

· 试验研究 ·

精炼渣组成对 31CrMoV9 钢夹杂物的影响

徐泽宇 刘吉辉 何志军 丛云伶 庞清海 湛文龙

(辽宁科技大学辽宁省化学冶金重点实验室, 鞍山 114051)

摘要 试验用 31CrMoV9 钢 (C: 0.28 ~ 0.33, Si: 0.30 ~ 0.35, Mn: 0.49 ~ 0.60, P: 0.011 ~ 0.016, S: 0.027 ~ 0.031, Cr: 2.47 ~ 2.60, Mo: 0.16 ~ 0.23, V: 0.12 ~ 0.19) 由 25 kg 感应炉熔炼, 采用正交试验研究了二元碱度 2.5 ~ 3.5 不同成分精炼渣 (CaO: 46.43 ~ 59.89, SiO₂: 15.16 ~ 23.50, Al₂O₃: 10 ~ 20, MgO: 6 ~ 10, CaF₂: 2 ~ 5) 对 31CrMoV9 钢夹杂物数量、尺寸和成分的影响。结果表明, 精炼渣二元碱度和氧化铝含量对该钢夹杂物含量的影响显著; 当二元碱度从 2.5 增加到 3.5 时, 每 0.3 mm² 钢中夹杂物的平均面积从 22.07 μm² 增至 25.67 μm², 增幅为 16.31%; 夹杂物的数量从 316.67 个/0.3 mm² 降至 255.00 个/0.3 mm², 降幅为 19.47%, 且有利于形成复合型夹杂物。当氧化铝含量从 10% 增加到 20%, 每 0.3 mm² 钢中夹杂物的面积由 22.57 μm² 增至 24.28 μm², 增幅为 7.55%, 夹杂物的数量由 292.67 个/0.3 mm² 降至 272.00 个/0.3 mm², 降幅为 7.06%, 并易形成镁铝尖晶石类夹杂物。综合分析, 当精炼渣成分为 10% Al₂O₃、10% MgO、5% CaF₂、二元碱度为 3.5 时精炼效果最佳。

关键词 31CrMoV9 钢 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO-CaF₂ 系精炼渣 碱度 Al₂O₃ 夹杂物

Effect of Refining Slag Ingredient on Inclusions in Steel 31CrMoV9

Xu Zeyu, Liu Jihui, He Zhijun, Cong Yunling, Pang Qinghai and Zhan Wenlong

(Key Lab of Liaoning Province for Chemical Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract Tested steel 31CrMoV9 (C: 0.28 ~ 0.33, Si: 0.30 ~ 0.35, Mn: 0.49 ~ 0.60, P: 0.011 ~ 0.016, S: 0.027 ~ 0.031, Cr: 2.47 ~ 2.60, Mo: 0.16 ~ 0.23, V: 0.12 ~ 0.19) is melted by a 25 kg induction furnace, and the effect of binary basicity 2.5 ~ 3.5 of different ingredient refining slag (CaO: 46.43 ~ 59.89, SiO₂: 15.16 ~ 23.50, Al₂O₃: 10 ~ 20, MgO: 6 ~ 10, CaF₂: 2 ~ 5) on number, size and composition of inclusions in steel 31CrMoV9 has been studied by orthogonal experiment method. Results show that the effect of binary basicity and alumina content in refining slag on inclusion content in this steel is obvious; as the binary basicity of slag increases from 2.5 to 3.5, for per 0.3 mm² steel the average area of inclusions increases from 22.07 μm² to 25.67 μm², i. e. that increases by 16.31% and the number of inclusions decreases from 316.67/0.3 mm² to 255.00/0.3 mm², i. e. that decreases by 19.47%, it is available to form composite inclusions; as alumina content in slag increases from 10% to 20%, for per 0.3 mm² steel the area of inclusions increases from 22.57 μm² to 24.28 μm², i. e. that increases by 7.55% and the number of inclusions decreases from 292.67/0.3 mm² to 272.00/0.3 mm², i. e. that decreases by 7.06%, it is available to form aluminium-magnesium spinel inclusions. With comprehensive analysis the refining slag contained 10% Al₂O₃, 10% MgO and 5% CaF₂ with binary basicity 3.5 has better refining effect.

