



## 轧制工艺对410 mm×530 mm连铸坯产材 等轴晶区的影响

任红娃, 刘军利, 蒋新华, 赵 骏  
(成都冶金实验厂有限公司, 成都 611330)

**摘要:**大端面连铸坯在轧制大规格棒材时,容易出现中心疏松和缩孔、中心粗等轴晶区分布不规则等一系列内部质量问题。设计了四种不同的BD轧机(BD为英文开坯缩写,文中试验所采用的为1250双辊可逆式轧机)开坯工艺对42CrMo钢410 mm×530 mm规格的连铸坯轧制为255 mm×255 mm尺寸过程进行研究,先采用有限元模拟软件对轧制过程进行仿真模拟,再经过工业试验验证对最终 $\phi$ 180 mm棒材成品进行低倍检验。结果表明,采用大压下量的矩形→方形→矩形交替变形机制工艺进行轧制,可有效改善产材心部疏松、缩孔缺陷,同时连铸坯心部粗等轴晶遗传至产材的尺寸接近1:1,优化产材组织对称性,便于客户后续使用。并且通过对模拟结果和工业试验检验结果对比分析显示,有限元仿真技术在轧制变形方面的应用具有较高的准确性,通过有限元仿真模拟轧制过程可有效缩短试验周期,降低工艺优化成本。

**关键词:**410 mm×530 mm大方坯;心部等轴晶区;对称性;变形渗透;42CrMo钢

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2024-00178 **中图分类号:**TG335.1

## Influence of Rolling Process on the Equiaxed Grain Zone of Bars Produced by 410 mm × 530 mm Continuous Casting Billet

Ren Hongwa, Liu Junli, Jiang Xinhua, Zhao Jun  
(Chengdu Metallurgical Experimental Factory Co., Ltd., Chengdu 611330, China)

**Abstract:** The large end face continuous casting billet is prone to a series of internal quality problems such as centre sparsity and shrinkage holes, irregular distribution of centre coarse equiaxed crystal zone when rolling large-size bars. Designed four different BD mills (BD is abbreviated for English blank, 1250 double roll reversible rolling mill used in this test) the open billet process on 42CrMo steel 410 mm × 530 mm specifications of continuous casting billet rolled to 255 mm × 255 mm size process to study, first using finite element simulation software for simulation of the rolling process, and then after the verification of industrial tests on the final  $\phi$ 180 mm bar finished products for macro-structure test. The results show that the use of large reduction amount rectangle → square → rectangle alternating deformation mechanism process for rolling, can effectively improve the heart of the material produced loose, shrinkage defects, and at the same time, continuous casting billet heart of coarse isometric crystals inherited to the size of the material produced is close to 1:1 to optimize constructure symmetry of the material produced to facilitate the subsequent use of the customer. Moreover, the comparative analysis of the simulation results and industrial test results shows that the application of finite element simulation technology in rolling deformation has high accuracy, and the rolling process through finite element simulation can effectively shorten the test period and reduce the cost of process optimization.

**Key Words:** 410 mm×530 mm Large Square Bloom; Core Equiaxed Crystal; Symmetry; Deformation Infiltration; 42CrMo Steel

在石油化工、矿山机械、海洋工程等重大型机械设备行业中,往往需要一些单体尺寸较大的零部件,并且由于轧制过程中对压缩比有着一定要求,因此,大规格零部件必须采用大规格的连铸坯进行生产<sup>[1]</sup>。随着连铸坯尺寸越来越大,可生产的产品尺寸也越来越大,但是由于大规格连铸坯

在凝固过程中形成的中心粗等轴晶区面积更大,疏松和缩孔等缺陷更加明显,因此,对轧制工艺的要求也越来越高。大规格连铸坯轧制过程中往往存在芯部变形渗透不够、芯部组织致密性差的问题,并且由于轧制工艺不合理容易导致产材芯部粗等轴晶区分布不规则等缺点,会影响钢材的力

