

铸轧区长度对 1235 铝合金板坯组织与性能的影响

王 珊¹ 任莎歌¹ 李 蒙² 祝 庆³

(1.焦作大学机电工程学院; 2.焦作大学人工智能学院; 3.商丘阳光铝材有限公司生产部)

摘 要 电解铝液采用直接双辊铸轧成厚度为 7.0 mm 的 1235 铝合金板坯。借助光学显微镜、扫描电镜、能谱分析仪、拉伸试验机,研究了铸轧区长度对 1235 铝合金板坯显微组织和室温力学性能的影响。结果表明,当铸轧区长度为 60 mm 时,板坯的晶粒粗大,中心偏析较为严重,力学性能较差;当铸轧区长度为 63~67 mm 时,板坯的晶粒细小,分布相对均匀,晶粒尺寸差距缩小,中心偏析消失,综合力学性能好;继续增加铸轧区长度到 70 mm 时,板坯的晶粒尺寸开始粗化,中心偏析加重,力学性能下降。能谱分析发现,中心偏析物主要为 Al₂O₃、FeAlSi 及吸附有其他原子的复杂化合物。1235 铝合金板坯的合理铸轧区长度为 63~67 mm,此时板坯的综合力学性能良好,抗拉强度≥108.7 MPa,伸长率≥37.7%。

关键词 铸轧区长度;1235 铝合金;铸轧板;微观组织;力学性能

中图分类号 TG292;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cast-rolling Zone Length on Microstructure and Mechanical Properties of 1235 Aluminum Alloy Slab

Wang Shan¹, Ren Shage¹, Li Meng², Zhu Qing³

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaozuo University; 2.College of Artificial Intelligence, Jiaozuo University; 3.Department of Production, Shangqiu Sunshine Aluminum Co., Ltd.)

Abstract: 1235 aluminum alloy slab with thickness of 7.0 mm was directly cast and rolled with electrolytic molten aluminum. The effects of cast-rolling zone lengths on the microstructure and tensile mechanical properties of 1235 aluminum alloy slab at room temperature were investigated by means of optical microscope, scanning electron microscope, energy spectrum analyzer and tensile testing machine. The results indicate that when the length of the cast-rolling zone is 60 mm, the grain size of the slab is coarse with severe central segregation and poor mechanical properties. When the length of the casting rolling zone is 63~67 mm, the grain size of the slab is fine with evenly distribution, and the grain size difference is reduced. The central segregation disappears and the comprehensive mechanical properties are desirable. When the length of the casting and rolling zone is increased to 70 mm, the grain size of the slab becomes coarsened, and the central layer segregation is aggravated, so the mechanical properties are decreased. Energy spectrum analysis demonstrates that the central segregation is mainly Al₂O₃, FeAlSi and complex compounds adsorbed with other atoms. The reasonable length of cast rolling zone of 1235 aluminum alloy slab is 63~67 mm, where the comprehensive mechanical properties are desirable with the average tensile strength above 108.7 MPa and the average elongation after fracture above 37.7%.

Key Words: Cast-rolling Zone Length, 1235 Aluminum Alloy, Cast-rolling Plate, Microstructure, Mechanical Properties

随着工业发展和技术进步,我国铝电解工业得到了快速发展,已成为铝生产大国,但在铝加工品种和高端产品方面仍存在不足^[1],尤其利用电解铝液直接铸轧生产高端双零铝箔坯料方面。采用电解铝液通过双辊铸

轧生产铝合金铸轧板具有短流程、生产成本低、节能降耗等^[2]特点,被广泛应用于冶炼和加工企业。由于电解铝液温度高等^[3]和铸轧工艺的复杂性,这对铝合金熔体品质和铸轧工艺提出了更高的要求,为此对其开展了大

收稿日期:2022-01-24;修改稿收到日期:2022-02-15
基金项目:河南省高等学校重点科研资助项目(22B430022);河南省科技攻关资助项目(182102310917)
第一作者简介:王珊,女,1981 年出生,讲师,河南焦作(454000),E-mail:wwss_19812021@163.com
引用格式:王珊,任莎歌,李蒙,等. 铸轧区长度对 1235 铝合金板坯组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):974-978.
WANG S, REN S G, LI M, et al. Effects of cast-rolling zone length on microstructure and mechanical properties of 1235 aluminum alloy slab [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):974-978.

