

快速抽锭电渣重熔 M2 高速钢 160 mm × 160 mm 铸坯工艺及质量

谢志彬^{1,2} 邵青立^{1,2} 张国平¹ 王子霖¹ 何宁^{1,2} 王然^{1,2}

(1 河冶科技股份有限公司, 石家庄 052165; 2 河北省高速工具钢工程技术研究中心, 石家庄 052165)

摘要 为控制高速钢铸锭组织的不均匀性和碳化物偏析问题, 常采用电渣重熔生产小规格钢锭, 但其生产效率低、成材率低。采用快速抽锭电渣重熔小规格长电渣坯可提高生产效率和成材率, 利用 T 型导电结晶器快速抽锭电渣炉以不同熔速重熔 M2 高速钢 160 mm × 160 mm 方长坯并锻轧成材, 通过对电渣坯成分、低倍、铸态组织及轧材碳化物不均度、大颗粒碳化物尺寸检测分析, 并与常规电渣重熔 Φ220 mm 锭轧材进行对比, 分析表明快速抽锭电渣炉以 400 kg/h 熔速重熔的电渣坯成分稳定、低倍组织良好, 生产的轧材碳化物不均度、大颗粒碳化物尺寸与常规电渣重熔 Φ220 mm 锭轧材相当, 而生产效率、成材率有明显提高。

关键词 快速抽锭重熔 T 型导电结晶器 高速钢碳化物 生产效率 成材率

Process and Quality of M2 HSS 160 mm × 160 mm Casting Billet by ESR Fast Withdrawing Process

Xie Zhibin^{1,2}, Shao Qingli^{1,2}, Zhang Guoping¹, Wang Zilin¹, He Ning^{1,2} and Wang Rang^{1,2}

(1 Heye Science and Technology Co., Ltd, Shijiazhuang 052165;

2 Hebei High Speed Tool Steel Engineering and Technology Research Center, Shijiazhuang 052165)

Abstract In order to control structure non-uniformity and carbide segregation of high speed steel ingot, ingots of small size are usually produced by ESR, but its production efficiency is low, the rate of finished product is low. Long electroslag billets with small specifications for ESR fast Withdrawing can improve production efficiency and finished product rate, we made 160 mm × 160 mm square billet of M2 high speed steel using T-type conductive crystallizer for ESR fast Withdrawing with different melting speed and forged and rolled, through the detection and analysis of the composition, low magnification, cast structure and carbide irregularity of the electroslag billet and the size of large particles of carbide, meanwhile, it is compared and analyzed with Φ220 mm ingot rolling for conventional ESR, analysis shows that electroslag billet for ESR fast Withdrawing with 400 kg/h remelting speed has stable composition and good macrostructure, the carbide variability and carbide dimensions of large particles of rolled materials produced are similar to those Φ220 mm ingot rolling materials for conventional ESR, and the production efficiency and the rate of finished products have been improved obviously.

Material Index ESR Fast Withdrawing, T - Type Conductive Crystallizer, High Speed Steel Carbide, Production Efficiency, Yield

高速钢具有优良的红硬性、耐磨性和一定的韧性, 仍是制作现代刀具的支柱材料之一^{[1]5}, 且随着模具材料向高端方向发展, 越来越多的厂家使用高速钢制作模具。高速钢为高碳高合金莱氏体钢, 钢锭铸态组织由共晶碳化物和奥氏体组成, 组织是很不均匀的^{[1]66}, 碳化物组织偏析严重。为改善高速钢铸态组织的不均匀性和碳化物偏析情况, 国内外普遍采用电渣重熔生产钢锭。高速钢电渣重熔通常采用传统的固定式电渣炉生产, 一支电极重熔一支钢锭、细电极重熔稍大截面电渣锭的生产工艺, 其具有设备投资少, 操作简单的优点, 不足是生产效率低、电耗高, 成材率低^[2]; 尤其小锭重熔, 熔速慢 [熔速 (kg/h)] 与钢锭直径 (mm) 比为 0.65 ~ 0.75^[3]、效率低。为提高电渣生产效率、降低电耗, 快速电渣重熔 (ESRR) 应运而生, 1992 年奥地利 Holzgruber 在意大利 Acciaier Valbuna 特钢厂试验开

