

国内 1215 系低碳高硫易切削钢的工艺流程和内部质量控制

林腾昌 朱 荣 王成杰 李文双 马国宏
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘 要 对国内 100 t EAF-LF-CC 和 80 t、100 t、160 t 转炉-LF-CC 四条生产线生产的 1215 系低碳高硫易切削钢($\% : 0.05 \sim 0.10C, \leq 0.013Si, 1.06 \sim 1.33Mn, 0.051 \sim 0.061P, 0.24 \sim 0.36S, 0.012O \sim 0.014O[O], \leq 0.005Al$)进行实物分析。结果表明,国内 1215 低碳高硫钢成分控制特点为通过适当提高 Mn 含量控制钢中的 Mn/S(3.7~3.9),个别流程通过降低 S 含量可使 Mn/S 达 4.4;160 t 转炉流程在夹杂物控制上优于其余流程(Mn/S=3.8, MnS 夹杂面积和长宽比波动较小)。由于连铸坯元素偏析较小和轧后冷却速度控制得当,80 t 转炉流程和 160 t 转炉流程生产的钢中无明显的带状组织,而 100 t 电弧炉流程和 100 t 转炉流程生产的钢中带状组织级别为 3~4。

关键词 1215 易切削钢 工艺流程 夹杂物 带状组织

Process Flow Sheet and Internal Quality Control of Domestic 1215 Low Carbon High Sulphur Free-Cutting Steel

Lin Tengchang, Zhu Rong, Wang Chengjie, Li Wenshuang and Ma Guohong
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract An analysis on the products of 1215 low carbon high sulphur free-cutting steel ($\% : 0.05 \sim 0.10C, \leq 0.013Si, 1.06 \sim 1.33Mn, 0.051 \sim 0.061P, 0.24 \sim 0.36S, 0.012O \sim 0.014O[O], 0.005Al$) produced by domestic 100 t EAF-LF-CC, 80 t, 100 t and 160 t BOF-LF-CC four process production line is carried out. Results show that the control characteristic of domestic 1215 low carbon high sulphur free-cutting steel is to control Mn/S (3.7~3.9) of steel by suitable increasing Mn content in steel and for individual flow sheet is by decreasing S content in steel to get Mn/S=4.4; the inclusion control of inclusion in steel produced by 160 t BOF flow sheet (Mn/S=3.8, fluctuation of MnS inclusions area and length/width ratio are comparatively smaller) is better than that by others; due to smaller segregation of elements in casting billet and suitable controlling of cooling rate after rolling the steel produced by 80 t BOF flow sheet and 160 t flow sheet has no obvious banded structure, but by 100 t EAF flow sheet and 100 t BOF flow sheet the rating of banded structure is 3~4.

Material Index 1215 Free-Cutting Steel, Flow Sheet, Inclusion, Banded Structure

随着机械零件加工比例的逐步增加和经济发展,我国易切削钢的需求量也稳步上升,这对我国钢材市场的调整和易切削钢种系列结构的变化起到了积极效应,近几年国内更是加快了高级别易切削钢的开发^[1-4]。低碳高硫易切削钢以其良好的加工性和无铅的环保性得到了较快的发展。本文通过对国内不同工艺流程所生产低碳高硫易切削钢的材料分析,对比了易切削钢的内部质量控制情况。

1 各工艺的产品取样与成分对比

对 2012 年 1 月投放国内市场的 1*(100 t EAF-LF-CC)、2*(80 t BOF-LF-CC)、3*(100 t BOF-LF-CC)和 4*(160 t BOF-LF-CC)工艺流程(见表 1)所生产的低碳高硫易切削钢线材(均为 $\Phi 10$ mm)进行了对比分析。在线材中心纵截面和横截面取样分析夹杂物和内部组织情况,在线材上钻取钢屑分析化学成分。抽检样品的成分检测结果如表 2 所示。

