

高碳钢小方坯机械压下过程变形行为数值模拟

高宇波^{1,2}, 包燕平¹, 王敏¹, 王郢²

(1. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中天钢铁集团有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 通过建立与高碳钢小方坯连铸机械压下过程相匹配的三维热力耦合数值模型, 从外观变形、两相区变形以及应变等方面对该过程中铸坯的变形行为进行了分析研究. 研究表明, 高碳钢小方坯机械压下过程的变形行为与压下量及实施压下的位置密切相关. 压下量增大, 铸坯外观变形和由压下导致的两相区减少面积增加, 内部产生的应变也呈增大趋势, 而压下效率则随着压下量的增加而降低; 随着压下位置的提前, 铸坯两侧向宽度方向扩展的变形趋势增强, 压下效率增加, 且随着压下位置对应中心固相率的降低, 铸坯中心区域受沿宽展左右两侧拉应变的强度和区域均呈现增大趋势.

关键词: 小方坯; 连铸; 机械压下; 变形行为; 数值模拟

中图分类号: TF 777.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)10-0096-08

Numerical Simulation on Deformation Behavior of High-Carbon Steel Billet During Mechanical Reduction Process

GAO Yu-bo^{1,2}, BAO Yan-ping¹, WANG Min¹, WANG Ying²

(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Zenith Steel Group Company Limited, Changzhou 213000, China. Corresponding author: BAO Yan-ping, E-mail: baoyp@ustb.edu.cn)

Abstract: The deformation behavior of the high-carbon steel billet in the continuous casting mechanical reduction process was analyzed from aspects such as appearance deformation, two-phase region deformation, and strain by establishing a 3D thermal-mechanical coupling numerical model. The research results show that the deformation behavior of the high-carbon steel billet during the mechanical reduction process is closely related to the amount and the position of mechanical reduction applied. A larger reduction amount indicates a larger overall appearance deformation of the billet and a more reduced area of the two-phase region caused by the mechanical reduction; the strain generated inside the billet also increases, while the reduction efficiency decreases with the increase in the reduction amount. As the reduction position moves forward, the deformation trend of the billet expanding in the width direction on both sides has intensified, and the reduction efficiency increases. Furthermore, as the central solidification rate corresponding to the reduction position decreases, the intensity and area of the lateral tensile strain in the spread direction acting on the central region of the billet show an increasing trend.

Key words: billet; continuous casting; mechanical reduction; deformation behavior; numerical simulation

随着现代工业的快速发展, 钢铁市场对高均质性的钢材提出了更加苛刻的要求. 钢材的均匀性与中间或最终产品的适用持久性、可靠性密切相关^[1]. 为了获得均质性更高的轧材, 人们通常从连铸坯的生产就开始通过各种技术手段^[2-4]来实

现铸坯均质性的提升, 其中机械压下 MR (mechanical reduction) 技术近些年被认为是对铸坯均质性改善非常有效的技术措施^[5-6], 但该技术主要应用于板坯和大方坯^[7-10].

小方坯相较于大方坯及板坯而言, 通常其在

收稿日期: 2024-03-18

作者简介: 高宇波(1984—), 男, 江苏常州人, 北京科技大学博士研究生; 包燕平(1963—), 男, 北京人, 北京科技大学教授, 博士生导师; 王敏(1982—), 男, 山西朔州人, 北京科技大学教授, 博士生导师.

更高的拉速以及更大的冷却强度下进行,铸坯内部应力应变的分布更为集中,变化也更为剧烈。而且,更快的拉速和更强的冷却条件还使得小方坯液芯的稳定性相对较差,浇注过程中液芯的大小和位置易受浇注条件的影响而出现较为明显的波动,对于小方坯实施精准机械压下的难度也明显大于大方坯和板坯。此外,由于其内部液芯相对较小且铸坯截面宽厚比较低,机械压下作用传递至小方坯液芯处的效率相对更低,因此需要更大的压下作用才能对铸坯内部质量,特别是铸坯芯部质量起到改善作用^[11],这进一步增加了小方坯在实施机械压下时内部产生裂纹的风险,同时也对机械压下设施的压下能力提出了更高的要求。因此,小方坯的MR技术工业化应用鲜有报道。

然而,近几年随着小方坯连铸工装设备能力的不断升级,以及当前对于特殊钢种使用要求的逐步提升,包括出于经济性考虑,对更低压缩比及更简洁生产流程下如何高效实现铸坯到均质性轧材的生产同样提出了进一步的挑战^[12]。这些使得对于连铸生产小方坯,特别是高碳钢小方坯的均质性要求不断增加,再加上现有技术对于小方坯均质性改善具有较大局限性^[13-14],机械压下技术也开始尝试应用于小方坯连铸生产,并在实现均质性难度较大的高碳钢种上取得了开创性的工业化应用成果^[15]。这使得小方坯机械压下过程变形行为的数值模拟研究比以往更加具有有