发了快速电渣重熔技术, 2002 年奥地利 Inteco 公司对设备进行升级实现了连铸快速电渣重熔 (CC-ESRR) 技术^[4]。借助于国内某公司快速抽锭电渣重熔设备, 重熔 160 mm × 160 mm M2 高速钢电渣坯, 经锻轧生产小规格轧材盘条, 与公司常规 Φ220 mm 电渣锭生产的同规格段轧材盘条进行了对比分析。

1 试验方法

1.1 快速抽锭电渣重熔技术原理

快速抽锭电渣重熔技术原理示意图见图 1, 重熔电流回路有两路, 一路为变压器-电极-渣池-导电结晶器-变压器, 一路为变压器-电极-渣池-钢锭-变压器。金属熔池控制在下端结晶器内。

1.2 试验钢种、电极、结晶器及电渣坯

钢种为 M2 (W6Mo5Cr4V2) 高速钢, 成分见表 1。

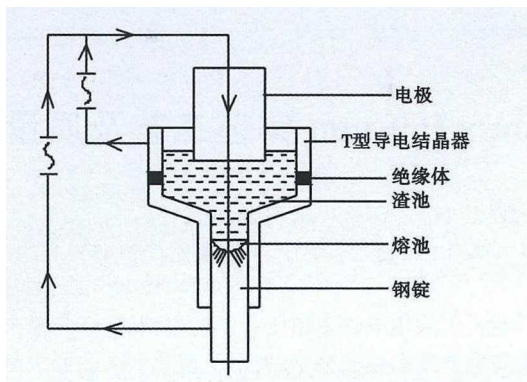


图 1 快速抽锭电渣重熔技术原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of ESR fast withdrawing process

表 1 M2 高速钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of high speed steel M2 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
0.87	0.37	0.35	0.025	0.008	4.10	4.87	1.92	6.10

电极为 $\Phi 310$ mm 圆形电极,质量 1 520 kg;结晶器由上下两部分组成,上部直径为 $\Phi 600$ mm,下部为 160 mm \times 160 mm 方坯;电渣坯断面为 160 mm \times 160 mm 方坯,长度 7.1 m。

1.3 试验渣系

常规电渣重熔高速钢采用熔点低、渣皮薄、成型光滑的 60% CaF_2 , 20% Al_2O_3 , 20% CaO 渣系^{[1]365}。考虑抽锭时钢锭与结晶器有相对移动使渣壳承受拉力影响,增加 SiO_2 含量可提高 CaF_2 - Al_2O_3 - CaO 渣系渣壳高温塑性^[5],因此试验用渣以 60% CaF_2 , 20% Al_2O_3 , 20% CaO 渣系为基础,适当增加 SiO_2 含量,组成见表 2。

表 2 试验 ESR 渣系的组成/%

Table 2 Ingredient of test ESR slag /%

CaF_2	Al_2O_3	CaO	SiO_2	MgO
55	19	19	5	2

1.4 试验工艺参数

快速抽锭电渣重熔炉设定熔速、电阻值后重熔过程自动匹配电压、电流。以 350、400、450、500 kg/h 不同熔速试验重熔电渣坯。其中熔速 400 kg/h 的试验重熔工艺参数见表 3。常规工艺生产 $\Phi 220$ mm 电渣锭熔速为 160 kg/h,工艺参数见表 3。

2 试验结果

2.1 电渣坯表面质量及探伤情况

M2 钢 160 mm \times 160 mm 电渣坯表面平整光滑,可直接锻制;熔速高时表面更为光滑。160 mm 电渣

表 3 快速重熔抽锭试验与常规电渣工艺生产电渣锭坯工艺参数

Table 3 Process parameters of electroslag ingot produced by rapid remelting withdrawing billet test and conventional electroslag process

重熔工艺	电极直径/mm	钢锭断面尺寸/mm	熔速/ $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	电压/V	电流/kA	电耗/ $(\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1})$
快速抽锭	310	160 \times 160	400	65	10.1	1 390
常规电渣	150	220	160	53	5.5	1 450