量的研究,研究了炉料配比和炉料添加顺序等对产品品质的影响,并提出相应的改进措施^[4~6]。还有研究者从铝合金熔体纯净度角度,研究和改进了铝合金熔体净化工艺,生产出满足客户要求的双零铝箔用铸轧坯料^[7~14]。铝合金铸轧过程非常复杂,其工艺参数的微小变化,如铸轧速度、铸轧辊轧制力、供流嘴材质及结构、冷却强度、铸轧区长度等均会对铸轧板品质造成很大影响^[15]。有研究者研究了铸轧速度对铝合金微观组织的影响规律,并优化了铸轧速度^[15~17]。WU J S等^[18]对双辊铸轧过程中轧制力进行模拟计算,推导出了倾斜角与轧制力之间的关系。飞尚才等^[19]研究了铸嘴对铸轧板品质的影响,通过改进铸嘴结构来改善铸轧板品质。宋芳等^[20]以 8079 合金为研究对象,研究了冷却强度对其微观组织与力学性能的影响,并对冷却强度进行了优化。尹小丹等^[21]研究了铸轧区长度对 Al-8Si 合金铸轧板金相组织和中心层偏析的影响,发现中心层偏析程度随铸轧区长度的增加先增加后减轻。但有关铸轧区长度对 1235 铝合金微观组织和力学性能影响的系统研究的报道还较少。因此,本课题采用电解铝液通过双辊铸轧技术制备 4 种不同铸轧区长度下的 1235 铝合金铸轧板,研究铸轧区长度对合金组织和室温力学性能的影响,以期为高品质铝合金铸轧板的生产提供借鉴。

1 试验材料与方法

1.1 材料制备

为了对比分析不同铸轧区长度对合金微观组织和力学性能的影响,用同一条铸轧线生产了 4 个炉次的不同铸轧区长度下 1235 铝合金铸轧板卷,规格为 7.0 mm×1 050 mm,其化学成分见表 1。1235 合金铸轧生产工艺流程为:先将固体冷料(重熔铝锭+冷轧工艺废料)加热至 450 ℃烘干,对精炼剂和造渣剂进行 350 ℃的烘烤,以减少和排除物理吸附状态水分的影响;接着将固体冷料放置在 25 t 熔炼炉底部,随后注入温度约为 850 ℃的电解铝液,控制熔炼温度为 740~760 ℃,并用 CCl₄ 浸泡砖进行预精炼,取样并进行成分检验,待成分合格后倒炉到保温炉精炼和扒渣。在溜槽内在线加入约为 2%的 Al-Ti-B 晶粒细化剂,其化学成分(质量分数)为 5.3%的 Ti、1.1%的 B、0.13%的 Si、0.17%的 Fe、0.02%的 V、0.06%的 K;采用在线除气装置和三层泡沫陶瓷过滤板进行除气去杂,熔体氢含量≤0.12 mL/(100 mg Al)。前箱温度控制在约 690 ℃,铸嘴开口度为 4.3~4.5 mm,嘴辊间隙为 0.4~0.7 mm,铸轧速度为 1 050~1 100 mm/min。结合生产实际,铸轧区长

度分别取 60、63、67、70 mm,所对应的铸轧试样编号分别为 1~4 号,铸轧区结构见图 1。

表 1 试验合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of test alloy %								
试样	w _B							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
1	0.13	0.42	0.002	0.002	0.002	0.02	0.013	余量
2	0.12	0.42	0.002	0.003	0.003	0.02	0.014	余量
3	0.12	0.41	0.002	0.002	0.002	0.02	0.014	余量
4	0.13	0.41	0.002	0.003	0.003	0.02	0.013	余量

