不同轧制方式下TC4轧管变形分析*

史佳新[1],余 伟[1],米永峰[3],董恩涛[1,2],李明辉[1]

(1. 北京科技大学工程技术研究院,北京 100083;
2. 钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 采用ABAQUS模拟软件模拟了PQF轧机、Accu轧机、Assel轧机轧制TC4钛合金管坯的过程,分析轧制过程的截面形状、温度、应力、应变的变化。结果表明:PQF轧机轧制TC4无缝管过程中截面形状较Accu和Assel轧机轧制TC4无缝管时截面形状变化小,尺寸精度高;Accu轧机和Assel轧机轧制过程中应力分布较PQF轧机复杂;采用3种方式轧制时,壁厚内侧金属应变较外侧大;Accu和Assel轧机轧制时间短,温度下降较PQF轧机小。

关键词: TC4无缝管;轧制方式;热轧;变形分析
中图分类号: TG339 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)04-0042-06
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.04.011

Deformation Analysis for TC4 Rolled Tube with Different Rolling Routes

Shi Jia-xin[1], *Yu Wei*[1], *Mi Yong-feng*[3], *Dong En-tao*[1,2], *Li Ming-hui*[1]

(1. *Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*;
2. *Collaborative Innovation Center of Steel Technology, Beijing* 100083, *China*;
3. *Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The process of rolling the TC4 titanium alloy tube blank with the PQF rolling mill, Accu rolling mill and Assel rolling mill was simulated by ABAQUS simulation software as well as the changes of section form, temperature, stress and strain in rolling process were analyzed. The results showed that the change of section form in the process of rolling TC4 seamless tube with PQF rolling mill was smaller than that in the process of rolling TC4 seamless tube with Accu and Assel rolling mills as well as the dimension precision was higher; the stress distribution in the rolling process with Accu and Assel rolling mills was more complicated than that in the rolling process with PQF rolling mill; the metal strain of inside wall thickness was larger than that of outside wall thickness when the three rolling routes were adopted; the temperature reduction with Accu and Assel rolling mills was smaller than that with PQF rolling mill because of the short rolling time.

Key words: TC4 seamless tube; rolling route; hot rolling; deformation analysis

钛是20世纪50年代发展起来的一种重要的结构金属,钛及其合金具有密度小,比强度、比刚度高,抗腐蚀性能、高温力学性能、抗疲劳和蠕变性能好等优良的综合性能,被誉为继钢铁、铝材之后处于发展

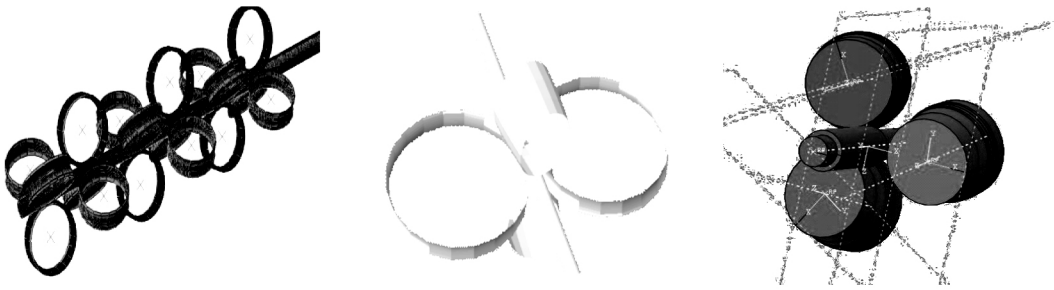
* 收稿日期:2019-06-05
作者简介:史佳新(1992-),男,辽宁省锦州市人,在读博士,主要从事塑性变形仿真研究。

中国知网 https://www.cnki.net

中的“第三金属”和“战略金属”[1]。钛合金无缝管相比于焊管的性能均匀，无焊缝等性能薄弱区，使用更加安全，如在航空液压管路系统、火箭发动机管件和石油套管等其他重要装备上要大量使用无缝管材。目前钛无缝管材的研制不断向高性能化、低成本化、功能化发展，利用有限元软件对成型过程进行模拟以实现对现有设备和工艺的优化，提高质量和成材率是一种很重要的趋势[2]。对于钛合金无缝管的制备加工目前已有许多研究，其中热轧是当前普遍采用的方法，相比于挤压工艺，其可显著简化流程，提高生产效率[3-4]。目前，PQF 轧机，Accu 轧机，Assel 轧机等热轧管设备的使用较为广泛[5]，Assel三辊轧管机和 Accu Roll 二辊轧管机具有装备简单、工艺灵活、投资少、轧制精度高、产量适中的特点[6]。PQF 轧机以其高质量、高产量和高技术水平等系列优点成为当今热轧无缝管生产技术的主流。本文通过有限元模拟的方法探究了 PQF 轧机、Accu 轧机、Assel 轧机轧制 TC4 无缝管的过程，分析轧制过程中的温度、应力、应变的变化，探索不同轧制方式轧制 TC4 无缝管的变形行为，分析对比 PQF 轧机，Accu 轧机，Assel 轧机轧制 TC4 无缝管的优缺点，为 TC4 无缝管轧制方法的确定提供依据。

