

不同铸轧方式对连铸连轧铝合金性能的影响

陈琛星¹, 胡建平¹, 肖寒²

(1. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 401122; 2. 中冶赛迪技术研究中心有限公司, 重庆 401122)

摘要: 本文制备了无压下、轻压下及重压下三种不同压下方式的铸轧铝合金, 并通过后续热轧, 获得了连铸连轧铝合金样品。铸轧态条件下, 无压状态下铸轧铝带试样屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为27.6 MPa、57.3 MPa、18%, 轻压状态下铸轧铝带试样屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为41.2 MPa、59.7 MPa、27%, 重压状态下铸轧铝带试样屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为72.9 MPa、83.8 MPa、35%。经过热轧后, 无压状态下的热轧铝带试样屈服强度、抗拉强度和伸长率分别达到88.9 MPa、96.8 MPa、4%, 轻压状态下的热轧铝带试样屈服强度、抗拉强度和伸长率分别达到66.7 MPa、75.5 MPa、45%, 重压状态下的热轧铝带试样屈服强度、抗拉强度和伸长率分别达到87.6 MPa、95.6 MPa、28%。铸轧成形的板材经过热轧后, 性能进一步提升。双辊铝薄带连铸连轧工艺下, 轻压下铸造和重压下铸造的铝带单道次热连轧后都满足铸轧带国标性能。

关键词: 高速铸轧; 铝合金; 连铸连轧; 性能

铝合金连铸连轧是在极短的时间内完成铝液的冷却凝固铸轧成形, 在后续配置在线的连续化的热轧, 对铝带进行压力加工, 形成最终的产品^[1]。连铸连轧将铝合金铸轧工艺和热轧工艺结合为一体, 缩短了离线轧制的工序, 具有生产效率高、节奏短和能耗低的优点。在绿色化、高质量发展的趋势下, 连铸连轧这种短流程工艺成为了冶金行业的研究热点。

目前, 铝带双辊铸轧技术在全国已经十分普遍, 已达上千条产线。传统铸轧机的凝固速度慢, 铸轧效率低, 压下量为一般普遍大于40%, 铸轧速度普遍在0.8~1.2 m/min, 生产的产品主要集中在1系、3系和8系铝合金, 可生产的合金牌号范围窄。为了进一步提高铸轧效率, 国内外学者进行了大量的研究。日本Haga^[2-5]采用铜辊套, 设计了不同形式的高速铸轧机, 其立式等径双辊铸轧机铸速达到了120 m/min, 不等径双辊铸轧机的铸速达到了60 m/min, 配置了刮板的单辊铸轧机组铸速达到了40 m/min。甘肃酒钢梁雪钢等人^[6]研究了铜套对提速的影响及不同铸轧速度下铜辊套对铸轧坯料内部组织的影响, 结果表明, 铜辊套比钢辊套的导热系数大很多, 对熔体的冷却能力更强, 可以使铸轧板表面晶粒组织更加致密均匀。燕山大学赵日东等人^[7]开展了铜辊套对铝带双辊铸轧速度提升的量化研究, 使用铜辊套替代钢辊套, 能够大幅增加热流, 从而提高铸轧速度。徐振等^[8]研究了温轧对6061铝合金铸轧板材显微组织和力学性能的影响, 对铝合金连铸连轧的技术开发提供了参考。大量研究还是基于实验室级别, 工业试验研究较少。

本文开展了无压下、轻压下和重压下三种不同铸轧压下方式的连铸连轧试验, 并研究了不同工艺下铝合金连铸连轧板带的组织及性能, 为铝合金高速连铸连轧技术的开发提供了理论基础。

作者简介:

陈琛星(1992-), 男, 硕士, 主要研究方向为铝合金铸造及加工。E-mail: ChenXing.Chen@cisdi.com.cn

通信作者:

胡建平, 男, 博士。电话: 13637898672, E-mail: Jianping.Hu@cisdi.com.cn

中图分类号: TG335.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

06-0824-07

收稿日期:

2025-03-03 收到初稿,
2025-04-02 收到修订稿。

1 试验材料与方法

铝薄带连铸连轧的铸轧区，即铸嘴、耳子与铸轧辊形成的通过铝液的腔体。铸嘴前沿至铸轧辊出口的长度称为铸轧区长度，常规的铝铸轧机组的铸轧区长度在40~70 mm。铸轧区示意图如图1所示，铝液进入铸轧区后，靠近两侧辊套的铝液逐渐凝固，随着凝固的进行，坯壳逐渐增厚，直至焊合，此时焊合点称为Kiss点。Kiss点的位置不仅决定了铸轧机的铸轧力，同时也影响铸轧机的铸速。Kiss点靠后，铝液在铸轧区内停留时间较长，铸轧区凝固的铝较多，铸轧机铸轧力增大。Kiss点靠前，铝液在铸轧区内停留时间较短，铸轧区铝液较多，凝固铝较少，铸轧机铸轧力减小。传统铸轧机生产时，Kiss点相对靠后，铝坯的压下量大于40%，铸轧力大，凝固速度慢。Kiss点前移，有利于铸轧机速度的提高，但是Kiss点要运行在铸轧区长度内一定范围，不能超出铸轧区。Kiss点在铸轧区之后，铝液将提前在铸嘴内部凝固，导致断流或者铸轧辊卡阻；

Kiss点在铸轧区之前，铝液以液态的形式流出铸轧区，导致不成带。Kiss点的位置与铝液温度、铸轧机速度和冷却水流量等有关。为提高铝带的铸轧速度，达到高效冷却，Kiss点可尽量前移。

本试验选用的材料为1050铝，材料成分见表1。铸轧机型号：倾斜式 $\Phi 900$ mm \times 1 600 mm，辊套材质为特殊处理的钢辊。生产的带材规格为6 mm \times 500 mm。开展了无压下、轻压下和重压下三种不同铸轧方式下的连铸连轧试验，示意图如图2所示。所谓重压下指Kiss点靠后，铸轧时压下率大于40%；轻压下指Kiss点靠前，铸轧时压下率小于20%；无压下是指Kiss点接近辊缝中心线上，几乎没有铸轧力产生。试验中Kiss点的位置通过速度来调节，重压下铸轧时的铸轧速度在1.5 m/min，轻压下铸轧时的铸轧速度在2.5 m/min，无压下铸轧时的铸轧速度在4 m/min。铝液浇注温度在 (690 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ ，经铸轧成形后，在450 $^{\circ}\text{C}$ 下进行单道次热轧，热轧压下量为40%。试验具体参数见表2。

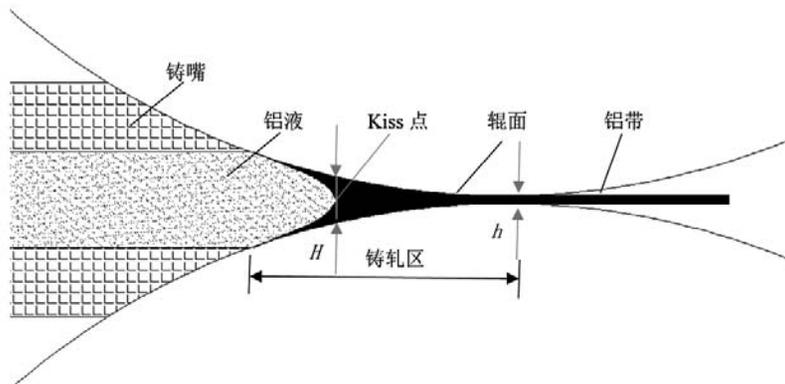


图1 铸轧区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the casting and rolling area

表1 铝合金1050成分
Tab. 1 Composition of 1050 aluminum alloy

成分	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	V	Fe	Al
含量	≤ 0.25	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.03	≤ 0.05	≤ 0.4	余量

