

AA7050 合金半连铸开裂及变形机制

白清领¹, 缪姚军¹, 单小龙¹, 周 峰²

(1. 上海中天铝线有限公司, 上海 201108; 2. 江苏中天科技股份有限公司, 江苏南通 226463)

摘要: 通过数值模拟对工业大规格铸锭在半连铸过程中的应力场分布以及铸锭的变形进行了研究, 分析了铸锭可能的开裂方式以及铸锭变形的机制, 同时也研究了铸造速度对铸锭中应力场和变形的影响。结果显示, 改变铸造速度对铸锭中各应力分量的影响不同, 因此也影响了铸锭可能的开裂方式; 提高铸造速度大幅增加了轧制面收缩的程度, 但翘曲主要受起始阶段铸造速度的影响, 受稳态铸造速度的影响不太显著。初始铸造速度对翘曲的影响主要是由其液穴深度的影响所致。

关键词: 半连续铸造; 翘曲; 收缩; 铸造速度; 液穴深度

高强度AA7050合金是一种非常重要的结构材料, 广泛应用于航空航天、交通运输等领域。目前工业上生产的AA7050合金锭坯主要采用半连续铸造工艺。铸造时由于冷却不均铸锭各部分会发生不均匀收缩, 从而在铸锭中出现残余应力^[1]。应力使铸锭几何形状发生扭曲变形, 导致形成底部翘曲、轧制面收缩等缺陷^[2-6], 影响铸锭的后续加工。而应力超过一定的极限值铸锭就会开裂, 导致整体报废或者部分切头, 大幅降低成材率。通过优化铸造工艺可以显著改善铸锭内部的应力大小及分布, 从而降低铸锭的几何变形和开裂倾向。数值模拟可以再现铝合金铸造过程温度场、流场和应力场等物理场的变化, 对于理解铸造过程及优化铸造工艺大有帮助。其中对应力场的模拟尤为重要, 因为大多数比较严重的铸造缺陷如铸锭底部翘曲、裂纹等都与应力有关。

1 有限元模型及参数设置

1.1 铸锭几何模型

本研究模拟了工业规格1 320 mm × 440 mm的AA7050合金铸锭半连续铸造过程, 采用1/4轴对称模型, 如图1所示, 计算域内包含铸锭、结晶器和引锭头三个几何实体模型。

1.2 计算模型及合金参数

AA7050合金的密度、等效比热容、热导率、热膨胀系数、弹性模量、泊松比等参数均是随温度变化的, 数值模拟计算过程中采用了流场、温度场和应力场耦合的方法, 其中流场采用低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型^[7], 通过与温度场的耦合可以获得更准确的液穴温度分布。铸锭换热边界包括铸锭与结晶器、二次冷却水及底座三个区域, 该换热模型对铸锭温度场的计算的准确性已经过试验验证^[8]。半连续铸造应力场采用扩展Ludwik方程计算, 方程中与合金有关的力学性能参数通过试验拟合获得。有关计算模型及该合金的物理和力学性能参数详见文献^[9]。

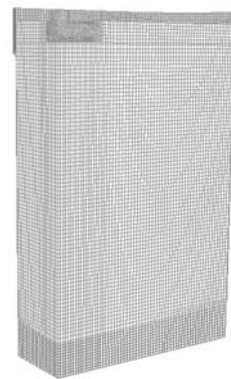


图1 AA7050铝合金铸锭几何模型及网格划分

Fig. 1 Geometric model and mesh

generation of AA7050 aluminum alloy ingot

作者简介:

白清领(1983-), 男, 博士, 研究方向为高性能铝合金材料及加工工艺。E-mail: baiql@chinaztt.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

01-0077-05

收稿日期:

2022-01-07 收到初稿,

2022-03-04 收到修订稿。

1.3 铸造工艺参数

本研究模拟的半连续铸造过程工艺参数如下：铸造温度690℃、冷却水流速为430 L/min、冷却水温度25℃，铸造速度为研究变量，如图2所示。模拟的铸造长度约为1.6 m，确保铸造过程完全进入稳态阶段。