学性能及加工性能,严重影响最终产品的质量和使用寿命,甚至影响产品后续使用过程中的安全性<sup>[2-3]</sup>。采用高温加热大压下量矩形→方形→矩形的 BD 轧机轧制工艺,在高温奥氏体相区对 42CrMo 钢 410 mm×530 mm 连铸坯进行大变形量轧制,目的是提高心部变形渗透程度改善连铸坯心部疏松,同时采用矩形→方形→矩形的变形方式,旨在将 410 mm×530 mm 矩形连铸坯的心部等轴晶区域缩小,并且在最终的棒材端面上等轴晶区域的长宽比接近 1:1,便于用户后续加工使用<sup>[4-5]</sup>。

## 1 试验材料及方法

由于连铸坯尺寸较大,常规轧制时变形基本上都在表面和次表层,变形很难渗透到钢坯芯部,为了提高轧制过程变形渗透能力,通常采用大压下量轧制使得变形渗透到轧件芯部,达到破碎芯部粗晶和焊合缩孔改善疏松的目的。但是由于大压下量会增加轧制过程的轧制力,受轧机能力的限制,需要尽可能提高连铸坯加热温度降低其变形抗力,所以,试验过程将钢坯加热温度设计为 1 240 °C,既能保证大压下量轧制同时钢坯不会出现过热和过烧问题<sup>[6]</sup>。变形机制方面,主要考虑改善连铸坯心部等轴晶区遗传在最终棒材端面长宽比差异大的问题,根据图 1 低倍检验结果可知,42CrMo 钢 410 mm×530 mm 连铸坯等轴晶区域约 230 mm×330 mm,长宽比 1.43。



图 1 42CrMo 低倍照片

Fig. 1 Macrostructure photos of 42CrMo

试验流程: 410 mm×530 mm 连铸坯→步进式加热炉→高压水除鳞→1250BD 初轧机→8 架连轧机组→步进式快床→保温坑→检查→入库。

试验钢种为 42CrMo, 加热温度 1 240 °C, 经 1250BD 轧机轧制为 255 mm×255 mm 的方形过程

坯,然后再经过连轧机组进行连轧成为  $\phi 180$  mm 规格棒材。从连铸坯到最终产材,变形过程总压缩比为 8.55,压缩比分布为 BD 轧机压缩比 3.34,连轧压缩比 2.56。由此可见,改善心部质量的关键工序在于 BD 轧机开坯过程,并且由于 BD 轧机轧制工艺灵活性高,便于优化,因此,试验过程将通过设置不同 BD 轧机开坯变形机制进行试验<sup>[7]</sup>。首先通过 DERORM 模拟软件对开坯过程进行仿真模拟,再结合工业试验验证对比分析产材低倍情况确定最优的开坯变形机制来指导生产<sup>[8]</sup>。

由于连轧过程为圆—椭圆平立交替孔型,因此,为了使最终产材上等轴晶区的长宽比接近 1:1,关键在于 BD 轧机开坯过程的变形控制,使 255 mm×255 mm 过程坯中心部等轴晶区域面积减小并且长宽比接近 1:1。为了验证不同变形机制对等轴晶区域的影响,设计了四种不同的轧制变形工艺,分别为不对称轧制工艺、大压下轧制工艺、大压下归方轧制工艺和大压下变方轧制工艺,具体工艺见表 1。

表 1 中工艺一为现有工艺,其特点为多道次小压下量轧制,缺点是轧制道次多,芯部变形渗透效果差,优点是轧制温度低,轧机负荷小;工艺二是在工艺一的基础上将多道次小压下量合并为单道次大压下量,目的是提高变形渗透效果,优点是减少轧制道次提高生产效率,缺点是轧机负荷高,因此,需要较高的轧制温度;工艺三设计思路是先对连铸坯长边进行压下,变形过程采用大压下量矩形—方形—矩形交替变形,目的是将心部等轴晶区经过多道次变形后让其趋于正方形;工艺四采用变方设计思路,轧制过程将连铸坯长边与短边进行互换,并且通过矩形—矩形长短边转换的方式将心部偏析区域变形为正方形<sup>[9]</sup>。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 有限元模拟分析

