

## AISI1008 圆钢混晶原因分析及有限元模拟和工艺改进

万文华 徐乐钱 沙鹏飞 左锦中 林俊 刘宇

(中天钢铁集团有限公司技术中心,常州 213011)

**摘要** 在棒材线轧制锻造爪机用 AISI1008 钢时,出现混晶现象,Φ50 mm 棒材边缘铁素体晶粒度 3 级,1/2 半径及心部铁素体晶粒度 8 级,通过对钢材进行金相组织及电镜检验,对轧制过程温度及等效应变利用 Deform 软件进行有限元模拟,发现造成圆钢边缘晶粒粗大的原因与终轧温度过低及轧制等效应变大且分布不均有关,将终轧温度由原 820 ℃ 提高至 880 ℃,成功改善了圆钢横截面混晶现象。

**关键词** AISI1008 钢 混晶 终轧温度 等效应变 有限元模拟

## Analysis and Finite Element Simulation of Mixed Grain of Round Steel AISI1008 and Process Improvement

Wan Wenhua, Xu Leqian, Sha Pengfei, Zuo Jinzhong, Lin Jun and Liu Yu  
(Technology Center, Zenith Steel Group Co Ltd, Changzhou 213011)

**Abstract** During rolling steel AISI1008 for claw machine in rolling line of steel bar, the mixed crystal phenomenon occurs. The ferrite grain size rating at the edge, 1/2 radius and center of Φ50 mm rolled bar is respectively 3, 8 and 8. Through metallographic and electron microscopic examination of round steel, the finite element simulation of finish rolling temperature and equivalent strain is carried out by using Deform software. It is found that the cause of coarse grain size at the edge of round steel is related to the low finish rolling temperature and the large equivalent strain during rolling. With improvement measures to increase the finish rolling temperature from 820 ℃ to 880 ℃, the uniformity of section grain size of round steel is successfully improved.

**Material Index** Steel AISI1008, Mixed Crystal, Finishing Rolling Temperature, Equivalent Strain, Finite Element Simulation

AISI1008 圆钢用于生产汽车发电机爪极,爪极是汽车发动机的关键部件,其形状和导磁性能直接影响感应交流电动势的波形和交流发电机的发电能力<sup>[1]</sup>,所以后道用户对钢材质量的要求很高,若圆钢有混晶现象,冷加工由于晶粒遗传性<sup>[2-3]</sup>会造成爪极晶粒不均,影响导磁性能造成不良影响。针对在首次生产 AISI1008 圆钢时出现的圆钢边缘晶粒粗大、心部晶粒细小的现象,通过对其不同部位金相组织及扫描电镜形貌进行分析,使用有限元软件对穿水及轧制进行模拟,从而提出了改善混晶组织的措施。

### 1 前期生产情况及混晶现象

原始坯料尺寸及各道次料型尺寸见表 1。原始坯料尺寸 220 mm × 260 mm,经 17 架轧机轧制成品

尺寸 Φ50 mm。钢坯加热采用四段式步进式加热炉,其中预热段温度 810 ℃,加热一段温度 1 050 ℃,加热二段温度 1 200 ℃,均热段温度 1 180 ℃,总加热时间控制在 200 ~ 210 min。为细化晶粒,提升产品塑性,生产时使用 7 个水箱中的 3<sup>#</sup>及 4<sup>#</sup>水箱穿水,控制终轧温度 800 ~ 820 ℃。

AISI1008 圆钢化学成分(%)为 0.09C, 0.35Si, 0.67Mn, 0.005P, 0.007S。

由图 1(a)(b)(c)可知,低温轧制的 Φ50mm AISI1008 钢边缘组织晶粒粗大,为 150 ~ 190 μm,并且铁素体晶粒内部有很多黑色点状物,1/2 半径及心部晶粒相对细小,为 20 ~ 30 μm。

AISI 1008 圆钢边缘组织粗大,铁素体晶粒度 3

表 1 原始坯料及轧制各道次料型尺寸/mm  
Table 1 Shape size of original billet and each pass of rolling/mm

原始坯料	道次												KOCKS 减定径机组				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
220 × 260	208 × 240	228 × 168	170 × 186	198 × 125	148 × 149	161 × 116	125 × 128	146 × 81	96 × 96	116 × 61	74 × 74	85 × 54	62 × 61	57 × 58	54 × 55	51 × 52	50 × 50