表 1 1215 易切削钢的生产流程及工艺

Table 1 Production flow sheet and Process for 1215 free-cutting steel

工艺编号	工艺流程	脱氧制度	轧制冷却
1*	100 t 电弧炉-100 t LF-6 流连铸机-高线轧制	EAF 出钢 Al 脱氧, LF 碳粉控氧, 造低碱度渣, LF 出钢 Ca 线调氧	轧后缓冷
2*	80 t 转炉-90 t LF-4 流连铸机-高线轧制	转炉出钢 Al 脱氧, LF 碳粉控氧, 造低碱度渣, 必要时 LF 出钢 Ca 线调氧	轧后缓冷
3*	100 t 转炉-100 t LF-8 流连铸机-高线轧制	转炉出钢 Al 脱氧, LF 碳粉控氧, 造低碱度渣, LF 出钢 Ca 线调氧	轧后缓冷
4*	160 t 转炉-160 t LF-4 流连铸机-高线轧制	转炉出钢 Al 脱氧, LF 碳粉控氧, 造低碱度渣, 必要时 LF 出钢 Ca 线调氧	轧后缓冷

磷硫:磷硫是有利于切削的元素,磷同时具有细化晶粒的作用。一般认为,随着硫含量的增高,钢材的切削性能也越好。但不能单纯考虑为切削性能而过多地增加硫含量,因为这不但会使该钢的生产条

表 2 1215 易切削钢分析成分
Table 2 Analysis of 1215 free-cutting steels

工艺 编号	化学成分/%							Mn/S
	C	Si	Mn	P	S	O	Al	
1#	0.05	0.010	1.32	0.061	0.34	0.012	<0.005	3.9
2#	0.07	≤0.01	1.06	0.051	0.24	0.014	<0.005	4.4
3#	0.10	≤0.01	1.33	0.054	0.36	0.012	<0.005	3.7
4#	0.08	0.013	1.28	0.053	0.34	0.014	<0.005	3.8
SAE1215	≤	≤	0.75 ~	0.04 ~	0.26 ~	-	-	>3
	0.09	0.10	1.05	0.09	0.35			

表 3 各工艺 1215 易切削钢横截面和纵截面单位面积上夹杂物数量/(个·mm⁻²)

Table 3 Amount of inclusions at cross section and longitudinal section of 1215 free-cutting steel produced by different process / (n · mm⁻²)

工艺	横截面	纵截面
1#	6 000	2 750
2#	2 564	3 400
3#	3 000	1 388
4#	4 500	2 100

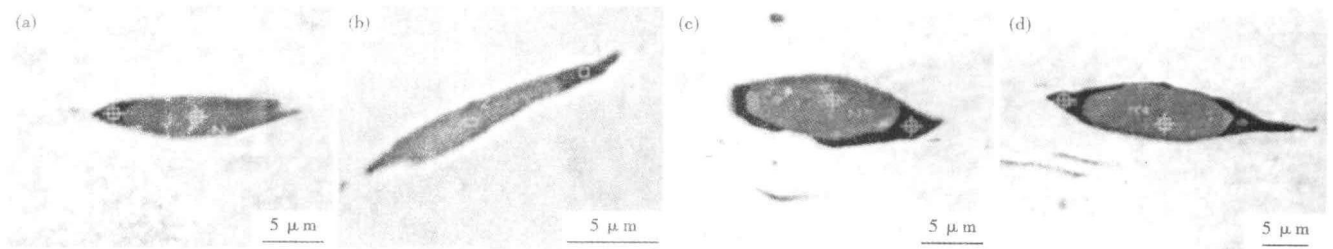


图 1 工艺 1# 100 t EAF-LF-CC (a), 2# 80 t BOF-LF-CC (b), 3# 100 t BOF-LF-CC (c), 4# 160 t BOF-LF-CC (d) 易切削钢中典型夹杂物

Fig. 1 Typical inclusion in free-cutting steel produced by process 1# 100 t EAF-LF-CC (a), 2# 80 t BOF-LF-CC (b), 3# 100 t BOF-LF-CC (c) and 4# 160 t BOF-LF-CC (d)