实意义。但机械压下过程小方坯的变形行为研究尚未有相关报道。

为此,本研究将建立与高碳钢小方坯连铸机械压下过程相匹配的三维热力耦合模型,从外观变形、两相区变形以及应变等方面对该过程中的铸坯变形行为进行研究。其中,外观、两相区的变形与压下工艺对铸坯外形及内部均质性改善的效果密切相关,而实施机械压下产生的应变对于铸坯在压下过程是否产生裂纹等缺陷以及其产生的位置直接相关。本文将对不同压下条件下得到的各变形参数的数值模拟计算结果进行分析和探讨,以更直观、更深入地理解高碳钢小方坯压下过程的变形机理,并为小方坯机械压下工艺的合理制订和进一步优化提供参考依据。

1 数值模型的建立及校验

1.1 热力耦合数值模型的建立

所研究高碳钢的化学成分、连铸机的基本工装参数以及所模拟的浇注条件和压下参数分别见表1~表3。

表1 研究钢种化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of studied steel grade (mass fraction) %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.86	0.20	0.52	≤0.010	≤0.010	≤0.05	≤0.03

表2 小方坯连铸机基本参数
Table 2 Basic parameters of billet caster

断面尺寸 mm×mm	弧形半径/m	结晶器有效长度 mm	二冷区长度/m	压辊直径/mm	压下覆盖区间/m
160×160	10	800	7.7	450	13.6~18.0

表3 浇注及压下参数
Table 3 Parameters for casting and reduction

拉速/(m·min ⁻¹)	二冷强度/(L·kg ⁻¹)	过热度/°C	单辊压下量区间/mm	压下位置区间
2.3	0.35	20~35	1~5	0.1~0.9

在模拟计算时,针对不同的压下工艺,设计压下量1~5 mm,间隔1 mm,压下位置对应中心固相率 $f_s=0.1\sim 0.9$,间隔0.2。研究不同的压下量以及不同的压下位置对压下过程中铸坯外观形变、两相区变形以及铸坯内部应变分布的影响。

本研究利用商业有限元软件MSC.Marc建立三维热力耦合模型,模拟所研究的高碳钢小方坯在机械压下过程中的传热和变形行为。该三维热力耦合模型所采用的传热控制方程和热弹塑性

本构方程在文献[16]中进行了详细介绍。通过JMatPro软件获得了所研究钢种的导热系数、凝固潜热、比热容等热物理参数,而杨氏模量、泊松比等相关力学参数则采用文献[17]中的计算方法进行取值。

为实现计算的简化,同时又不失合理性,根据连铸压下过程的实际生产情况,对模型作出以下基本假设:1) 铸坯变形尺寸远小于连铸坯实际尺寸大小,轻压下过程中压下辊对连铸坯的作用

力方向不会随着变形发生变化,因此将材料视为满足小变形理论;2) 连铸坯变形分析中铸坯尺寸远超过实际物质中的不连续间隙大小,因此将坯料视为连续物质;3) 考虑到铸坯尺寸及不同成分材料的物性差别较小,忽略铸坯不同物性差异,将材料视为各处均匀分布,连铸坯材料物性参数与位置无关只随着温度的变化而改变;4) 在应变分析中忽略微观结构的影响,假设材料为各向同性。

在该热力耦合模型中,铸坯的初始温度设置为 $1\ 497\ ^\circ\text{C}$,这是本研究涉及钢种在工业实践中最常见的温度.以坯料开始实施压下时计算出的温度分布作为机械压下模型的初始条件.在坯料机械压下过程中,与辐射的主导作用相比,压下辊与坯料之间的传热可以忽略不计,采用 Stefan-Boltzmann 方程计算坯料表面的热通量,其中坯料的发射率设置为 0.8.而对于模型受力结构分析的边界条件,设定铸坯保持静止,上下辊按拉速反向位移咬入铸坯,上辊为主动压下辊,下辊为从动支撑辊;铸坯表面为自由面,铸坯前后的 2 个横截面,被咬入横截面为自由面,未被咬入横截面在拉坯方向位移为零。

在模拟的小方坯压下过程中,铸坯压下几何模型由铸坯、上辊压下辊和下辊支撑辊组成,将压下辊和支撑辊视为无变形的刚体,而将坯料视

为可变形体,假设压下辊与钢坯之间的摩擦系数为 0.3.模型尺寸与实际连铸机浇注的铸坯及压辊实际尺寸相同,钢坯长度和初始截面尺寸分别设定为 $1\ 000\ \text{mm}$ 和 $160\ \text{mm}\times 160\ \text{mm}$.压下过程的三维热力耦合几何模型示意图如图 1 所示。

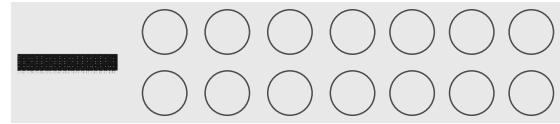


图 1 机械压下过程热力耦合模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal-mechanical coupling model established for mechanical reduction process