轧制过程中,轧件的应变变量、应变速率及温度场等变量的变化,影响轧件心部变形情况。借助有限元仿真技术,结合钢厂生产的连铸坯横截面质量特点,通过质点追踪功能研究了轧件从初轧的 410 mm×530 mm 到终轧的 255 mm×255 mm 过程中流动分布情况。采用三维建模软件 Solidworks 建立开坯过程孔型系统对应的几何模型,通过 Deform 软件对轧制过程进行仿真模拟<sup>[10]</sup>。

表 1 42CrMo 钢四种不同初轧 BD 轧制工艺  
Table 1 Four different BD rolling processes of 42CrMo steel

轧制道次	工艺一				工艺二				工艺三				工艺四			
	高/mm	宽/mm	压下/mm	翻钢(90°)	高/mm	宽/mm	压下/mm	翻钢(90°)	高/mm	宽/mm	压下/mm	翻钢(90°)	高/mm	宽/mm	压下/mm	翻钢(90°)
0	410	530		1	410	530		1	410	530		1	410	530		1
1	525	410	5	1	510	412	20	1	500	414	30	1	500	414	30	1
2	405	525	5	1	402	511	10	1	404	501	10	1	404	501	10	1
3	475	412	50	0	431	415	80	1	421	417	80	1	421	417	80	0
4	425	420	50	1	335	447	80	1	337	437	80	1	411	418	10	0
5	395	429	25	0	367	350	80	0	357	352	80	1	331	434	80	1
6	375	432	20	0	337	355	30	1	272	375	80	1	424	332	10	1
7	355	435	20	0	275	356	80	0	295	291	80	1	252	444	80	1
8	335	438	20	1	265	357	10	1	242	308	49	1	404	258	40	0
9	378	346	60	0	282	283	75	1	255	255	53	0	324	275	80	1
10	335	354	43	1	246	292	37	1					220	340	55	1
11	329	339	25	0	255	255	37	0					260	240	80	0
12	304	343	25	0												
13	279	348	25	0												
14	254	354	25	1												
15	294	268	60	0												
16	250	279	44	1												
17	255	255	24	0												

注:表 1 中翻钢列中“1”表示翻钢,“0”表示不翻钢

### 2.1.1 有限元模型的建立

#### (1) 基本假设

基本假设条件为:轧件为变形体,材料的物理性能参数随时间的变化而变化,包括比热容、热导系数、摩擦系数、热膨胀系数、弹性模量;轧件的材质均匀,为各项同性;轧辊定义为刚体,没有变形;材料遵循 Von Mises 屈服准则;塑性变形区内的行为服从流动准则和硬化定律;轧进接触摩擦过程中采用库伦摩擦模型。

#### (2) 轧制物理模型

轧辊模型:BD 轧机为直径  $\phi 1\ 250\ \text{mm}$  的平辊,轧辊在轧制过程中属于对称轧制,取轧辊 1/2 建立几何模型,并按平立交替布置以实现无扭轧制。

轧件:轧件截面尺寸为  $410\ \text{mm} \times 530\ \text{mm}$ ,角部圆角半径为  $20\ \text{mm}$ ,取原始坯料的  $2\ 000\ \text{mm}$  长,由于轧制时的对称性,取轧件 1/4 建立几何模型。

后推板:尺寸为  $300\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ ,其作用为帮助咬入,在实现稳态轧制后及时脱离轧件。