1　模拟条件

模拟所用的材料为 TC4。模拟轧制时，轧制工具(轧机、轧辊等)的温度设定为 200 ℃恒温，轧制工具在轧制过程中设定为刚体，不考虑在轧制过程中发生的变形。



(a) PQF轧机；　(b) Accu轧机；　(c) Assel轧机

图 1　轧制方式示意图

如图 1(a)所示，采用 PQF 轧机轧制外径 206 mm、壁厚 16 mm 的无缝管坯料。如图 1(b)所示，采用 Accu 轧机轧制外径 232 mm，壁厚 14 mm 的无缝管坯料，轧辊间距是 212 mm，导盘间距 233 mm，芯棒的直径是 190 mm。如图 1(c)所示，采用 Assel 轧机轧制外径 163 mm，壁厚 19 mm 的无缝管坯料。轧辊表面与轧制中心线的最小距离为 75 mm，芯棒直径为 120 mm。

2　结果与分析

2.1　PQF 轧机轧制 TC4 无缝管时变形分析

轧前外径 206 mm，壁厚 16 mm，内径 174 mm，轧制出口方向速度为 2.5 m/s，单元的运动速度约为 2.5 m/s，轧后外径 185 mm，外径偏差(最大外径 - 最小外径)为 3 mm，外径偏差 1.6%，轧后壁厚 7 mm，轧后壁厚偏差(最大壁厚 - 最小壁厚) 0.82 mm，壁厚偏差 11.7%。

在热连轧过程中，选取典型单元研究典型单元在热连轧过程中的温度、应力、应变等参数的变化，典型单元的选取如图 2 所示。

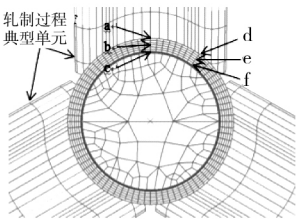


图 2　典型单元示意图

第一道次出口和第四道次出口的截面的温度云图如图 3 所示，典型单元在轧制过程中的温度变化如图 4 所示。与轧辊接触时，接触位置温度下降，塑性变形导致壁厚中心处金属出现温度升高。典型单元 a、b、c 所在的位置在轧制过程中的最高温度出现在第三道次轧制时，最高温度为 940 ℃，位置是壁厚