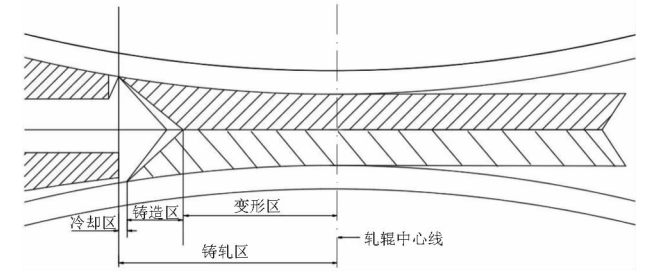


图 1 铸轧区示意图

Fig.1 Schematic diagram of cast-rolling region

1.2 组织观察与性能测试

沿平行于轧制方向使用线切割在试验合金铸轧板中间截取尺寸为 10 mm×20 mm 的金相试样。将金相试样铣平,然后分别经打磨、抛光。金相观察之前对试样进行电解抛光和阳极覆膜处理,电解液使用体积比为 1:9 的高氯酸和无水酒精的混合液,覆膜液使用体积比为 38:43:19 的 H₂SO₄、H₃PO₄和 H₂O。采用配置有 MIAPS 分析软件的 Axiovert 40 MAT 光学显微镜(OM),来观察和分析显微组织。采用 Quanta-2000 型扫描电镜(SEM)观察试样偏析物形貌,采用扫描电镜自带的能谱分析仪(EDS)分析偏析物成分构成,同时在 WA-3000 型屏显式万能材料拉伸试验机上测试室温抗拉强度和伸长率,拉伸速率为 0.2 mm/min,每种方案测试 3 个试样,取其平均值。

2 试验结果与分析

2.1 微观组织分析

图 2 为不同铸轧区长度下 1235 铝合金铸轧板轧面和纵截面的偏光组织。可以看出,合金铸轧板轧面组织大部分为等轴晶,纵截面组织为拉长的变形组织,沿轧制方向分布,呈明显的纤维状结构,并且随着铸轧区长度的变化,晶粒大小也发生明显变化。铸轧区长度偏小或偏大,晶粒会变得粗大不均匀,局部区域存在大块晶粒。其原因为表层冷却速度大而中心层冷却速度小,并且从表层向中心冷却速度逐渐降低。金属晶粒尺寸受其形核率和长大速率影响很大,而液相过冷度对形核率

和长大速度有着决定性影响。形核率和长大速率均随着过冷度的增加而增加,但增加程度不同^[22]。当铸轧区长度为 60 mm 时,合金铸轧板晶粒粗大,晶粒平均尺寸约为 87.3 μm ,见图 2a、图 2b。这是由于当冷却水温度、流速等参数一定时,铸轧区长度偏小,铸轧辊与铸轧板接触面积减少,铸轧辊带走的热量少^[21],增大了铝合金熔体前沿的温度梯度,造成液相过冷度减小,晶粒处于高温阶段,凝固时间相对长,晶粒长大倾向大,因此合金铸轧板晶粒粗大。当铸轧区长度为 63~67 mm 时,随着铸轧区长度增加,合金铸轧板晶粒尺寸细小,晶粒尺寸差距缩小,晶粒平均尺寸约为 53.2 μm ,见图 2c~图 2f。这是由于铸轧区长度增加,铸轧辊与铸轧板接触面增大,从熔体带走的热量多,铝合金熔体温度梯度

减小,液相过冷度增加,凝固速度加快,在很短时间内液相中会形成较多的晶核,并且没有时间长大便相互接触,使合金晶粒组织变细且均匀化程度提高。继续增加铸轧区长度到 70 mm 时,合金铸轧板晶粒又开始粗化,晶粒平均尺寸约为 89.1 μm ,见图 2g、图 2h。这是由于铸轧区长度偏大时,在铸轧辊辊径、辊缝、冷却水温度、铸轧速度等条件不改变的情况下,进入铸轧区的铝合金熔体量就越多,需要带走的热量就越多,造成铸轧辊辊套温度升高,铝合金熔体温度梯度增大,液相过冷度减小,金属结晶速度降低,凝固时间变长,故合金铸轧板晶粒开始粗化。由以上分析可知,铸轧区长度控制在 63~67 mm 范围内,有利于获得晶粒细小均匀的合金铸轧板。