#### (3) 边界条件

模型中将轧辊视为恒温刚性体,轧辊温度为  $200\ ^\circ\text{C}$ ;推板为刚性体,温度为  $200\ ^\circ\text{C}$ 。轧件为塑性体,研究用材料为 42CrMo 钢,对应 DEFORM 3D 材料库中钢号为 AISI-4140;轧件的初始温度为均匀温

度场为  $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ ;边界条件有摩擦条件和传热条件:轧辊、推板与轧件接触面上采用剪切摩擦,摩擦系数取 0.5;由于轧制速度快、温降慢的特点,本文仅启动了有限元仿真软件的变形模块,定义轧件与环境、轧辊之间不发生热交换。

#### 2.1.2 模拟过程及结果

整个模拟过程通过点追踪法来跟踪等轴晶区变化。根据图 1 显示结果,在连铸坯 1/4 模型等轴晶区边界上分别设置 P1、P2、P3、P4 四个点作为追踪质点,对比分析不同工艺下质点流动分布情况<sup>[11]</sup>。模拟过程和模拟设置如图 2 所示。

分别对四种不同轧制工艺进行模拟分析,取关

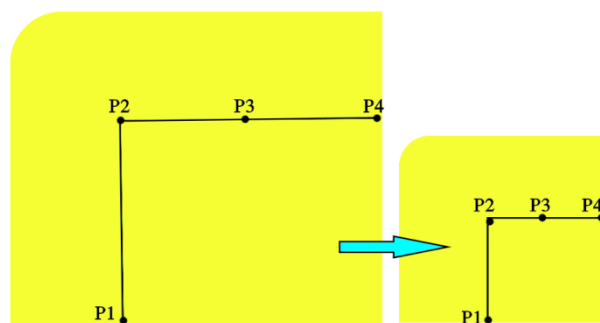


图 2 模拟过程追踪质点设置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of particle tracking during simulation process

键质点 P2 以其坐标变化作为评价依据, 分别对比四种不同轧制工艺下 P2 点坐标变化情况, 具体见表 2。

表 2 42CrMo 钢四种不同 BD 初轧轧制工艺模拟结果  
Table 2 Simulation results of four different BD primary rolling processes of 42CrMo steel

项目	P2 点坐标/ (mm)	等轴晶区面 积/mm <sup>2</sup>	长宽比
连铸坯	(165, 115)	37 950	1.435
工艺一	(84, 69)	11 592	1.217
工艺二	(79, 65)	10 270	1.215
工艺三	(74, 70)	10 360	1.060
工艺四	(78, 66)	10 292	1.180

根据表 2 模拟结果显示, 工艺一效果最差, 由于工艺一采用多道次小压下量变形, 单道次心部渗透效果差, 因此, 等轴晶区域面积最大, 并且第 3 道次、第 5 道次等多个道次未进行翻钢, 单面第二次、第三次轧制时, 由于加工硬化的影响质点在宽展方向基本不发生位移, 没有达到通过宽展改善偏析区域形状的目的, 因此, 长宽比也最大。

工艺二、工艺三和工艺四均采用高温大压下变形, 由于 BD 轧机为兼容钢坯尺寸的多变性, 因此, 孔型槽口较浅, 轧制过程更接近与自由宽展轧制, 心部质点的流动很大程度上取决于压下量的大小, 所以, 等轴晶区面积较小。通过对比 P1、P4 质点分别在轧制方向和宽展方向上位移的变化情况, 可以发现料宽比越大、压下量越大, 金属在轧制方向的位移变化就越大, 由于工艺一和工艺二均采用不对称变形机制, 均在小料宽比道次采用大压下量轧制, 因此, 在改善等轴晶区长宽比方面效果较差, 长宽比均为 1.2。

工艺三采用大压下矩形—方形—矩形交替变形制度, 由于矩形和方形两者料款比的不同 P2、P4 质点在宽展方向的移动比例也不同, 经多道次变形后, 芯部等轴晶区区域最终也趋于正方形, 其长宽比为 1.06 效果最好, 工艺四设计目的是经过矩形—矩形轧制变换长短边进行交替轧制, 缩小长宽比, 但是由于连铸皮本身为矩形, 最终过程坯为方形,