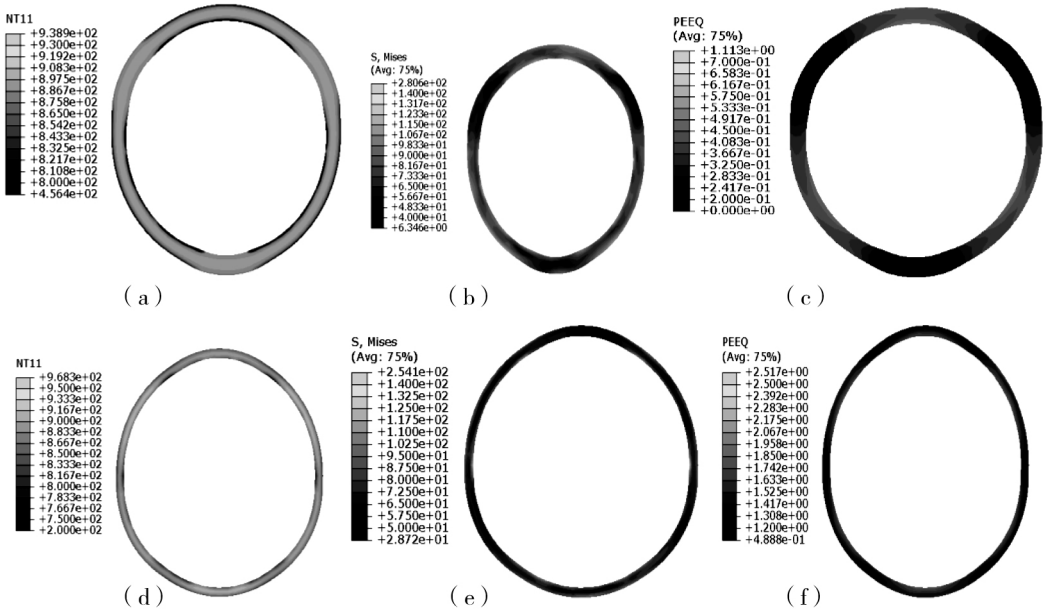
中国知网　https://www.cnki.net

中心(典型单元b),最低温度出现在第三道次且为760 ℃,位置是内表面(典型单元c)。典型单元d、e、f所在的位置在轧制过程中的最高温度出现在第四道次轧制且为950 ℃,位置是壁厚中心(典型单元e),最低温度出现在第二道次且为700 ℃,位置是内表面(典型单元f)。

根据图2的云图外形可以得知,轧管轧制变形过程中,截面形状都近似于圆形,在不与轧辊接触的位置出现部分凸起,轧制道次越多,整体形状近似圆形。

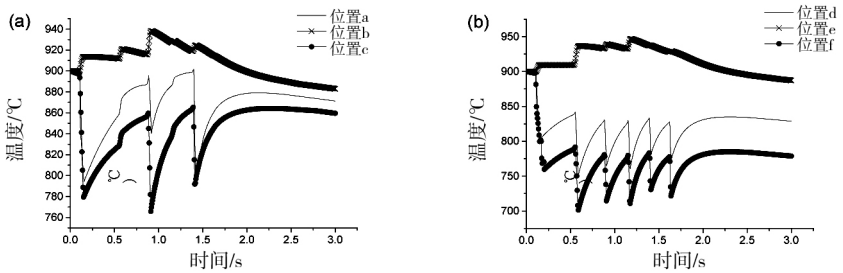
第一道次出口和第四道次出口截面的应力云图如图3所示,应力最大值位置主要集中在表面,典型单元a、d的应力变化如图4所示。a点的纵向在奇数道次的时候存在拉应力,其拉应力值约为200 MPa;每一道次轧后的a点和d点的纵向应力并不相同,轧管各部分变形的程度不相同,导致局部存在拉应力和压应力,即使在第六道次也没有达到完全的应力一致。其波动范围在±150 MPa以内。相比于纵向应力,周向和轴向的轧后应力的波动比较小。

第一道次出口和第四道次出口截面的累积应变分布云图如图3所示,典型单元a、d的应力变化如图5所示。应变较大的位置是本道次孔型顶点所对应的金属截面的靠近内表面的位置。从图5也可以看出内表面的应变值大于外表面的应变值,孔型顶端所对应的金属的内外表面(即单元c和单元a)应变差别比较大,而孔型侧壁所对应金属内外表面(即单元f和单元d)应变差值较小。



