

轻压下和拉速对42CrMo钢410 mm×530 mm铸坯轧成Φ195 mm材的低倍和中心C偏析的影响

张越^{1,2} 吕泽安³ 马建祎^{1,2} 钟骞⁴ 王占忠^{1,2} 彭峰^{1,2}

(1 大冶特殊钢有限公司棒材研究所,黄石 435001; 2 大冶特殊钢有限公司高品质特殊钢湖北省重点实验室,黄石 435001;
3 黄冈师范学院机电与汽车工程学院,黄冈 438001; 4 大冶特殊钢有限公司转炉厂,黄石 435001)

摘要 对比试验了铸坯的轻压下量(0~8 mm)及拉速(0.42~0.49 m/min)对42CrMo钢Φ195 mm轧材低倍组织和偏析的影响。结果表明,在现有工艺条件下,42CrMo钢过热度控制在20~30℃,二冷比水量0.30 L/kg,结晶器电搅100 A/1.5 Hz,末端电搅400 A/8 Hz,连铸拉速控制在0.49 m/min,总压下量6~8 mm,能有效改善42CrMo钢轧材的内部质量。

关键字 42CrMo钢 中心疏松 中心偏析 轻压下 拉速

Effect of Soft Reduction and Cast Speed on Macrostructure and Centre C Segregation of 42CrMo Steel Φ195 mm Bar Rolled from 410 mm×530 mm Cast Bloom

Zhang Yue^{1,2}, Lü Zean³, Ma Jianyi^{1,2}, Zhong Qian⁴, Wang Zhanzhong^{1,2} and Peng Feng^{1,2}

(1 Steel Research Institute, Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001;

2 High Quality Special Steel Key Laboratory of Hubei, Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001;

3 Huanggang Normal University, School of Electromechanical and Automobile Engineering, Huanggang 438001;

4 Converter Plant, Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract The effects of soft reduction (0~8 mm) and casting speed (0.42~0.49 m/min) of cast bloom on macrostructure and segregation of 42CrMo steel Φ195 mm rolled product are tested. The results show at present process condition that when the superheat degree of 42CrMo steel is controlled at 20~30℃ with secondary cooling specific water content 0.3 L/kg, mold and end electromagnetic stirring 100 A/1.5 Hz and 400 A/8 Hz, the casting speed 0.49 m/min and the total soft reduction 6~8 mm, the internal quality of 42CrMo steel rolled product can be effectively improved.

Material Index 42CrMo Steel, Center Porosity, Centerline Segregation, Dynamic Soft Reduction, Casting Speed

42CrMo钢为常用的高强度中碳钢,经热处理后会得到较好的硬度和强度。目前市场上普遍采用42CrMo钢制作破碎锤钎杆,其轧材一般在调质后使用,可以获得较高的强度、耐磨性、弹性等。中心偏析是42CrMo钢连铸生产中经常出现的内部缺陷。中心偏析降低了钢的中心致密度,成为疲劳断裂的根源。中心偏析一般与中心疏松的加剧和非金属夹杂物不均匀分布同时存在,这将大幅降低钢材的疲劳性能^[1]。

轻压下技术目前已成为国内外特钢厂解决铸坯内部质量的主要措施之一^[2]。轻压下工艺不仅可以消除或减轻凝固收缩形成的中心孔隙,而且可以使凝固末端与液相穴上部保持联通,从而有效改善钢坯内部质量^[3-5]。轻压下的关键工艺控制参数有压下量、压下区间。其中压下量在补偿钢水凝固时体积收缩、抑制钢水流动上发挥了至关重要的作用,压下量过大会使铸坯内部产生裂纹,压下量过小铸

坯中心疏松、中心缩孔及中心碳偏析等改善不明显。合适的压下量可以补偿压下区间内钢液在凝固过程中的体积收缩量,避免铸坯产生内裂,产生的反作用力要在连铸机拉矫辊许可载荷范围内^[6-7]。压下区间指轻压下的作用区域,实际生产条件下,拉坯速度的改变会影响轻压下作用在凝固末端的固相率^[8-9]。

为改善破碎锤钎杆用42CrMo钢的中心偏析,提升内部质量,本文通过试验不同拉速以及轻压下量等工艺参数,研究不同工艺参数对42CrMo钢内部质量的影响,并总结出合适的连铸工艺参数,对实际生产过程有一定的指导作用。