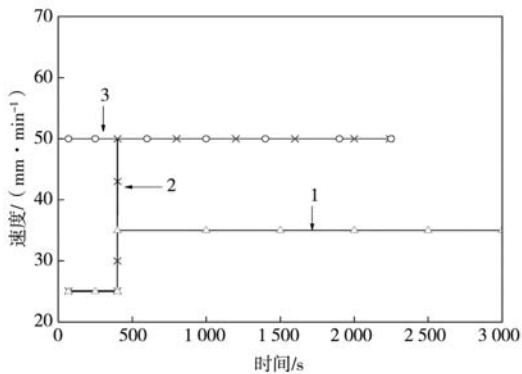


图2 半连续铸时铸造速度

Fig. 2 Casting speed during direct chill casting

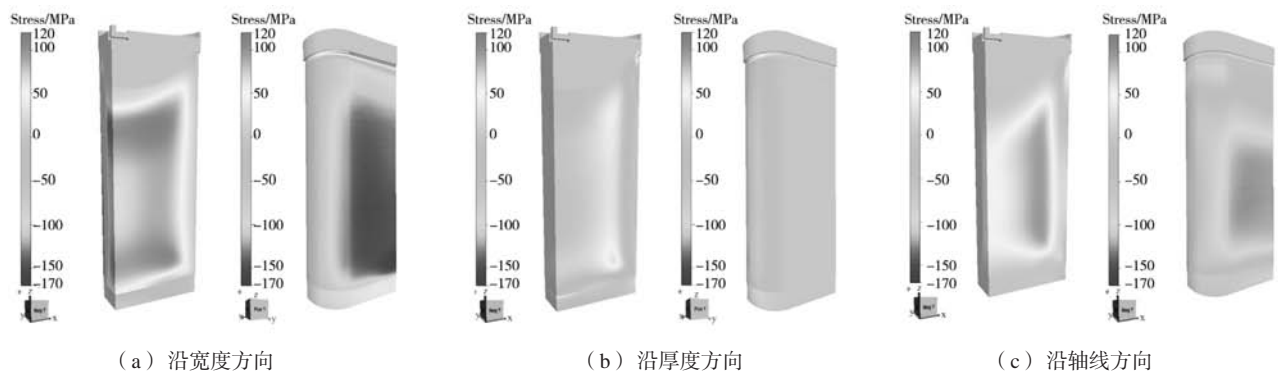


图3 铸锭沿各方向的应力分量

Fig. 3 Stress component along different direction in the ingot

的扭曲变形，使其宏观几何形状出现显著变化，为铸造过程及后续的加工带来不良的影响。在当前的铸造工艺下，铸锭沿宽度、厚度及轴向的变形如图4所示。根据模拟结果可知，铸锭在宽度方向及轴向的变形主要集中在铸锭底部，其他区域变形不显著。铸造在厚

2 结果与讨论

2.1 铸锭应力场和变形机制

高强度铝合金在半连铸时，会在铸锭内部形成复杂的应力应变场，一方面使铸锭的几何形状发生变化，另一方面当应力应变超过一定范围时还会导致铸锭开裂，造成比较严重的影响。在35 mm/min的铸造速度，铸锭沿各方向的应力分量如图3所示。从宏观上看扁铸锭表面呈压应力状态，内部为拉应力。从应力水平来看，沿宽度方向的应力最大，沿厚度方向的应力最小。AA7050合金铸造时易产生冷裂，这种脆性开裂一旦出现将发生急剧扩展，表面的压应力也难以抑制，因此往往会使整个铸锭断开。根据各应力分量的水平可以预测裂纹在靠近窄面一端发生的倾向最大，垂直于宽度方向沿轴向扩展形成底部裂纹，或者在轴向应力的作用下形成侧面裂纹（J形裂纹）。由于铸锭沿轴向的应力也比较大，少数情况下也可能会发生横向断裂。

