

· 试验研究 ·

基于 Deform-3D 软件对 AISI4340 钢 $\Phi 600$ mm 铸坯开坯工艺参数的模拟数值

朱 叶 赵景存

(石钢京诚装备技术有限公司, 营口 115000)

摘 要 利用 Deform-3D 软件对 AISI4340 钢 $\Phi 600$ mm 铸坯至 300 mm \times 300 mm 坯的开坯过程工艺参数进行了数值模拟。通过对加热温度、轧制速度、压下率、2 道次压下对铸坯心部变形和材料流动影响的研究, 分析了开坯成形过程中心部等效应力和材料变形特点, 获得了 $\Phi 600$ 圆连铸坯开坯成 300 mm 方坯的成形规律。结果表明: 在 $1\ 070 \sim 1\ 140$ $^{\circ}\text{C}$ 内, 加热温度对心部的应变影响较小, 变化幅度在 2.3% 左右。当轧制速度选 $1.0 \sim 2.0$ m/s、总压下量一定的情况下, 先大后小更利于心部缺陷的焊合。

关键词 AISI4340 钢 $\Phi 600$ mm 铸坯 开坯 等效应变 模拟 Deform-3D

Numerical Simulation on Process Parameters of Breakdown of AISI4340 Steel $\Phi 600$ mm Cast Bloom Based on Deform-3D Software

Zhu Ye and Zhao Jingcun

(Shigang Jingcheng Equipment Development & Manufacturing Co Ltd, Yingkou 115000)

Abstract The numerical simulation on process parameters of AISI4340 Steel $\Phi 600$ mm cast bloom to 300 mm \times 300 mm square billet breakdown has been carried out by Deform-3D software. The effects of heating temperature, rolling speed, reduction ratio and two passes reduction on rolling bloom center deformation and material flow are studied, the equivalent stress and material deformation characteristics of the center during the deformation process are analyzed to get forming law of $\Phi 600$ mm round continuous casting bloom rolling into 300 mm square bloom. The results show that the heating temperature has little effect on the strain of the core at $1\ 070 \sim 1\ 140$ $^{\circ}\text{C}$, and the variation range is about 2.3% . When the rolling speed is $1.0 \sim 2.0$ m/s and the total reduction is fixed, it is better to weld the core defects at deformation of first big then small

Material Index AISI4340 Steel, $\Phi 600$ mm Cast Bloom, Breakdown, Equivalent Strains, Simulation, Deform-3D

近年来,随着我国冶炼技术和装备制造技术的提高,钢水质量稳步提升,大型轧机或者超大型轧机的出现,使 $\Phi 300 \sim 500$ mm 大规格轧材的实物质量已经能够达到锻材水平,使轧材代替锻材成为了可能;轧材表面光洁度高,生产效率高,可以缩短生产周期,成本远低于锻材,易于实现批量生产,成材率高,在市场上有着极高的竞争力。心部质量是轧材代替锻材的评价标准。某公司 1350 开坯机 $\Phi 250 \sim 305$ mm 规格内,轧材探伤综合合格率为 96.45% 。奥氏体晶粒度达到 6.5 级以上,已经达到锻材的水平,使以轧代锻成为了可能。但是经过统计分析, AISI4130M、AISI4130-I-BD、AISI4140、SAE4140、31CrMoV9、30CrMoV9、AISI4145HM、40CrNiMoA、817M40、AISI4340 规格在 $\Phi 200$ mm 以上的轧材,存在一定比例 UT 探伤不合格,超标缺陷集中在轧材心部区域,表现为密集连续型缺陷,长度最短 45 mm,最长 700 mm,绝大多数长度在 $250 \sim 350$ mm 内,浇次头尾炉及铸坯堆冷方式出现比例较大,尤其

是对 $\geq \Phi 250$ mm 规格更明显。本文以 AISI4340 圆钢为研究对象,利用金属塑性成形有限元平台 Deform-3D 软件对开坯过程工艺参数进行模拟。通过对成形过程中应变状态、材料变形特点进行分析,得出大断面圆坯的成形规律。

1 建立有限元模型

1.1 构建几何模型

由于 $\Phi 600$ mm 圆连铸坯开坯轧制 300 mm \times 300 mm 方中间坯,除去最后一道次是限制宽展,轧槽对坯料有限制作用外,其余道次全部是自由宽展,故建立模型时,将轧辊考虑为平棍。采用有限元软件 Deform-3D 进行模拟,圆钢轧制过程属于大变形的金属塑性成形问题,采用刚塑性材料模型。圆钢为塑性材料,模拟选用材料为 AISI4340 钢,其泊松比为 0.3 ,杨氏模量为 210 MPa,热膨胀系数为 $1.2e \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;轧辊为刚性材料。由于圆钢属于中心对称回转体零件,形状规整,选用六面体等参单元进行变形体的离散^[1]。轧件与空气的对流换热系