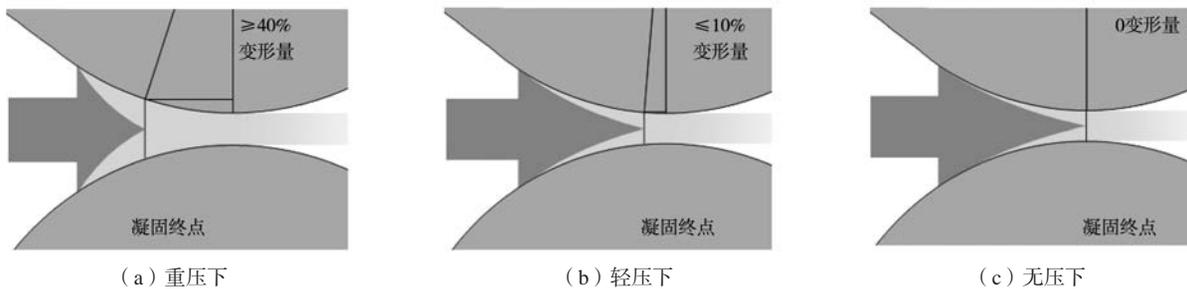


图2 不同铸轧方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different casting and rolling methods

表2 试验工艺参数
Tab. 2 Experimental process parameters

工艺	浇注温度/℃	铸轧速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	铸轧压下量/%	热轧温度/℃	热轧压下量/%
无压下试样	687	4	5	450	40
轻压下试样	690	2.5	18	450	40
重压下试样	692	1.5	50	450	40

试验后采取的金相试样磨平抛光处理后, 再进行阳极覆膜。覆膜液成分为25 g/L氟硼酸, 电压为20 V, 时间为2 min。抛光后用酒精擦拭干净。利用Zeiss Axio Lab 5型蔡司光学显微镜对铸轧板和热轧板内部组织进行观察分析, 研究不同铸轧方式下的铝合金带在铸轧和连续热轧过程中组织演变规律。利用钢研纳克GNT200拉伸机进行力学性能研究, 拉伸试样如图3所示。利用Xradia 515 Versa工业CT对铝合金样品内部缺陷进行分析。利用FEI Apreo S型扫描电镜对铝合金试样断口进行观察。

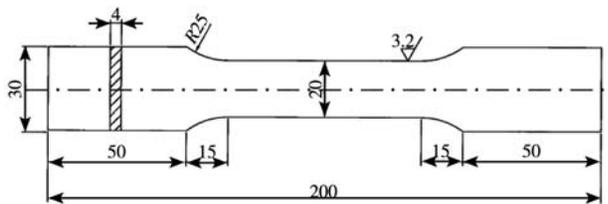


图3 拉伸试样形状和尺寸

Fig. 3 Shape and sizes of the tensile specimen

2 结果与分析

2.1 金相组织

图4为不同铸轧方式下的铸轧态和热轧态铝带金相组织, 方向为轧制方向(RD面)。铸轧态是指铸轧机制备的铝带, 热轧态是铸轧态铝带经后续热轧后的铝带。如图4所示, 图4(a)和图4(b)分别为无压下的铸轧态和热轧态试样; 图4(c)和图4(d)分别为轻压下的铸轧态和热轧态试样; 图4(e)和图4(f)分别为重压下的铸轧态和热轧态试样。从图中看出, 无压下铸轧态组织为典型的铸态组织, 晶粒组织自由冷却生长, 晶粒尺寸在150 μm , 同时还存在气孔, 可能是除气不到位或者无压状态下自由凝固, 卷进的气体无法挤出所致; 经过热轧后晶粒明显细化, 厚度方向晶粒尺寸在100 μm , 且沿轧制方向拉长, 气孔也被压合。无压状态下晶粒相对较小可能是因为在无压状态下铸速较快, 铝液在熔池中停留时间短, 过冷度

大, 熔炼铝液受到冷却辊急冷作用, 迅速结晶形核, 所以晶粒细小。轻压下铸轧态组织为对称的柱状晶组织, 铝液在接触铸辊后, 沿辊面法向生长, 铝带厚度方向晶粒尺寸在毫米级, 也存在少量气孔, 经过热轧后晶粒也进一步细化, 同时气孔也受压压合。轻压下铸轧态组织晶粒尺寸大主要是因为铝液在熔池内停留时间长, 凝固缓慢, 且受到的挤压力较小, 晶粒生长充分。重压下铸轧态组织也为对称的变形晶粒组织, 厚度方向晶粒也在毫米级, 但是与轻压下铸轧态组织相比, 晶粒更加细小, 这是晶粒在生长的过程中受到较大轧制力的作用, 晶粒生长被抑制; 同时重压下铸轧板晶粒有明显的自辊面向铝板中心的变形, 内部不存在气孔, 经过热轧后晶粒呈明显的轧制变形组织, 呈平行于轧制方向的纤维组织, 且表面变形要高于内部。