Material Index Steel 31CrMoV9, CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO-CaF₂ Series Refining Slag, Basicity, Al₂O₃, Inclusions

轴承钢是重要的特钢品种,其洁净度和组织均匀性是影响其使用寿命的重要因素^[1-3]。轴承钢材的洁净度主要指钢中氧含量的多少和夹杂物的大小及分布^[4]。对于轴承钢中的夹杂物处理,目前主要集中于超纯净钢精炼工艺、精炼渣成分改良、钢中夹杂物及碳化物分布等方面^[5]。二次精炼中的精炼渣作为降低钢中夹杂物含量的一个有效手段被钢厂广泛应用,针对轴承钢的精炼渣合理配比一直是冶金工作者的研究重点^[6]。

31CrMoV9 钢是近几年国产化钢中新研制的钢种,用于制造液压驱动轴类部件,是欧洲牌号的高淬透性中碳合金钢^[7],此钢种的标准成分如表 1 所示。国内对于此钢种的相关研究主要集中在热处理方面,对精炼过程的研究不够全面。研究表明国产

31CrMoV9 钢与德国、日本产同种型号钢在夹杂物的控制上存在明显差距,并且国内钢厂生产的 31CrMoV9 钢材性能和使用寿命落后于进口钢材^[8-9]。为此,有必要探究 31CrMoV9 钢夹杂物控制手段。本文针对不同精炼渣配比方案对 31CrMoV9 钢夹杂物的影响进行了研究,为 31CrMoV9 钢精炼生产优化提供借鉴。

1 实验材料与方法

实验采用相关冶炼原料为工业纯铁 YT01,钼铁

表 1 31CrMoV9 钢化学成分要求/%

Table 1 Requirement of chemical composition of steel 31CrMoV9 / %

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S
0.27 ~ 0.34	≤ 0.40	0.40 ~ 0.70	2.30 ~ 2.70	0.15 ~ 0.25	0.10 ~ 0.20	≤ 0.035

FeMo60, 钒铁 FeV50-B, 中碳锰铁 FeMn82C1.0, 中碳铬铁 FeCr69C1.0。硅钙线参数见表 2。实验设备采用容量为 25 kg 的中频感应炉, 熔炼温度控制在 1 600 ℃ 左右。根据对精炼渣组分的分析, 选择了 4 个影响因子, 分别为碱度、 Al_2O_3 、MgO 和 CaF_2 含量。每项影响因子选取 3 个因素水平, 见表 3。

采用正交试验设计方法安排实验, 得出 9 组不同成分的精炼渣样, 如表 4 所示。

实验时首先在感应炉加入 10 kg 工业纯铁, 铁水预热后将钢铁料全部熔化, 向钢液中加入配置好的炉渣(炉渣成分配比见表 4, 质量占工业纯铁总质量的 5%)使其完全熔化, 而后依次向炉内加入 Al、V、Mn、Cr、Mo 等合金元素进行脱氧并合金化, 电磁搅拌 2 min 使钢液成分均匀后插入 Ca-Si 线, 再次进行电磁搅拌, 然后制取分析检测所需试样。

2 结果与讨论

2.1 实验钢样的成分检测结果

将实验得到的各炉次钢样切出 1 cm × 1 cm × 1 cm 试样, 分析得出钢的成分(%)为: 0.28 ~ 0.33C, 0.30 ~ 0.35Si, 0.49 ~ 0.60Mn, 0.011 ~ 0.016P, 0.027 ~ 0.031S, 2.47 ~ 2.60Cr, 0.16 ~ 0.23Mo, 0.12 ~ 0.19V。对照 31CrMoV9 的标准成分表(见表 1), 所有实验冶炼所得钢样均符合目标钢种成分的要求, 可以进行下一步的实验分析。

2.2 夹杂物的金相观察结果及分析

用线切割机切割实验得到的 9 组钢样, 经过抛光处理后放在金相显微镜下放大 100 倍, 每个钢样选取 4 个视场进行检测, 并用 Image Pro Plus 图像分析软件对试样中夹杂物的数量和尺寸进行统计, 实验试样分析结果如表 5 所示。

根据表 5 中的夹杂物统计结果, 用极差计算法来计算各个因素的均值和极差, 来研究各个因素对夹杂物数量和尺寸的影响。通过极差分析法, 计算出各个因素对夹杂物面积的影响, 如表 6 所示。

