结晶器电磁搅拌对矩形坯轧制大规格齿轮钢圆钢碳偏析行为的影响

徐瑞军[1]，颜慧成[2]，吴清明[1]，许伟阳[2]，曹志刚[2]，杨庚朝[1]，
刘　建[1]，刘永龙[1]，仇圣桃[2]

（1. 湖南华菱湘钢股份有限公司，湖南 湘潭 411101；2. 钢铁研究总院国家连铸技术工程研究中心，北京 100081）

摘　要：通过对齿轮钢矩形坯轧制大规格圆钢宏观碳偏析的分析，结合碳含量和低倍组织，研究了不同结晶器电磁搅拌强度时圆钢的碳偏析行为。结果表明，结晶器电磁搅拌扩大连铸坯柱状晶/等轴晶转换界面（CET）框尺寸，提高等轴晶率，但是产生皮下负偏析带，圆钢的偏析变得明显；结晶器电磁搅拌下，齿轮钢矩形坯与圆钢从表面到中心呈现“N”形碳偏析，搅拌强度越大，偏析幅度越大；圆钢同一圆周上，搅拌时 3/4 *R*、1/2 *R* 处极差大，1/4 *R* 处极差小，不搅拌时则相反。连铸坯的 CET 区域与圆钢方框偏析有严格的对应性，说明连铸坯与圆钢的组织与成分存在传承关系。

关键词：齿轮钢；圆钢；轧制；宏观碳偏析；结晶器电磁搅拌；矩形坯
中图分类号：TF777. 2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1004－7638（2012）02－56－06

Effect of M-EMS on Carbon Segregation of Gear Steel Round Bar Rolled from Rectangular Bloom

Xu Ruijun[1], Yan Huicheng[2], Wu Qingming[1], Xu Weiyang[2], Cao Zhigang[2], Yang Genchao[1], Liu Jian[1], Liu Yonglong[1], Qiu Shengtao[2]

(1. Hunan Hualing Xiangtan Steel Co., Ltd., Xiangtan, 411101, China; 2. National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Effect of different M-EMS strength on carbon segregation of gear steel round bar rolled from rectangular bloom is investigated by analyzing the carbon distribution and etched macro-structure. The results show that the CET rectangle is enlarged and equiaxed crystal rate rises with M-EMS, but a band of negative carbon segregation appears under the surface of round bar and the carbon segregation rectangle is apparent in macrostructure. An N-shaped carbon segregation appears from surface to center of the bloom and round bar under M-EMS and the segregation becomes more intensified with stronger stirring. The carbon difference is large at 3/4 *R* circle, 1/2 *R* circle and small at 1/4 *R* circle in same round bar circumference with M-EMS, but reversal without M-EMS. The bloom and round bar are subject to the same carbon segregation rules, and the carbon distribution is strongly related to the etched macrostructure. There is an inherited relation between bloom and round bar in carbon segregation and macrostructure.

Key words: gear steel; round bar; rolling; carbon macrosegregation; M-EMS; rectangular bloom

收稿日期：2011－10－12

0　引言

长期以来,中心碳偏析是一个普遍关注的连铸坯质量问题,产生了大量研究结果,然而连铸坯横截面上的碳均匀性同样影响轧材的性能,如齿轮加工热处理后的热变形[1]。近来有少量关于连铸坯横截面上碳均匀性的研究报道[2-3],并且一定程度上探讨了结晶器电磁搅拌对碳均匀性的影响,但这些探究只涉及连铸坯横截面的一个或者几个方向,而大规格齿轮圆钢加工齿条在整个圆周上,并且齿根大约位于圆钢横截面的 3/4 R ~ 1/2 R 处,其圆周方向的碳成分均匀性直接影响到齿轮的性能。笔者通过对方坯与圆钢横截面低倍与碳偏析进行检测分析,研究了不同结晶器电磁搅拌强度对矩形坯及其轧制大规格圆钢的碳均匀性影响,以利于优化结晶器搅拌参数,提高齿轮产品性能。