2.2 力学性能

图5为不同铸轧方式下的铸轧态和热轧态铝带力学性能拉伸曲线, 图6为不同铸轧方式下的铸轧态和热轧态铝带力学性能对比分析图。从图6中看出, 在铸轧态条件下, 无压下状态的试样强度最低, 屈服强度和抗拉强度分别只有27.6 MPa、57.3 MPa, 轻压状态下试样强度略有提高, 屈服强度和抗拉强度分别为41.2 MPa、59.7 MPa, 重压状态下试样强度有明显的升高, 屈服强度和抗拉强度达到72.9 MPa、83.8 MPa, 这是由于铝液在铸轧区凝固, 重压状态下Kiss相对靠后, 铸轧时压下量较大, 致使内部晶粒更加细化和致密, 性能相对更好。伸长率方面, 重压状态铸板的伸长率最高, 达到35%。经过热轧后, 无压状态下的热轧铝带试样屈服强度和抗拉强度分别达到88.9 MPa、96.8 MPa, 轻压状态下的热轧铝带试样屈服强度和抗拉强度分别达到66.7 MPa、75.5 MPa, 重压状态下的热轧铝带试样屈服强度和抗拉强度分别达到87.6 MPa、95.6 MPa, 热轧后的不同状态下的铸轧板强度进一步提高。无压状态下的热轧铝带强度升高显著, 高于轻压和重压状态下铸板轧制后的性能, 但是无压下热轧铝带伸长率却下降明显, 只有约10%, 这可能由于无压状态下铸速快, 铝