1.2 数值模型的校验

对于热力耦合模型的校验主要通过各压下辊输出的压下作用力与实际压辊压下力测量值的对比进行.表 4 为所研究高碳钢在 $25\ ^\circ\text{C}$ 过热度、 $2.3\ \text{m/min}$ 拉速及 $0.35\ \text{L/kg}$ 二冷强度的浇注条件下,通过 2#~6#压辊按照 2 -4 -5 -5 -4 mm 的压下量分配情况进行机械压下的压下力反馈值的变化.可以看出,各压辊模型计算值与实际测量值的偏差均在 5% 以内,这说明所建立的热力耦合模型可以应用于实际生产的模拟计算和预测。

表 4 压下作用力计算值与实测值对比

Table 4 Comparison of calculated values and measured values of reduction reaction forces

参数	2#	3#	4#	5#	6#
压下作用力计算值/kN	32.6	109.1	203.8	306.8	254.4
压下作用力实测值/kN	31	106	196	295	264
偏差/%	4.91	2.84	3.83	3.85	-3.77

2 结果与讨论

2.1 铸坯外观变形

小方坯在实施机械压下时,最直观的为铸坯在外观上的形变.图 2 为铸坯上表面沿压下方向的位移量随压下量变化的情况.从铸坯上表面各位置的变化来看,在压辊的作用下,铸坯横截面中心位置沿压下方向的位移量最大,然后分别向两侧递减;而随着压下量的增加,横截面上表面各位置处的压下位移量也随之增加,且变化趋势基本保持一致。

由图 3 可知,相对于铸坯上表面,压辊压下导致铸坯下表面各位置沿压下方向的变形位移要

小得多.而当压下量不同时,下表面各位置处的形变位移变化趋势也不完全相同.当压下量为 $1\sim 2\ \text{mm}$ 时,压辊压下作用处对应铸坯下表面各位置的压下方向位移差异较大,铸坯靠近中心位置区域出现了沿压下相反方向的形变位移,而沿压下方向的位移最大值出现在靠近角部的两侧;当压下量增大至 $3\sim 4\ \text{mm}$ 时,铸坯下表面各位置总体均呈现沿压下方向的位移,角部沿压下方向的位移量最大,随后向内不断减小,在角部向内延伸的两侧近角位置则又出现位移变形的回升,两侧近角位置再向下表面中心延伸则位移量又逐渐减小;当压下量继续增大至 $5\ \text{mm}$ 时,下表面的变形位移量总体呈增大趋势,且各位置沿压下方向的形变位移量变化较为平缓且相对均衡。

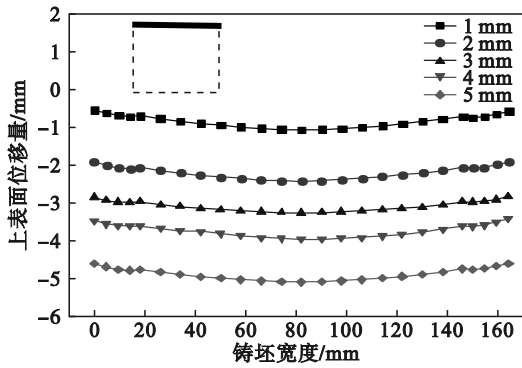


图2 铸坯上表面沿压下方向的位移量随压下量变化
Fig. 2 Variation of displacement of upper surface of billet along reduction direction with reduction amount

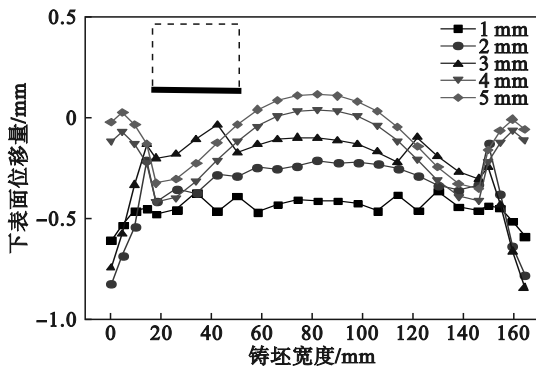


图3 铸坯下表面沿压下方向的位移量随压下量变化
Fig. 3 Variation of displacement of lower surface of billet along reduction direction with reduction amount

从图4所示不同压下量下铸坯的侧面形变位移来看,铸坯靠近上、下面的位置呈沿宽度方向扩展形变趋势,且下侧的宽展变形要更大些;这种形变量随着上下侧向侧面中心变化而逐渐减小,且在铸坯侧表面中心位置非但没有向宽度方向延展,反而出现了少量向铸坯内部凹陷的形变情况,这很可能是由于在铸坯横截面上铸坯侧表面中心位置附近坯壳厚度较薄,而此处对应的两相区面积占比较大,进而使得该处在铸坯侧面上、下位置宽展变形挤压的作用下而向内凹陷.从侧面形变曲线还可以看出,凹陷最明显的地方出现在铸坯侧面中心偏下位置处.随着压下量的增大,侧面中心向内凹陷的变形呈加剧趋势.

