

GCr15 轴承钢 240 mm × 240 mm 连铸坯末端电磁搅拌工艺参数研究

秦凤婷

(济源职业技术学院冶金化工系, 济源 459000)

摘要 利用射钉法测定了 240 mm × 240 mm 断面高碳铬轴承钢 GCr15 的铸坯凝固坯壳厚度, 并根据凝固定律计算了其液相穴长度和综合凝固系数, 针对凝固率 0.65、0.75 进行计算得出 F-EMS 在不同拉速条件下的电磁搅拌位置。同时, 与该铸机二级模型计算结果进行对比, 在不改变末端电搅位置(9.4 m)的情况下, 讨论了拉速对连铸坯质量的影响。并采用特斯拉计 HT201 对末端电磁搅拌磁感应强度进行了测量, 找出凝固末端电磁搅拌最佳工艺参数。结果表明, 拉速由原来的 0.68 m/min 提高至 0.75 m/min, 效果更好; 电搅参数优化为电流 450 A, 频率 8 Hz; 工艺改进后, 中心碳偏析合格率从 75% 提高至 92%。

关键词 GCr15 大方坯连铸 末端电磁搅拌 凝固系数 磁感应强度

A Study on Parameters of F-EMS Process for Bearing Steel GCr15 240 mm × 240 mm Casting Bloom

Qin Fengting

(Jiyuan Vocational Technical College Metallurgy & Chemical Industry Department, Jiyuan 459000)

Abstract Nail-shooting technique is applied to measure shell thickness of typical high-carbon chromium bearing steel GCr15 240 mm × 240 mm casting bloom, and the electromagnetic stirring position at different casting speed is calculated by the solidification law which can determine the length of the liquid core and the solidification coefficient according to the solidification rate 0.65 and 0.75. Meanwhile, compared with the calculation results of the secondary model of the casting machine, the influence of the casting speed on the quality of the continuous casting bloom is discussed without changing the position of final electromagnetic stirring (9.4 m). And the magnetic stirring strength of the final electromagnetic stirring is measured by using the tesla meter HT201 to determine the optimal process parameters of final electromagnetic stirring. The results show that increased pulling speed from 0.68 m/min to 0.75 m/min has better effect; the optimized electric stirring parameters are current 450 A and frequency 8 Hz; after process improved, the qualified rate of central segregation is increased from original 75% to 92%.

Material Index GCr15 Continuous Casting of Bloom, F-EMS, Solidification Coefficient, Magnetic Induction Intensity

连铸工序是炼钢环节的最后一道工序, 既包含复杂的化学反应, 又包含系列物理变化, 伴随着凝固的进行会产生固有的偏析、疏松、缩孔等大量的凝固缺陷, 并且会对最终产品造成不良影响。电磁搅拌技术具有能量密度高、非接触性和易于自动控制等特点, 其实质是流动的钢液在电磁搅拌器产生的磁场中切割磁感线, 使钢液产生感应电流, 载流钢水在磁场中受到洛伦兹力的作用, 从而强化液相穴中钢水运动, 改善钢水凝固过程中的流动、传热和迁移过程, 达到提高铸坯质量的目的^[1-2]。但电磁搅拌参数与连铸机生产条件的匹配状况十分重要, 尤其是末端电磁搅拌的位置等参数更为关键, 只有选定合适的参数才会对质量的改善发挥出最大的作用。

济源钢铁公司为了提升特钢产品质量, 对 240 mm × 240 mm 大方坯连铸机进行升级改造, 连铸工艺发生了较大的变化, 振动方式由原来的四连杆振动改造为液压驱动谐振式振动, 二冷制度由原

来的强冷改为弱冷, 增加了轻压下等新技术。液相穴长度在新的工艺条件下发生了较大变化, 因此, 在新工艺条件下, 为了更好地发挥末端电磁搅拌的作用, 有必要对其工艺参数的优化进行进一步的研究。

1 主要技术参数与研究方法

本研究的铸机参数见表 1, 末端电搅参数见表 2。

表 1 铸机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of continuous caster

项目	参数
铸机类型	7 机 7 流全弧形
结晶器振动形式	谐振式振动, 液压驱动
电磁搅拌	M-EMS + F-EMS
断面尺寸/(mm × mm)	240 × 240
铸机弧半径/m	10
结晶器长度/mm	800
二冷方式	动态配水、气雾冷却
流间距/mm	1 200
拉矫系统	DMSR-WSU 动态轻压下-拉矫机 7 组机架, 上辊驱动, 1 点矫直