通过计算各个因素的极差, 比较各个因素极差的大小, 就可以得出各个因素对夹杂物面积大小的影响, 从表 6 中可以看出, 碱度从 2.5 增至 3.5, 夹杂物的平均面积从 22.07 μm^2 增至 25.67

表 2 硅钙线参数

Ca / %	Si / %	Al / %	粉重 / ($g \cdot m^{-1}$)	直径 / mm
30.0	60.0	2.4	220.0	15.0

表 3 试验精炼渣组分因素水平表

碱度(R)	(Al_2O_3) / %	(MgO) / %	(CaF_2) / %
2.5	10	6	2
3.0	15	8	3
3.5	20	10	5

表 4 试验精炼渣成分和碱度

精炼渣	组分 / %					二元碱度 (R)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂	
1	58.50	23.50	10.00	6.00	2.00	2.49
2	52.86	21.14	15.00	8.00	3.00	2.50
3	46.43	18.57	20.00	10.00	5.00	2.50
4	57.75	19.25	10.00	8.00	5.00	3.00
5	54.75	18.25	15.00	10.00	2.00	3.00
6	53.25	17.75	20.00	6.00	3.00	3.00
7	59.89	17.11	10.00	10.00	3.00	3.50
8	57.56	16.44	15.00	6.00	5.00	3.50
9	54.44	15.16	20.00	8.00	2.00	3.59

μm^2 , 增幅为 16.31%; 氧化铝含量从 10% 增至 20%, 夹杂物的面积由 22.57 μm^2 增至 24.28 μm^2 , 增幅为 7.55%。而对于氧化镁的含量和氟化钙的含量变化, 3 个均值之间夹杂物面积变化比较小, 因此氧化镁和氟化钙含量的变化对夹杂物面积的影响比较小。比较各因素的极差可以看出, 碱度和氧化铝含量的变化对夹杂物面积的影响最大。

从表 6 中可以看出, 随着碱度从 2.5 变到 3.5 过程中, 单位面积中夹杂物的数量从 317 减至 255, 降幅为 19.47%。同理, 氧化铝的含量从 10% 变化到 20% 的过程中, 单位面积夹杂物数量从 293 降至 272, 降幅为 7.06%。氧化镁含量和氟化钙含量变化对夹杂物数量影响并不大。比较各个因素的极差

表 5 试验 31CrMoV9 钢中每 0.3 mm² 面积中夹杂物数量和面积及尺寸分布

Table 5 Distribution of number, area and size of inclusions in per 0.3 mm² area of tested steel 31CrMoV9

编号 (碱度)	夹杂数量/ (个 · 0.3 mm ⁻²)	平均面积/ ($\mu m^2 \cdot 0.3 mm^{-2}$)	平均粒 径 / μm	夹杂物尺寸分布 / %			
				0 ~ 5 μm	5 ~ 10 μm	10 ~ 20 μm	> 20 μm
1(2.49)	331	21.00	4.7	56.59	39.37	4.04	0
2(2.50)	314	22.50	5.3	55.34	37.05	7.61	0
3(2.50)	305	22.70	5.5	54.30	37.83	7.87	0
4(3.00)	283	22.59	4.9	52.27	36.96	10.77	0
5(3.00)	272	23.19	5.0	51.81	36.72	4.47	0
6(3.00)	263	23.20	5.1	50.01	39.81	10.18	0
7(3.50)	264	24.13	4.7	51.45	39.04	9.51	0
8(3.50)	253	25.94	5.0	50.56	37.81	11.63	0
9(3.59)	248	26.93	5.6	49.56	40.74	9.73	0

表6 精炼渣碱度、氧化铝、氧化镁和氟化钙含量对每0.3 mm² 试验钢31CrMoV9中夹杂物面积和个数的影响

Table 6 Effect of basicity, and alumina, magnesium oxide and calcium fluoride content in refining slag on area and number of inclusions in per 0.3 mm² area of tested steel 31CrMoV9