(a)第一道次的温度云图;(b)第一道次的应力云图;(c)第一道次的应变云图;
(d)第四道次的温度云图;(e)第四道次的应力云图;(f)第四道次的应变云图

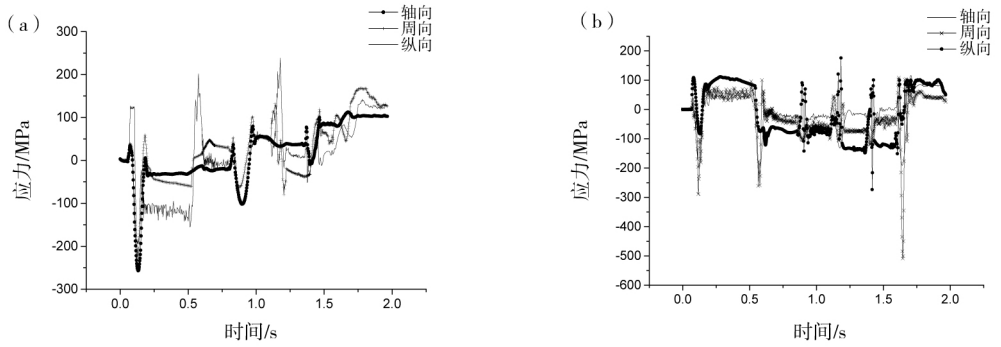
图3 轧制过程中的轧件截面云图



(a)典型单元a,b,c温度变化曲线;(b)典型单元d,e,f温度变化曲线

图4 轧件断面不同位置的的温度曲线

中国知网 https://www.cnki.net



(a) 为单元 a 的应力变化曲线;(b) 为单元 d 的应力变化曲线

图 5　轧制过程相关节点应力变化曲线

2.2　Accu 轧机轧制 TC4 无缝管时变形分析

轧前外径 232 mm,壁厚 14 mm,内径 204 mm,轧制出口方向速度为 0.3 m/s,单元的运动速度约为 2 m/s,轧后外径 231 mm,外径偏差(最大外径 - 最小外径)为 22.8 mm,外径偏差 9.87%,轧后壁厚 11.2 mm,轧后壁厚偏差(最大壁厚 - 最小壁厚)1.3 mm,壁厚偏差 11.61%。

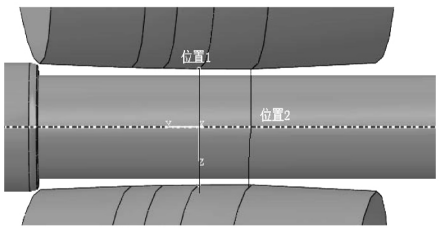
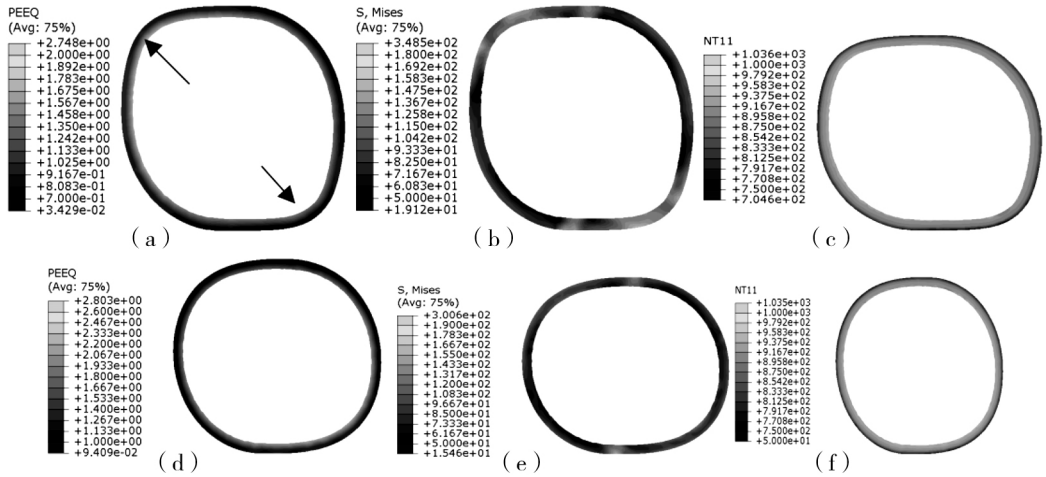


图 6　应力云图、应变云图、温度云图的截面所在位置示意图

云图截面位置示意图如图 6 所示,云图的结果如图 7 所示。随着轧制过程的进行,坯料由原本的圆形,变成一个有约束的近似方形,如图 7 中位置 1 的云图(a)、(b)、(c)所示,图 7(a)中箭头所示位置的内表面的温度、应变最大,因为此时该处内表面发生变形,而且不与芯棒接触,温度升高,此处也存在应力分布较大的位置,但是整体的应力分布较为复杂,存在多处应力较大值的位置。图 7 中位置 2 的云图(d)、(e)、(f)所示内壁的温度和应变较高,应力较大值的位置是图 7(a)中箭头所示位置,控制好箭头所示位置的变形程度有利于轧制的顺利进行,获得良好的轧后尺寸。

轧制过程中壁厚方向温度变化曲线如图 8 所示,在此条件下轧制过程中最低温度 780 ℃。



(a) 位置 1 的应变云图;(b) 位置 1 的应力云图;(c) 位置 1 的温度云图;
(d) 位置 2 的应变云图;(e) 位置 2 的应力云图;(f) 位置 2 的温度云图