不同压下位置对铸坯外观变形的影响如图5~7所示.不同压下位置处,铸坯上表面各位置压下位移随着中心固相率的降低而呈略增趋势,各位置压下方向的位移大小变化趋势基本相同;下表面沿压下方向的位移随着中心固相率的降低亦呈增加趋势,且压下时机越晚,下表面各位置处的位移差异越明显,压下时机提前,则使得下

表面在压下方向的位移更为均衡.而从不同压下时机对应的铸坯侧面在宽展方向的形变位移来看,压下越早,铸坯侧面各位置整体沿宽度方向向外扩展的趋势越强;随着压下位置对应中心固相率的增加,铸坯侧面中心位置出现凹陷变形的趋势和程度则更为明显.

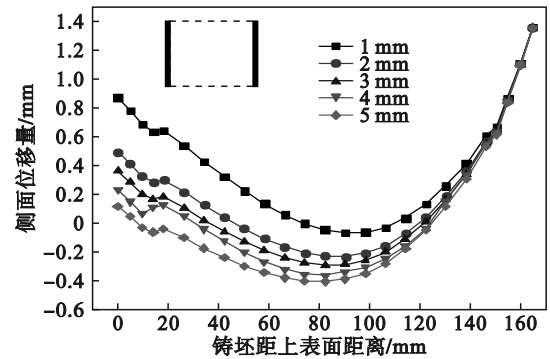


图4 铸坯侧面沿宽展方向的位移量随压下量变化
Fig. 4 Variation of displacement of side surface of billet along spread direction with reduction amount

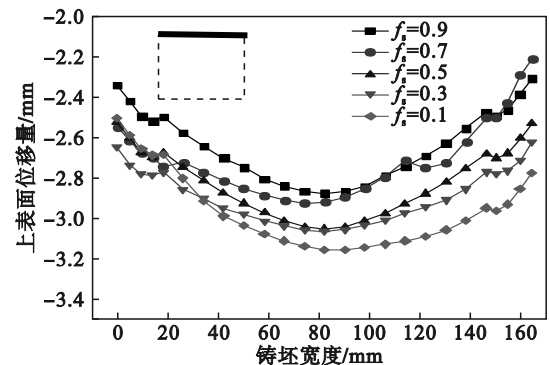


图5 铸坯上表面沿压下方向的位移量随压下位置变化
Fig. 5 Variation of displacement of upper surface of billet along reduction direction with reduction position

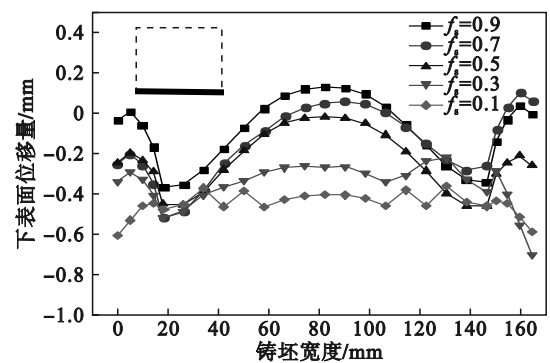


图6 铸坯下表面沿压下方向的位移量随压下位置变化
Fig. 6 Variation of displacement of lower surface of billet along reduction direction with reduction position

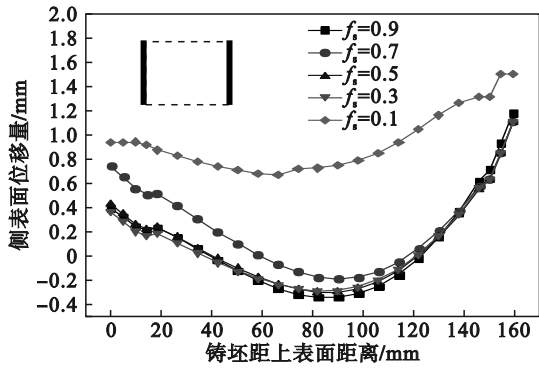


图7 铸坯侧面沿宽展方向的位移量随压下位置变化
Fig. 7 Variation of displacement of side surface of billet along spread direction with reduction position

2.2 两相区变形

铸坯两相区的变形情况是实施机械压下工艺来改善铸坯内部质量的关键,因此,对小方坯在机械压下作用下的两相区变形情况的计算结果进行以下对比讨论。

从图8可以看出,在相同中心固相率 f_s 条件下,随着压下量的增加,两相区面积减小量也增大;同时,图8还表明,压下导致两相区面积减小量增幅随压下量的增加而逐渐降低,这表明随着压下量的增加,单位压下量对两相区变形的作用会下降。