数取 0.015 kW/(m²·K)。

1.2 摩擦处理

圆钢成形过程中轧辊和坯料间处于面接触状态且产生接触压力较大,轧辊与坯料的相对接触较复杂,导致摩擦力的方向随着改变,因此选用剪切摩擦模型可得到较为可信的结果。当摩擦剪切应力超过材料屈服应力沿剪切方向的分量系数之后,工件开始作相对滑动。

$$\sigma_{fr} = -\mu \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

式中: σ_{fr} -切向摩擦应力; $\bar{\sigma}$ -等效应力; μ -摩擦系数。

由于接触区法向力或法向应力很大,滑动摩擦表现出高度非线性特性,用反正切函数平滑粘-滑摩擦之间的突变。

$$\sigma_{fr} = \mu \sigma_n \frac{2}{\pi} \arctan(v/r_{const}) \quad (2)$$

表 1 开坯工艺参数

Table 1 Process parameters of breakdown

轧辊直 径/mm	槽深/ mm	工作辊 径/mm	电机转速 /(r·min ⁻¹)	电机额定转速 /(r·min ⁻¹)	电机额定 功率/kW
1350	105	1140	40	50/120	6800

表 2 AISI4340 钢的化学成分/%

Table 2 Chemical composition of AISI4340 steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.41	0.27	0.77	0.013	0.002	0.87	1.86	0.27

表 3 Φ600 圆铸坯开 300 方坯工艺参数

Table 3 Process parameters of Φ600 mm breakdown to 300 mm square billet

孔号	道次	料高(H) /mm	料宽(B) /mm	辊缝(S) /mm	压下量 (Δh)/mm	宽展 (Δb)/mm
BD041	1	542	616	332	66	9
BD041	2	476	626	266	66	10
	翻钢					
BD041	3	546	486	336	80	11
BD041	4	466	498	256	80	12
	翻钢					
BD041	5	438	475	228	60	9
BD041	6	353	492	143	85	16
	翻钢					
BD340	7	412	367	202	80	13
BD340	8	322	385	112	90	18
	翻钢					
BD340	9	325	334	115	60	12
BD340	10	290	341	80	35	7
	翻钢					
BD270	11	300	300	90	41	8

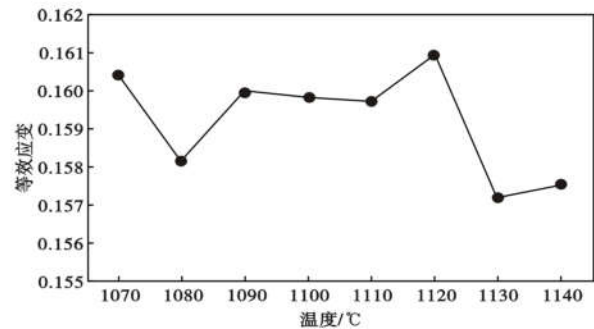


图 1 铸坯加热温度对第 4 道次 498 mm × 466 mm 轧坯心部等效应变的影响

Fig. 1 Effect of cast bloom heating temperature on equivalent strain in center of 498 mm × 466 mm rolling bloom at fourth pass