1 试验过程

对大冶特钢生产的42CrMo钎杆钢进行试验跟踪。具体的工艺流程为:120 t转炉→120 t LF→120 t RH→410 mm×530 mm方坯连铸机→红送→步进式加热炉加热→6架平立连续轧机,最终轧制成直径为Φ195 mm的42CrMo圆钢。试验的42CrMo钢

化学成分范围见如表 1 所示。

连铸生产时过热度控制在 20 ~ 30 °C, 结晶器 M-EMS 频率 1.5 Hz、搅拌电流 100 A, 末端 F-EMS 频率 8 Hz、搅拌电流 400 A; 二次冷却采用弱冷; 在连铸同一炉四个流进行试验, 生产过程中分别采用不同的连铸轻压下、拉速工艺, 具体参数如表 2 所示。

连铸坯红送轧钢加热炉, 加热保温温度在 1 220 °C 以上, 轧后不进行控冷。

2 轧材低倍检验及结果分析

按照《GB/T 226-2015 钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》, 对 4 个流不同工艺生产的轧材, 横向截取 25 mm 厚试料。将试料横截面进行车光。将加工后的试样浸入容积比为 1 : 1 的工业盐酸水溶液, 酸蚀时间 15 ~ 20 min, 温度 70 ~ 80 °C。酸蚀结束后立即用水冲洗吹干。图 1 为酸蚀后的轧材低倍。

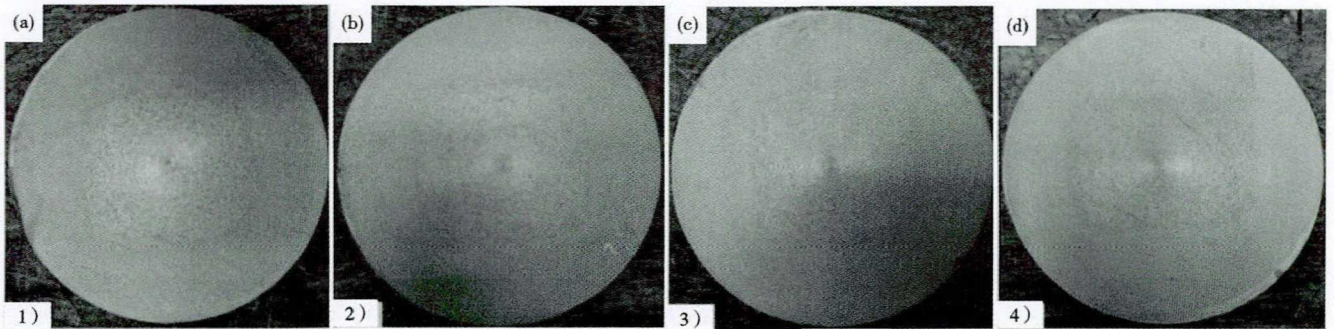


图 1 拉速, 轻压下: (a) 0.42 m/min, 0 mm; (b) 0.49 m/min, 0 mm; (c) 0.49 m/min, 6 mm; (d) 0.49 m/min, 8 mm 时 Φ195 mm 轧材的低倍组织

Fig. 1 Macrostructure of Φ195 mm rolled products with cast speed, soft reduction: (a) 0.42 m/min, 0 mm; (b) 0.49 m/min, 0 mm; (c) 0.49 m/min, 6 mm; (d) 0.49 m/min, 8 mm

表 3 轧材的低倍分析结果

Table 3 Macrostructure analysis results of rolled products

试验编号	拉速/ (m · min ⁻¹)	轻压下/ mm	一般疏松/ 级	中心疏松/ 级	锭型偏析/ 级
1	0.42	0	1.5	1.5	1.0
2	0.49	0	1.0	1.5	1.0
3	0.49	6	1.0	1.0	0.5
4	0.49	8	1.0	0.5	0.5

厚度与压下效率的关系, 此时压下效率(η)与液芯厚度(h)的关系为: $\eta = -0.00902 + 0.01155 h$, 式中 h 为铸坯液芯厚度^[10]。对比图 1 中 1、2 号和 3、4 号轧材低倍可知, 使用轻压下工艺后中心疏松、一般疏松均有所改善。

由表 3 可见, 将总压下量由 6 mm (3 号) 提高到 8 mm (4 号), 随着压下量的增大, 方框偏析有所改善。理论分析表明, 连铸坯的液芯末端所施加的轻

表 1 试验的 42CrMo 钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of 42CrMo steel tested / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	H	O
0.38 ~ 0.45	0.20 ~ 0.20	0.65 ~ 0.80	≤ 0.025	≤ 0.010	1.00 ~ 1.20	0.20 ~ 0.25	≤ 0.010	≤ 0.0002	≤ 0.0015