表2 结晶器和末端电磁搅拌结构和参数

Table 2 Structure and parameters of mold and F-EMS

项目(F-EMS)	参数
外形内径/mm	430
外形外径/mm	822
外形高度/mm	600
工作电流(最大值)/A	550
工作频率(最大值)/Hz	12
工作电压(最大值)/V	500
中心位置(中心距弯月面距离)/mm	9 400

采用射钉法测量坯壳厚度,射钉后,将射钉试样沿钉子中心线剖开,在铣床上一层层剥开得到钢钉纵剖面。用4%稀硝酸(或硫酸)侵蚀磨光面,在酸浸后的试样上划分区域、测量尺寸、记录并拍照,必要时可将试样用磨床加工后做硫印,由此判断凝固坯壳及两相区的厚度。

采用特斯拉计 HT201 对铸机末端电磁搅拌磁感应强度进行了测量。分别测量不同频率、不同电流的磁感应强度,并进行回归分析,找到铸机最佳匹配的电缆参数。

2 末端电磁搅拌位置优化

2.1 连铸机二级模型对凝固末端位置的计算

根据连铸轻压下二级模型,在正常生产拉速 0.68 m/min,过热度为 25 °C 的情况下,对 240 mm × 240 mm 断面高碳铬轴承钢 GCr15 的冶金长度及对应的固相率进行了计算(表3),不同拉速情况下固相率变化见图1,GCr15 钢化学成分见表4。

在拉速 0.68 m/min,过热度 25 °C 的情况下,模

表3 GCr15 钢二级模型计算所对应固相率

Table 3 Calculation of solid fraction by level 2 model for steel GCr15

拉矫机辊号	各拉矫辊固相率	距弯月面位置/m
F-EMS 位置	0.20	9.40
1 [#]	0.48	11.56
2 [#]	0.60	12.76
3 [#]	0.85	13.98
4 [#]	1.00	15.17
5 [#]	1.00	16.35
6 [#]	1.00	17.53
7 [#]	1.00	19.69

表5 GCr15 钢射钉板坯厚度试验工艺条件及测试结果

Table 5 Process conditions and test results of nail-shooting bloom shell thickness of steel GCr15

编号	炉号	拉速/ (m · min ⁻¹)	过热度/ °C	射钉位置/ m	二冷比水量/ (L · kg ⁻¹)	液芯厚度/ mm	K 值/ (mm · min ^{-1/2})	液相穴长度/ m
1	21505398	0.68	21	10.44	0.18	60	25.8	14.2
2	21505398	0.68	21	10.44	0.18	70	26.4	14.4
3	21505593	0.68	27	10.44	0.18	66	25.7	14.4
4	21505398	0.68	21	13.53	0.18	44	25.0	15.7
5	21505593	0.68	27	13.53	0.18	40	25.5	15.1
6	11505609	0.68	20	13.53	0.18	48	24.5	16.3

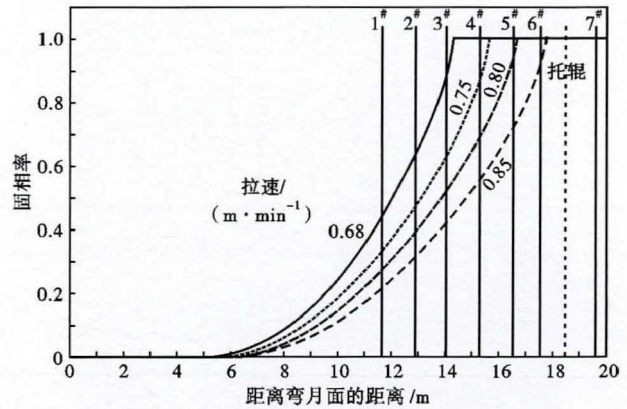


图1 拉速对 GCr15 钢固相率的影响

Fig. 1 Casting speed on solid fraction of steel GCr15

表4 试验钢 GCr15 化学成分 / %

Table 4 Chemical composition of experimental steel GCr15 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
0.98	0.23	0.30	0.012	0.003	1.46	0.021