表 4 电渣坯不同位置化学成分/%

Table 4 Chemical composition of electroslag billets at different positions /%

试样	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
电极	0.87	0.37	0.33	0.025	0.008	4.10	4.87	1.92	6.10
电渣坯头	0.87	0.30	0.31	0.026	0.005	4.08	4.88	1.90	6.12
电渣坯中	0.87	0.33	0.32	0.025	0.006	4.09	4.89	1.91	6.08
电渣坯尾	0.87	0.34	0.33	0.025	0.006	4.12	4.93	1.95	6.15

坯扒皮后采用 CTS-26 超声波探伤仪参照 GB/T4162-2008 进行了探伤检验,探伤结果良好。

2.2 成分

电极及电渣坯成分采用 M10 直读光谱仪检验,在电渣坯头中尾不同位置取样。抽锭电渣坯成分见表 4,硅在重熔起始头部有一定烧损,中部、尾部仅略有烧损;其余成分正常。

2.3 电渣坯低倍

在 160 mm \times 160 mm 电渣坯上取横向试样,按照 GB/T226-2015 检验法热酸腐蚀试样,按照 GB/T1979-2001 评级。不同熔速低倍见图 2,熔速为 350、400 kg/h 电渣坯心部质量良好,无一般疏松、中心疏松、点状偏析;熔速为 450、500 kg/h 电渣坯无一般疏松、点状偏析,中心疏松为 0.5 级。所有电渣坯均无气泡、白点、夹渣等缺陷。

2.4 电渣坯铸态组织

按照 GB/T13298-91 标准要求,在电渣坯横截面中心线上的 1/2、1/4 边长处取样制样,采用日立 S3400N 电镜检验电渣坯的铸态组织。熔速 400、450、500 kg/h 电渣坯铸态组织见图 3,碳化物形貌见图 4。由图 3 可见,熔速高时晶粒细小,但心部 1/2D 处碳化物堆积趋于严重,熔速为 500 kg/h 时心部 1/2D 处碳化物堆积已较严重。由图 4 可见,熔速高时心部 1/2D 处板条状碳化物趋于粗大。因此,从铸态碳化物组织及形貌分析,熔速为 400、450 kg/h 的电渣坯较好,熔速为 500 kg/h 电渣坯较差。

2.5 电渣坯轧材质量

电渣坯与常规 $\Phi 220$ mm 电渣锭一样采用 20MN 快锻开坯、 $\Phi 600$ mm 连轧机组轧制的锻轧工

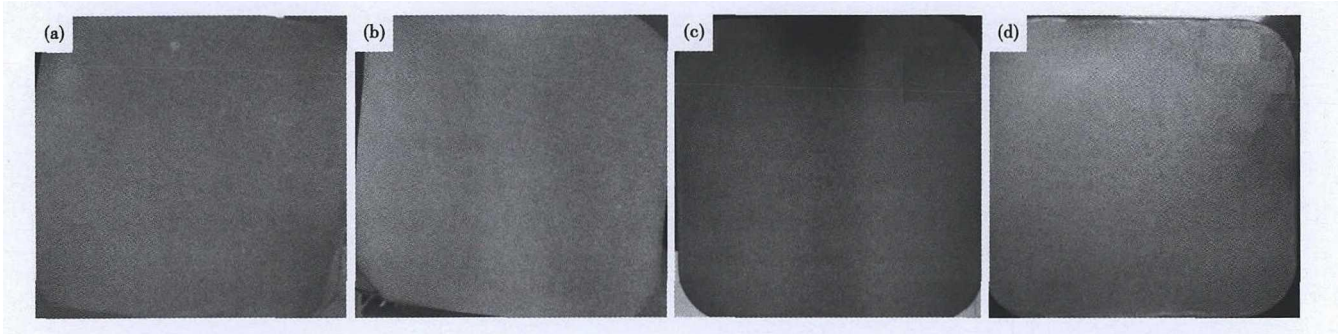


图 2 熔速/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$):350(a),400(b),450(c)和 500(d)M2 钢 160 mm × 160 mm 电渣坯低倍组织

Fig.2 Macrostructure of 160 mm × 160 mm M2 steel electroslag billets with melting speed ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$):350(a),400(b),450(c) and 500(d)