变方过程中无法有效缩小长宽比, 因此, 效果不理想。

综合上述模拟结果, 采用高温大压下量轧制工艺可有效提高芯部变形渗透效果, 可以改善连铸坯芯部疏松、缩孔缺陷, 并且轧制过程采用矩形—方形—矩形交替变形制度, 可有效改善过程坯等轴晶区长宽比大的问题。

## 2.2 四种轧制工艺工业试验验证

### 2.2.1 工业试验过程

为了进一步验证四种轧制工艺下产材质量情况, 采用 410 mm×530 mm×6 000 mm 的 42CrMo 钢连铸坯作为试验钢, 在 1250BD 轧机+850 连轧线进行工业试验验证。

工艺流程: 加热→高压水除鳞→1250 轧机初轧→8 架连轧产  $\phi 180$  mm 材→入坑缓冷→矫直→表面清理或扒皮→超声波探伤→检验、检查→包装、入库。

加热工艺: 采用五段式步进梁加热炉, 具体加热工艺见表 3。

上述试验完成后, 分别对四种轧制工艺产材进行取样做低倍检测分析, 主要检测等轴晶区分布情况, 一是对比等轴晶区面积大小, 二是分析对比等轴晶区长宽比。

### 2.2.1 工业试验结果

将四种轧制工艺试验产材取样进行酸洗低倍检验, 结果如图 3 所示。

根据表 4 显示, 工艺一采用多道次小压下量, 等轴晶区面积相比工艺二、工艺三和工艺四大 7%~9%, 再次证明高温大压下量轧制工艺对于轧件芯部变形渗透效果较好<sup>[12]</sup>。工艺二是在工艺一的基础上将多道次小变形优化为大压下量轧制, 对于等轴晶区长宽比没有改善, 工艺三和工艺四分别采用矩形—方形—矩形轧制和矩形—矩形变方轧制, 结果显示等轴晶区长宽比均优于工艺一, 并且采用工艺三归方轧制长宽比为 1.04, 接近 1:1。综合分析显示, 工艺三轧制产材效果最优, 能提高产材均匀性, 便于下游工序加工使用<sup>[13]</sup>。

表 3 42CrMo 钢  $\phi 180$  mm 棒材试验验证加热工艺

Table 3 Experimental verification of heating process of 42CrMo steel  $\phi 180$  mm rolled bar

项目	预热段/°C	加热 I 段/°C	加热 II 段温度/°C	均热 I 段/°C	均热 II 段/°C	总加热时间/h	高温扩散时间/h
加热温度	≤850	1 030±50	1 240±30	1 240±30	1 230±30	8~12	≥3.5