图 7　所述位置正常轧制时的云图

中国知网　https://www.cnki.net

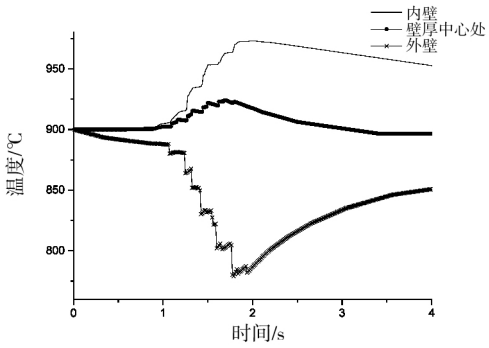


图8 Accu 轧机轧制时壁厚方向温度变化曲线

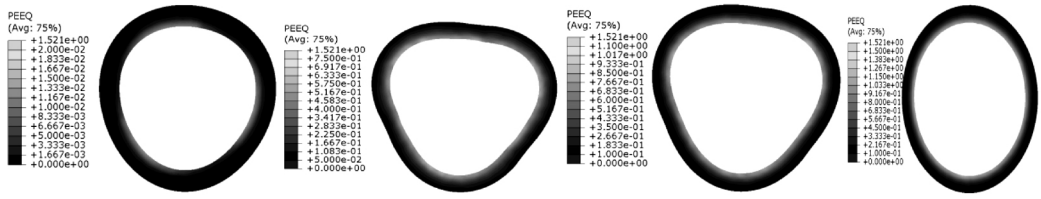
2.3 Assel 轧机轧制 TC4 无缝管时变形分析

轧前外径 163 mm，壁厚 19 mm，内径 135 mm，轧制出口方向速度为 0.8 m/s，单元的运动速度约为 3 m/s，轧后外径 166 mm，外径偏差(最大外径 - 最小外径)为 28 mm，外径偏差 16.8%，轧后壁厚 16.2mm，减壁量较小，轧后壁厚偏差(最大壁厚 - 最小壁厚)0.9 mm，壁厚偏差 5.5%。

轧制过程分为四段，依次为咬入段、减壁段、均整段和转圆段，在每一个轧制段内取一个该截面的等效应变云图如图 9 所示，应力云图如图 10 所示。

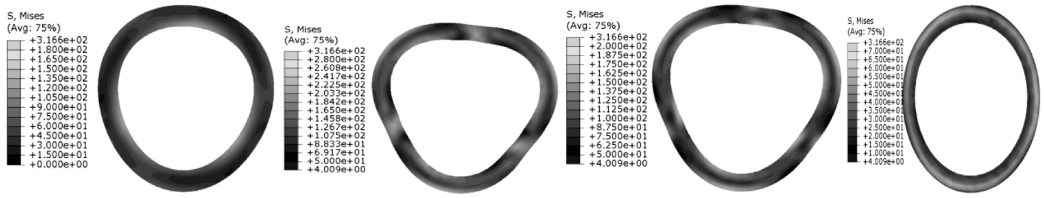
图 9(d)轧制转圆段的截面云图可以明显看出，总体上沿径向由内向外等效应变逐渐降低。由(a)、(b)、(c)、(d)四个阶段的截面云图，也可以直观看出轧件的变形规律，由轧件原本的圆形，逐渐变成三角形，同时伴随着壁厚的减薄，最后又转变回圆形。

图 10(a)表明在轧件被稳定咬入阶段，三个轧辊的挤压使轧件开始与芯棒接触，接触部分应力较大。随着轧制的进行，到达(b)减壁段，在轧件与三个轧辊接触的区域，以及轧件向三个辊缝处凸起的区域，应力较大。在(c)均壁段处，依然是这些区域的应力值较大。到达(d)转圆段，轧件逐渐开始脱离芯棒，但轧件的外表面与三个轧辊仍然有接触，在它们接触的区域应力值较大。



(a)咬入段 (b)减壁段 (c)均壁段 (d)转圆段

图9 轧制过程应变云图



(a)咬入段 (b)减壁段 (c)均壁段 (d)转圆段

图10 轧制过程应力云图

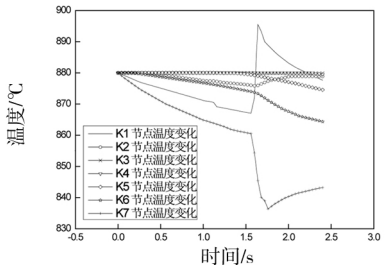


图11 k1 - k7 节点温度变化曲线

截面沿径向平均取 7 个节点，由内向外依次为 K1、K2、K3、K4、K5、K6、K7。K1 - K7 节点的温度变化如图 11 所示，开始时，节点所在截面并未进行轧制，在热辐射和热对流的作用下温度有所下降，处于壁厚减薄区时，轧件有了较大的变形，最内层节点 K1 由于变形生成热大于与芯棒间热传导散失的热量，温度上升，之后由于热传导的作用，K1 温度逐渐下降。最外层节点 K7 由于与轧辊接触，温度下降，