夹杂物面积 / μm ²												夹杂物个数 / (个 · 0.3 mm ⁻²)											
碱度(R)			Al ₂ O ₃ / %			MgO / %			CaF ₂ / %			碱度(R)			Al ₂ O ₃ / %			MgO / %			CaF ₂ / %		
2.5	3.0	3.5	10	15	20	6	8	10	2	3	5	2.5	3.0	3.5	10	15	20	6	8	10	2	3	5
22.07	22.99	25.67	22.57	23.88	24.28	23.38	24.01	23.34	23.71	23.28	23.74	317	273	255	293	280	272	282	282	280	284	280	280

表7 精炼渣碱度、氧化铝、氧化镁和氟化钙含量对试验钢31CrMoV9夹杂物粒径和0~5 μm夹杂物所占比例的影响

Table 7 Effect of basicity, and alumina, magnesium oxide and calcium fluoride content in refining slag on size of inclusions and 0~5 μm inclusions making up percentage of total inclusions in tested steel 31CrMoV9

夹杂物粒径 / μm												0~5 μm 夹杂物所占比例 / %											
碱度(R)			Al ₂ O ₃ / %			MgO / %			CaF ₂ / %			碱度(R)			Al ₂ O ₃ / %			MgO / %			CaF ₂ / %		
2.5	3.0	3.5	10	15	20	6	8	10	2	3	5	2.5	3.0	3.5	10	15	20	6	8	10	2	3	5
4.93	5.13	5.33	5.03	5.07	5.30	5.07	5.20	5.13	5.17	5.10	5.13	55.41	51.36	50.52	53.44	52.57	51.29	52.39	52.39	52.52	52.65	52.27	52.38

可以看出,碱度对精炼渣的除夹杂效果影响最大,其次是氧化铝含量的变化,氧化镁和氟化钙含量的变化对精炼渣去夹杂物的影响较小。

从表7各因素对夹杂物粒径的影响的结果不难看出,碱度的增加会在一定程度上使得夹杂物的粒径提高,氧化铝含量的增加也会使得粒径有一定程度的增加,但是总的来看,粒径的变化并不大。

从表7各因素对小尺寸夹杂物所占比例的影响可以看出,碱度增大,会使得夹杂物尺寸相应增大,同时氧化铝含量增加也会相应使小夹杂物比例减小。说明渣中初始氧化铝含量越低,越有利于大颗粒夹杂物的吸收。

2.3 夹杂物扫描电镜及能谱分析

为了进一步研究精炼渣碱度和氧化铝这两个主要影响因素对夹杂物的影响,选取以精炼渣中碱度为主要变量的2#和8#钢样,精炼渣中以氧化铝含量

为主要变量的7#和9#钢样。分别将4组钢样用线切割机截出1 cm × 1 cm × 6 cm长条状试样进行无水电解,将夹杂物收集后用电子显微镜观察其形貌和成分。

图1(a,b)分别是2#和8#钢样的典型夹杂物扫描电镜图像及能谱分析结果。可以看出,随着精炼渣中碱度的提高,夹杂物成分由CaS向复合夹杂物Al₂O₃-MgO-CaS转变,并且复合夹杂物成分中含有少量的SiO₂,具有一定的塑性。这类夹杂物的尺寸一般在5 μm以下,对钢的性能影响不大。

图2(a,b)分别是7#和9#钢样的典型夹杂物扫描电镜图像及能谱分析结果。可以看出,随着精炼渣中Al₂O₃含量的提高,夹杂物中Al₂O₃和MgO含量增加,形成D类点状镁铝尖晶石型复合夹杂物。这种夹杂物具有高熔点、高硬度的特点,容易造成钢铁产品表面缺陷,降低钢材的抗腐蚀性能,在生产中