表 2 试验的 42CrMo 钢连铸工艺参数

Table 2 Test parameters of 42CrMo steel continuous casting process

试验方案	工艺	二冷比水量/ (L · kg ⁻¹)	拉速/ (m · min ⁻¹)	轻压下量/ mm
1	(a) 1 流	0.30	0.42	0
2	(b) 2 流	0.30	0.49	0
3	(c) 3 流	0.30	0.49	6
4	(d) 4 流	0.30	0.49	8

2.1 轻压下工艺对铸坯组织的影响

相同的压下量下, 压下效率与液芯厚度呈线性正比; 压下量越大, 压下效率随液芯厚度增加越快, 当压下量 > 2.3 mm 时, 压下量的增加不再影响液芯

压下, 对连铸坯后期凝固收缩具有较好的补偿作用, 具有消除或减轻连铸铸坯中心疏松和缩孔、提升致密度的效果, 而轧材偏析基本遗传自连铸坯。

2.2 拉速对铸坯组织的影响

对比 1 号和 2 号试验铸坯以及 3 号和 4 号试料可见, 适当提高拉速时, 中心疏松有一定改善。文献 [11] 指出最佳压下位置为中心固相率在 0.3 ~ 0.7 的区域, 由专家系统计算出不同固相率 ($f_s = 0.3 \sim 0.7$) 由于压下位置不变, 固相率低, 压下时坯壳厚度较薄; 拉速和压下量的增加使得压下时铸坯凝固前沿的形变速率提高, 因此, 在高拉速条件下应尽量避免采用过大的压下量。

3 中心偏析检测及结果分析

采用化学分析法分别检测 C 元素在轧材中心

和凝固中心的偏析状态。采用Φ4 mm全合金钻头对上述浸蚀后的坯样横断面进行钻孔取屑。每次取约1 g的样品,进行C含量分析;取样位置如图2所示,分为4个象限,从外表面到心部等距离6个点,D为中心点。碳偏析常用碳偏析指数来定量描述^[12],见式(1)、式(2)。

$$K_{Ci} = C_i / C_0 \quad (1)$$

$$\bar{K}_C = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Ci}}{n} \quad (2)$$

式中: K_{Ci} -碳偏析指数; C_i -截面各点碳质量分数/%; C_0 -各点的平均碳质量分数/%; K_{Ci} 到 K_{Cn} -

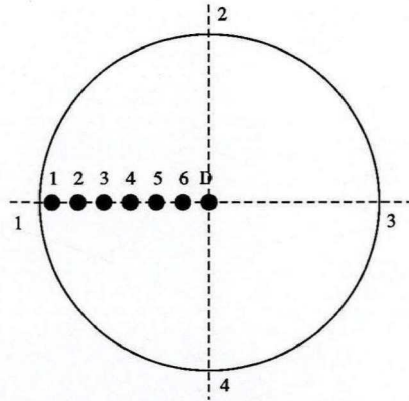


图2 轧材钻样位置示意图
Fig.2 Schematic diagram of sampling position of rolled product

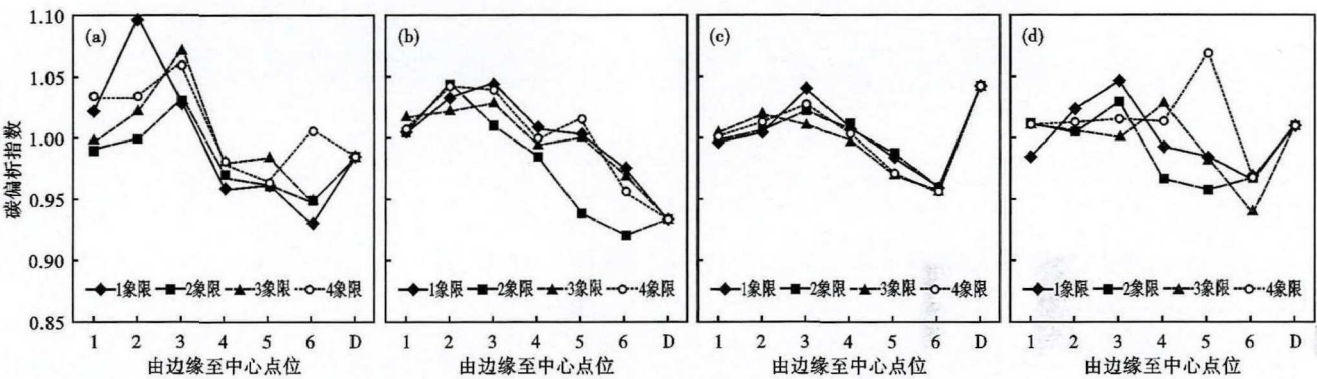


图3 方案1(a),2(b),3(c)和4(d)轧材碳偏析分布
Fig.3 Carbon segregation distribution of rolled product with scheme 1 (a), 2 (b), 3 (c) and 4 (d)