型计算该钢液相线为 1 450 °C,固相线为 1 338 °C,综合凝固系数为 25.84 mm/min^{1/2},起始凝固位置为 5.9 m,凝固末端位置为 14.2 m,末端电磁搅拌中心位置处坯壳厚度为 92.0 mm。

2.2 射钉试验结果分析

2.2.1 射钉位置的选取及数据分析

根据理论预测和现场条件,射钉位置选择在连铸机第1流,距离结晶器弯月面 10.44 m 和 13.53 m 两个位置,各射钉3次,分别将射钉试验编号分别为 1、2、3、4、5、6,取测量的平均值作为该钢种工况下的凝固坯壳厚度。射钉工艺条件及试验结果见表5,低倍照片见图2,硫印照片见图3。

综合凝固系数平均值为 25.5 mm/min^{1/2},与模型计算值比较吻合,根据凝固平方根定律 $d = K \cdot (L/\nu)^{0.5}$ 可得,末端电搅中心位置距弯月面 9.4 m 处的凝固坯壳厚度 94.9 mm,厚度凝固率为 79.1%。

2.2.2 末端电搅位置的确定

末端电磁搅拌(F-EMS)要安置在固相率 $f_s =$

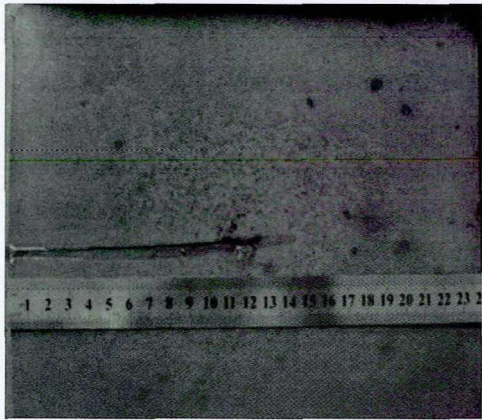


图 2 GCr15 钢钉射结果
Fig. 2 Results of nail-shooting of steel GCr15

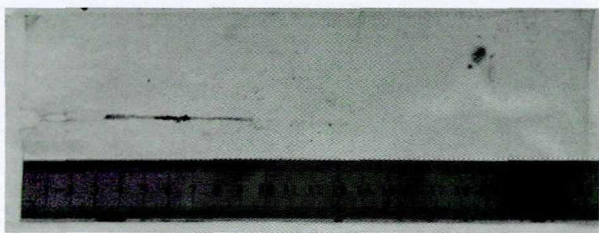


图 3 GCr15 钢射钉硫印照片
Fig. 3 Photograph of nail-shooting sulphur print of steel GCr15

0.2~0.7 之处^[3-5], 铸坯中心液相率 $f_l = 25\% \sim 35\%$ ^[6], 即坯壳厚度方向的凝固率在 65%~75%。研究铸坯中心凝固规律, 可以发现铸坯中心固相率在 0.2 之前一直是缓慢增加, 过了 0.2 铸坯快速凝固, 因此要阻止凝固末端柱状晶的“搭桥”, 必须在铸坯中心固相率为 0.2 之前进行电磁搅拌^[7]。当固相分数为 60% 时, 半固态金属的表观粘度为 60 Pa·s, 半固态金属就像水泥一样; 当固相分数为 50% 时, 半固态金属的表观粘度为 20 Pa·s, 半固态金属浆料就像稀水泥一样; 当固相分数为 40% 时, 半固态金属的表观粘度为 4 Pa·s, 半固态金属浆料就像室温的重油一样^[8]。研究发现当电磁力达到 4000 N/m³, 黏度约为 27 Pa·s, 糊状区的流速在 1.0 mm/s 以下。因此, 可将此时糊状区的流动近似为静止状态^[9]。钢液搅拌只有在高剪切速率或高强度紊流作用下, 液体的温度场和溶质场才会趋于

表 6 GCr15 钢不同凝固率和拉速对应末端电缆位置
Table 6 Position of F-EMS of steel GCr15 with different solidification rate and casting speed

坯壳凝固率/ %	坯壳厚度/ mm	不同拉速下距弯月面长度/m		
		0.68 m/min	0.75 m/min	0.80 m/min
65	78	6.36	7.02	7.49
75	90	8.43	9.35	9.97