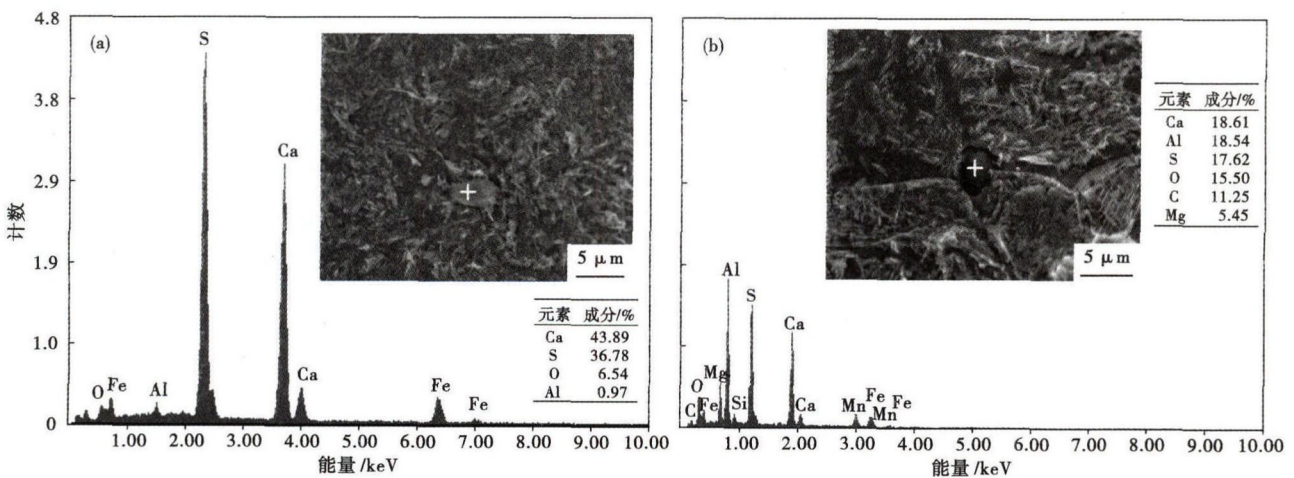


图1 碱度2.5, Al₂O₃ 15%的2#钢样(a)和碱度3.5, Al₂O₃ 15%的8#钢样(b)电解夹杂物形貌和能谱分析

Fig. 1 Morphology and energy spectrum analysis of electrolyzed inclusions in No2 steel sample, basicity 2.5, Al₂O₃ 15% (a) and in No8 steel sample, basicity 3.5, Al₂O₃ 15% (b)

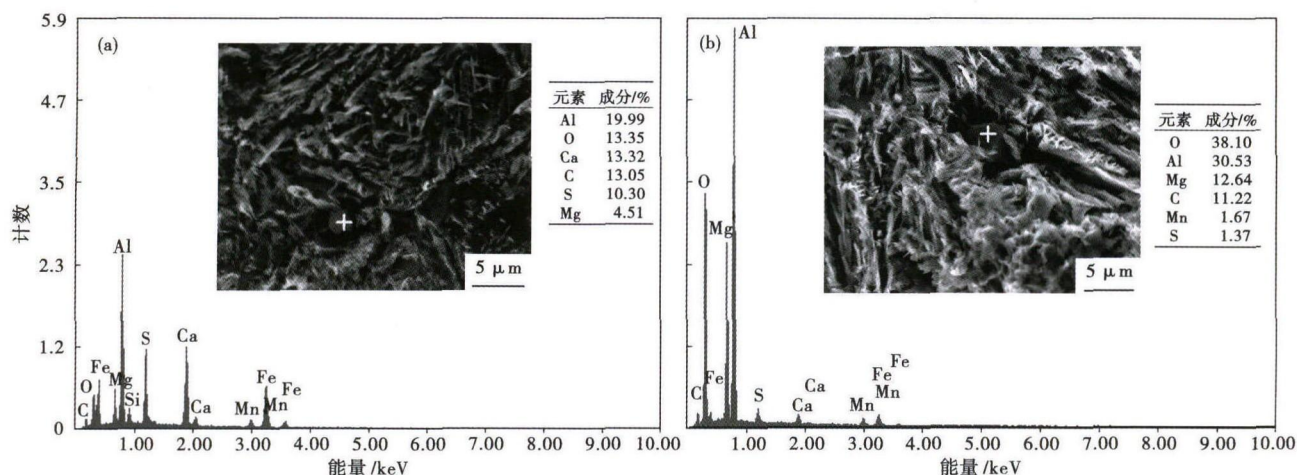


图2 碱度 3.5, Al_2O_3 10% 的 7# 钢样 (a) 和碱度 3.59, Al_2O_3 20% 的 9# 钢样 (b) 电解夹杂物形貌和能谱分析

Fig. 2 Morphology and energy spectrum analysis of electrolyzed inclusions in No7 steel sample, basicity 3.5, Al_2O_3 10% (a) and in No9 steel sample, basicity 3.59, Al_2O_3 20% (b)