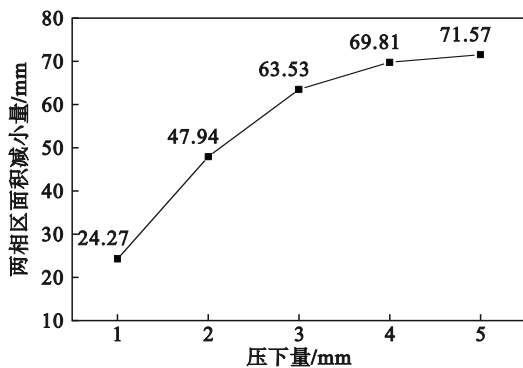


图8 压下量对铸坯两相区面积减小量的影响
Fig. 8 Effect of reduction amount on reduced area of two-phase region of billet

从图9可以得知,相同压下量下,压下位置对应中心固相率 f_s 越大,两相区面积减小量越小;且从图9中曲线的变化趋势可以看出,随着 f_s 的增大,两相区面积减小量的增幅也整体呈降低趋势.这一方面是由于铸坯两相区面积随着压下位置的后移而不断减小;另一方面是压下位置越靠后,传递至两相区的压下作用也越弱。

从压下作用下小方坯两相区面积变化来看,压下量的增大和压下位置中心固相率的降低将

有利于两相区变形量的增加.然而,这2个参数各自增加两相区变形的变化方向对于两相区面积减小量增幅的影响却呈相反的作用趋势,这与压下时凝固坯壳对铸坯表面压下的消耗程度密切相关,即压下效率。

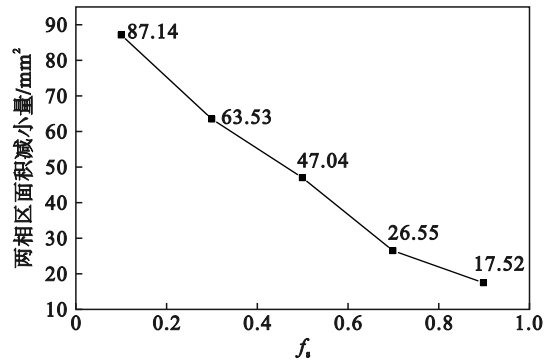


图9 压下位置对铸坯两相区面积减小量的影响
Fig. 9 Effect of reduction position on reduced area of two-phase region of billet

压下效率是铸坯压下变形时传递到铸坯凝固前沿压下量的效率,采用可全面反映这一压下指标的理论计算方法^[17],计算公式如下:

$$\eta = \frac{\Delta A_i}{\Delta A_s} \times 100\%.$$

式中: η 为压下效率,%; ΔA_i 为压下时铸坯凝固前沿液芯的变形面积, mm^2 ; ΔA_s 为压下时铸坯表面的理论变形面积, mm^2 。

不同压下量及不同压下位置处的压下效率的计算结果分别如图10和图11所示.由图10可知,在相同压下位置,随着压下量的增加,压下效率逐渐从1 mm的15.67%降低至5 mm的8.95%;这与图8中两相区减小量的增幅随压下量的变化趋势完全一致.图11则表明,在相同压下量下,压下效率随着压下位置的后移即中心固相率 f_s 的增加而降低,从 $f_s=0.1$ 时的18.15%降低至 $f_s=0.9$ 时的3.65%.这说明,压下得越晚,压辊的压下作用越难传递至两相区,这与图9中两相区面积减小量的增幅趋势完全相符。

此外,对于图10和图11中各自的变化趋势,还可以看出,在所建模型计算范围内,随着压下量的增加,压下效率将加剧下降,而压下位置处对应中心固相率 f_s 对于压下效率的影响,则在 f_s 大于0.7后呈逐渐减缓趋势。

2.3 应变

连铸小方坯在机械压下过程中,除了会产生外观变形以及两相区变形外,铸坯在受力产生变形时,各位置上的变形程度也不相同,具体以应

变进行描述.