1　工艺流程与试验方案

齿轮钢圆钢生产工艺流程为: BOF—LF—VD—CC—加热炉—可逆轧机—精轧机组。生产线主要设备与工艺参数如表 1 所示。

表 1　生产线主要技术参数

Table 1　Parameters of the production line　　mm

连铸机		轧机		
浇铸断面	特征	粗轧	精轧	圆钢规格
300 ×430	直弧形,带液芯多点连续矫直,方板兼用,结晶器电磁搅拌	Ø800 二辊可逆式轧机	四平四立连轧机组	前两炉 Ø110,第三炉 Ø130

为了比较结晶器电磁搅拌的影响,共试验 3 炉并分别采用不同的搅拌形式,试验炉号及工艺条件见表 2。

表 2　试验炉次连铸工艺条件

Table 2　Continuous casting parameters of experimental heats

炉号	过热度/℃	拉速/(m·min^{-1})	电磁搅拌	电流/A	频率/Hz	比水量/(L·kg^{-1})
1722	15	0.7 ~ 0.8	无			0.32
1723	15 ~ 30	0.7	有	200	2.5	0.32
1724	15 ~ 30	0.7	有	400	2.5	0.32

生产中对连铸坯及其轧制的相应大规格圆钢取样进行低倍与碳偏析分析(见表 3),连铸坯样与圆钢取样来自同一支坯,低倍采用酒精硝酸溶液进行腐蚀,碳偏析采用 Ø5 mm 钻头在连铸坯和圆钢横截面上钻屑进行化学分析。利用该横截面上所有点的碳平均值为基准,计算每个点的碳偏析指数,即碳偏析指数由以下公式得到: $R_i = \dfrac{C_i}{\sum_{i=n} C_i/n}$。

表 3　试验炉次 20CrMnTiH 分析试样清单

Table 3　Specimen list of 20CrMnTiH steel in experimental heats

炉号	连铸坯样	圆钢样
1722	第 2 流第 6 支	第 2 流第 6 支(编号 226)
1723	第 2 流第 4 支	第 2 流第 4 支(编号 324)
1724	第 2 流第 4 支	第 2 流第 4 支(编号 424)

2　矩形坯低倍与碳偏析结果

2.1　矩形坯低倍

不同搅拌条件下的三炉连铸坯低倍见图 1 ~ 3。为了与圆钢圆周八个方向碳分布相对应,以连铸坯横截面的几何中心点为中心,以中心到宽面、窄面、角部距离为当量半径,并在当量半径的不同位置处(1/4R、1/2R、3/4R)钻屑取样。中央方框为柱状晶/等轴晶转换界面(CET),右边绘图为柱状晶、等轴晶分布区域实测尺寸,低倍特征见表 4。

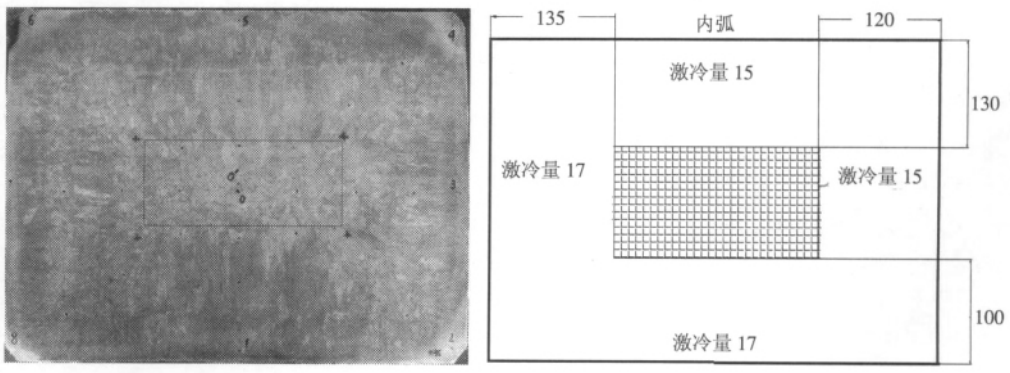

图 1　1722 连铸坯低倍组织、取样钻屑点位置

Fig. 1　Macrostrcture and drilling spots in the continuously cast bloom (heat 1722)