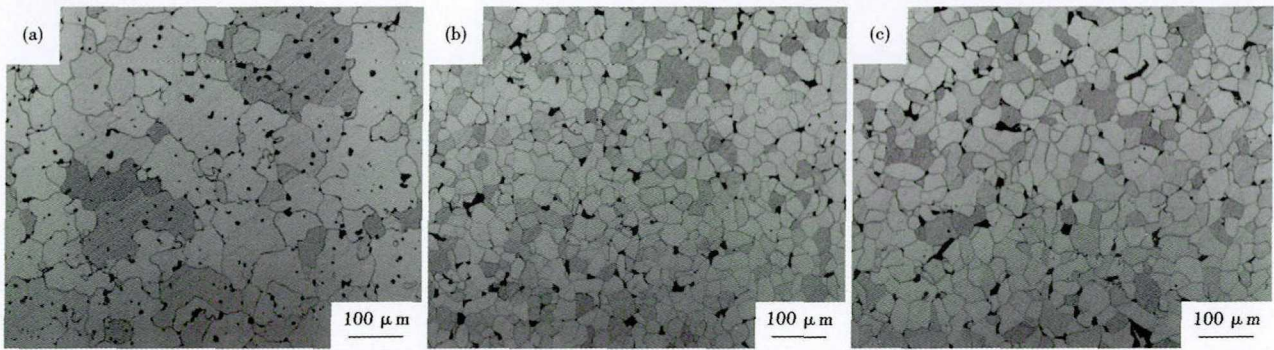


图 1 Φ50 mm AISI1008 圆钢边缘 (a), 1/2 半径 (b), 心部 (c) 的金相组织  
Fig. 1 Metallographic structure at edge (a), 1/2 radius (b) and center (c) of Φ50 mm AISI1008 round steel

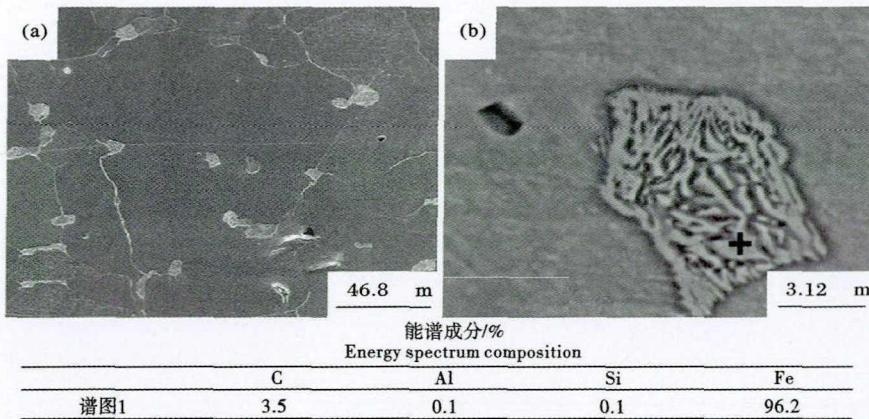


图 2 晶内黑色物质扫描电镜形貌和能谱分析  
Fig. 2 SEM morphology of black substance in crystal and energy spectrum analysis

$$\sigma_s \propto F(\dot{\epsilon}, \epsilon, T) \quad (1)$$

式中:  $\sigma_s$ -变形抗力;  $T$ -变形温度;  $\epsilon$ -应变变量;  $\dot{\epsilon}$ -应变速率。

材料选用 Deform 材料库中 AISI1008 钢, 设定轧件为弹塑性体, 精轧前来料为 Φ61 mm 假设断面温度均匀为 920 °C, 依据轧件模型的网格划分及温度分布云图。结合实际现场经验 3# 水箱传热系数为 1.0 W/(m<sup>2</sup>·K), 4# 水箱传热系数为 0.6 W/(m<sup>2</sup>·K), 与空气传热系数为 0.025 W/(m<sup>2</sup>·K), 将 KOCKS

级, 而 1/2 半径及心部组织细小, 铁素体晶粒度 8 级, 圆钢断面出现明显的混晶现象。

## 2 混晶原因分析

### 2.1 边缘粗大晶粒内的黑色点状物

由图 2 及能谱分析结果可知, 晶粒内部黑色物质为片层状组织, 且主要成分为 Fe 与 C, 实为晶内珠光体组织。

### 2.2 精轧过程的有限元模拟

使用 Deform 3D 模块对穿水及减定径机组轧制过程进行模拟, 以观察轧制中圆钢不同位置的温度及等效应变分布情况。采用 Pro/E 三维造型软件建立控轧控冷模型, 再导入 Deform-3D 软件的前处理模块中建立三维有限元轧制模型。在孔型挤压机挤压与摩擦的综合作用下, 轧件发生复杂的弹塑性变形, 材料的变形抗力曲线直接影响轧件的变形程度及应力分布, 因此材料模型是反映轧件实际轧制状态的关键。变形抗力是与变形温度、应变速率和应变的函数, 表达式为:

机组中的轧辊设置为刚性体。模拟流程图见图 3。

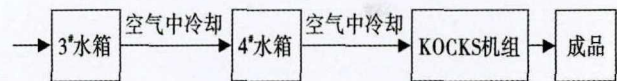


图 3 模拟流程图  
Fig. 3 Flowchart of simulation

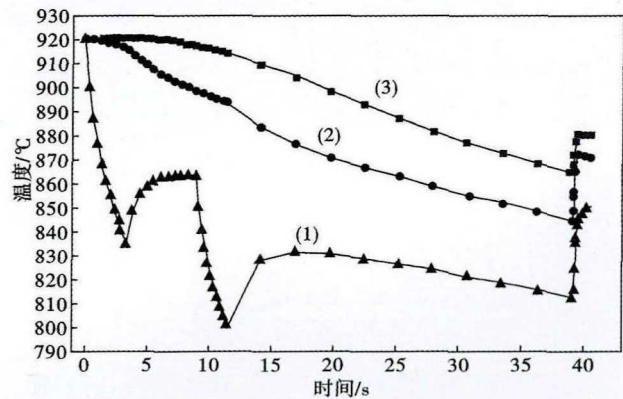


图 4 圆钢(1)边缘、(2)1/2 半径和(3)心部温度  
Fig. 4 Temperature of round steel edge (1), 1/2 Radius (2) and center (3)

### 2.3 模拟结果

#### 2.3.1 穿水及轧制温度变化

由模拟结果图 4 可知,圆钢边缘处温度经过 3<sup>#</sup> 与 4<sup>#</sup>水箱的冷却,出现迅速降温及在出水箱后回温现象,1/2 半径及心部温度逐步降低,进 KOCKS 机组时圆钢边缘温度 815 ℃,1/2 半径处 850 ℃,心部 870 ℃,心表温差 55 ℃,经 KOCKS 机组轧制后,均出现不同程度的温升现象。

现场生产时,通过 IRCON 红外测温枪测定圆钢轧制过程中进、出 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>水箱的温度,并与模拟温度进行对照,见表 2。通过表 2 可知,最大误差为 1.4%,模拟结果与实测符合度很高,从模拟结果来看,进 KOCKS 机组前 AISI1008 圆钢边缘温度 815 ℃,1/2 半径处 850 ℃,心部 870 ℃。

#### 2.3.2 轧制中等效应变分布情况

为研究 KOCKS 机组轧制中,AISI1008 圆钢断面变形分布的差异,通过建模,对轧制中 4 道次圆钢的等效应变进行模拟,AISI1008 圆钢断面等效应变分布情况见图 5。由图 5 可知,轧制过程中每一道次的轧件横截面上等效应变分布是不均匀的,轧制

过程中等效应变主要集中在圆钢边缘,1/2 半径处等效应变次之,心部等效应变始终最小。

#### 2.4 AISI1008 圆钢的 Gleeble 曲线

由图 6 可知,AISI1008 圆钢热强度在 850 ~ 950 ℃ 内,随温度的降低,热强度逐渐增大。而在 800 ~ 850 ℃,随温度继续降低,热强度开始减小,当低于 800 ℃ 时,热强度再次随着温度的降低而增大。AISI1008 圆钢属于低碳锰钢,可用铁碳相图进行分析,当温度低于 850 ℃ 时,圆钢处于两相区轧制,由于先共析铁素体的强度仅为奥氏体硬度的 1/4<sup>[4]</sup>,因此拉伸时其抗拉强度在 800 ~ 850 ℃ 内,随温度继续降低,热强度开始减小呈下降趋势。

表 2 模拟温度与实际温度对比

Table 2 Comparison between simulated temperature and actual temperature

位置	实测温度/℃	模拟温度/℃	温度误差/%
进 3 <sup>#</sup> 水箱	928	920	0.8
出 3 <sup>#</sup> 水箱	843	835	1.0
进 4 <sup>#</sup> 水箱	858	863	0.5
出 4 <sup>#</sup> 水箱	789	800	1.4
进 KOCKS	818	815	0.3