在半连铸时的不均匀收缩也会导致铸锭发生一定

度方向的变形主要分布在轧制面上，且越靠近中心变形越严重。

铝合金铸锭半连铸时的扭曲变形主要产生两种缺陷，即底部翘曲和轧制面收缩。翘曲指在铸造起始阶段铸锭底部上翘的现象。根据图4a、c可知，铸锭沿宽

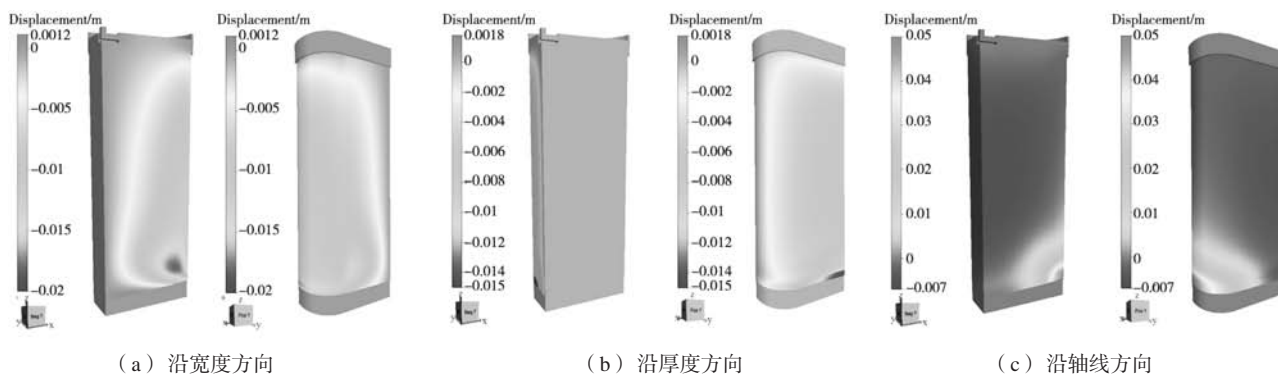


图4 铸锭沿各方向的变形

Fig. 4 Displacement along different direction in the ingot

度方向和轴向最大变形处正好与翘曲最严重的地方吻合,因此翘曲产生的原因可归结为两种变形效应的组合。在铸造的起始阶段,铸锭底部在引锭头和冷却水作用下形成一层凝壳,但表面的凝壳降温更剧烈,轴向收缩量大于中部,导致底部的两头向上翘起;同时液穴外部的凝壳由于向里收缩会在底部的凝壳上产生扭矩,使底部凝壳向上扭曲变形,增加翘曲的程度。其中后者是翘曲产生的主要因素。翘曲可能会对铸造过程和铸锭质量造成各种不良影响,有必要采取适当的改善措施。

轧制面收缩是铝合金半连铸时另外一种变形缺陷,在宽厚比较大的铸锭中比较明显。该铸造缺陷指铸锭的轧制面往里凹陷,显著偏离了原本的尺寸。其产生的原因是,铸锭凝壳在见水后急剧冷却收缩,此时内部温度很高甚至尚未凝固,对表层的抑制作用很小。随着铸锭内部降温,表层又进一步受到来自内部的拉扯作用,收缩量进一步增加。而此时轧制面两端由于受到侧面凝壳的制约不会再次收缩,最终使铸锭形成凹形的横截面。轧制面的收缩过程会一直进行到表层和心部的温度达到一致时为止。根据铸造经验,铸锭轧制面收缩量两端约为2.8%~4.35%,中间约为6.4%~8.1%^[10]。铸锭轧制面收缩使得在轧制前必须加

大铣面深度,降低了生产效率和成材率。本次模拟计算的稳态时轧制面沿铸锭宽度方向的收缩情况如图5所示。在实际生产中,可以根据模拟结果对铸锭尺寸进行反向补偿设计,从而达到提升成材率的目的。

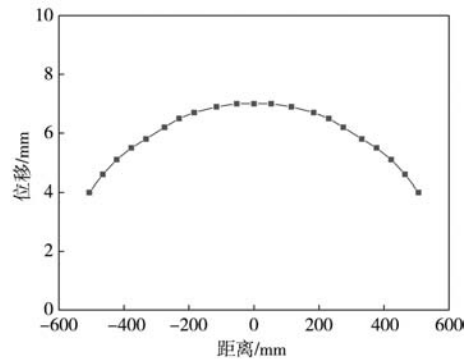


图5 轧制面沿宽度方向的变形量

Fig. 5 Displacement of rolling face along ingot width

2.2 铸造速度对应力场和铸锭变形的影响

铸造速度对应力场的影响如图6所示,图6a-d分别为最大主应力及宽度方向、厚度方向和轴向应力分量,所选点为靠近铸锭底部具有最高应力值处。图6a显示,铸造速度由35 mm/min提升至50 mm/min后,最大主应力峰值从126 MPa提高到138 MPa,但是应力水