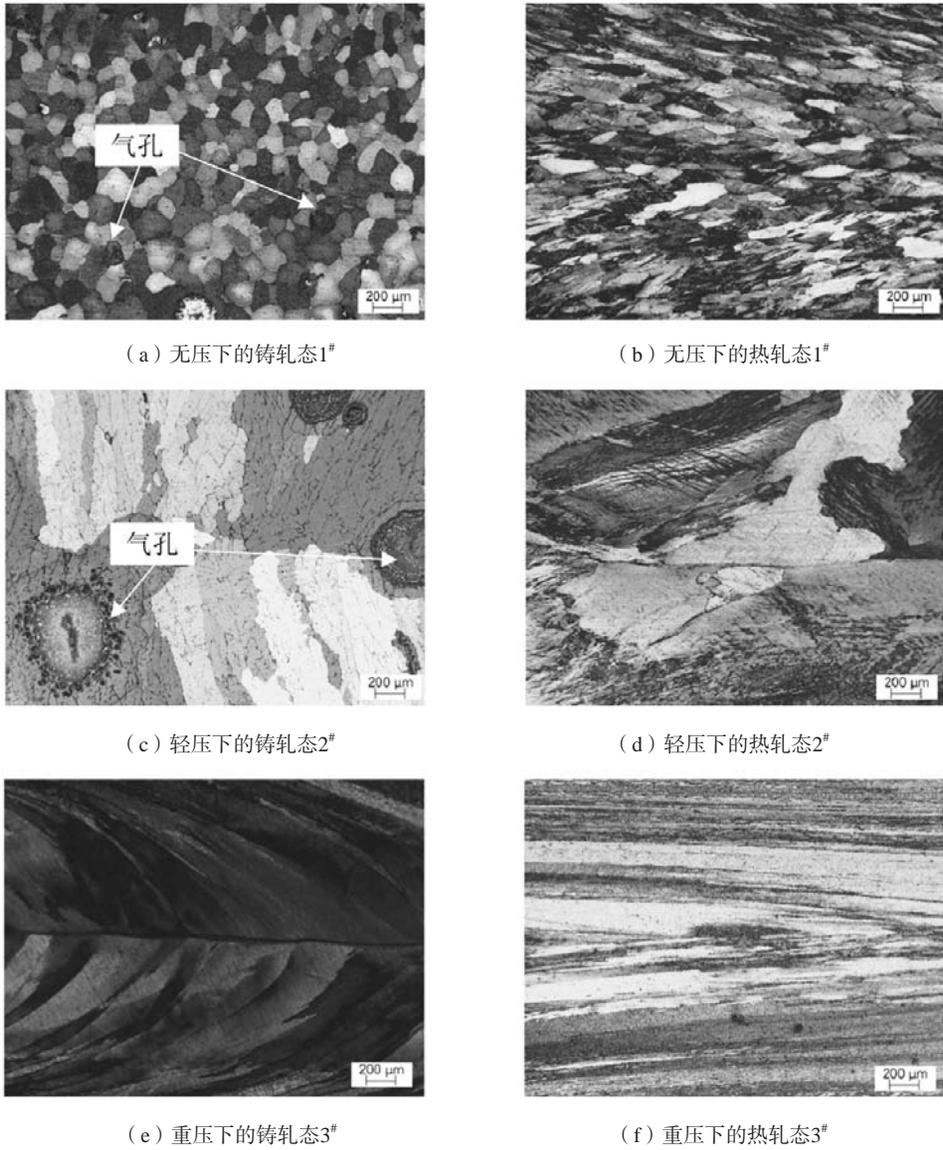


图4 不同铸轧方式下的铸轧态和热轧态铝带金相组织

Fig. 4 Microstructures of as-cast and hot-rolled aluminum strips under different casting and rolling methods

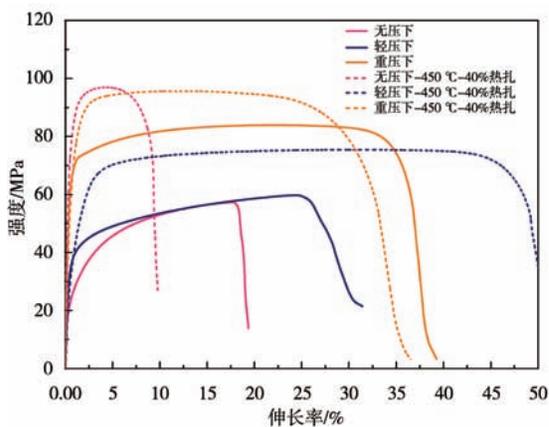


图5 不同铸轧方式下铸轧态和热轧态铝带力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of as-cast and hot-rolled aluminum strips under different casting and rolling methods

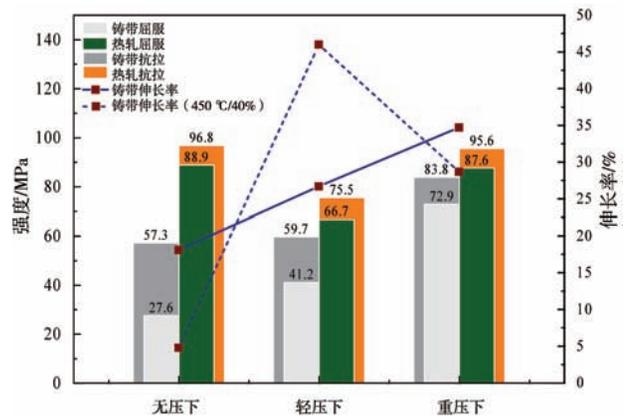


图6 不同铸轧方式下铸轧态和热轧态铝带力学性能对比

Fig. 6 Comparison of mechanical properties of as-cast and hot-rolled aluminum strips under different casting and rolling methods

带的冷却更为剧烈,使得铝带内部晶粒更加细小,所以热轧后强度提高较大,但是板带内部存在的气孔,经热轧后虽然被压合,但还是出现了“缺陷遗传”,导致伸长率不高。轻压状态下的铝板在热轧后伸长率最高,达到45%。重压状态下的铝板热轧后伸长率反而低于轻压下状态的热轧铝板,主要原因在于重压下铸轧后的铝板继续热轧后,可能出现了一定的加工硬化。轻压下铸轧压下率低于20%,重压下铸轧压下率大于40%,两者在同条件热轧后,轻压下铸轧板的变形程度更高,所以伸长率提升较高,变化较大,而重压下铸轧板在热轧后强度有所提高,伸长率与铸轧态相近,提升不明显。整体来看,铸轧成形的板材经过热轧后,性能进一步提升。连铸连轧工艺下,轻压下铸造和重压下铸造的铝带单道次热连轧后都满足铸轧带国标性能。