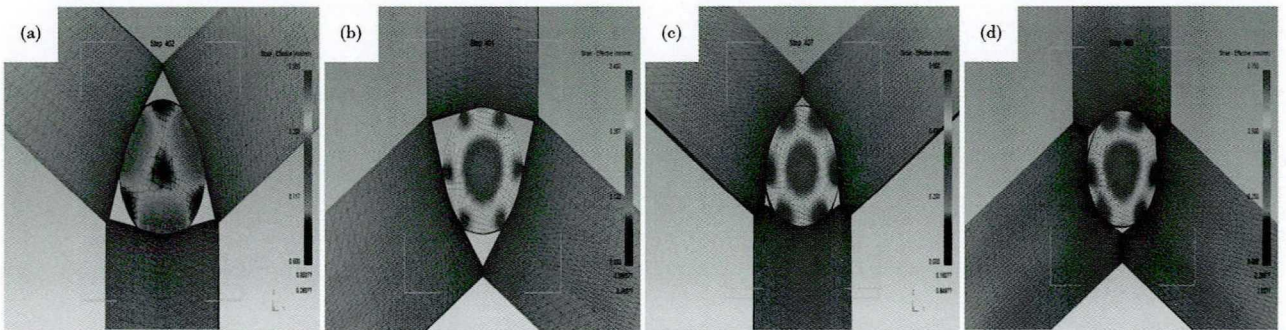


图 5 轧制中圆钢等效应变分布:道次 1(a);2(b);3(c)和 4(d)

Fig. 5 Equivalent strain distribution of round steel at rolling pass 1(a), 2(b), 3(c) and 4(d)

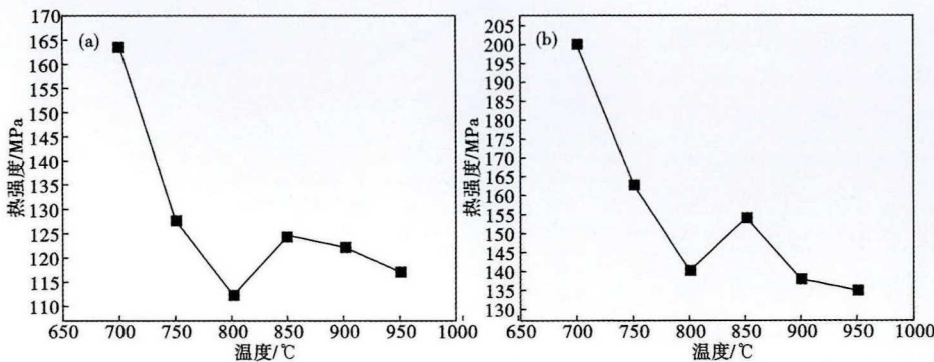


图 6 AISI1008 圆钢 Gleeble 曲线:应变速率 1/s (a)和 5/s (b)

Fig. 6 AISI1008 round steel Gleeble simulation curve:strain rate 1/s (a) and 5/s (b)

#### 2.5 混晶原因分析

轧制过程中,轧件表层温度低,属于两相区轧制,同时圆钢边缘处在低温与较大等效应变情况下发生形变诱导铁素体的析出<sup>[5-6]</sup>,诱导析出的新生铁素体硬度仅为奥氏体的 1/4,轧制中变形优先在其上进行<sup>[7]</sup>,积累大量的畸变能,同时晶粒拉长,晶界比面积增加,晶界能较高,为降低体系界面能,将自发

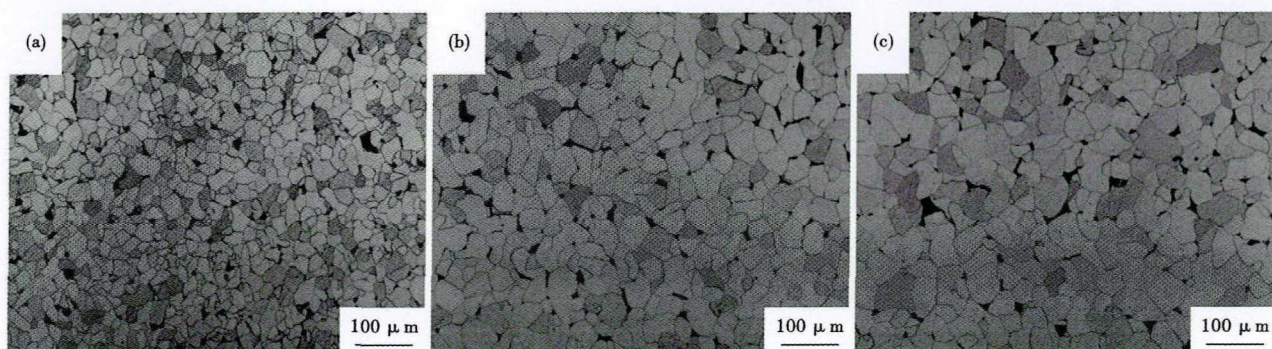


图 7 工艺改进后 AISI1008 圆钢边缘(a), 1/2 半径(b) 和心部(c) 金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of steel AISI1008 round bar at edge (a), 1/2 radius (b) and center (c) after process improvement