各点的碳偏析指数; n -碳偏析指数个数。

各工艺参数对轧材C元素偏析影响如图3所示。使用轻压下,钢材心部为正偏析,未使用芯部为负偏析。使用轻压下整体碳偏析指数更平稳。

一般认为,轻压下工艺主要通过压下变形将液芯中心富集溶质元素的钢液挤出,并促使其与周围母液混合,溶质元素重新分配从而减轻铸坯的中心偏析。

拉速对轻压下效果有重要影响。拉速快,液相穴末端超过轻压下区,收缩不能用轻压下来补偿,会形成中心疏松和偏析;拉速慢,液相穴位于轻压下区之前,轻压下使中心区枝晶压碎,减轻了疏松但不会改变已形成的宏观偏析。可见,只有在合适拉速下实施轻压下时,才有可能通过挤压中心富集溶质母液和枝晶、通过成分再分配而减轻中心偏析。此外,由于拉速0.49 m/min下铸坯已有出现内部裂纹的倾向,尽管在后续生产中可以焊合,现有工艺条件下的拉速也不宜超过0.49 m/min。

4 中心致密度分析

截取低倍试料中心锭型偏析区域,采用OPA-100

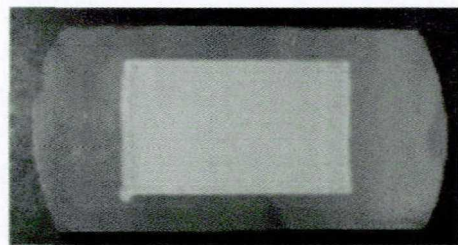


图4 取样示意图
Fig.4 Sampling diagram

原位分析仪((钢研纳克分析仪器)进行扫描,扫描面积约60 mm×100 mm,测量区域如图4所示。

在原位统计分布分析技术中,通过测定连续扫描过程中基体谱线强度的异常变化,不仅可以得到样品剖面不同部位疏松的变化和部分缺陷的情况,得到剖面上任意指定位置的致密度数值,还可以定量地计算出样品的致密度和统计疏松度。

图5是不同试料钢材心部横剖面的致密度二维分布图,对比图中1#、2#和3#、4#可知,不采用轻压下技术,铸坯中心固化时都将产生不同程度的收缩而在中心部位形成缩孔,使得1#、2#试样铸坯中心部位