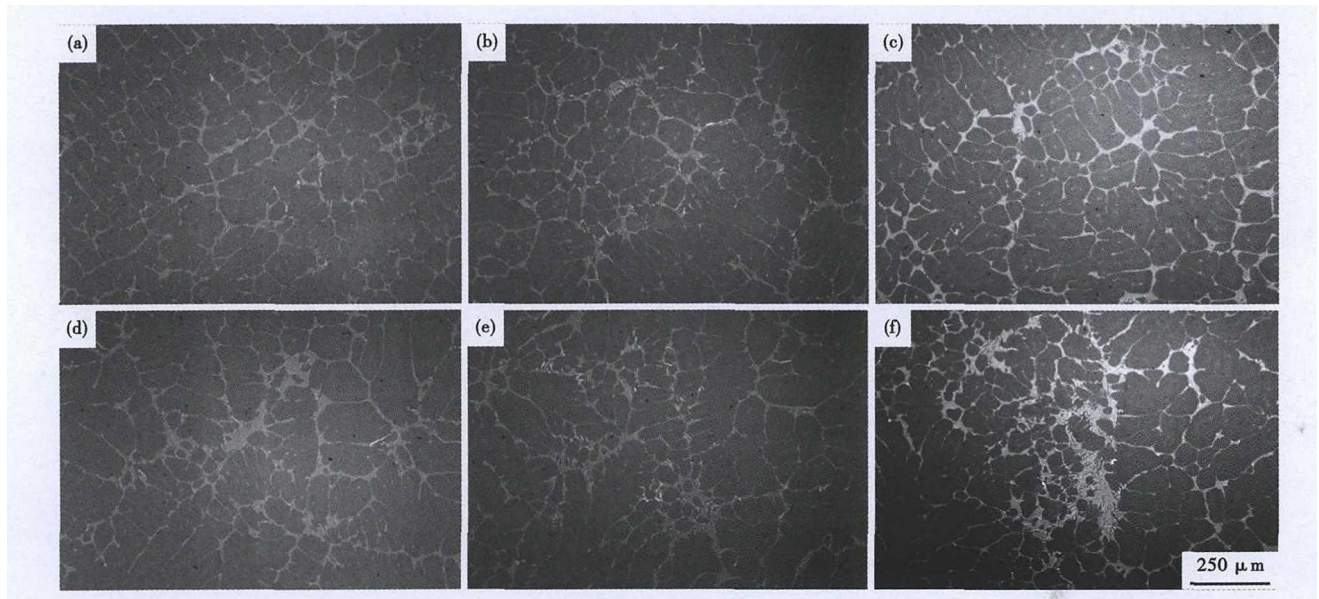


图 3 熔速/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$):400(a)(d),450(b)(e)和 500(c)(f)M2 钢 160 mm × 160 mm 电渣坯铸态组织,(a)(b)(c)1/4D,(d)(e)(f)1/2D

Fig.3 As-cast structure of 160 mm × 160 mm M2 steel electroslag billets with melting speed /($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$):400(a)(d),450(b)(e) and 500(c)(f) (a,b c- 1/4 D,d,e,f- 1/2D)

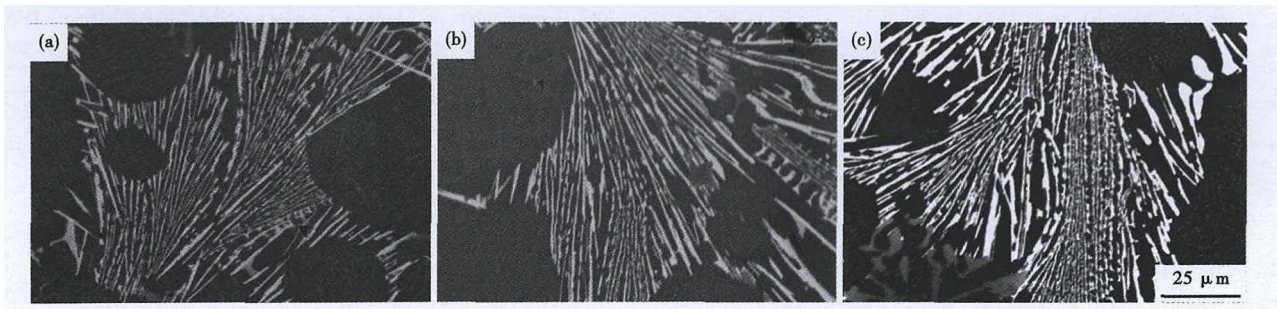


图 4 熔速/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$):400(a),450(b)和 500(c)M2 钢 160 mm × 160 mm 电渣坯 1/2D 处铸态碳化物形貌