件复杂化,而且会导致钢的力学性能显著恶化^[5]。

锰:对于镇静钢来说,锰可以提高硅和铝的脱氧效果,也可以同硫结合形成硫化锰,改善了钢中硫的热脆倾向和钢材切削性能,但锰量不宜过多,否则将增加钢材的强度和韧性,切削性能有下降的趋势。

氧:对一般钢种氧要求控制在比较低的水平,而易切削钢中适当的氧有利于改善硫化物。硫系易切削钢中的硫化锰夹杂物的形态的生成与钢的脱氧有关。当钢中氧大于 200×10^{-6} 时,生成高熔点、大颗粒、分布均匀的 I 型硫化锰夹杂物;当钢中氧低于 100×10^{-6} 时在晶界处生成薄膜状或小圆球链状、低熔点的 II 型硫化锰夹杂物;当钢中氧极低时,生成带棱角的大块 III 型硫化锰夹杂物。

硅:在沸腾钢中,含硅量很低 ($<0.05\%$),硅是作为脱氧元素加入镇静钢中。除形成非金属夹杂物外,硅溶于铁素体中。硅在钢中形成硅酸盐,会导致刀具磨损。硅加入钢中会降低钢的氧含量,使硫化物夹杂呈细长条状分布,恶化钢的切削性能。在易切削钢中,希望硅尽量少。

铝:铝对钢材切削性能的影响和硅相似,形成硬度高且不规则的 Al_2O_3 ,在切削时同样会导致刀具的磨损疲劳,因此钢中的铝含量也要尽可能低。

易切削钢连铸坯和线材的成分控制是产品赢得市场的基础。由测试结果可以得出,4 个试样中 Al、Si 含量均较低, Mn 含量均超出 SAE 标准范围。1#

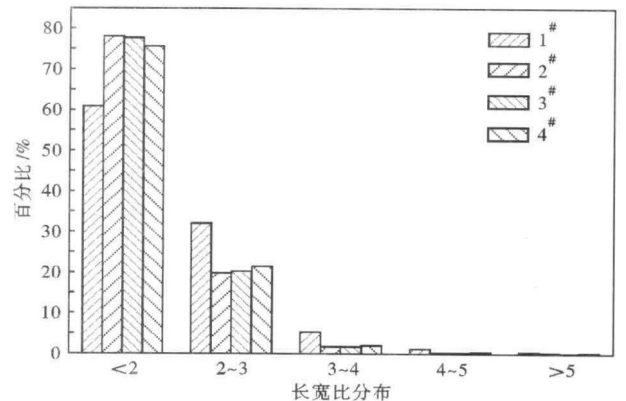


图 2 各工艺生产的 1215 易切削钢纵截面夹杂物的长宽比分布

Fig. 2 Distribution of aspect ratio of inclusions at longitudinal section of 1215 free-cutting steel produced by each process

和 4# 试样其他成分均控制在标准范围之内; 2# 试样 S 含量较低,以低硫含量保持了最高的 Mn/S。3# 试样的碳含量超出低碳高硫钢的要求,硫含量高于 SAE 标准上限。可见国内仿 1215 低碳高硫钢在成分上的特点为:提高 Mn 含量(如 1#、3#、4#)或提高钢中 Mn 含量同进降低 S 含量(如 2#)来追求高 Mn/S,合理控制氧含量在 $(120 \sim 140) \times 10^{-6}$ 的质量控制方式。

2 钢中夹杂物的形貌对比

钢中夹杂物的控制是整个生产工艺的综合影响

结果^[6-8]。抽检样品中夹杂物形貌见图1,单位面积上夹杂物的数量见表3。横截面上夹杂物数量最多的是1#,接近6000个/mm²,最少的为2#的2564个/mm²。纵截面上夹杂物数量最多的是2#,达到3422个/mm²,最少的为3#的1388个/mm²。纵截面是夹杂物随着轧制变形的方向,纵截面夹杂物长宽比分布见图2。可见2#、3#、4#三个流程钢中MnS夹杂长宽比百分比控制情况基本相当,而1#长宽比小于2的夹杂物比其他3种工艺流程要低,而长宽比在>2的其他范围内的夹杂物比例均比其他工艺流程高。