应尽量减少这种夹杂物的产生。

3 精炼渣差异配比综合分析及建议

通过对几种 31CrMoV9 钢精炼渣配比所精炼的钢样进行金相分析,不难看出,精炼渣成分中碱度变化对夹杂物面积和数量的影响最大,其次是氧化铝含量。进一步的电解实验、SEM + EDS 观察,表明精炼渣中碱度的提高有利于夹杂物的塑性转变,生成复合型夹杂且尺寸较小,对钢的危害降低;而精炼渣中氧化铝含量的提高会使夹杂物转变为棱角状的镁铝尖晶石类夹杂物,降低钢的疲劳强度。

为了达到对国产 31CrMoV9 钢在夹杂物方面的合理控制,从而提高该钢种的综合性能,建议在生产过程中采取以下措施:(1) 尽量提高精炼渣碱度,促进形成复合型夹杂物,同时有利于提高精炼渣的脱氧能力;(2) 降低精炼渣中氧化铝含量的同时可适当提高 CaF_2 含量,以便降低精炼渣总体熔点,尽早形成液滴,加快渣金界面反应速率;(3) 由于精炼渣中 MgO 含量对夹杂物面积的影响较小,可适当提高精炼渣中 MgO 含量,以便提升对炉衬的保护效果。

4 结论

(1) 从实验结果分析看出,碱度和氧化铝含量的变化对夹杂物面积和数量的影响最大。精炼渣碱度从 2.5 增至 3.5,随着碱度的增大夹杂物的平均面积会相应增大,但夹杂物的数量略有降低;精炼渣中氧化铝含量从 10% 增至 20%,随着氧化铝含量的增加夹杂物的面积会相应增加,但夹杂物数量有所减少。

(2) 精炼渣碱度的提高有利于形成低熔点的复合夹杂物,并提高夹杂物的塑性。随着精炼渣中

Al_2O_3 含量的提高,夹杂物成分中 Al_2O_3 含量上升,易形成棱角状的镁铝尖晶石类夹杂物。

(3) 经过检测分析,针对碱度大小和氧化铝含量变化对试样中夹杂物个数,比较精炼渣各个组分变化对夹杂物面积的影响,最后认为组成为碱度 3.5, 10% Al_2O_3 , 10% MgO , 5% CaF_2 的精炼渣精炼效果最佳。

国家自然科学基金 (51474124, 51504131, 51504132), 辽宁省教育厅项目 (L2014111), 辽宁省科技厅项目 (2015020192) 资助

参考文献

- [1] 周德光,傅杰,王平,等. 高质量轴承钢的生产技术[J]. 中国冶金, 2000, 49(6): 14-17.
- [2] Uesugi T. Recent Development of Bearing Steel in Japan [J]. Tei-su-to-Hagané, 1988, 74(10): 1889-1894.
- [3] 董耀仁,刘新华. 钢中大型非金属夹杂物[M]. 北京:冶金工业出版社, 1991: 15-16.
- [4] 徐匡迪,肖雨俊. 特殊钢精炼中的脱氧及夹杂物控制[J]. 钢铁, 2012, 47(10): 1-13.
- [5] 朱诚意,吴炳新,张志成,等. 轴承钢生产过程中夹杂物控制的研究进展[J]. 机械工程材料, 2014, 38(7): 8-15.
- [6] Yoon B H, Heo K H, Kim J S, et al. Important of Steel Cleanliness by Controlling Slag Composition[J]. Ironmaking and Steeling, 2002, 29(3): 214-217.
- [7] 刘金鑫,冯桂萍,王连海,等. 31CrMoV9 钢调质工艺研究[J]. 物理测试, 2011, 29(2): 17-19.
- [8] 何志军,戴雨翔,刘吉辉,等. 31CrMoV9 钢夹杂物和组织观察[J]. 钢铁, 2016, 51(7): 81-88.
- [9] 何志军,李晶,戴雨翔,等. 国内外 31CrMoV9 钢成分与夹杂物特性分析[J]. 河南冶金, 2016, 24(2): 1-3.

徐泽宇(1992-),男,硕士研究生,2015年辽宁科技大学(本科)毕业,特殊钢研究。E-mail: 924919334@qq.com

刘吉辉(1980-),女,硕士(辽宁科技大学),讲师,特殊钢研究。E-mail: ljh805930@126.com

收稿日期:2017-02-12