中国知网 https://www.cnki.net

之后脱离轧辊后内层又向其传热，温度逐渐升高。

3　结论

(1) Accu 轧机轧制 TC4 无缝管时截面先逐渐靠近方形，然后逐渐归圆; Assel 轧机轧制 TC4 无缝管时，截面形状先靠近三角形，然后逐渐归圆。相比于 Accu 和 Assel 轧机，PQF 轧机轧制 TC4 无缝管时，由于孔型限制，截面形状均比较近似于圆形。

(2) 轧制时温度变化与接触传热、摩擦生热、塑性功生热、轧制参数等因素有关，内壁温度较高的原因与摩擦生热有关，壁厚中心处温度升高的原因主要与塑性变形有关。由于 Accu 轧机与 Assel 轧机轧制过程时间短，所以温度下降较 PQF 轧机小。

(3) Accu 轧机和 Assel 轧机的应力分布较为复杂，轧制过程中多处位置均存在应力较大值。其应力分布较 PQF 轧机复杂。采用 3 种方式轧制时，内侧金属的应变较外侧金属的应变大。

(4) PQF 轧机相比于 Accu 和 Assel 轧机轧制无缝管时尺寸精度高，截面形状变形程度小，出口速度快。

参　考　文　献

[1] GUPTA K, LAUBSCHER R F. Sustainable machining of titanium alloys: A critical review [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(14): 2543 - 2560.

[2] 余志远，于振涛，刘汉源，等. 钛合金无缝管材的研制与应用现状 [J]. 热加工工艺，2018，(09): 6 - 9.

[3] 李永林，袁红军，朱宝辉，等. TA18 钛合金斜轧管坯组织与性能研究 [J]. 钛工业进展，2014，(05): 23 - 27.

[4] 赵彬，曾卫东，赵永庆. 加工方法对高强钛合金管坯组织性能的影响 [J]. 热加工工艺，2008，(04): 23 - 25.

[5] 成海涛，李赤波，李晓. 轧管工艺技术(I)——《热轧无缝钢管实用技术》[J]. 钢管，2019，(01): 78 - 83.

[6] 张良夫. 浅谈 Assel 轧管机与 Accu Roll 轧管机的性能对比 [J]. 钢管，2008，(01): 57 - 59.

(上接第 41 页)

由图 4 和表 5 可知，沿内弧方向距离中心点 100 mm 处为最大正偏析点，偏析指数达到 1.17; 沿内弧方向距离中心点 190 mm 处为最大负偏析点，偏析指数为 0.82; 而试验工艺最大正偏析点偏析指数为 1.10，最大负偏析点偏析指数为 0.87。

距离中心点 -50 ~ +50 mm 范围内，两种工艺碳偏析度变化幅度较小，无明显差别。距离中点 50 ~ 160 mm范围内正偏析度对比: 原工艺有 4 个点位偏析度达到 1.12 以上，最高达到 1.17; 而实验工艺除 +90 mm 点位偏析度为 1.1 外，其他点位正偏析度接近 1，几乎不存在正偏析。距离中点 160 ~ 210 mm范围内负偏析度对比: 原工艺相同点位负偏析度均小于试验工艺，变化较明显。

试验结果表明，结晶器电磁搅工艺采用“正反转交替模式”其相对于原有工艺碳偏析指数变化幅度明显减小，碳偏析指数变化趋势曲线趋于平缓，碳偏析情况得到明显改善。

4　结论

(1) 包钢 1# 铸机 Φ430 mm 断面通过改变结晶器电磁搅拌转动模式的工艺改进，铸坯中心等轴晶比率提高了 12.59 个百分点，达到优化铸坯内部组织结构、改善铸坯内部质量的效果。

(2) 试验结果表明，通过工艺优化，Φ430 mm 铸坯横断面碳偏析现象明显改善，铸坯不同位置成分的均匀性得到提高。

参　考　文　献

[1] 吴存有，周月明，候晓光. 电磁搅拌技术的发展 [J]. 世界钢铁，2010，(2): 36 - 41.

[2] 李春龙，姜茂发，王宝峰. 组合电磁搅拌对连铸大方坯内部质量的影响 [J]. 东北大学学报，2003，24(7): 34 - 37.

[3] 韩春鹏，张怀军，钱静秋. Φ210 mm 断面末端电磁搅拌的应用研究 [J]. 包钢科技，2015，(3): 28 - 29.

中国知网　https://www.cnki.net