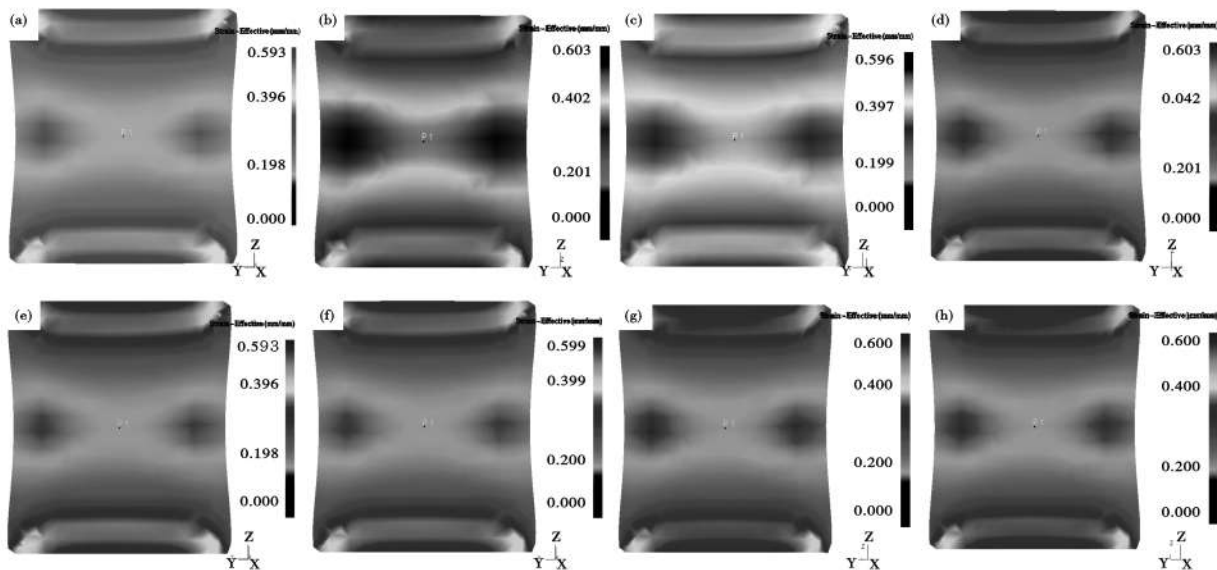


图 2 铸坯加热温度 1 070 °C (a), 1 080 °C (b), 1 090 °C (c), 1 100 °C (d), 1 110 °C (e), 1 120 °C (f), 1 130 °C (g) 和 1 140 °C (h) 轧坯等效应变图

Fig. 2 Rolled bloom equivalent strain figure as casting bloom heating temperature at 1 070 °C (a), 1 080 °C (b), 1 090 °C (c), 1 100 °C (d), 1 110 °C (e), 1 120 °C (f), 1 130 °C (g) and 1 140 °C (h)

式中: v_r -相对滑动速度; r_{venst} -修正系数^[2]。数值模型的摩擦系数取为 0.3。

2 数值模拟的条件

本试验的圆钢选用 AISI4340 钢种。开坯工艺的基本参数见表 1。AISI4340 钢种化学成分见表 2。

3 工艺参数的影响规律

3.1 轧制温度对圆钢心部等效应变的影响

当 $\Phi 600$ mm 圆坯料开坯机往复轧制 11 道次成 300 mm \times 300 mm 方中间坯时, 第四道次料型为 498 mm \times 466 mm, 其余轧制参数见表 3, 设计加热温度从 $1\ 070$ $^{\circ}\text{C}$ 到 $1\ 140$ $^{\circ}\text{C}$, 每 10 $^{\circ}\text{C}$ 取心部等效应变, 通过等效应变的变化反映心部变形情况。

第四道次料型为 498 mm \times 466 mm, 选取坯料中心位置点 P1 的等效应力可以得出趋势图 1, 从图 1 可以看出, 在其他条件相同的情况下, 对比不同加热温度下, 坯料心部等效应变情况, 如图 2 所示。随着加热温度的升高, 心部等效应变呈现波动现象, 但是不明显, 波动范围大约 2.3%。可见, 在正常生产的情况下, 温度对心部的应变的影响较小。各加热温度轧坯等效应变云图见图 2。

3.2 轧制速度对圆钢心部等效应变的影响

当 $\Phi 600$ mm 圆坯料开坯机往复轧制 11 道次成 300 mm \times 300 mm 方中间坯时, 第四道次料型为 498 mm \times 466 mm, 其余轧制参数见表 3, 设计轧制速度分别为从 1.0 m/s 到 3.0 m/s, 每增加 0.5 m/s 的轧制速度, 取心部等效应变, 通过等效应变的变化