均匀^[10], 而随着钢液固相率的增加, 粘度逐渐增大, 被搅拌起来的难度越来越大, 即便能搅拌起来, 基本也只能是发生转速较慢的层流流动, 对降低碳偏析的程度也会很弱。碳在糊状区扩散速度较慢, 若使糊状区均匀分布, 需依靠钢液流动冲刷凝固前沿, 加速凝固前沿富集的碳与糊状区内部碳混合^[9]。

鉴于以上研究结果, 又因为固相率难以准确测定, 所以利用凝固率进行测算末端电缆位置参数, 凝固率按上述文献提到的 65%~75%。不同凝固率和拉速下对应末端电缆位置, 如表 6。

2.3 末端电缆工艺参数优化

对于大断面尺寸连铸机, 在钢种相同的情况下, 与过热度、二次冷却强度及结晶器电磁搅拌强度等其它连铸工艺参数相比, 拉速对铸坯内凝固终点位置影响最大^[11]。所以, 建议 GCr15 钢拉速由目前的 0.68 m/min 提至 0.75 m/min, 末端电磁搅拌发挥的作用会更加明显。拉速为 0.75 m/min、过热度为 25 °C 时二级模型模拟结果见图 4, 与射钉检测结果比较吻合。

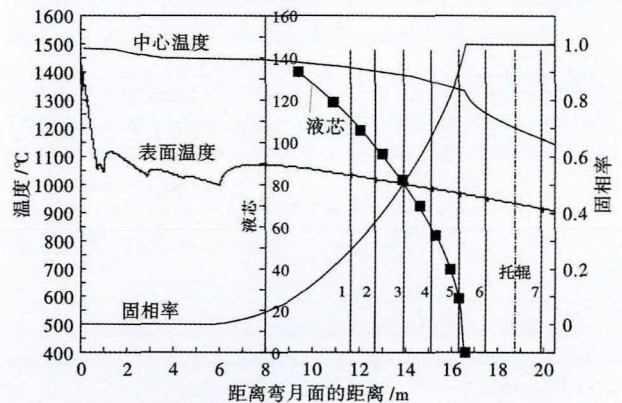


图 4 GCr15 钢拉速 0.75 m/min 过热度 25 °C 的模拟结果
Fig. 4 Simulation results of steel GCr15 at casting speed 0.75 m/min and superheat 25 °C

3 末端电磁搅拌(F-EMS)电参数优化

根据熊洪进^[1-2]等的研究可知, 电磁搅拌器内的磁感应强度轴向分布为“中间大, 两头小”, 原因为搅拌器的有限长度导致端部漏磁严重所致, 径向分布由搅拌器内表面向中心逐渐减小。所以本次测量没有再对磁场轴向分布和径向分布进行研究, 轴向测量位置选定在磁场最大位置处, 测量过程从搅拌器上口逐渐往下移动, 距上口 400 mm 处磁感应强度值最大, 径向位置选定在搅拌器的正中心处, 测量数据如表 7 所示。

3.1 磁感应强度与频率和电流的关系

磁感应强度与频率和电流的关系见图 5。

由图 5 可知,在末端电磁搅拌额定电流范围内,随着电流的增加磁感应强度也在增加,由于集肤效应随着频率的增加磁感应强度在减小,并且在频率为 6 Hz 时出现一个波谷,不同电流值出现相同的规律。

3.2 整流电压与频率的关系

整流电压与频率的关系见图 6。

表 7 频率 2 ~ 12 Hz、电流 300 ~ 450 A 时测量的磁感应强度

Table 7 Magnetic flux density measured at current 300 ~ 450 A and frequency 2 ~ 12 Hz

频率/Hz	300 ~ 450 A 时磁感应强度/Gs			
	300 A	350 A	400 A	450 A
2	950	1 030	1 221	1 350
4	800	893	996	1 110
6	670	685	763	850
8	710	761	860	970
10	600	765	790	897
12	570	654	747	776