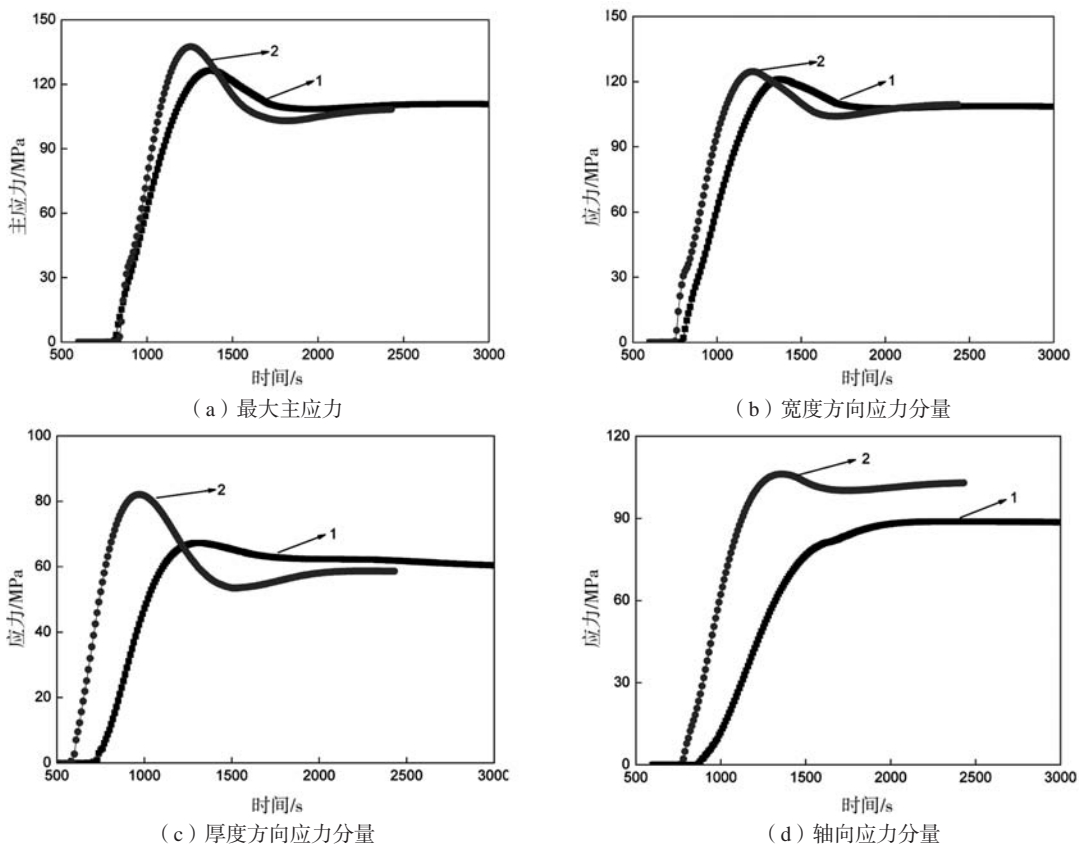


图6 铸造速度对该点应力变化的影响

Fig. 6 Effect of casting speed on evolution of stress

平的提高主要在一定的温度范围和铸锭区域内,达到稳态后应力水平基本没有显著的区别。图6b-d显示,提高铸造速度对宽度方向应力分量几乎没有影响;对厚度方向应力分量的影响比较复杂,大幅提高了应力的峰值,却使稳态下的应力明显降低;对沿轴向的应力分量影响最为明显,使稳态应力水平大为提高。铸锭中各应力分量随铸造速度的不同变化,使铸锭可能的开裂形式发生改变,即随着铸造速度提高,铸锭J形开裂和横向开裂的倾向增大。

铸造速度对轧制面收缩的影响如图7所示,可以看到提高铸造速度明显加剧了轧制面收缩的程度。轧制面的收缩可以分为液穴以上的阶段和液穴以下的阶段,提高铸造速度一方面使液穴更深,使凝壳在液穴以上的阶段收缩增加,另一方面也使液穴以下部分内