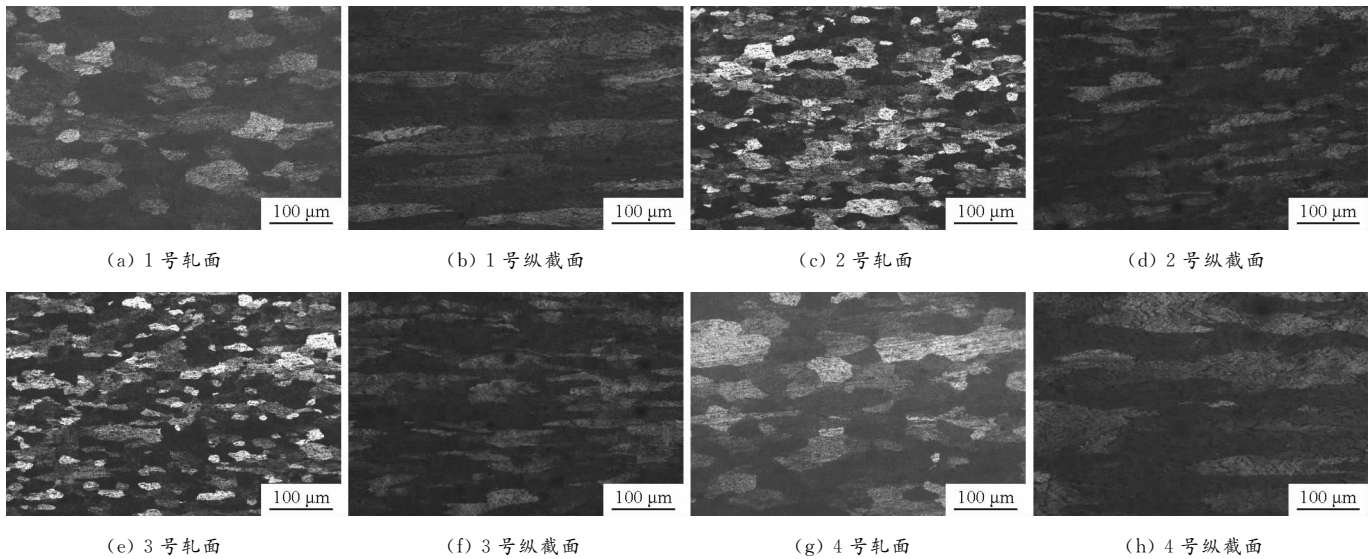


图 2 1235 铝合金铸轧板晶粒组织
Fig.2 Grain structures of 1235 aluminum alloy cast-rolling plates

图 3 为不同铸轧区长度下 1235 铝合金铸轧板纵截面边部和中心位置金相组织。可以看出,铸轧板表层区第二相数量明显少于中心区域,表层第二相多呈颗粒状,见图 3a、图 3c、图 3e 和图 3g,而中心区域第二相多呈条状和骨骼状,见图 3b、图 3d、图 3f 和图 3h。这是由于铸轧板表层冷却速度快、过冷度大,表层凝固结晶快,合金元素更多地固溶于基体组织,而中心区域铝合金熔体冷却速度慢、过冷度小,凝固结晶温度高且慢,析出的第二相较多,并且中心层变形较小而不易被压碎,故为粗大的条状或骨骼状。另外还发现,合金铸轧板金相显微组织随铸轧区长度的变化,合金铸轧板中心区域出现了不同程度的偏析物聚集现象,这是因为在铸轧时铝合金熔体表层先与铸轧辊接触,同时在轧辊的压力作用下富含合金元素和杂质元素的铝合金熔体,如 Fe、Si 等,在孔道效应^[23]的作用下被挤压到中心层而形成。当铸轧区长度为 60 mm 时,合金铸轧板中出现较严重的中

心偏析现象,见图 3b,这主要是由于铸轧区长度偏小时,铸轧辊与熔体接触面小而从熔体中带走的热量就少,液相冷却速度小^[24],结晶速度放慢,富含合金元素和杂质的铝合金熔体有充分时间通过孔道效应扩散到合金中心层,故造成合金铸轧板出现较为严重的偏析。当铸轧区长度为 63~67 mm 时,合金铸轧板中心区域未出现明显偏析现象,见图 3d 和图 3f,这说明铸轧区长度增加,提高了铝合金熔体冷却强度,弱化了合金元素和杂质的扩散速度。这是由于在不改变其他铸轧工艺条件下,合理增加铸轧区长度,铸轧辊能够从铝合金熔体带走更多的热量,使得液相冷却速度增大,合金元素和杂质来不及向中心层扩散,使得铸轧板中合金元素和杂质分布相对较为均匀。继续增加铸轧区长度到 70 mm 时,因铸轧辊带走的热量一定,而铝合金熔体有更多的热量需要带走,结果铝合金熔体冷却速度降低,结晶速度放缓,导致合金铸轧板又开始出现较为严重的偏