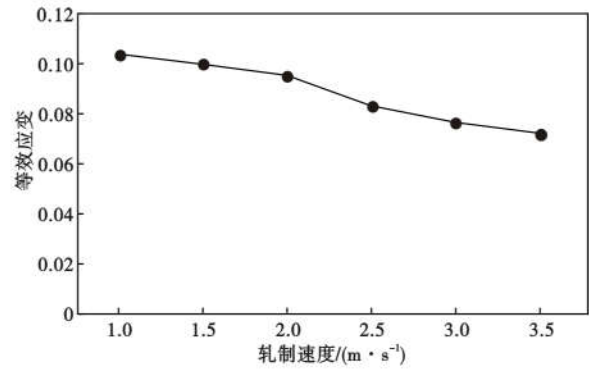


图 3 轧制速度对轧坯心部等效应变的影响

Fig. 3 Effect of rolling speed on equivalent strain at center of rolling bloom

反应心部变形情况。

第四道次料型为 498 mm \times 466 mm, 选取坯料中心位置点 P1 的等效应力可以得出趋势图 3, 从图 3 可以看出, 在其他条件相同的情况下, 对比不同轧制速度下, 坯料心部等效应变情况, 可看出, 轧制速度从 $1.0 \sim 3.0$ m/s 内, 随着轧制速度的提高, 心部等效应变逐渐减小。轧制速度从 1.0 到 2.0 m/s 时, 等效应变减小了 8%, 而从 2.0 到 3.0 m/s 时等效应变减小了 20%, 各轧制速度对轧坯等效应变云图见图 4。

在实际生产中, 整个轧制过程中道次压下量为 $40 \sim 120$ mm, 在保证自然咬入和提高生产效率的情况下可以适当降低轧制速度可以改善心部质量, 增加变形渗透, 轧制速度为 $1.0 \sim 2.0$ m/s 是较为合适的。

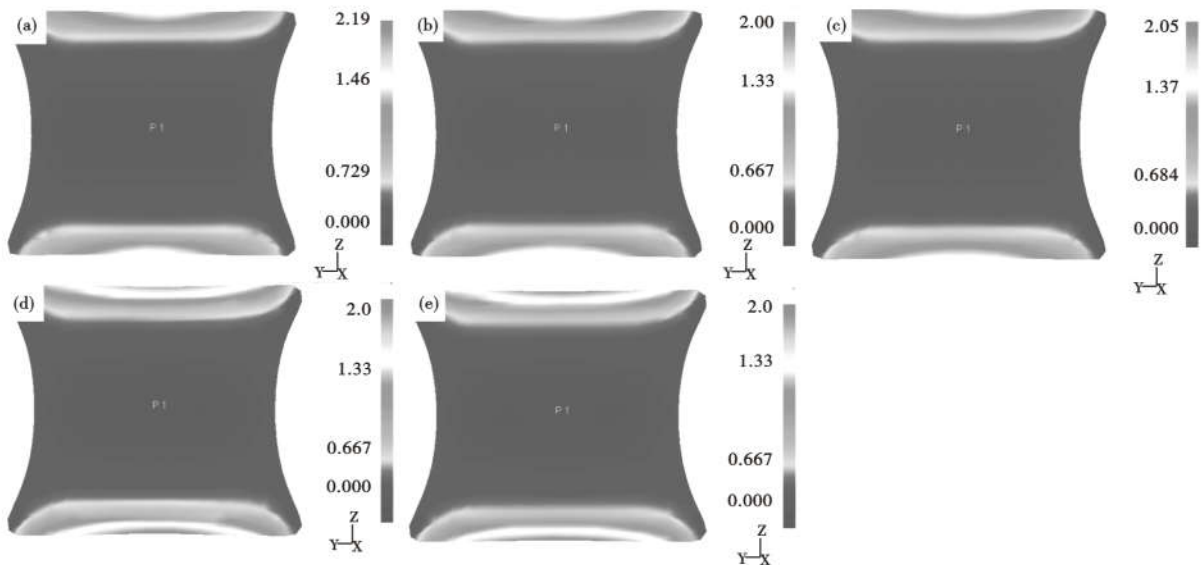


图 4 轧制速度 1.0 m/s (a), 1.5 m/s (b), 2.0 m/s (c), 2.5 m/s (d) 和 3.0 m/s (e) 轧坯等效应变图

Fig. 4 Rolled bloom equivalent strain figure with roll speed 1.0 m/s (a), 1.5 m/s (b), 2.0 m/s (c), 2.5 m/s (d) and 3.0 m/s (e)

表 4 轧坯压下工艺参数变化

Table 4 Change of process parameters of rolling bloom reduction

料高/mm	料宽/mm	压下量(Δh)/mm	压下率/%
450	450	40	8.89
450	450	60	13.33
450	450	80	17.78
450	450	100	22.22
450	450	120	26.67
450	450	140	31.11