Fig.4 As-cast carbide morphology in 160 mm × 160 mm M2 steel electroslag billets with melting speed /($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$):400(a),450(b) and 500(c) at 1/2D

艺生产成 $\Phi 41$ mm 轧材和 $\Phi 5.5$ mm 盘条。使用奥林巴斯 GX-51 金相显微镜按照 GB/T14979-1994 要求取样制样检测碳化物不均度、大颗粒碳化物尺寸,非金属夹杂物按 GB/T 10561-2005 A 法检验。

不同熔速电渣坯 $\Phi 41$ mm 轧材低倍组织见图 5, $\Phi 41$ mm 轧材低倍组织均无一般疏松、中心疏松和点状偏析,但熔速低的低倍质量更好。

不同熔速电渣坯及常规 $\Phi 220$ mm 电渣锭 $\Phi 41$ mm

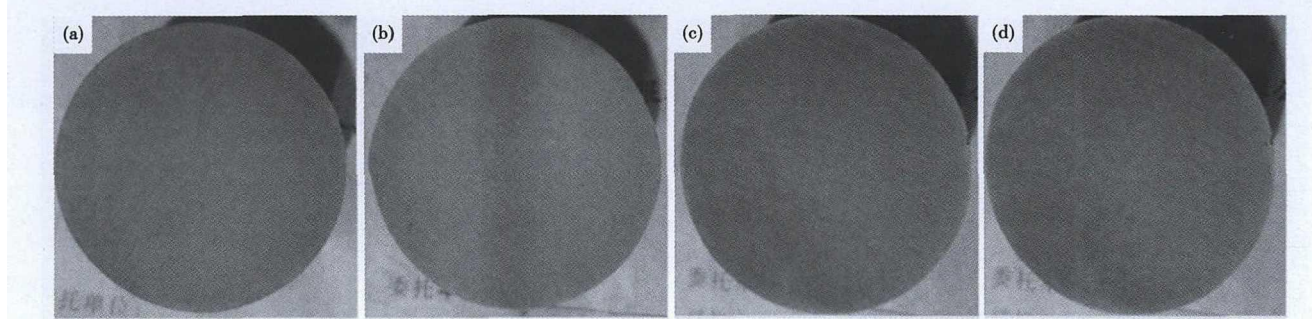


图 5 熔速/(kg·h⁻¹):350(a),400(b),450(c)和500(d)M2 钢 160 mm×160 mm 电渣坯锻轧成 Φ41 mm 轧材低倍组织
Fig. 6 Macrostructure of M2 steel Φ41 mm bar forged and rolled by 160 mm×160 mm electroslag billet with melting speed/(kg·h⁻¹):350(a),400(b),450(c) and 500(d)

轧材碳化物及非金属夹杂物检验数据见表 5。由表 5 可见,熔速 350 kg/h 的电渣坯碳化物不均度尚可,大颗粒碳化物尺寸偏大;熔速 500 kg/h 的电渣坯碳化物不均度、大颗粒碳化物尺寸都较差。熔速 400 kg/h 的电渣坯碳化物不均度、大颗粒碳化物尺寸都

较好。M2 高速钢碳化物类型以 M2C、M6C、MC 为主,不同熔速形成的 M2C、M6C 数量不同,经锻轧后残余的大颗粒碳化物不同,熔速适宜时碳化物不均度、颗粒较好。试验表明,熔速 400 kg/h 较为适宜。

由表 5 可知,电渣坯非金属夹杂物符合产品技

表 5 熔速 350 ~ 500 kg/h M2 钢电渣坯及 160 kg/h 常规电渣锭 Φ41 mm 轧材碳化物不均度、大颗粒碳化物尺寸及非金属夹杂物

Table 5 Carbide unhomogeneity, dimensions of large carbide and nonmetallic inclusion in M2 steel Φ41 mm bar rolled by electroslag billets with melting speeds 350 ~ 500 kg/h and conventional electroslag ingots with 160 kg/h