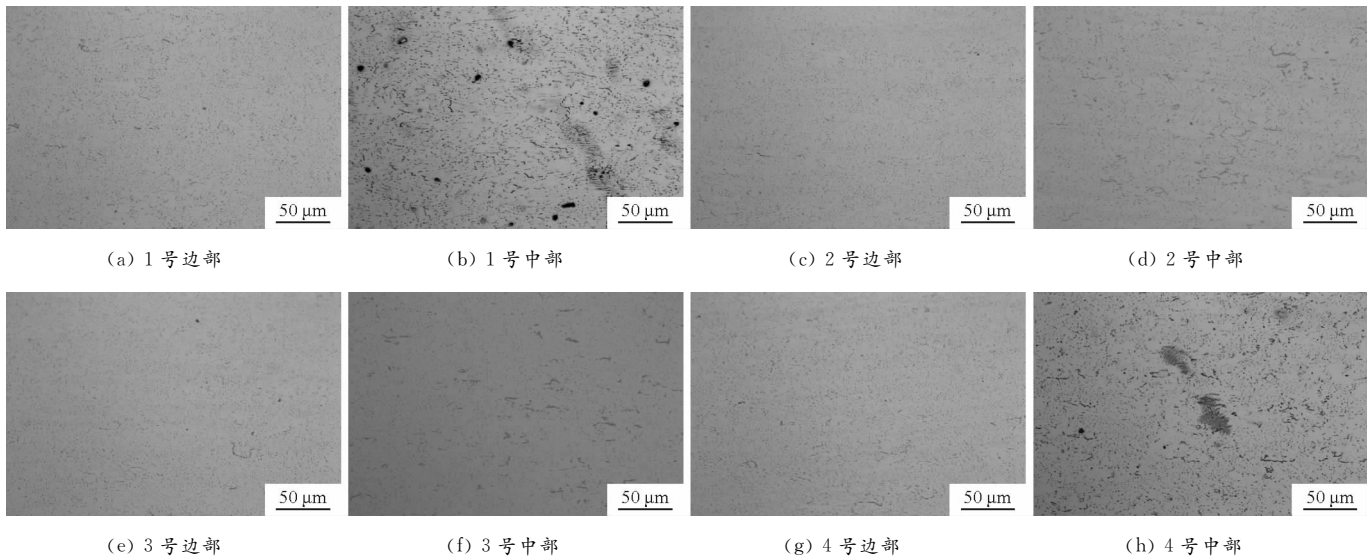


图 3 1235 铝合金铸轧板金相组织

Fig.3 Metallographic structure of 1235 aluminum alloy cast-rolling plates

析现象,见图 3h。由此可知,铸轧区长度控制在 63~67 mm 范围内,铸轧板中心区域未出现明显偏析现象。

2.2 微观形貌及能谱分析

图 4 是铸轧区长度分别为 60 mm 和 67 mm 时试样的 SEM 形貌和 EDS 能谱分析。可以看出,铸轧区长度为 60 mm 时,试样中心区域发现明显的夹杂物偏析现象,沿铸轧方向出现长短和宽窄不一的沟槽或孔洞,并且在其内部分布着大量颗粒状夹杂物,见图 4a。而铸轧区长度为 67 mm 时,合金试样中心区域未出现明显的夹杂物偏析现象,见图 4b,这与图 2 的金相组织结果一致。为了解偏析物中夹杂颗粒成分构成,对其进行能谱分析,见图 4c 和图 4d。可以看出,A 处夹杂物构成较为复杂,主要由 Al、C、O、Si、Na、Cl、K、Ca 元素组成,还含有少量的 S、N 元素,而 B 处夹杂物构成均较为