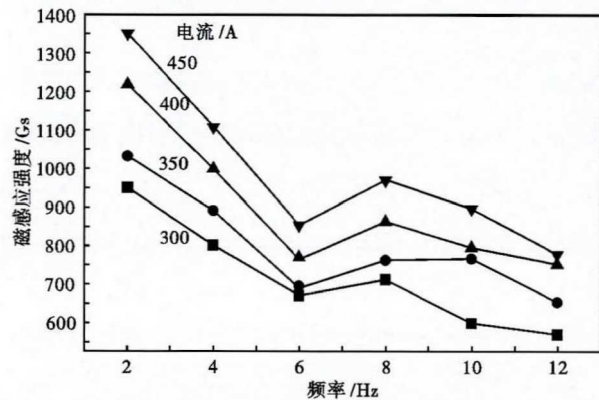


图 5 磁感应强度与频率和电流的关系

Fig. 5 Relation between frequency and current and magnetic flux density

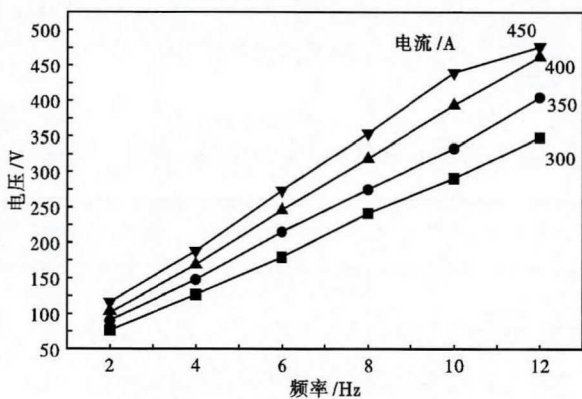


图 6 整流电压与频率的关系

Fig. 6 Relationship between voltage and frequency

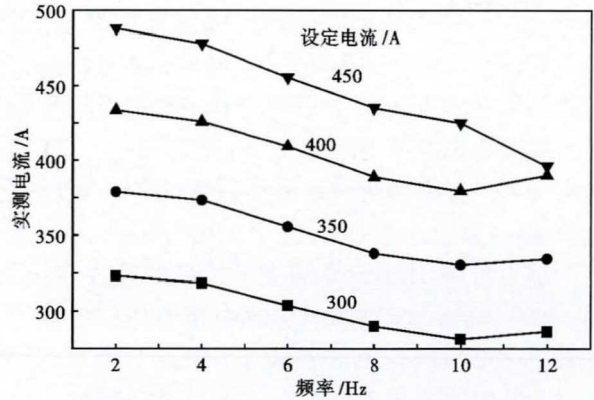


图 7 实测电流与频率的关系

Fig. 7 Relationship between measured current and frequency

由图 6 可知,整个输出电压曲线呈一个随频率增加线性上升的趋势,电流越大输出电压越高。在同一个设定的电流下,频率越高,实际输出电流值越小,电压越大。

3.3 电流与频率的关系

电流与频率的关系见图 7。

由图 7 可知,无论在任何设定电流的情况下,随着频率的增加,实际电流会减少,但在 12 Hz 有稍微抬头现象。在 6 Hz 左右实际电流与设定电流相等,随着频率减少,实际电流会变大,频率增大,实际电流会变小。

对于 F-EMS 的工作频率,为避免铸坯表面集肤效应的发生,由式 (1) 可知,对于断面尺寸为 380 mm × 490 mm 的矩形坯,F-EMS 的最大工作频率应为 4 Hz^[12]。可通过调节 F-EMS 的工作电流大小来改变搅拌器的搅拌强度。

$$d_s = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0 \sigma}} = \frac{503}{\sqrt{f \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中: d_s -集肤深度/m; ω -角速度/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); f -频率/Hz; μ -相对磁导率; μ_0 -真空磁导率,值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$; σ -电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)。

对某一个确定的频率,电流大小决定了电磁力的大小。有研究表明,电磁搅拌要使钢液发生旋转运动,磁感应强度应在 0.045 T 以上^[13],随着含碳量和合金含量的增加,磁感应强度要求相应增加, $[C] \geq 0.7\%$ 时,甚至要达到 0.085 T。电磁力的大小随频率的变化存在一个极限,频率过低则搅拌器的电磁力可能达不到要求;过高的频率会直接影响磁场的穿透力^[14]。Hideaki 的研究指出,凝固末端的电磁搅拌速度最大值应当控制在 0.10 ~