电渣工艺	锭坯规格/ (mm×mm)	熔速/ (kg·h ⁻¹)	碳化物不均度/级		最大碳化物颗粒尺寸/μm		非金属夹杂物/级
			1/2D	1/4D	1/2D	1/4D	1/4D
抽锭	160×160	350	4.0	4.0	16	15	B 1.0,D 0.5,DS 0.5
		400	4.0	3.5	14	13	D 0.5,DS 1.5
		450	4.5	4.0	15	12	B 0.5,D 0.5,DS 0.5
		500	5.0	4.0	17	14	B 1.0,D 0.5,DS 1.5
常规	220	160	4.0	4.0	16	15	B 0.5,D 0.5,DS 1.0

术要求(细系 A、B、C、D 类 ≤ 1.5 级, Ds 类 ≤ 2.0 级)。

Φ5.5 mm 盘条大颗粒碳化物尺寸(1/2D 处)见表 6,拉伸性能数据见表 7。熔速 400、450 kg/h 电渣坯 Φ5.5 mm 盘条大颗粒碳化物尺寸较好,与常规 Φ220 mm 电渣锭 Φ5.5 mm 盘条相当;熔速 350、500 kg/h 电渣坯大颗粒碳化物尺寸较差。

由表 7 可见,熔速 400 kg/h 电渣坯 Φ5.5 mm 盘条拉伸试验断面收缩率较常规 Φ220 mm 电渣锭提高 10%,有利于盘条进一步拉拔成细钢丝。

2.6 电渣坯锻轧成材率

抽锭 160 mm×160 mm 电渣坯与常规 Φ220 mm 电渣锭锻制开坯、连轧成材序及锭(坯)材成材率见表 8,由表 8 可见,抽锭电渣坯成材率较常规 Φ220 mm 电

表 6 M2 钢熔速 350 ~ 500 kg/h 电渣坯及 160 kg/h 常规电渣锭轧成的 Φ5.5 mm 盘条大颗粒碳化物尺寸

Table 6 Dimensions of large carbide particles of M2 steel Φ5.5 mm wire rod rolled by electroslag billets with melting speeds 350 ~ 500 kg/h and conventional electroslag ingots with 160 kg/h

电渣工艺	电渣锭坯规格/ (mm×mm)	熔速/ (kg·h ⁻¹)	最大碳化物颗粒 尺寸/μm
抽锭	160×160	350	12
		400	10
		450	10
		500	14
常规	220	160	10

表 7 160 mm×160 mm 抽锭电渣坯与常规 Φ220 mm 电渣锭 Φ5.5 mm M2 钢盘条拉伸性能对比

Table 7 Comparison of tensile properties of M2 steel Φ5.5 mm wire rod produced by 160 mm×160 mm electroslag withdrawing billet and conventional Φ220 mm electroslag ingot

电渣工艺	锭坯规格/ (mm×mm)	熔速/ (kg·h ⁻¹)	退火 HBW 硬度值		抗拉强度/MPa		断面收缩率/%	
			均值	范围	均值	范围	均值	范围
抽锭	160×160	400	228	221~234	794	791~796	44.3	43.3~45.4
		450	226	220~232	792	789~794	42.7	41.8~44.6
常规	220	160	229	220~235	793	789~797	39.2	37.3~40.8

表8 抽锭 160 mm × 160 mm 电渣坯与常规 Φ220 mm 电渣锭至锻坯及锭(坯)至轧材的成材率/%

Table 8 Yield of ESR billet (ingot)- forged billet, and ESR billet-rolled product by 160 mm × 160 mm electroslag ingot withdrawing process and conventional Φ220 mm electroslag ingot process / %

钢材规格/ mm	电渣工艺	电渣坯 (锭)-锻坯	锻坯- 轧材	坯(锭)- 材
Φ41	抽锭电渣坯	91.9	93.8	86.2
	常规电渣锭	89.5	93.9	84.0
Φ5.5	抽锭电渣坯	91.9	93.2	85.6
	常规电渣锭	89.5	93.4	83.6