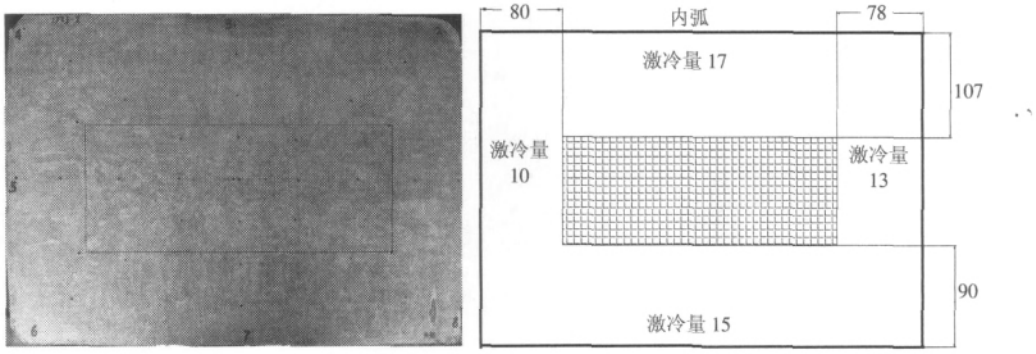

图 2 1723 连铸坯低倍组织、取样钻屑点位置

Fig. 2 Macrostrcture and drilling spots in the continuously cast bloom (heat 1723)

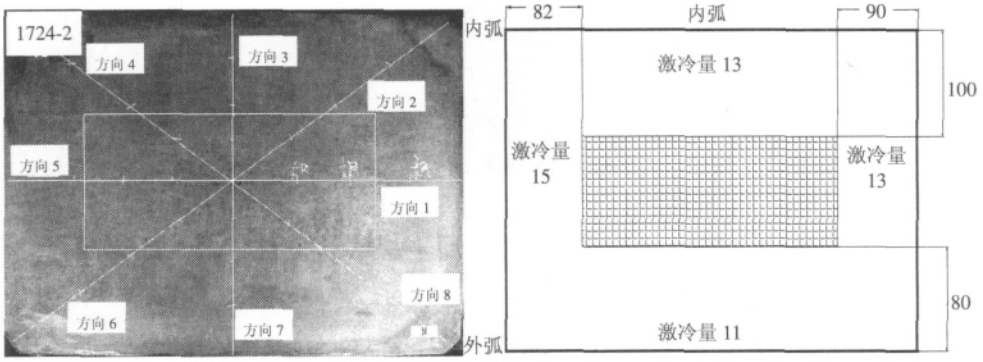

图 3 1724 连铸坯低倍组织、取样钻屑点位置

Fig. 3 Macrostructure and drilling spots in the continuously cast bloom (heat 1724)

表 4 连铸坯低倍特征

Table 4 Features of macrostructure of the continuously cast bloom

炉号	等轴晶率/%	低倍特征
1722	9.5	柱状晶发达,内弧柱状晶较外弧发达; 宽向、窄向柱状晶长度相当
1723	22	内弧柱状晶比外弧发达,宽向柱状晶比窄向明显发达
1724	25	内弧柱状晶比外弧发达,宽向柱状晶比窄向明显发达

2.2 连铸坯碳偏析结果

在连铸坯低倍的八个方向的 3/4*R*、1/2*R*、1/4*R* 的当量半径点、CET 界面、半个周边皮下 10 mm 点、横截面几何中心点分别钻屑取样。三炉连铸坯碳偏析结果见图 4,等当量半径上 8 个点碳含量平均值与极差(最大值、最小值之差) 见表 5。

碳偏析数据表明:

1) 1722、1723、1724 三炉连铸坯横截面碳含量逐渐提高,这与其中包碳含量逐渐提高一致;

2) 由平均碳含量看,从表面到中心,1722 炉变化小,皮下 10 mm 处、1/4*R* 处和 1/2*R* 处碳含量相当(1/4*R* 在 CET 区) ,3/4*R* 处在柱状晶区域,碳含量最高; 而 1723、1724 炉总体呈现字母 N 形,即皮下 10 mm 为负偏析,1/2*R*、3/4*R* 处为正偏析,等轴晶区(1/4*R* 处) 为负偏析,中心呈正偏析;