2.3 缺陷分析

图7为无压下铸造的铸轧态和热轧态的铝带CT扫描图。从图7中看出,无压下铸轧态试样内部存在明显的孔洞,这些孔洞尺寸范围集中在50~100 μm,经过热轧轧制后,孔洞基本不存在。无压下铸轧态试样存在孔洞的原因主要是铸造过程相当于自由铸造,铝液经过带内冷水的辊面自由凝固,无外力场的干扰,铝液在辊面上容易波动,且很容易吸气,导致铸成的铝带内部存在大量气孔。此种方式生产铝带要严格控制熔体质量,铸造过程要有气体保护措施。由此推断,轻压下铸轧态试样金相组织存在少量气孔,也是由于冷却过程中,气体没排出造成的,经过热轧后基本没有气孔存在。重压下铸轧态试样金相组织内部不存在气孔,是因为在冷却凝固的过程中,凝固时间长,铸辊的挤压力将铝液中的气体挤压出去,并将组织压密实。

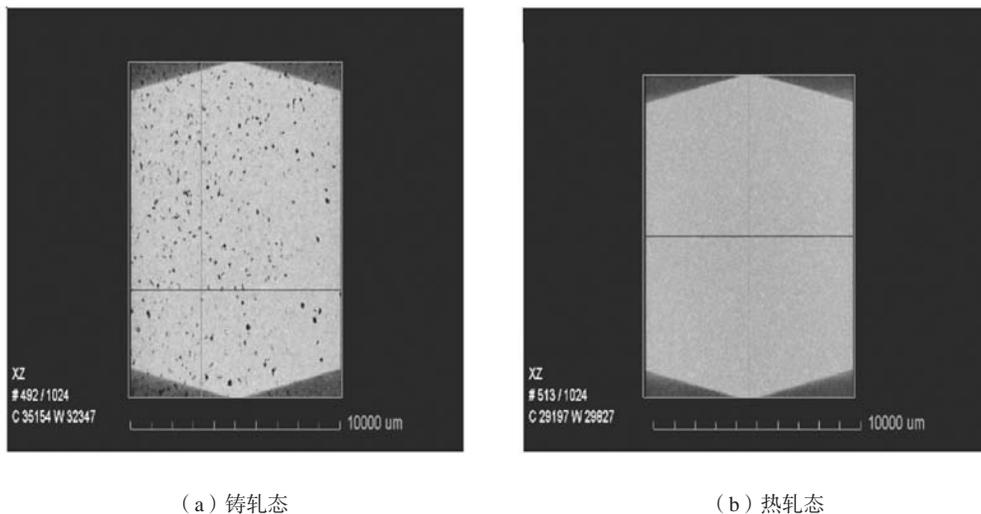


图7 无压下铸造方式下的铸轧态和热轧态铝带的CT扫描图
Fig. 7 CT scan images of as-cast and hot-rolled aluminum strips under pressureless casting method

2.4 扫描断口

图8中1#、2#和3#分别为无压下、轻压下和重压下三种铸轧方式下的铸轧态和热轧态扫描断口图。从图中看出,在铸轧态条件下,无压下铸轧态铝带的扫描断口除了有拉伸断后形成的细小韧窝,还存在原生的气孔,这个气孔可能是除气过滤不到位带来的,也可能是因为无压下量,成形过程是一种自由凝固状态,熔体中的气体不易挤出,冷却后留在铝带内部,导致强度和伸长率都不高;轻压下铸轧态铝带的扫描断口,断后的韧窝较少,依旧存在除气不充分带来的气孔,但经过一定压下率将大部分气孔排出,内部组织更致密,断裂后出现少量韧窝,强度和伸长率明显提升;重压下铸轧态的铝带扫描断口,韧窝很细小,且