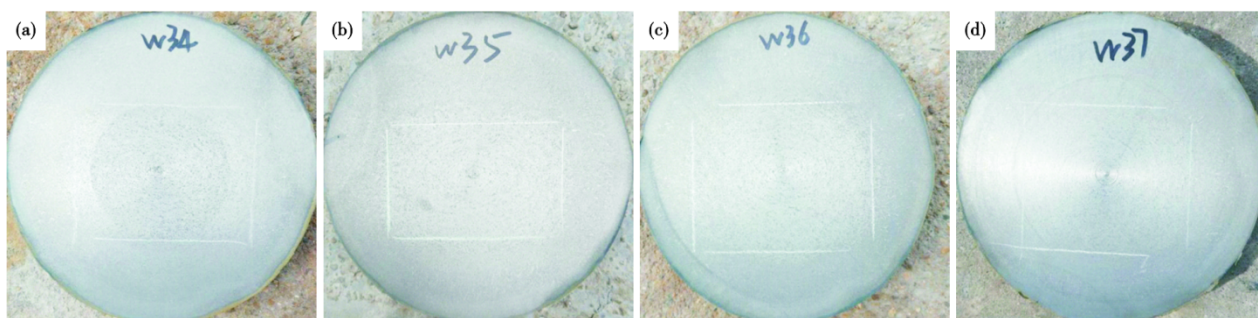


图3 42CrMo 钢 $\phi 180$  mm 规格产材低倍图片:(a)工艺一,(b)工艺二,(c)工艺三,(d)工艺四

Fig. 3 Macrostructure image of 42CrMo steel with a specification of  $\phi 180$  mm : (a) process 1, (b) process 2, (c) process 3, (d) process 4

表 4 42CrMo 钢四种初轧轧制工艺低倍结果

Table 4 Macrostructure results of four primary rolling processes of 42CrMo steel

试验	等轴晶区边长/mm	等轴晶区边宽/mm	等轴晶区域面积/ $\text{mm}^2$	长宽比
工艺一	96	80	7 680	1.20
工艺二	93	75	6 975	1.24
工艺三	86	83	7 138	1.04
工艺四	88	80	6 960	1.10

### 3 结论

(1)42CrMo 钢高温大压下量轧制工艺对于提高

轧件芯部变形渗透效果明显,同规格连铸坯到产材芯部等轴晶区面积减少 7%~9%;

(2)通过矩形—方形—矩形交替轧制的归方变形方式,可有效控制 42CrMo 钢 410 mm×530 mm 矩形连铸坯中心等轴晶区在 $\phi 180$  mm 规格产材中的长宽比,使其接近 1:1;

(3)通过对比有限元模拟结果和工业试验检验结果显示,有限元轧制模拟结果和工业试验结果基本接近并且准确性较高,采用有限元模拟可以有效提高试验周期和节省试验成本。

### 参考文献

- [1] 陈其为,包汉生,杨 钢,等. S30432 钢连铸和模铸管坯的高温加工性能对比[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 97-106.
- [2] 梅德云,陈 敏,杨湘澜,等. 电磁搅拌模式对大方坯结晶器内钢水流动特性的影响[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(6): 532-539.
- [3] 张 越,吕泽安,马建祎,等. 轻压下和拉速对 42CrMo 钢 410 mm×530 mm 铸坯轧成 $\Phi 195$  mm 材的低倍和中心 C 偏析的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 35-38.
- [4] 于 莉.  $\Phi 190$  mm 和  $\Phi 200$  mm 不锈钢棒材轧制孔型系统的优化[J]. 特殊钢, 2007, 28(2): 58-60.
- [5] 王敬梓. 中碳钢高温大压下轧制流变行为及动态再结晶规律研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [6] 王全胜,袁向前. 厚板轧制过程中轧件内部变形渗透量化研究——自主工艺设计辅助软件的探索[J]. 宝钢技术, 2021 (1): 14-18.
- [7] 赵景存,李 雷,朱 叶. 22CrMoH 钢轧制过程中金属流变对锭型偏析的影响[J]. 河北冶金, 2021(10): 33-36.
- [8] 赵博志,邓加东,钱东升,等. 面向大型环件径轴向稳定高效轧制的变形过程规划方法研究[J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (9): 9-16.
- [9] 赵 杰,赵景存. 轧制对锭型偏析的影响[J]. 山西冶金, 2021, 44(5): 26-28.
- [10] 吴晨辉,吴国荣,张 敏,等. 板坯连铸过程热收缩变形行为研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(2): 141-146.
- [11] 史海军. 特厚板变厚度轧制过程金属流动规律研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [12] 石可伟,张洪才,郑力宁,等. 齿轮钢大圆坯的铸态组织及轧制遗传性[J]. 连铸, 2020, 45(4): 66-69.
- [13] 孙 涛,岳 峰,林 寒,等. 大断面圆坯凝固组织及力学性能分析[J]. 炼钢, 2016, 32(1): 66-69.