5	J11	J15
正火(850 ± 10) °C + 淬火(850 ± 5) °C	55 ~ 62	31 ~ 46	26 ~ 38

表 4 正火 45Mn2R 钢力学性能与硬度值
Table 4 Mechanical properties and hardness value of normalized 45Mn2R steel

推荐热处理制度	R_{d1}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	HBW 硬度值
正火(850 ± 30) °C	≥470	720 ~ 850	≥15	217 ~ 255

按 EN ISO642-1999 进行淬透性试验,应符合表 3 要求。

1.4 力学性能与热处理硬度

按要求用热处理毛坯制成试样测定钢材的纵向力学性能以及热处理硬度,检验结果应符合表 4 的规定。

1.5 非金属夹杂物

钢材应按 ASTM E45-2018 进行非金属夹杂物检验,按 A 法评定,其合格级别应符合表 5 的规定。

1.6 晶粒度

按 ASTM E112-2013 测定钢材的奥氏体晶粒度,合格级别不粗于 5 级。

2 工艺流程及控制要点

2.1 工艺流程

炉料(热装 40% 以上铁水)→50 t 电弧炉→LF 精炼 + VD 真空脱气处理→连铸(铸坯尺寸 180 mm × 220 mm)→缓冷→加热→轧制成材(成材规格 Φ40 ~ 50 mm)→精整→入库。

2.2 关键技术

表 5 45Mn2R 钢材非金属夹杂物要求/级
Table 5 Non-metallic inclusions requirement for 45Mn2R steel product / rating

A		B		C		D	
细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系
-	-	≤1.5	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≤1.5

2.2.1 力学性能及淬透性的控制

钢材的力学性能和淬透性主要取决于钢的化学成分,根据与其他相似的成熟产品性能相对比,合理设计内控,严格控制化学成分波动范围,设计 C、Mn、Cr 均按照成分的中限并按窄成分控制,同时加强成分的均匀性控制,在 VD 处理后,软吹时间不少于 20 min,应合理控制连铸工艺参数,减少合金元素偏析及促进碳化物充分溶解。主要采取以下措施:连铸采用低过热度、电磁搅拌工艺;钢水过热度波动控制在 10 °C 范围内,尽量减少 C、Cr、Mn 等元素的偏析;在连铸过程采用电磁搅拌,稳定拉速和结晶器液面,使铸坯组织均匀;连铸全程保护浇注、采用弱冷配水工艺以获得良好的铸坯组织结构。

2.2.2 非金属夹杂物的控制

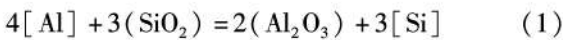
为了满足钢材洁净度的要求,电弧炉冶炼过程造好泡沫渣,均匀脱碳,减少吸氮;严格控制终点 $[C] \geq 0.10\%$, $[P] \leq 0.015\%$,控制出钢温度在 1620 ~ 1660 °C,为了满足 Ti 含量的要求,钢包合金化时配入中锰、中铬,出钢过程采用“增碳剂 + 15% Ca-12% Al-47% Si 复合脱氧剂 + 50% CaO-34% Al_2O_3 -4% MgO 合成渣”的预脱氧工艺。LF 精炼取一次样前,喂入(1.0 ~ 2.0 m/t)铝线、(1.0 ~ 2.0 m/t)钙线,降低溶解氧含量,增强脱硫效果,钙处理前 S 含量控制目标 $< 0.010\%$,钙处理后白渣保持时间 > 20 min,使夹杂物充分上浮,同时使钢水中的残余 $[Ca]$ 尽量排尽,一次性喂足 S 线,进 VD 前扒渣,VD 处理后的软吹时间延长至 20 min 以上^[2-3],达到 25 ~ 30 min,使夹杂物充分上浮。连铸采用全程保护浇注,钢包保护采用长水口,采用整体中间包、使用覆盖剂、选用性能优良的中碳合金钢专用结晶器保护渣,以防止钢水二次氧化。

2.2.3 钢的可浇性研究

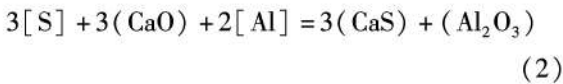
对于含硫含铝钢,易产生 Al_2O_3 和 CaS 夹杂,当耐材侵蚀严重时还会产生尖晶石夹杂。钙处理能提高 Al 镇静钢的连浇能力,但钙处理的效果与钢成分密切相关。随着 $[S]$ 含量增加,钙处理后的夹杂物“液窗”范围急剧减小,甚至消失^[4-6]。45Mn2R 钢在浇铸过程中,水口蓄流现象较为多发,连浇炉数少,通常浇铸 3 ~ 5 炉后,便发生水口堵死的情况,水口结瘤物主要为 Al_2O_3 或钙处理后的 Al_2O_3 -CaO。