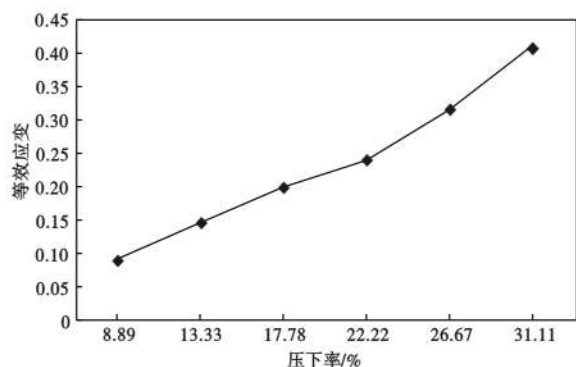


图 5 压下率对轧坯心部等效应变的影响

Fig. 5 Effect of reduction ratio on equivalent strain at center of rolling bloom

3.3 压下率对圆钢心部等效应变的影响

假设料型为 450 mm × 450 mm 方,用 Deform-3D 模拟不同压下率情况下,心部等效应变情况见图 5,

根据心部受力情况反映多大的压下率合适,对心部的变形渗透影响情况。当压下量为 40 ~ 140 mm,每增加 20 mm 压下量,压下率变化为 8.89% ~ 31.11%,各压下率对心部等效应变云图见图 6。

从图 5 可以看出,从等效应变曲线和断面等效应变分布情况来看,随着压下率的加大,心部等效应变值在逐渐增大,提高单道次压下率对于增加心部变形渗透效果是明显的,并且从断面等效应变分布云图也可看出,从表面到心部应变逐渐增大,并且随着压下率的加大,心部应变越大,见图 6。

3.4 压下量分布对圆钢心部等效应变的影响

当不翻钢时,轧制相同面进行了 2 个道次,按照不同的分配比例进行轧制,两个道次压下量分配不同,对心部的改善也不相同,故用 Deform-3D 模拟总的压下量为 140 mm,按照五种组合进行分配,第一道次从 40 mm 开始,每种方法第一道次增加 20 mm,直至第二道次变为 0 mm(表 5),每种方法取心部等效应变值,做成变化趋势图 7。从图 7 可见,在总压下量相等的情况下,第一道次增加至 140 mm 时,等效应变最好,两个道次的分配比例先大后小略好于先小后大,总的等效应变变化小于 2%。可见,翻钢前后的总在压下量不变的情况下,先大后小,更有利于提高心部的应变,更有利于心部缺陷的焊合。

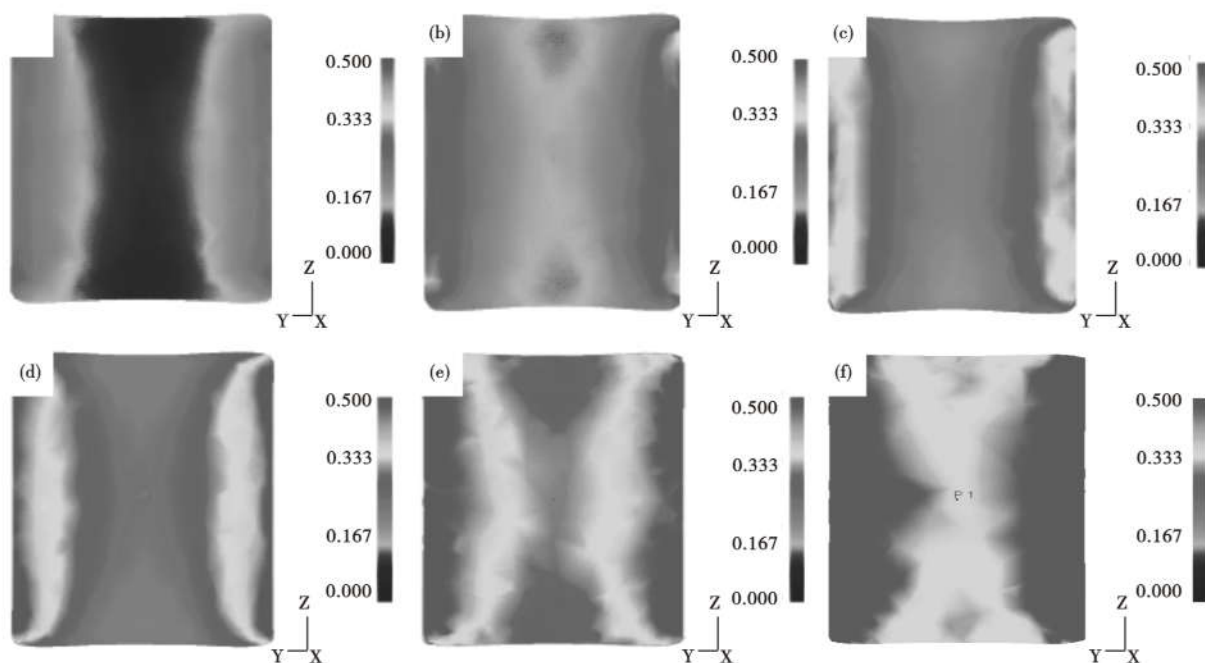


图 6 压下率 8.89% (a), 13.33% (b), 17.78% (c), 22.22% (d), 26.67% (e) 和 31.11% (f) 轧坯等效应变图