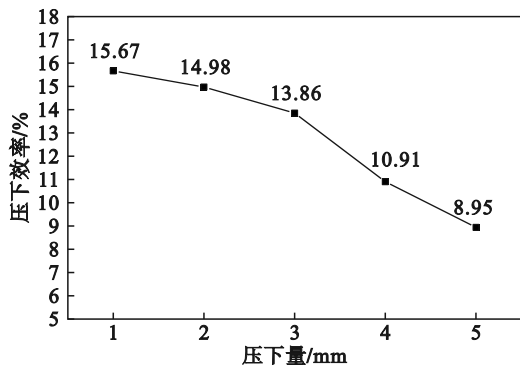


图 10 压下量对压下效率的影响

Fig. 10 Effect of reduction amount on reduction efficiency

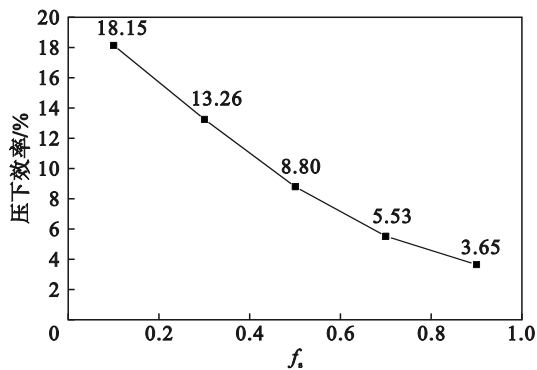


图 11 压下位置对压下效率的影响

Fig. 11 Effect of reduction position on reduction efficiency

由不同压下量下铸坯内部应变分布(图 12)可知,从应变在铸坯横截面分布来看,角部的应变最大,其次是与压辊接触的上、下面,中心区域的应变较低.随着压下量的增加,铸坯各位置应变整体呈增大趋势;同时,通过铸坯压下方向向中心传递的应变亦趋于明显,铸坯芯部受压下作用逐步呈向两侧扩展状.再从铸坯横截面上、下两侧的应变来看,靠近上辊一侧产生的应变较靠近下辊侧的应变要更大,这主要是由于在本模型中,上辊为主动压下辊,而下辊为从动压下辊,这与其他坯形压下过程的应变研究结果^[18]类似.从铸坯侧面的应变来看,靠近上、下面的应变趋于产生扩大宽展,而靠侧面中间位置则反而趋于减弱,且压下会导致铸坯产生向内凹陷的趋势,这与铸坯外观变形部分的计算结果一致.

图 13 表明,由于不同压下位置对应两相区面积大小的差异,中心低应变区域的面积存在较大差异.随着压下位置处对应中心固相率的降低,铸坯横截面应变分布总体增加,铸坯四周相对于

中心应变的极值差异也变大;而且,压下越早,应变更易向铸坯中心传递,铸坯中心区域的应变由于受向下压下作用后导致的向宽度方向两侧扩展的趋势逐步增强.

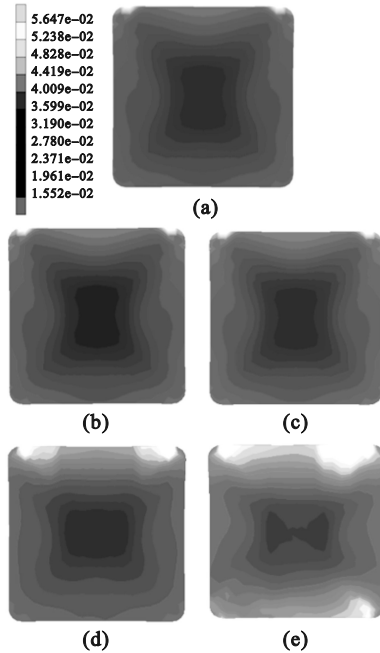


图 12 压下量对铸坯应变分布的影响

Fig. 12 Effect of reduction amount on strain distribution of billet

(a)—1 mm; (b)—2 mm; (c)—3 mm; (d)—4 mm; (e)—5 mm.

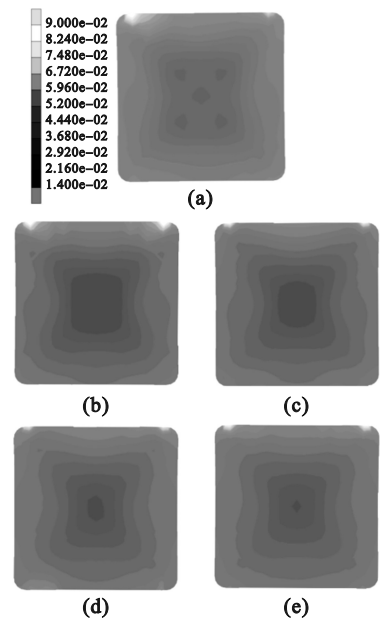


图 13 压下位置对铸坯应变分布的影响

Fig. 13 Effect of reduction position on strain distribution of billet

(a)— $f_s=0.1$; (b)— $f_s=0.3$; (c)— $f_s=0.5$; (d)— $f_s=0.7$; (e)— $f_s=0.9$.

大多数内部裂纹往往发生在铸坯两相区的裂纹敏感区(BTR)^[6],当有效应变(施加在裂纹敏感区内的拉应变分量累积效应)达到大于临界应变时就会产生裂纹.压下过程中,铸坯会在宽度、厚度和浇注3个方向产生应变.通过对小方坯压下位置对应两相区内裂纹敏感区与所受各方向的应变分量的作用关系分析可知,只有宽度方向及拉坯方向的应变与裂纹敏感区内枝晶间生长方向呈垂直关系.当这2个方向的应变分量为拉应变时,则很容易在裂纹敏感区内产生沿枝晶的撕裂,进而产生裂纹.再结合本模型中所取铸坯长度较为有限,且铸坯端部设定为自由端,这使得在拉坯方向上产生的应变与实际值可能存在较大偏差,所以主要对比分析铸坯在宽展方向上应变分量的变化情况.