为了提高钢水的纯净度和可浇性,优化生产工艺,采用脱氧脱硫→钙处理→增硫的方式来改善钢的可浇性。一次样前喂入钙线、铝线,一次性喂足,后期不再补加;增加钙线喂入量,将每炉喂入的数量由 50 m 提高到 60 m,钢液中钙铝比应尽量控制在 0.04 ~ 0.12,同时保证钙处理前钢水中硫含量控制在 0.010% 以下,钙处理后白渣保持时间 ≥ 20 min,使夹杂物充分上浮,同时使钢水中的残余 [Ca] 尽量排尽,按成分上限喂入 S 线。在含硫含铝钢渣系中,精炼过程存在以下两个生成高熔点夹杂的反应:

钢-渣氧化反应:



脱硫反应:



由于钢中 Al 含量高,脱氧反应生产的 Al_2O_3 类夹杂物的去除需采用高碱度低氧势渣;同时钢中 S 含量高,S 易与 CaO 反应生成 CaS,为抑制生成 CaS,应采用低碱度高氧势渣,此两方面存在热力学矛盾^[7]。因此采用的精炼渣系应满足条件:抑制钢渣反应生成 Al_2O_3 的热力学条件,并且精炼渣要有合适的 CaO/ Al_2O_3 ,保证同化吸收 Al_2O_3 的能力,兼顾减弱 [S] 与渣的反应,限制脱硫动力学条件,降低 CaS 的生成量,综合以上因素,依据 CaO- Al_2O_3 - SiO_2 -MgO 渣系的等活度图^[8](图 1),设计精炼渣目标渣系及实际 LF 出钢 CaO- Al_2O_3 - SiO_2 -MgO 渣系成分如表 6 所示。

VD 处理后的软吹时间延长至 20 min 以上,达到 25 ~ 30 min,使夹杂物充分上浮,控制软吹强度,确保钢渣不翻卷,抑制 CaS 的形成。优化连铸工艺,连铸过程强化全保护浇铸,调整中间包过热度,在原来的基础上提高 5 ~ 10℃,并适当提高连铸拉速,采用经优化的防絮流水口。采用该工艺可实现 7 炉连浇,生产顺行。

表 6 精炼渣目标组成和 LF 终点渣分析

Table 6 Refining slag aim ingredient and LF end slag analysis

序号	渣组成/%						R(碱度)
	ΣFe	SiO ₂	MgO	CaO	S	Al ₂ O ₃	
设计目标	-	8-15	6-10	45-55	-	18-31	-
1	2.66	9.73	6.31	46.46	1.329	19.78	4.77
2	2.65	9.49	6.66	46.22	1.277	19.17	4.87
3	0.66	9.92	7.47	44.58	1.389	23.42	4.49
4	0.68	9.62	8.05	43.90	1.310	22.25	4.56

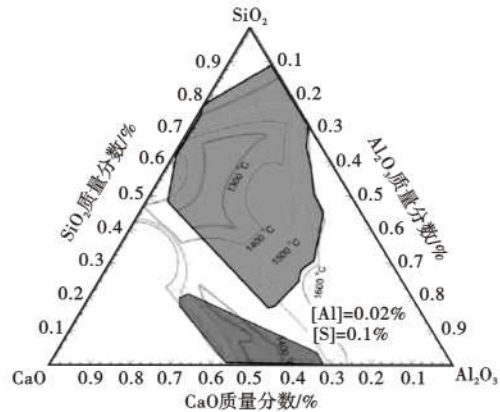


图 1 CaO- Al_2O_3 - SiO_2 精炼渣系 (MgO = 6% ~ 8%) 等活度图
Fig. 1 CaO- Al_2O_3 - SiO_2 refining slag system (MgO = 6% ~ 8%) iso-activity diagram

2.2.4 钢的轧制工艺研究

由于钢中硫含量偏高,使钢材的热加工性能变差,易打滑,易产生裂纹,因此轧制时的温度控制比较关键。硫化物的脆化敏感温度在 830 ~ 1 050℃,轧钢时要尽量避免在该区间进行变形,采用高温快速轧制工艺。考虑到生产实际,控制开轧温度最好在 1 130 ~ 1 180℃。加强对轧制节奏的控制,适当调节关闭水冷却,严禁轧件在辊道上长时间停留,防止因轧件温降太快、轧制温度过低导致劈头现象,注重导卫、轧辊及运输轨道的精加工并控制好终轧温度,终轧目标温度 950 ~ 1 000℃。