内部非常致密,同时还出现断裂面,这是由于重压下铸轧压下量较大,材料内部更密实。

经过热轧后,无压下铸轧铝带的断口处,韧窝更加细小且致密,强度较铸轧态时有提高,但是由于气孔缺陷的遗传效应,导致伸长率未增加;轻压下铸轧铝带经热轧后,断口出现大量细小的韧窝,比无压下铸轧态热轧后的铝带韧窝更细小,铸轧态的下的气孔被压缩压合,断口基本辨不出气孔,使得在强度和伸长率方面提升明显;重压下铸轧态铝带经热轧后,材料更加密实,断裂面仅存在少量的撕裂韧窝,其他部位为拉伸形成的滑移面,光滑,几乎无韧窝,强度较轻压下热轧态铝板更高,但是伸长率有所下降,这种现象可能源于加工硬化,内部韧窝减少,使伸长率下

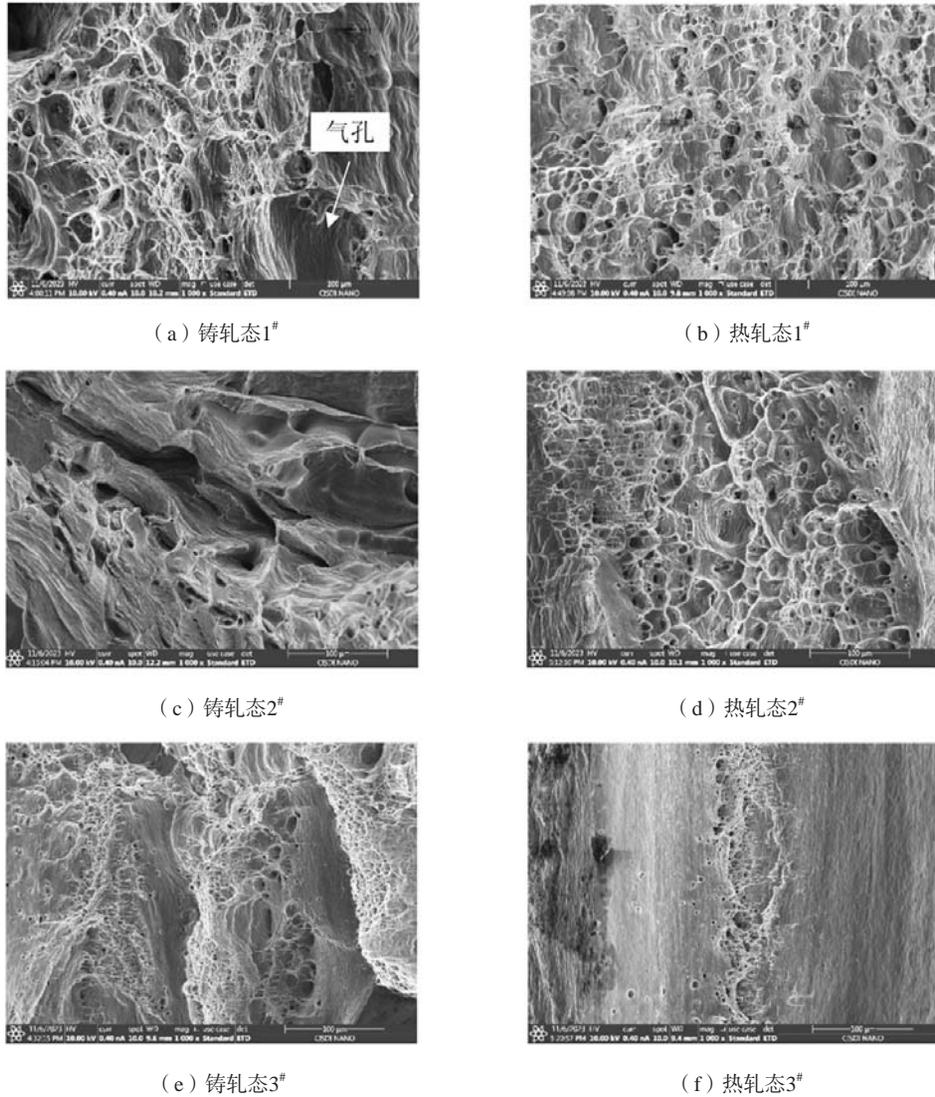


图8 不同铸轧方式下铸轧态和热轧态铝带扫描断面口

Fig. 8 Scanning fracture surfaces of as-cast and hot-rolled aluminum strips under different casting and rolling methods