由图 14 可知,就铸坯横截面上沿宽展方向的应变分量而言,铸坯外侧受压,芯部受拉;上、下侧受拉应变,侧面中间受压应变.随着压下量的增加,中心受拉应变的区域和强度均逐渐增大.由图 15 可知,在铸坯垂直于横截面上、下两边中心线各位置,沿铸坯宽展方向的应变随着压下量的增加而逐渐向拉应变方向转变,且压下量越大,所受拉应变也越大.

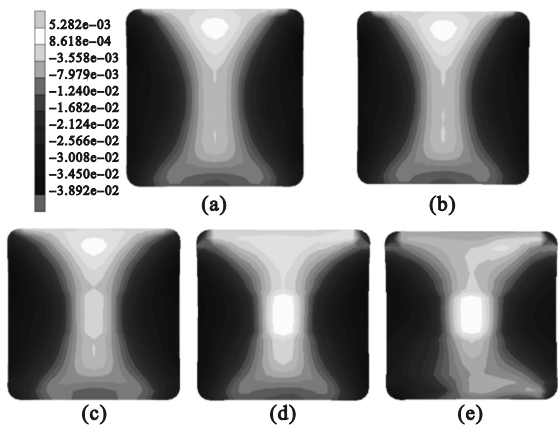


图 14 压下量对宽展应变分量分布的影响
Fig. 14 Effect of reduction amount on distribution of strain component in spread direction
(a)—1 mm; (b)—2 mm; (c)—3 mm;
(d)—4 mm; (e)—5 mm.

随着压下时机的前移,如图 16 所示,铸坯沿宽展方向的应变分量的分布梯度增大,铸坯中心区域受沿宽展方向左右两侧拉应变的区域和强度均逐渐增大.而由图 17 可知,在铸坯横截面垂直中心线各位置,沿铸坯横截面宽展方向的应变随着压下位置的前移而不断向拉应变方向转变,

当中心固相率 f_s 降低至 0.1 时,该方向大部分位置在压下作用下主要产生拉应变.

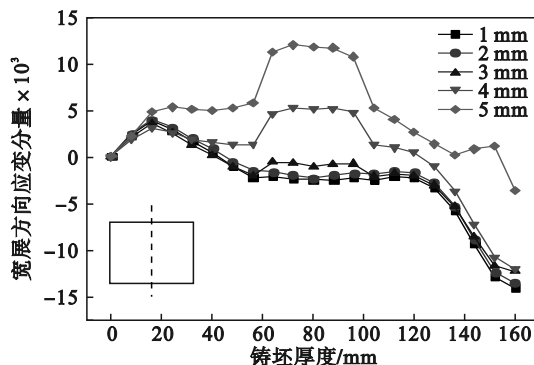


图 15 压下量对宽展方向应变分量沿铸坯表面中心垂直方向分布的影响
Fig. 15 Effect of reduction amount on distribution of strain component in spread direction along vertical central line of billet surface

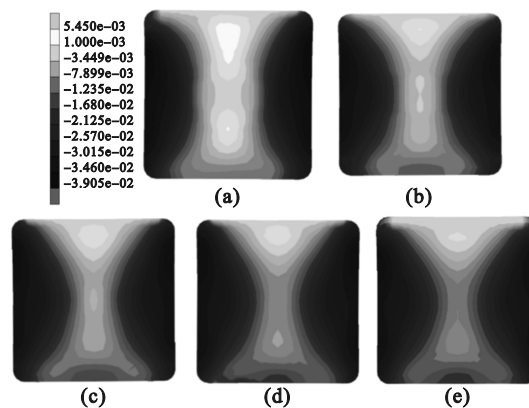


图 16 压下位置对宽展应变分量分布的影响
Fig. 16 Effect of reduction position on distribution of strain component in spread direction
(a)— $f_s=0.1$; (b)— $f_s=0.3$; (c)— $f_s=0.5$;
(d)— $f_s=0.7$; (e)— $f_s=0.9$.