3) 同一圆周的碳偏析极差看,1722 炉由于个别方向碳含量奇异,导致碳偏析极差大; 1723、1724 炉除 1/4*R* 处碳含量极差稍大外,其余周向碳含量极差较小; 1723 炉极差比 1724 炉小; 在结晶器电磁搅拌条件下,搅拌越强,周向偏析极差越大。

4) CET 区域碳含量(1723 炉数据) 表明该区域碳含量明显偏高。

3 大规格圆钢的低倍与碳偏析结果

先进行圆钢低倍酸洗,然后在三个圆钢低倍上的几何中心点均匀往外 8 个方向,取 3/4*R*、1/2*R*、1/4*R* 半径点、4 个方向皮下 5 mm,分别钻屑分析碳含量(见图 5) 。

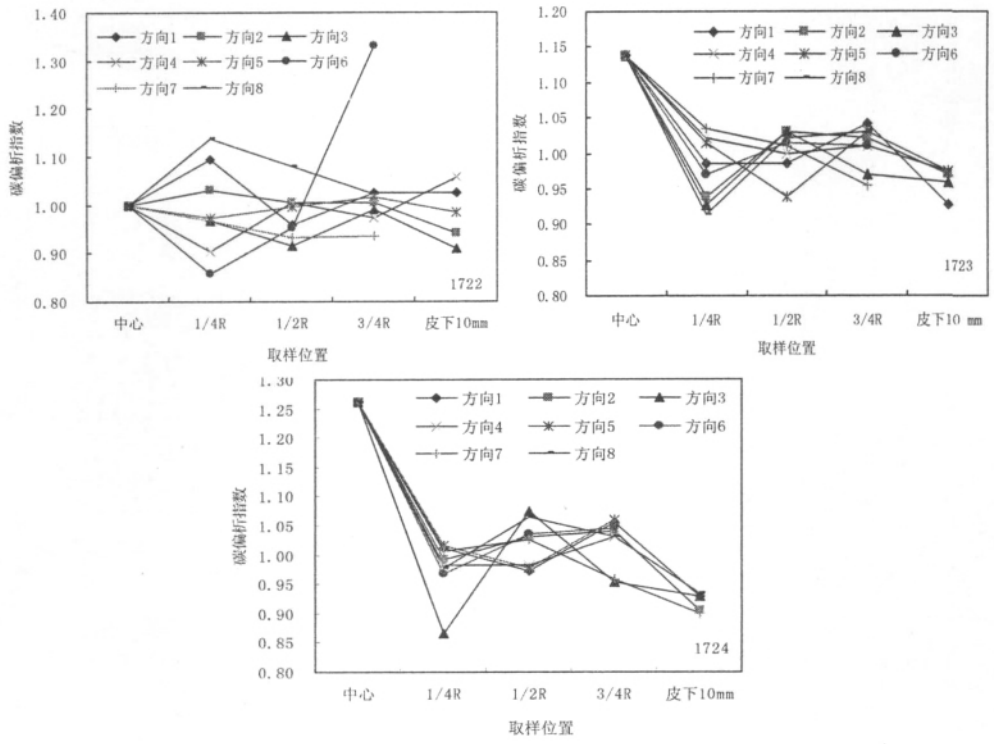

图 4　连铸坯横截面碳偏析结果

Fig. 4　Carbon segregation in the cross section of continuously cast bloom

表 5　连铸坯碳含量分布情况

Table 5　Carbon distribution of continuously cast bloom　%

炉号		中心	1/4*R*	1/2*R*	3/4*R*	皮下 10 mm	CET
1722	平均	0.19	0.189	0.186	0.197	0.187	
	极差	0	0.053	0.031	0.075	0.028	
1723	平均	0.223	0.191	0.197	0.198	0.188	0.206
	极差	0	0.024	0.018	0.017	0.009	
1724	平均	0.258	0.2	0.209	0.209	0.188	
	极差	0	0.031	0.019	0.022	0.007	