表 3 AISI1008 圆钢边缘、1/2 半径、心部铁素体晶粒度  
Table 3 Ferrite grain size of steel AISI1008 round steel at edge, 1/2 radius and center

检验位置	边缘	1/2 半径	心部
铁素体晶粒度/级	8	7	7

生晶界迁移,大晶粒吞并小晶粒而长大形成粗晶,因此圆钢表面铁素体晶粒度大道 3 级。而粗晶中珠光体的形成,是由于形变诱导形成的铁素体为非平衡态过饱和<sup>[8]</sup>,碳来不及扩散就发生析出,并不是碳原子长程扩散机制的结果,在变形中随变形量的增加,铁素体内的过饱和碳原子在铁素体内部位错,晶格畸变处析出<sup>[9]</sup>。而 1/2 半径及心部,由于轧制中温度高,处于奥氏体单相轧制,等效应变小,不具备发生形变诱导铁素体相变的条件,相变后转变为铁素体晶粒细小且等轴,因此 1/2 半径及心部位置铁素体晶粒细小,铁素体晶粒度为 8 级。

### 3 改善混晶的措施及结果

针对混晶的产生原因,提出了减低冷却速度,将 AISI1008 圆钢进 KOCKS 机组温度提升至  $Ar_3$  以上的措施。实际生产中关闭 3<sup>#</sup> 及 4<sup>#</sup> 水箱,进 KOCKS 机组温度控制在 880 ~ 890 °C。

提高终轧温度后,取 AISI1008 圆钢试样,检验边缘、1/2 半径和心部的金相组织如图 7

提高终轧温度后,AISI1008 圆钢边缘、1/2 半径和心部的铁素体晶粒度如表 3。

改进工艺后生产的 AISI1008 圆钢边缘铁素体晶粒度为 8 级、1/2 半径、心部铁素体晶粒度为 7 级,原工艺的边缘混晶现象得到有效改善。

### 4 结论

(1) AISI1008 圆钢混晶的原因是终轧温度过低,轧制中圆钢边缘处于两相区轧制,且轧制过程中圆钢边缘等效应变大,发生形变诱导铁素体相变,因变形过程使诱导析出铁素体畸变能及界面能增加,晶粒自发长大吞并,造成圆钢边缘处粗晶。

(2) 将终轧温度由原 820 °C 提高至 880 °C 以上,使 AISI1008 圆钢处于奥氏体单相区轧制,有效的改善了圆钢边缘的混晶现象。

### 参考文献

- [1] 原国森. 汽车发电机爪极锻造工艺研究[J]. 金属铸锻焊技术, 2010,39(23):124-126.
- [2] 张帆,张宏. 碳钢组织遗传性的研究[J]. 材料科学与工艺, 1990,9(2):40-46.
- [3] 萨多夫斯基. 钢的组织遗传性[M]. 北京:机械工业出版社, 1980.
- [4] 杨小刚,张立峰,任英,等. 含钛微合金的高温热塑性及断裂机理[J]. 工程科学学报,2016,38(6):805-811.
- [5] 王慧敏,邱坤,杨忠民. 变形速率对普碳钢中形变诱导铁素体相变的影响. 钢铁研究学报 2005,17(4):51-54.
- [6] 赵河山. 在  $A_{c3}$ - $A_{r3}$  温度之间低碳钢形变诱导铁素体相变的实验研究[D]. 沈阳:中国科学院金属研究所, 2007.
- [7] 汪福成,浦绍康. 热轧低碳钢板表面铁素体晶粒异常粗大的试验研究[J]. 轧钢,1990(6):26-29.
- [8] 高霖,王先进. 深冲钢 W08Al 热轧模拟试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1999,31(4):388-392.
- [9] 刘朝霞,佟铭明,黄成江,等. 低碳钢形变诱导铁素体相变过程中碳的扩散行为[J]. 金属学报,2004,40(9):930-934.

万文华(1970-),男,高级工程师,1993 年安徽工业大学(本科)毕业,特钢技术质量管理。E-mail:wanwenhua@zt.net.cn

收稿日期:2020-08-30