降。整个拉伸断面口形貌与前面力学性能测试结果相对应。

3 结论

(1) Kiss点前移, 有利于提高铸轧速度, 但Kiss点太靠前, 压下量太小, 容易出现气孔缺陷。

(2) 铝薄带双辊连铸连轧工艺, 轻压下铸造和重压下铸造的铝带单道次热连轧后都可满足铸轧产品国标性能。

(3) 高速铸造后在线热轧, 可以生产性能优良的铸轧料产品, 同时减少了传统铸轧料离线热轧的道次, 效率进一步提高。

参考文献:

- [1] 王祝堂. 铝带坯双辊式连续铸轧技术的现状与新进展 [J]. 世界有色金属, 1997 (7): 18-43.
- [2] HAGA T. High speed roll caster for aluminum alloy [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2021, 11 (3): 520.
- [3] HAGA T, NAKAMURA R, KUMAI S, et al. A vertical type twin roll caster for an aluminium alloy clad strip [J]. Archives of Materials Science and Engineering, 2013, 62 (1): 36-44.

- [4] HAG T, KOZONO R, NISHIDA S, et al. Casting of aluminum alloy clad strip by an unequal diameter twin-roll caster equipped with a scraper [J]. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2017, 3 (4) : 511-521.
- [5] HAGA T, MIYAKE T. Casting of aluminum alloy rod by a single wheel with V-groove [J]. *Key Engineering Materials*, 2018, 792: 53-58.
- [6] 梁雪刚, 刘伟尚, 王生宁, 等. 铸轧生产中铜辊套对铝合金组织和中心层偏析的影响分析 [J]. *甘肃冶金*, 2022 (3) : 44.
- [7] 赵日东, 黄华贵, 冯淼, 等. 铜辊套对铝带双辊铸轧速度提升的量化研究 [J]. *燕山大学学报*, 2023, 47 (1) : 20-27.
- [8] 徐振, 张伟, 王洪斌, 等. 温轧对6061铝合金铸轧板材显微组织和力学性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49 (11) : 10.

Effects of Properties of Aluminum Alloy by Continuous Casting and Rolling with Different Casting and Rolling Methods

CHEN Chen-xing¹, HU Jian-ping¹, XIAO Han²

(1. CISDI GROUP Co., Ltd., Chongqing 401122, China; 2. MCC CCID Technology Research Center Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract:

In this paper, three types of cast-rolled aluminum alloys with different pressing-down methods, namely no pressing-down, light pressing-down and heavy pressing-down, were prepared. Through subsequent hot rolling, samples of continuous casting and continuous rolling aluminum alloys were obtained. Under the cast-rolling state, the yield strength, tensile strength and elongation of the cast-rolled aluminum strip samples in the no pressing-down state were 27.6 MPa, 57.3 MPa and 18% respectively; in the light pressing-down state, they were 41.2 MPa, 59.7 MPa and 27% respectively; and in the heavy pressing-down state, they were 72.9 MPa, 83.8 MPa and 35% respectively. After hot rolling, the yield strength, tensile strength and elongation of the hot-rolled aluminum strip samples in the no pressing-down state reached 88.9 MPa, 96.8 MPa and 4% respectively; in the light pressing-down state, they reached 66.7 MPa, 75.5 MPa and 45% respectively; and in the heavy pressing-down state, they reached 87.6 MPa, 95.6 MPa and 28% respectively. The properties of the cast-rolled plates were further improved after hot rolling. Under the twin-roll continuous casting and rolling process for aluminum thin strips, both the aluminum strips produced by the light squeeze casting and heavy squeeze casting after single pass continuous hot rolling meet the national standard performance of cast-rolled strips.

Key words:

high speed casting and rolling; aluminum alloy; continuous casting and rolling; properties