3.1　圆钢的低倍

三个低倍中，方框为中心偏析框，工艺不同，偏析框明晰程度有差异，偏析框呈矩形，矩形长度方向对中心基本对称，宽度方向对中心则不对称，可能与铸态组织内外弧柱状晶长度的差异有关。1722 炉圆钢偏析框很弱并且较小，而后两炉则比较明显，可能与结晶器电磁搅拌有一定的影响。

3.2　圆钢碳偏析结果

三炉圆钢的碳含量与碳偏析结果分别见表 6 和图 6。

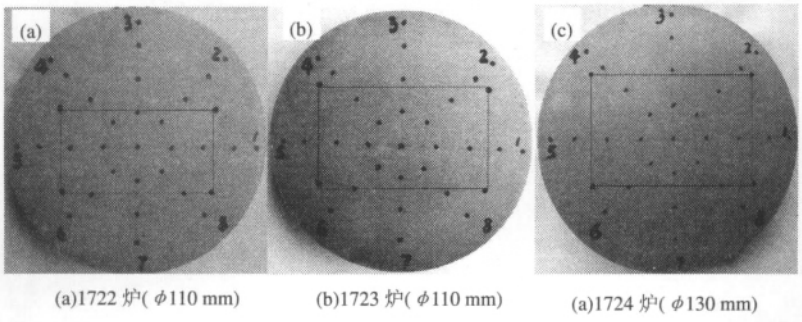

图 5　各炉轧材低倍组织及取样位置分布

Fig. 5　Macrostrcture and drilling spots in round bar

1) 1722 炉的圆钢样(226) 特点: 1/2*R*、3/4*R* 处碳含量极差很小,1/4*R* 处极差大; 皮下 5 mm 处、1/4*R* 处无负偏析现象,整个横断面碳比较均匀,与圆钢偏析框不是很明显的现象一致;

2) 1723 炉的圆钢样(324) 特点: 1/4*R*、1/2*R*、3/4*R* 处碳含量极差很小; 皮下 5 mm 处、1/4*R* 处存在负偏析现象,中心为正偏析。

3) 1724 炉的圆钢样(424) 特点: 1/2*R*、3/4*R* 处碳含量极差大; 1/4*R* 处碳偏析极差小; 皮下 5 mm 处、1/4*R* 处存在负偏析现象,中心为正偏析。

表 6 圆钢碳含量分布结果

Table 6 Carbon distribution of round bar %

炉号(样号)		中心	1/4*R*	1/2*R*	3/4*R*	皮下 5 mm
1722(226)	平均	0.178	0.183	0.183	0.189	0.186
	极差	0	0.033	0.017	0.015	0.012
1723(324)	平均	0.207	0.187	0.198	0.197	0.187
	极差	0	0.013	0.019	0.022	0.004
1724(424)	平均	0.228	0.2	0.214	0.213	0.187
	极差	0	0.018	0.028	0.031	0.022