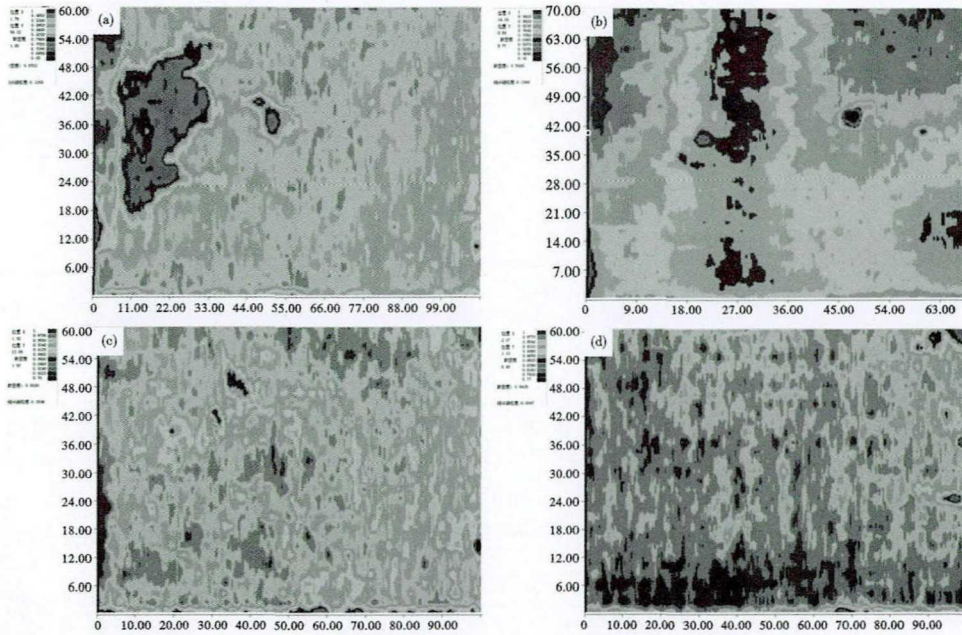


图 5 方案 1(a)、2(b)、3(c)和 4(d)轧钢材心部原位分析图
Fig. 5 In situ analysis diagram of rolled product center: scheme 1 (a), 2 (b), 3 (c) and 4 (d)

表 4 试验钢轧材的致密度
Table 4 Density of test steel rolled product

项目	1# 工艺(a)1流	2# 工艺(b)2流	3# 工艺(c)3流	4# 工艺(d)4流
致密度	0.872 2	0.782 0	0.920 0	0.943 5
统计疏松度	0.128 4	0.194 9	0.054 6	0.054 7

的致密度较差。3#、4#试样心部无明显缩孔和疏松区,铸坯各部位的致密度在 0.92 以上,即致密度较高(表 4),其中,4#试样中心部位的致密性要略好于 3#试样。试验结果表明,在 42CrMo 钢连铸拉速 0.49 m/min,总压下量 6~8 mm 的工艺条件下,在控制铸坯产生裂纹倾向的同时,能保证较大的致

参考文献

[1] 王怡青. 连铸坯中心偏析质量分析及预报研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.
 [2] 赵军普,刘 浏,范建文,等. 轻压下技术及其在连铸中的应用[J]. 材料导报,2016,30(15):57-61.
 [3] 周伟基,沙玉峰,路 辉,等. GCr15 连铸大方坯凝固终点及末端的大压下区间[J]. 钢铁,2018,53(1):41-45+71.
 [4] 李 荣,晁 霞,郭 江. 轻压下对 20CrMnTiH 钢 240 mm×240 mm 铸坯中心碳偏析和低倍组织的影响[J]. 特殊钢,2020,41(5):64-67.
 [5] 李朋欢,包燕平,安航航,等. 改善 55SiCrA 弹簧钢小方坯内部质量的试验研究[J]. 炼钢,2016,32(3):41-45.
 [6] 李德军,李泽林,赵志刚,等. 单辊轻压下对高碳钢 SWRH72B 180 mm×180 mm 铸坯内部质量的影响[J]. 特殊钢,2017,38(6):33-36.
 [7] 林大帅,李晓斐,张文涛,等. 轻压下对 C610L 连铸板坯内部质量的改善[J]. 炼钢,2019,35(5):50-53.
 [8] 景财良,罗伯钢,田志红. 首钢京唐 3 号铸机高拉速工艺研究与实践[J]. 钢铁,2014,49(3):46-50.

密度。

5 结论

- (1)轻压下工艺可有效改善 42CrMo 钢轧材中心疏松、缩孔和中心偏析,明显提高了内部质量级别。
- (2)拉速变化改变液芯长度以及压下时凝固前沿形变速率,从而直接影响轻压下工艺的效果。设计与实施轻压下工艺时必须综合考虑拉速的影响。
- (3)在当前设备与工艺条件下,42CrMo 钢连铸拉速控制在 0.49 m/min、总压下量 6~8 mm 时,材料低倍、偏析级别与致密度有较大的改善。

[9] Lin C M, Lai H H and Kuo J C, et al. Effect of Carbon Content on Solidification Behaviors and Morphological Characteristics of the Constituent Phases in Cr-Fe-C Alloys[J]. Materials Characterization,2011,62(12):1124-1133.
 [10] 叶德新,曾令宇,丘文生,等. 大方坯连铸轻压下工艺技术开发与应用[J]. 连铸,2020(4):17-21.
 [11] 高 翔,李玉刚,谢 兵,等. 连铸方坯动态轻压下压下区域模型[J]. 过程工程学报,2009,9(S1):337-340.
 [12] 安航航,包燕平,王 敏,等. 凝固末端电磁搅拌和轻压下复合技术对大方坯高碳钢偏析和中心缩孔的影响[J]. 工程科学学报,2017,39(7):996-1007.

张 越(1987-),男,工程师,2010 年武汉科技大学(本科)毕业,新产品开发和研究。E-mail: xn224@163.com

收稿日期:2020-12-17