0.20 m/s^[15]。提高旋转磁场的磁感应强度是提高合金溶体搅拌强度的有效措施,电源的频率越高,旋转磁场的穿透深度越浅,合金溶体的搅拌效果越差。为了提高金属溶体的搅拌强度,提高绕组线圈的输入电压和选择适当的频率是提高电磁搅拌强度的有效手段。

综上所述,GCr15 高碳钢末端电磁搅拌建议使用 450 A,频率使用 8 Hz,磁感应强度达 970 Gs,既能满足文献[13]中高碳钢大于 0.085 T 的要求,也可以兼顾磁场穿透力的问题,使用效果会更佳。

通过采取以上工艺优化措施,铸坯的中心偏析、中心疏松等质量缺陷得到很大程度的改善,中心偏析合格率由优化前的 75% 提高至 92% 左右,改善效

果较为明显。

4 结论

(1)在不改变末端电搅位置的情况下,拉速由目前的 0.68 m/min 提高至 0.75 m/min,末端电搅位置满足凝固率在 65% ~ 75% 和中心固相率小于 20% 的技术要求。

(2)通过对末端电搅磁场强度的测量,电流使用 450 A,频率使用 8 Hz,磁感应强度达 970 Gs,可以充分发挥末端电搅对高碳钢的搅拌作用。

(3)工艺优化后,中心碳偏析合格率由优化前的 75%,提高至 92%,铸坯质量改善效果明显。

河南省科技攻关项目(836)资助

参考文献

[1] 熊洪进,阴树标,马忠存,等.圆坯连铸机电磁感应磁场特性研究[J].连铸,2015,21(1):41-45.

[2] 魏宁,包燕平,吴华杰,等.方坯结晶器电磁搅拌磁场特性研究[J].连铸,2010,16(6):30-34.

[3] Oh K S and Chang Y W. Macro-Segregation Behavior in Continuously Cast High Carbon Steel Bloom and Billets at the Final Stage of Solidification in Combination Stirring[J]. ISIJ International, 1995, 35(7):866-875.

[4] Abbott T B, Hoyle I B and Woodyatt A S. Three Dimensional Visualization of Segregation in Continuously Cast Blooms[C]. Steelmaking Conference Proceeding, 1992:875-882.

[5] 卢盛意.连铸坯质量[M].北京:冶金工业出版社,1994.

[6] 陈超.减少方坯中心偏析的冶金手段[J].宝钢技术,2001(4):54-55.

[7] 葛亮,曾亚南,汪成义,等.大方坯末端电磁搅拌工艺参数研究[J].炼钢,2014,30(1):40-47.

[8] Flemings M C, Mehrabian R and Spencer D B. Composition and Methods for Preparing Liquid-Solid Alloys for Casting and Casting Methods Employing the Liquid-Solid Alloys[P]. US:US3948650 A, 1976.

[9] 苏旺,姜东滨,罗森,等.方坯连铸凝固末端电磁搅拌工艺优化的数值模拟[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(5):674-677.

[10] Ji S and Fan Z. Solidification Behavior of Sn-15wt% Pb Alloys under a High Shear Rate and High Intensity of Turbulence during Semisolid Processing[J]. Metal Mater Trans, 2002, 33(11): 3511-3520.

[11] Saunders N and Miodownik A P. CALPHAD (Calculation of phase diagram): a Comprehensive Guide[M]. Pergamon, 1998.

[12] 孙海波,李烈军.大方坯末端电磁搅拌工艺参数优化与设计[J].炼钢,2015,31(4):45-48.

[13] 刘国贵,何宇明,余挺进.小方坯连铸机电磁搅拌工艺参数优化实践[J].连铸,2004:10(4):11-13.

[14] 陈建国,江国利,庞永刚.结晶器电磁搅拌在小方坯连铸机上的应用[J].北京科技大学学报,2007,29(s1):143-144.

[15] Mizukami k, Komatsu M and Kitagawa K, et al. Effect of Electromagnetic Stirring at the Final Stage of Solidification of Continuously Cast Strand[J]. tetsu-to-Hagane, 1984, 70(2):194-200.

秦凤婷(1983-),女,硕士(2008年东北大学),讲师,2006年中原工学院(本科)毕业,钢铁冶金研究。
E-mail: qinfengting@163.com