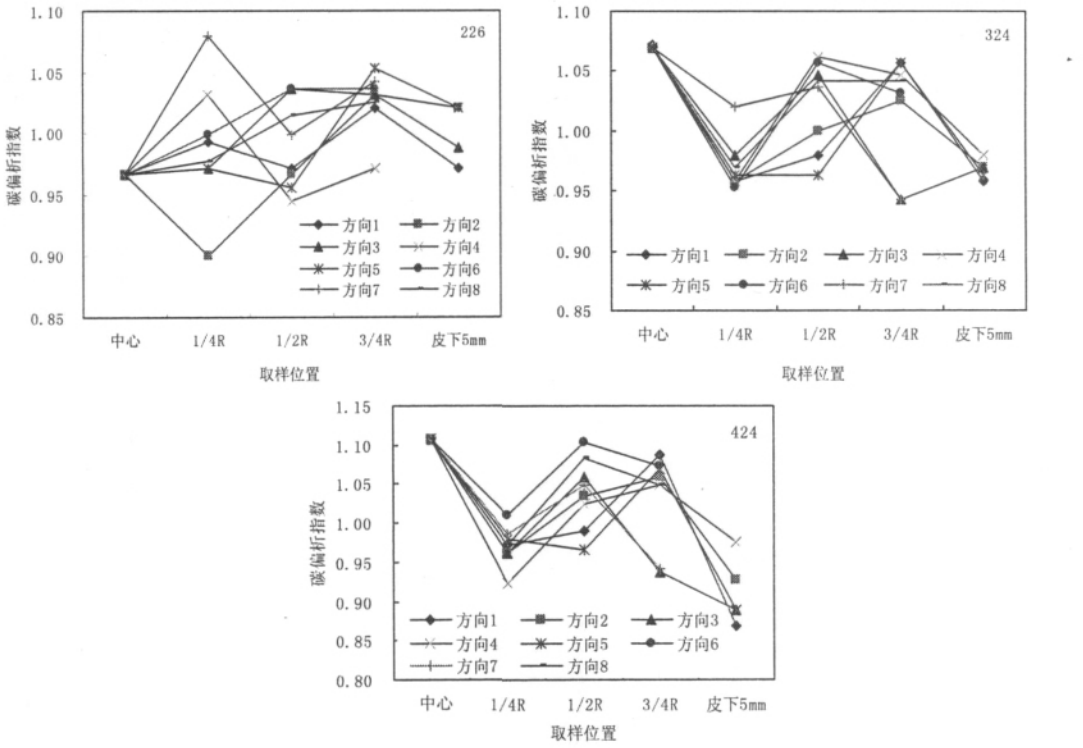

图 6 圆钢横截面碳分布

Fig. 6 Carbon distribution in the cross section of round bar

4 分析与讨论

4.1 电磁搅拌对低倍组织的影响

结晶器电磁搅拌会促使柱状晶方向发生偏移,皮下出现程度不同的亮带(表现为碳负偏析); CET 界面是一个矩形框,不搅拌时柱状晶发达,等轴晶率只有 9.5%,窄向柱状晶也很发达,此时矩形框长宽比为 2.6; 搅拌时,促进了等轴晶率的提高,在 20% ~25%,但是 200 A、400 A 时等轴晶率没有明显差异,400 A 时 CET 框长宽比 2.2,说明搅拌加强使得温度更加均匀,从而减小 CET 框的长宽比。

与连铸坯低倍相对应,轧制圆钢低倍特征为: 不搅拌时偏析框很弱,搅拌时有明显的碳偏析方框。

4.2 结晶器电磁搅拌对碳偏析的影响

1722 炉不搅拌时,从表面往中心碳成分波动较小; 1723、1724 两炉在有搅拌条件下,碳成分从外往里均呈现字母“N”形,即皮下负偏析、柱状晶及 CET 区正偏析、等轴晶区负偏析、中心正偏析的规律性,除中心外,CET 界面碳含量最高。关于电磁搅拌引起碳负偏析机理已有大量报道[3],在此不再赘述。

在同半径圆周上,不搅拌时 3/4*R*、1/2*R* 处极差小,1/4*R* 处极差大,而搅拌时则正好相反。这是由于电磁搅拌的作用,使得等轴晶区扩大,CET 矩形框变大,其结果导致外围(CET 区域以外区域)的同半

径上碳成分无法均匀,如 1/2*R* 圆周上点有的在框内、有的在框外; 并且随着搅拌电流的增加(搅拌电流从 200 A 到 400 A) ,皮下负偏析加剧,会导致 3/4*R* 圆周碳极差加剧,使得外围碳偏析极差存在加剧现象。当然在不搅拌时,由于选分结晶,最后在等轴晶区域出现碳含量极差增加和中心正偏析,就比较容易理解了。连铸坯与轧制圆钢呈现相同的碳偏析特征。

对于齿轮钢而言,加工成齿后热处理变形的主要原因是横截面碳成分不均匀,而切齿位置正好在材料外围,因此电磁搅拌强度不宜过高。

4.3　连铸坯与轧材组织与碳偏析的传承关系

从前面结果,连铸坯低倍存在 CET 界面,其上面碳偏析特征与低倍存在对应性; 圆钢低倍存在碳偏析框,圆钢上碳偏析与低倍呈现很好的对应性; 这些结果表明低倍与碳偏析规律之间存在一致性。