渣锭锻制开坯序提高 2.4%, 轧制成材序略低 0.1% ~ 0.2%, 锭(坯)到成品材成材率提高 2.0% ~ 2.2%。

3 分析

M2 高速钢使用 Φ310 mm 电极采用快速抽锭电渣重熔 160 mm × 160 mm 电渣坯, 熔速为 350 ~ 450 kg/h 时, 160 mm × 160 mm 电渣坯生产的 Φ41 mm 轧材 1/4D 处碳化物不均度为 3.5 ~ 4.0 级、大颗粒碳化物尺寸为 12 ~ 15 μm, 与常规 Φ220 mm 锭略好或相当; 生产的 Φ5.5 mm 盘条拉伸断面收缩率达 42.7% ~ 44.3%, 较常规 Φ220 mm 锭生产的盘条提高 9% ~ 13%; 其中熔速为 400 kg/h 的 160 mm × 160 mm 坯轧材、盘条指标更佳。熔速达到 500 kg/h 时, 碳化物指标趋差。

综合低倍、铸态组织及轧材碳化物不均度、大颗粒碳化物尺寸、拉伸性能等检验数据, M2 高速钢快速抽锭电渣重熔 160 mm × 160 mm 电渣坯熔速为 400 kg/h 较为适宜。

M2 高速钢采用快速抽锭电渣重熔 160 mm × 160 mm 电渣坯熔速达 400 kg/h, 较常规 Φ220 mm 电渣锭熔速 160 kg/h 提高 150%, 熔速 (kg/h) 与钢锭直径 (mm) 比达 2.21, 生产效率显著提高; 电耗由 1450 kWh · t⁻¹ 降至 1390 kWh · t⁻¹。电渣坯长度达 7.1 m, 减少了钢锭开坯时的头尾开裂切头量, 较常规 Φ220 mm 电渣锭成材率提高 2.7%, 锭(坯)材成材率提高 2.0% ~ 2.2%。生产效率和成材率的提高、电耗的降低可为企业带来较好的经济效益。

试验所用快速抽锭电渣炉具有恒熔速控制、气氛保护、电极更换等先进功能, 设备投资较大。如采用 T 型结晶器、双极串联、抽锭电渣技术组合而成的电渣炉^[6], 同样可实现快速抽锭电渣重熔长电渣坯的目的, 而设备投资较为经济。

4 结论

(1) 使用 Φ310 mm 电极采用快速抽锭电渣重熔 M2 高速钢 160 mm × 160 mm 电渣坯, 电渣坯成分稳定, 表面、低倍质量良好。

(2) 快速抽锭电渣重熔 M2 高速钢熔速为 400 kg/h 时, 160 mm × 160 mm 电渣坯生产的 Φ41 mm 轧材 1/4D 处碳化物不均度为 3.5 级、大颗粒碳化物尺寸为 13 μm, 较常规 Φ220 mm 锭 4.0 级、15 μm 略好; 生产的 Φ5.5 mm 盘条拉伸断面收缩率达 44.3%, 较常规 Φ220 mm 锭盘条提高 13%。

(3) 采用快速抽锭电渣重熔 M2 高速钢 160 mm × 160 mm 电渣坯熔速达 400 kg/h, 较常规 Φ220 mm 电渣锭熔速 160 kg/h 提高 150%, 生产效率显著提高, 电耗也有所降低。同时电渣坯较长, 锻制开坯成坯率提高 2.7%, 锭(坯)材成材率提高 2.0% ~ 2.2%。

参考文献

- [1] 邓玉昆, 陈景榕, 王世章. 高速工具钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 5, 66, 365.
- [2] 戴喜民. 抽锭电渣重熔技术的进展[C]//姜周华, 邓鑫, 邱天禹, 等. 2014 年钢锭制造技术与管理研讨会论文集. 洛阳: 2014: 64.
- [3] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 436.
- [4] 姜周华, 董艳伍, 耿鑫, 等. 电渣冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 268.
- [5] 于仁波, 张祖贤, 毛裕文. CaF₂-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 五元电渣重熔渣系高温力学性能研究[J]. 钢铁研究学报, 1991, 3(1): 17-23.
- [6] 戴喜民, 邓鑫, 姜周华, 等. T 型结晶器抽锭电渣重熔高速钢 90 mm 方锭新工艺[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 39-45.