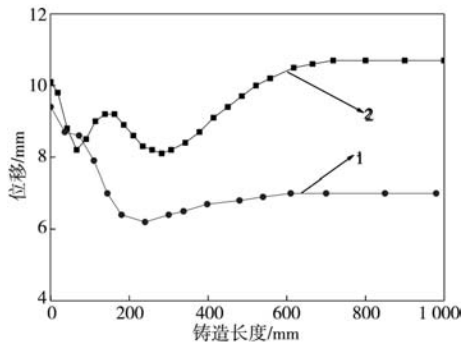


图7 铸造速度对轧制面收缩的影响

Fig. 7 Effect of casting speed on rolling face pull in

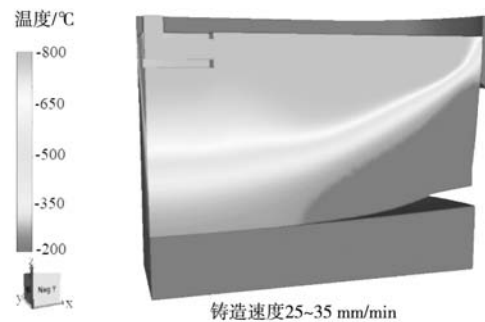
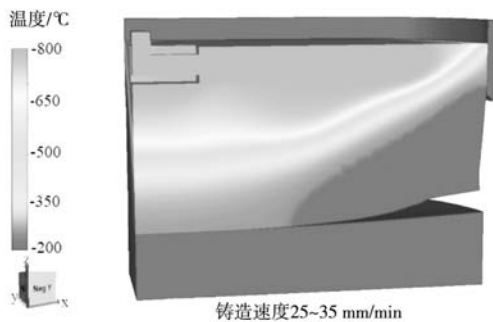


图9 相同起始速度不同稳态速度下铸锭翘曲变化

Fig. 9 Evolution of butt-curl at same start-up casting speed and different steady state casting speed

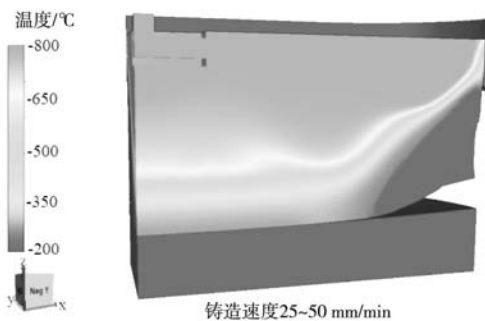
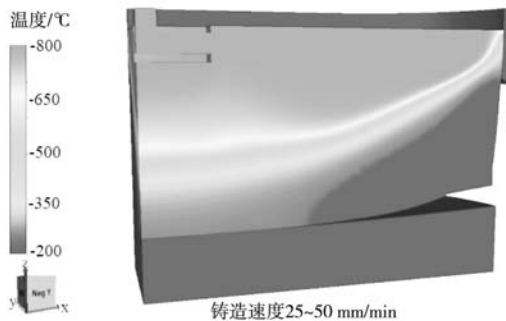


图10 不同起始速度相同稳态速度下铸锭翘曲变化

Fig. 10 Evolution of butt-curl at same steady state casting speed and different start-up casting speed

外温度差更大,需要更多时间达到温度均匀,因而轧制面收缩的时间更长,收缩量也更大。

铸造速度对翘曲的影响如图8所示,结果显示翘曲在起始铸造阶段迅速发展,很快就达到稳定状态。因此起始铸造阶段的铸造速度对翘曲影响最大并且起到决定性的作用,而铸造一段时间之后翘曲量即不在变化,这时再改变铸造速度对翘曲程度也不会有明显影响。

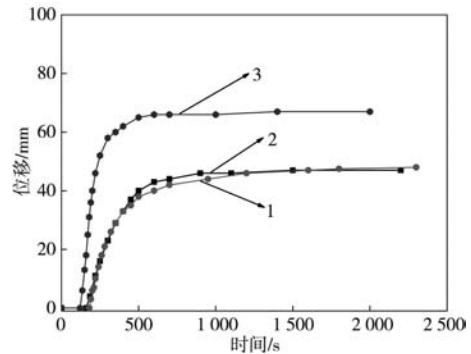


图8 不同铸造速度下铸锭翘曲变化

Fig. 8 Evolution of butt-curl at different casting speed

起始铸造速度对翘曲的影响主要是通过其对液穴的影响体现出来的。如图9所示,在初始阶段采用相同的铸造速度,液穴的形状是一样的,因此翘曲也一样。400 s后铸造速度发生变化,采用高铸速的液穴开始逐渐比低铸速的液穴加深,但是由于已经铸造了一段长度,翘曲的程度仅有微量的增长。在起始阶段即采用高铸速时,液穴变得更陡(图10),扭转力矩使