以连铸坯的 CET 与圆钢碳偏析方框为标志,结合连铸坯与圆钢的整个横截面碳偏析特征,说明连铸坯与轧制圆钢之间在组织与成分上存在传承关系。将连铸坯与对应轧制圆钢的碳偏析含量在各方向的平均值列于图 7 中,两图趋势非常相似,424 圆钢样(1724 炉) 碳含量最高; 226 钢样(1722 炉) 碳含量低,从表面往中心变化小; 324、424 两个样在圆钢不同位置上表现相同的趋势,中心为正偏析,皮下、1/4*R*为碳含量低,1/2*R*、3/4*R* 呈现较高的正偏析。这种和连铸坯样严格的相似性说明其碳偏析来源于连铸坯。

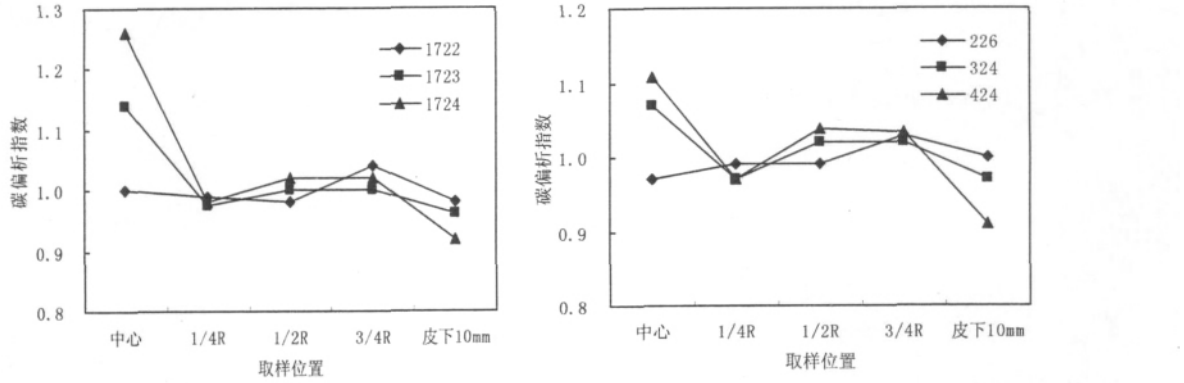

图 7　连铸坯与轧材偏析指数比较

Fig. 7　Comparison of carbon distribution between the continuously cast and round bar under different M-EMS condition

5　结论

1) 结晶器电磁搅拌扩大连铸坯 CET 框尺寸,提高等轴晶率,但是产生皮下负偏析带,轧制圆钢的偏析框变得明显。

2) 结晶器电磁搅拌使得齿轮钢大方坯与圆钢从表面到中心呈现“N”形碳偏析,搅拌强度越大,偏析幅度越大; 同一圆周上,搅拌时 3/4*R*、1/2*R* 处极差大,1/4*R* 处极差小,不搅拌时则相反。

3) 连铸坯的 CET 区域与圆钢方框偏析有严格的对应性,说明连铸坯与圆钢的组织与成分存在传承关系。

4) 生产齿轮钢大规格圆钢时,大方坯结晶器电磁搅拌强度要适中。

参考文献

[1] Ren Yuanhe. Effect of metallurgical factors on hardenability of pinion steel [J]. Steelmaking,1995,11(12):16 - 19.
(任元和. 冶金因素对齿轮钢淬透性的影响 [J]. 炼钢,1995,11(12):16 - 19.)

[2] Wu Xiaolin, Wang Fuming, Huang Xiaoxing, *et al*. Effect of mould elecetromagnetic stirring on segregation of medium-carbon steel [J]. Steelmaking,2005,21(5):21 - 23.
(吴小林 ,王福明,黄晓星,等. 结晶器电磁搅拌对中碳钢成分偏析的影响 [J]. 炼钢,2005, 21(5):21 - 23.)

[3] Li Guozhong, Chen Feng, Chen Weiqing, *et al*. Effect of mould electromagnetic stirring on carbon segregation of medium carbon continuous casting bloom [J]. Steelmaking,2008,24(1):40 - 43.
(李国忠,陈峰,陈伟庆,等. M-EMS 对中碳钢连铸方坯碳偏析的影响 [J]. 炼钢, 2008, 24(1):40 - 43.)

编辑　杨冬梅