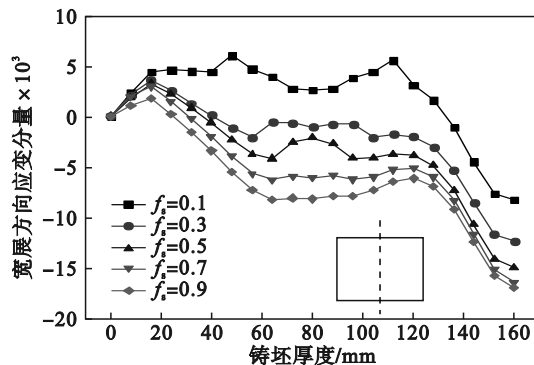


图 17 压下位置对宽展方向应变分量沿铸坯表面中心垂直方向分布的影响
Fig. 17 Effect of reduction position on distribution of strain component in spread direction along vertical central line of billet surface

3 结 论

1) 采用有限软件 MSC.Marc 将小方坯机械压下过程视为各向同性连续分布物质的小变形过程,建立与之相匹配的三维热力耦合数值模型,通过对该模型进行不同参数条件下的模拟计算,研究了高碳钢小方坯连铸机械压下过程的变形行为。

2) 在对小方坯实施机械压下时,就铸坯外观变形而言,铸坯上表面的变形量要远大于下表面,且压下量对上表面变形量的影响比压下位置更大;铸坯侧面形变位移来看,越早压下,铸坯侧面各位置外扩的趋势越强,且随着压下量的增大,铸坯侧面中心向内凹陷的变形呈加剧趋势。

3) 机械压下导致小方坯两相区面积的减小量随着压下量的增加以及压下时机的提前而增加,而压下效率则随压下量的增加以及压下位置的后移而降低。

4) 在机械压下过程中,小方坯横截面上角部所受的应变最大,铸坯中心区域则最小;随着压下量的增加以及压下时机的提前,铸坯横截面各处的应变总体呈增长趋势,而铸坯中心受拉应变的强度和区域均逐渐增大。

参考文献:

- [1] Chen C Y, Wang L, Sun M, et al. Recent advances in inclusions and central segregation control technology in tyre cord steel and saw wire steel [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2023, 50(2): 179-214.
- [2] Sivesson P, Ortlund T, Widell B. Improvement of inner quality in continuously cast billets through thermal soft reduction and use of multivariate analysis of saved process variables [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 1996, 23 (6) : 504-511.
- [3] Zhang Z, Wu M H, Zhang H J, et al. Modeling of the as-cast structure and macrosegregation in the continuous casting of a steel billet: effect of M-EMS [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 301: 117434.
- [4] Han Y S, Yan W, Zhang J S, et al. Comparison and integration of final electromagnetic stirring and thermal soft reduction on continuous casting billet [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2021, 28(2): 160-167.
- [5] Zhang M Y, Bao Y P, Zhao L H, et al. Improvement of carbon segregation in cast bloom and heredity in hot-rolled bar [J]. *Metallurgical Research & Technology*, 2021, 118 (6): 610.
- [6] Zong N F, Jing T, Liu Y. Comparative studies on a chamfer technology and a convex roll technology during the soft reduction process [J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2021, 66(3): 819-829.
- [7] Zhang J Y, Wu C H, Ji C, et al. Evolution of microporosities in wide-thick continuous casting slab during heavy reduction process [J]. *Steel Research International*, 2022, 93(7): 2000601.
- [8] Yang B, Wang M L, Zhang H, et al. Optimization of heavy reduction process on continuous-casting bloom [J]. *Metals*, 2022, 12(11): 1873.
- [9] Chen X H, Deng W, Niu S. Industrial application of mechanical reduction on continuous casting of bearing steel bloom [J]. *Processes*, 2021, 9(12): 2280.
- [10] Okimori M, Nishihara R, Fukunaga S, et al. Development of soft reduction techniques for preventing center porosity occurrence in large size bloom [J]. *Tetsu-to-Hagane*, 1994, 80(8): 120-123.
- [11] Byrne C, Tercelli C. Mechanical soft reduction in billet casting [J]. *Steel Times International*, 2002, 26(10) : 33-35.
- [12] Ludlow V, Normanton A, Anderson A, et al. Strategy to minimise central segregation in high carbon steel grades during billet casting [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2005, 32(1): 68-74.
- [13] Zeng J, Chen W Q, Wang Q X, et al. Improving Inner quality in continuous casting rectangular billets: comparison between mechanical soft reduction and final electromagnetic stirring [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2016, 69(8): 1623-1632.
- [14] Nabeshima S, Nakato H, Fujii T, et al. Control of centerline segregation in continuously cast blooms by continuous forging process [J]. *ISIJ International*, 1995, 35 (6): 673-679.
- [15] Gao Y B, Bao Y.P, Wang Y, et al. Development of a novel strand reduction technology for the continuous casting of homogeneous high-carbon steel billet [J]. *Steel Research International*, 2023, 94(5): 2200740.
- [16] Zhang M Y, Bao Y P, Zhao L H, et al. Formation and control of central cracks in alloy steel ZKG223 [J]. *Steel Research International*, 2022, 93(11): 2200289.
- [17] Wu C H, Ji C, Zhu M Y. Numerical simulation of bulging deformation for wide-thick slab under uneven cooling conditions [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, 49(3): 1346-1359.
- [18] Zong N F, Huang J, Liu Y, et al. Controlling centre segregation and shrinkage cavities without internal crack in as-cast bloom of steel GCr15 induced by soft reduction technologies [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2021, 48(8): 944-952.