作者简介见第 30 页

收稿日期: 2018-08-12

表 6 酸性渣重熔含硫 M35 高速钢轧材非金属夹杂物评级
 Table 6 Non-metallic inclusion rating of acid slag remelted sulfur-bearing M35 high speed steel rolled bar

规格/ mm	A		B		C		D	
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
Φ61 ~ 72	1.5	0	1.0	0	0	0	0.5	0
Φ40 ~ 56	1.0	0	1.0	0	0	0	0.5	0

表 7 酸性渣重熔含硫 M35 高速钢轧材碳化物不均匀度、大颗粒碳化物尺寸
 Table 7 Carbide Nonuniformity and large particle carbide size of acid slag remelted sulfur-bearing M35 high speed steel rolled bar

规格 /mm	碳化物不均匀度/级			大颗粒碳化物尺寸/ μm		
	均值	最大	最小	均值	最大	最小
Φ61 ~ 72	4.52	5.0	4.0	16.2	20	14
Φ40 ~ 56	3.92	4.5	3.5	14.8	18	12

化学成分、碳化物、非金属夹杂物等质量指标经检验都达到了用户合同要求,用户制作刀具使用良好。

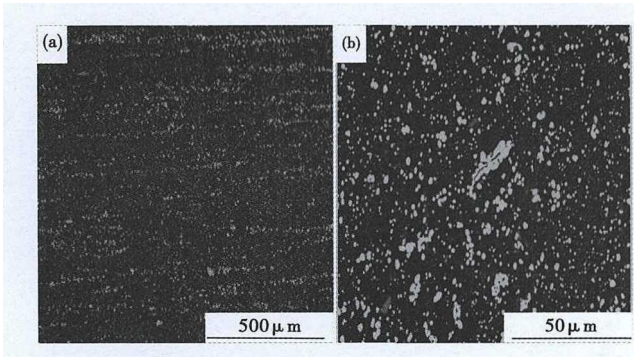


图 5 酸性渣系重熔 M35 高速钢 Φ72 mm 轧材碳化物不均匀度(a)及碳化物形貌(b)

Fig.5 Nonuniformity (a) and morphology (b) of carbide in acid slag remelted M35 high speed steel Φ72 mm rolled bar

5 结论

(1) 大气环境下酸性渣重熔含硫 M35 高速钢, 钢锭大头硫、锰、铬等易氧化元素有一定的损失, 渣系碱度越低, 硫烧损减小, 而锰、铬含量损失加大; 随重熔进行, 硫、锰、铬含量趋于稳定。钢锭大头硅含量有一定的增加, 随重熔进行, 变为烧损并趋于稳定。硅、锰、硫、铬含量钢锭大小头均有较大的差值。

(2) 为使钢锭成分合格, 炉外化渣时添加硫化钙、倒渣时添加锰铁粉, 可使钢锭大头硫、锰含量提高, 可减小钢锭两头差值。

(3) 酸性渣重熔含硫 M35 高速钢钢锭生产的轧材碳化物质量与常规碱性渣系重熔的非含硫 M35 相当, B 类、C 类、D 类非金属夹杂物也相当, A 类夹杂物为 1.5 级, 满足了用户含硫 M35 高速钢要求, 制作刀具使用良好。

参考文献

- [1] 曹红福、高德漫. 易切削高硫钢的冶炼工艺探讨[J]. 江苏冶金, 2002, 30(5): 1-5.
- [2] 邓玉昆, 陈景榕, 王世章. 高速工具钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 365.
- [3] 姜周华, 董艳伍, 耿鑫, 等. 电渣冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 227.
- [4] 马群, 孙常亮, 冯桂萍, 等. 改善 34CrNiMo6 含硫电渣钢 B 类夹杂物的工艺实践[J]. 特殊钢, 2017, 38(1): 39-41.
- [5] 赵鸿燕. 酸性渣 SiO₂ 对电渣重熔 S-Pb-Te 易切削不锈钢冶金质量的影响[J]. 特殊钢, 2016, 37(2): 23-25.
- [6] 冶金工人技术理论培训教材. 电渣重熔炉冶炼(中级本)[M]. 北京: 冶金工业部, 1988: 104.
- [7] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M](第 2 版). 北京: 冶金工业出版社, 2010: 664, 690.
- [8] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 124.

谢志彬(1964-): 男, 高级工程师, 1984 年河北矿冶学院(本科)毕业, 工模具钢冶炼工艺研究。
 E-mail: xiezhibinhg@163.com

收稿日期: 2018-07-02

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
 行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
 和技术、产品研发宣传广告**