Fig. 6 Rolling bloom equivalent strain figure with reduction ratio 8.89% (a), 13.33% (b), 17.78% (c), 22.22% (d), 26.67% (e) and 31.11% (f)

表5 压下量工艺参数分布变化

Table 5 Distribution change of process parameters of reduction

组合方法	道次	料高/mm	料宽/mm	压下量 (Δh)/mm	等效应变
原始坯料		498	466		
第一种	1	458	491	40	0.081
	2	358	472	100	0.351
第二种	1	438	476	60	0.129
	2	358	491	80	0.352
第三种	1	418	480	80	0.179
	2	358	491	60	0.354
第四种	1	398	484	100	0.232
	2	358	491	40	0.355
第五种	1	378	488	140	0.356

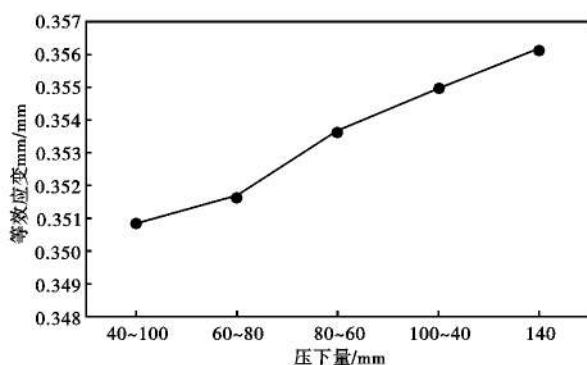


图7 总压下量相同,五种组合变形轧坯心部等效应变

Fig.7 Equivalent strain at the center of rolling bloom by five combined deformations with same total reduction

对于热轧工艺来说,对心部质量的影响因素很多,就轧制工艺参数的组合就有很多种要准确把握它们之间的相互关系势必进行大量的试验^[3],有限元模拟优势在于可以通过较少的试验获得设计变量与性能之间足够准确的相互关系,找到各个参数之间的最优组合,减少设计周期,优化工艺参数,节约

试验成本。在实际生产中,应该参考上述参数并结合轧机和产品实际情况,制定具体的轧制规程,以保证中心渗透变形^[4]。按照上述思路进行开坯工艺参数设置, $\Phi 600$ mm AISI4340 连铸坯轧制 $\Phi 250 \sim 300$ mm 轧材,按照 GB/T4162-2008 A 级进行探伤,合格率 100%。全钢种的综合合格率为 99.12%,环比提高 2.67%。

4 结论

(1) 在 1 070 ~ 1 140 $^{\circ}\text{C}$ 内,温度变化对心部的应变影响较小,变化幅度在 2.3% 左右。

(2) 随着轧制速度的提高,心部等效应变呈下降趋势,轧制速度在 1.0 ~ 2.0 m/s 内有利于提高心部应变,又能保证自然咬入。

(3) 随着压下率的增大,心部应变迅速增加,两者近似成线性关系。

(4) 翻钢前总压下量一定的情况下,先大后小更利于心部缺陷的焊合。

参考文献

- [1] 张利鹏,刘智冲.带内筋铝合金筒形件强力旋压成形工艺研究[J].塑性工程学报,2007,14(6):109-113.
- [2] 原霞,王铁,樊文欣,等.基于 Simufact 的连杆衬套旋压工艺参数的模拟研究[J].热加工工艺,2013,42(1):63-66.
- [3] 赵祖德,陈学文,陈军,等.基于近似模型和数值模拟的连杆热锻成形工艺设计优化[J].上海交通大学学报,2008,42(5):748-756.
- [4] 马兴云.厚钢板轧制过程变形渗透规律试验研究[J].山东冶金,2014,36(1):34-35.

朱叶(1982-),女,硕士(2012年太原科技大学),工程师,2009年河北理工大学(本科)毕业,热轧棒材工艺研究、汽车用钢新产品研发。E-mail:1315290535@qq.com

收稿日期:2020-07-06

欢迎订阅 2021 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010