侧面翘起变得更容易,因此翘曲的程度更大。根据以上分析可知,所有影响初始阶段液穴深度的因素都会对翘曲的变化有影响,只是铸造速度的作用更加显著。

3 结论

(1) 铸锭中沿三个方向的应力分量都是表面呈压应力,中心为拉应力,且应力水平在靠近窄面一端最高。根据对应力场的分析可知,该规格铸锭比较容易产生垂直于宽度方向沿轴向扩展形成底部裂纹,或者在轴向应力的作用下形成侧面裂纹。

(2) 铸锭中的翘曲和轧制面收缩是对铸造过程和随后的加工工序影响最大的两种变形缺陷,其形成与铸锭收缩和几何形状对收缩的制约有关。

(3) 改变铸造速度对铸锭中各应力分量的影响不同,因此也影响了铸锭可能的开裂方式。

(4) 提高铸造速度显著增加了轧制面的收缩程度,但翘曲主要受起始阶段铸造速度的影响,稳态铸造速度的影响不太显著。初始铸造速度对翘曲的影响主要是由其对液穴的影响所致,因此所有影响初始阶段液穴深度的因素都会对翘曲的变化有影响。

参考文献:

- [1] GRANDFIELD J F, MCGLADE P T. DC casting of aluminium: Process behaviour and technology [J]. Materials Forum, 1996, 20: 29-51.
- [2] DROSTE W, SCHNEIDER W. Laboratory investigations about the influence of starting conditions on butt curl and swell of DC cast sheet ingots[C]// Light Metals, 1991: 945-951.
- [3] FJÆR H G, JENSEN E K. Mathematical modeling of butt curl deformation of sheet ingots: Comparison with experimental results for different starter block shapes [C]// Light Metals, 1995: 951-959.
- [4] SCHNEIDER W, JENSEN E K, CARRUPT B. Development of a new starting block shape for the D.C.casting of sheet ingots part 1: experimental results[C]// Light Metals, 1995: 605-611.
- [5] DREZET J M, RAPPAZ M. Modeling of ingot distortions during direct chill casting of aluminum alloys [J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 1996, 27A: 3214-3225.
- [6] ISHIKAWA N. Numerical simulation of butt curl in the semi-DC casting of aluminum slabs [J]. Furukawa Review, 2005, 28: 46-52.
- [7] MORTENSEN D. Mathematical model of the heat and fluid flows in direct-chill casting of aluminum sheet ingots and billets [J]. Metallurgical Transactions B, 1999, 30: 119-133.
- [8] 白清领,李宏祥,张济山,等. 7050铝合金半连续铸过程应力场及开裂倾向 [J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(11): 1527-1533.
- [9] 白清领. 7×××系铝合金半连续铸造开裂缺陷的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2016
- [10] 唐剑,王德满,刘静安,等. 铝合金熔炼与铸造技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

Mechanism of Cracking and Ingot Distortion During Direct Chill Casting of AA7050 Alloy

BAI Qing-ling¹, MIAO Yao-jun¹, SHAN Xiao-long¹, ZHOU Feng²

(1. Shanghai Zhongtian aluminum wire Co., Ltd., Shanghai 201108, China; 2. Jiangsu Zhongtian Technology Co., Ltd., Jiangsu 226463, Nantong, China)

Abstract:

Stress fields and ingot distortions during DC casting of a large size ingot were studied through numerical modeling and possible cracking modes and mechanisms of ingot distortions were analyzed. Meanwhile, the effects of the casting speeds on the stress fields and distortions were also studied. The results show that changing casting speed has different effects with respect to each stress component, so it also affects the possible cracking mode of the ingot. Increasing casting speed greatly enhanced rolling face shrinkage. At the same time, the butt-curl was mainly affected by the start-up casting speed while the influence of steady state casting speed was not obvious. The effect of start-up casting speed on the butt-curl was mainly attributed to its effect on the sump depth.

Key words: direct chill casting; butt-curl; shrinkage; casting speed; sump depth