钢中夹杂物的形貌控制,以接近纺锤形为最佳,4个样品对比见图3。4个样品对比来看,以4#样品中纵截面MnS的长宽比波动范围最小,2#因为夹杂物数量较大,其长宽比标准方差与4#相当。因此纵截面控制情况优劣依次为2#>4#>1#>3#。而横截面的对比来看,控制优劣依次为3#>4#>2#>1#。

易切削钢中的MnS粒径如何控制最有利于加工性能,至今尚无定论。一般认为有一定量的大型夹杂物亦可获得较好的加工性能。4个样品的对比见图4。从纵截面对比来看,4个样品夹杂物的面积波动均较大,其中以1#和2#控制较为稳定,3#夹杂物平均面积最大。纵截面夹杂物面积波动性大小依次为3#>4#>1#>2#。从横截面对比来看,1#和4#夹杂物面积控制比较均匀,从均匀性上看,依次为1#>4#>2#>3#。合理控制夹杂物形貌、夹杂物数量的均匀分布以及适当的大颗粒MnS的存在是保证易切削钢性能优良的根本。

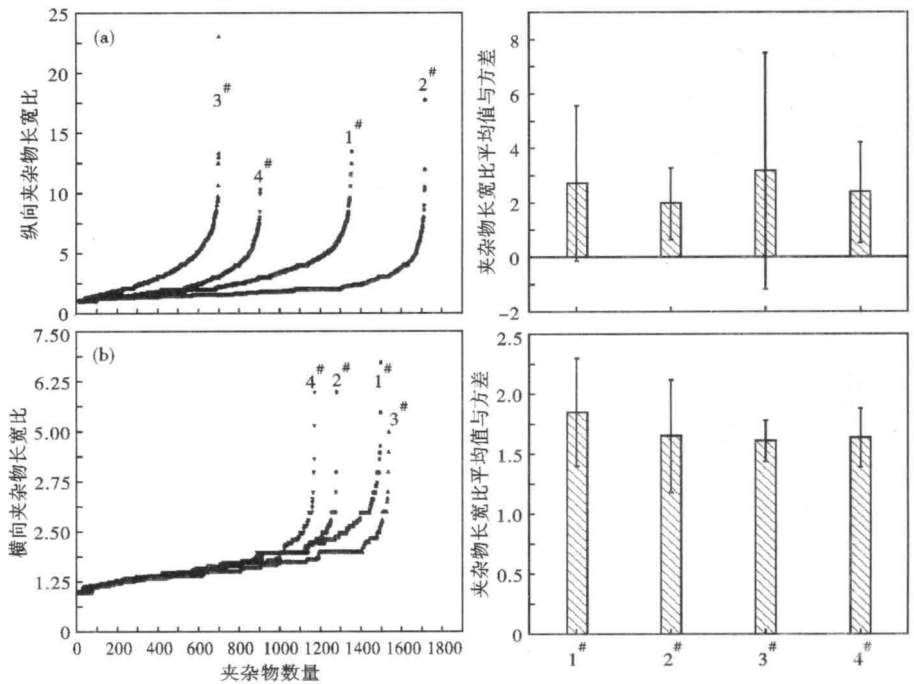


图3 各工艺1215易切削钢纵截面(a)和横截面(b)夹杂物长宽比与方差
Fig.3 Aspect ratio and standard variance of inclusions at longitudinal section (a) and cross section (b) of 1215 free-cutting steel produced by each process