3 产品实物质量

3.1 化学成分

45Mn2R 钢中 C、Si、Mn、P、S、Cr、Ti、Al 成分的统计结果如表 7 所示。其主要元素含量范围表明,钢材的化学成分控制稳定,所有 Ti 含量均在 0.010% 以下,S 含量符合控制要求。

3.2 低倍组织和非金属夹杂物

钢材的低倍组织级别为一般疏松 0.5 级,中心疏松 1 级,偏析 0.5 级,中心偏析 0 级,无其它低倍缺陷。

对钢材的非金属夹杂物进行统计,A 细 1.5 ~ 2.5 级,A 粗 0.5 ~ 1.5 级;B 细 0 ~ 1 级,B 粗 0 ~ 0.5 级;C 细 0 级,C 粗 0 级;D 细 0 ~ 0.5 级,D 粗 0 级;钢材的洁净度高,硫化物夹杂控制较好。

3.3 力学性能

统计正火处理后钢材的力学性能,屈服强度 482 ~ 515 MPa,抗拉强度 730 ~ 780 MPa,延伸率 18.5% ~ 23.5%,硬度值 217 ~ 241HBW,符合客户技术要求。

表 7 45Mn2R 钢化学成分统计结果/%
Table 7 Statistical results of chemical composition of 45Mn2R steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Al
0.43 ~ 0.46	0.22 ~ 0.27	1.21 ~ 1.26	0.009 ~ 0.017	0.065 ~ 0.086	0.32 ~ 0.36	0.003 ~ 0.010	0.013 ~ 0.034

3.4 淬透性

对钢材的淬透性进行统计, J1.5: 58. 4 ~ 62HRC; J11: 32 ~ 37. 9HRC; J15: 26. 3 ~ 32. 5HRC, 符合淬透性的要求。

3.5 晶粒度

对钢材的晶粒度进行统计, 晶粒度级别 7 ~ 8 级, 符合技术要求。

综合以上统计结果可以看出, 生产的 45Mn2R 的各项性能均能很好的满足技术要求, 且性能稳定,

洁净度高, 具有良好的综合性能。

4 结论

(1) 采用 50 t 电弧炉短流程生产工艺成功开发了 45Mn2R 硫系易切削钢, 生产工艺稳定可行, 产品的各项性能均很好的满足产品的使用要求。

(2) 研制生产的 45Mn2R 易切削钢具有良好的综合性能, 易加工、力学性能优良、成本低、满足用户的技术要求。

参考文献

[1] 夏艳花. 易切削钢种类及其特性分析[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2014, 26(1): 18-20, 24.

[2] 黄 蕾. 高硫钢中硫化物形态控制的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010[2021-12-03].

[3] 王小龙. 稀土高硫钢硫化物形态及性能的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011[2021-12-03].

[4] 董大西, 张 永, 孙玉春, 等. 提高含硫含铝齿轮钢钢液洁净度实践[J]. 炼钢, 2015, 31(1): 12-16.

[5] 张 飞. 含硫钢夹杂物控制技术[D]. 沈阳: 东北大学, 2011[2021-12-03].

[6] 王会忠, 薛文辉. 关于钙铝比与中包塞棒开口度的探讨[J]. 本钢技术, 2006, 12(1): 29-34.

[7] 储晓明, 刘全保, 王俊超, 等. 含硫易切削钢可浇性的工艺优化[J]. 特钢技术, 2015, 21(1): 29-32.

[8] 郭银涛, 何生平, 王 谦, 等. 含硫含铝易切钢的可浇性研究: 第十八届全国炼钢学术会议文集[C]. 西安: 中国金属学会, 2014.

下 期 要 目

基于非铝脱氧工艺的 GCr15 轴承钢中 Ds 类夹杂物控制 王仲亮等

GCr15 轴承钢转炉冶炼中“C-P-T”协同控制工艺优化研究 肖丙政等

1. 25C-1. 5Cr-5Al 轴承钢中合金元素扩散对 κ 碳化物不均匀形核的影响 鹿佳琛等

加 Ce-Mg 对 GCr15 轴承钢夹杂物和凝固组织的影响 邹 涛等

电渣重熔渣系对 GCr15 轴承钢洁净度的影响 肖爱平等

GCr15 轴承钢碳化物控制及其对压碎负荷的影响 官跃辉等

260 t 转炉用双角度六孔氧枪的射流特性研究 孙梦丽等

碲处理改善汽车曲轴用非调质钢 38MnVS6 硫化物形貌的研究 轩康乐等

超低碳钢 AISI 1006 铸坯夹杂物的分布及改进 李 润等