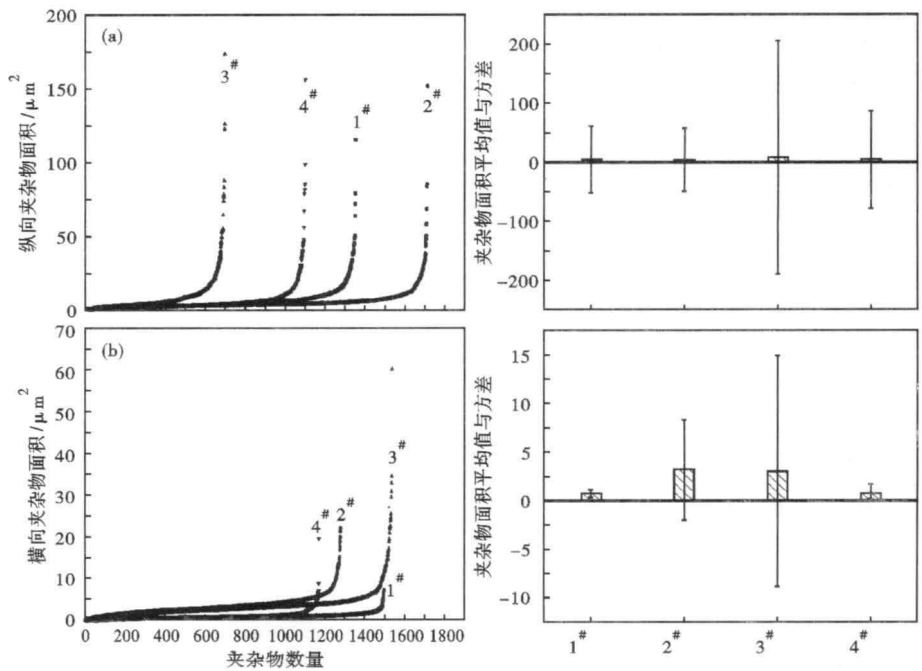


图4 各工艺1215易切削钢纵截面(a)和横截面(b)夹杂物面积与方差
Fig.4 Area and standard variance of inclusions at longitudinal section (a) and cross section (b) of 1215 free-cutting steel produced by each process

3 钢中带状组织控制对比

易切削钢的内部带状组织是影响线材的切削性

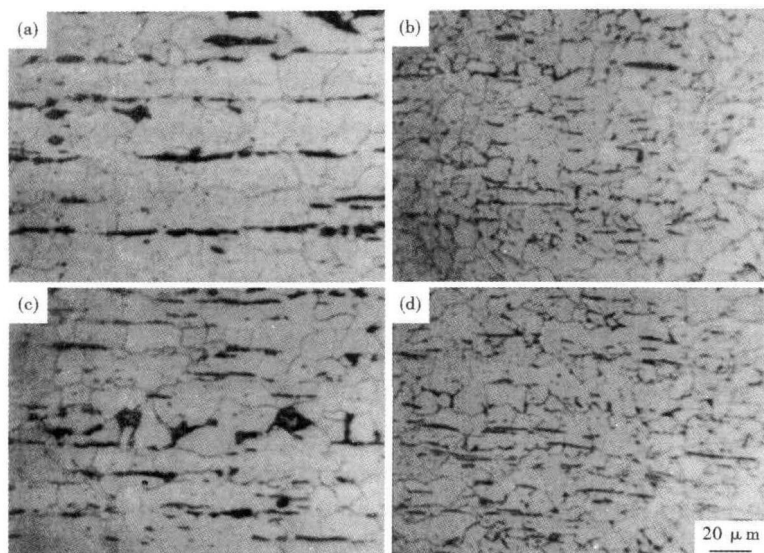


图 5 各工艺 1215 易切削钢的带状组织:(a)1# 100 t EAF-LF-CC;(b)2# 80 t BOF-LF-CC;(c)3# 100 t BOF-LF-CC;(d)4# 160 t BOF-LF-CC

Fig. 5 Banded structure of 1215 free-cutting steel produced by process 1# 100 t EAF-LF-CC (a), 2# 80 t BOF-LF-CC (b), 3# 100 t BOF-LF-CC (c) and 4# 160 t BOF-LF-CC (d)

能和力学性能的重要因素之一^[9-10]。对所取线材样的最大直径断面进行组织对比分析,结果见图 5。

钢中的铁素体/珠光体带状组织是热轧钢板中常见的一个现象,它对钢的使用性能有很大影响。其形成原因是由于钢在凝固时的溶质元素(如 Mn)偏聚,轧制过程中成分偏聚区被变形延伸成带状分布,轧后冷却时低锰区的局部相变温度 Ar_3 较高,首先形成铁素体并导致碳和锰进一步富集到偏聚区,最后形成铁素体/珠光体带状组织^[11]。

易切削钢线材内部组织的均匀控制是提高线材

车削、拉拔等后续加工性能的基础。4# 和 2# 易切削钢的内部组织没有带状组织存在,并市场反映加工性能良好。而 1#(4 级)和 3#(3 级)的产品市场反映加工性能略低于 4# 和 2#,检测结果为部分批次产品线材中存在一定量的带状组织,影响了钢的加工性能,其中 3# 带状组织不排除由于碳偏析引起的不良影响^[5]。因此从带状组织控制情况优劣看,依次为 4# \approx 2# > 3# > 1#。

影响 4 个工艺线材带状组织的原因较多,最大的原因可能为连铸坯的元素偏析程度不同,因本文没有对抽检线材前序的连铸坯进行取样分析,很难得到确切结论。虽然所调整的 4 个工艺后的轧材均为缓冷处理,但带状组织的严重程度还可能与轧后的冷却速度有关。

4 结论

(1) 国内 1215 系低碳高硫钢在成分上的特点为:提高 Mn 含量或提高钢中 Mn 含量同时降低 S 含量来追求高 Mn/S,同时控制产品氧含量在 $(120 \sim 140) \times 10^{-6}$ 以获得较好的 MnS 形貌。

(2) 从抽检结果对比来看,4# 160 t BOF-LF-CC 工艺在易切削钢夹杂物控制上优于 1# 100 t EAF-LF-CC、2# 80 t BOF-LF-CC 和 3# 100 t BOF-LF-CC 工艺,而 2# 和 4# 钢中无带状组织,1# 和 3# 钢中带状组织达到 3~4 级,对线材的后续加工产生不良影响,该带状组织与连铸坯元素偏析程度和轧后冷却速度有关。

参考文献

- [1] 袁武华,王 峰. 国内外易切削钢的研究形状和前景[J]. 钢铁研究,2008,36(5):56-62.
- [2] 王小红,谢 兵,冯仲渝. 国内外易切削钢的现状和研究进展[J]. 特殊钢,2005,26(4):26-28.
- [3] Lane B M, Shi M, Dow T A, et al. Diamond Tool Wear When Machining A16061 and 1215 Steel[J]. Wear, 2010, 268:1434-1441.
- [4] 许 俊,徐德生,李良策,等. 国内外易切削钢性能对比分析[J]. 汽车科技,2003(1):28-30.
- [5] 王金龙,王福明,李长荣,等. 碳与磷含量对易切削钢 9SMn28 微观组织的影响[J]. 材料热处理学报,2010,31(2):60-64.
- [6] 王宏斌,林腾昌,朱 荣. X1215 易切削钢连铸坯成分偏析的研究[J]. 北京科技大学学报,2011,33(Z1):161-164.
- [7] 胡俊辉,杨伟宁,常红英,等. 易切削钢硫化物特性分布数理统计分析[J]. 物理测试,2006,24(2):28-31.
- [8] 严国安,秦 哲,田志红,等. 中碳钙硫易切削钢夹杂物形态控制[J]. 北京科技大学学报,2009,29(7):685-688.
- [9] 徐梦明. 低碳高硫易切削钢带状组织对冷拔材裂纹形成的影响[J]. 特殊钢,2007,28(4):54-55.
- [10] 杨伟宁,徐梦明,常红英,等. 低碳高硫易切削钢裂纹成因分析[J]. 物理测试,2007,25(4):36-40.
- [11] 孙贤文,柳得楷,邵伟然,等. CSP 低碳钢的表面带状组织[J]. 电子显微学报,2003,22(6):558-559.

林腾昌(1986-),男,博士研究生,2008 年太原理工大学毕业,特殊钢工艺开发及质量控制研究。

收稿日期:2013-02-20