简单,主要由 Al、C、O、Si、Fe 组成。其中,C、Na、Ca、K 可能来自电解铝液,O、S 可能是固体料表层遭到污染而导致的,Al₂O₃可能是铝合金熔体与吸附的水蒸气发生化学反应所致,N、Cl、F 可能是熔体净化残留所致。结合文献^[25,26],可以推断合金铸轧板中心区域偏析夹杂物颗粒为 Al₂O₃、Fe-Si-Al、Al₄C₃ 及吸附其他原子构成的复杂化合物。另外,夹杂物周围的孔洞和沟槽应该是合金熔体中气体超标而在后续铸轧时保留到铸轧板中而造成的。这是由于夹杂物与气体之间存在着互为寄生关系,即铝合金熔体中杂质多,气体也相应多,二者相互依存,合金元素和杂质随着熔体被挤压到中心层的同时,气体也进入到中心层,结果导致合金铸轧板中心层出现了夹杂物偏析和空洞或沟槽。由以上分析可知,铸轧区长度控制在 63~67 mm 范围内,可获得无明显

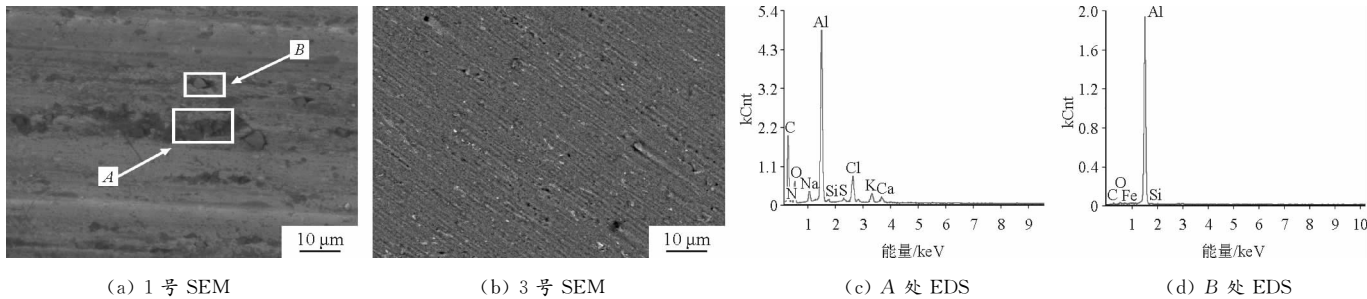


图 4 1235 铝合金铸轧板微观形貌 SEM 和 EDS 分析

Fig.4 SEM images and EDS analysis of 1235 aluminium alloy cast-rolling plates

偏析的合金铸轧板。

2.3 拉伸性能分析

表 2 为不同铸轧区长度下 1235 铝合金铸轧板的力学性能。可以看出,适当增加铸轧区长度可以明显改善合金的力学性能,铸轧区长度在 63~67 mm 范围内,其抗拉强度和伸长率平均值不低于 108.7 MPa 和 37.7%。

这是因为增加铸轧区长度,在其他工艺条件不变的情况下,可以让铸轧辊带走更多的热量,提高了铝合金熔体的冷却速度,增大液相结晶时的过冷度,能够获得晶粒细小均匀的合金组织。根据霍尔-配奇公式^[22]可知,合金晶粒细小,需要较大的外力才能使相邻晶粒发生塑性变形,即晶界强化;在同样的外加载荷作用下,细小晶粒

内部和晶界附近变形度相差较小,变形协调能力强,因应力集中引起开裂的机会较小,合金在断裂之前能承受较大的变形量,故细小晶粒可改善和提高合金的强度和塑性。当铸轧区长度偏低或偏高时,合金强度和塑性差,其原因在于:一方面,合金晶粒粗大,大晶粒位错塞积应力集中大,晶粒内部和晶粒附近应变度相差大,协调变形能力差^[22];另一方面,合金组织中存在夹杂物偏析,尤其夹杂物中的硬脆相,将严重割裂基体,破坏基体的连续性,导致基体应力集中,大幅降低合金的力学性能。由以上分析可知,铸轧区长度控制在 63~67 mm 范围内,合金铸轧板综合力学性能较好。

表 2 1235 铝合金铸轧板的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of 1235 aluminum alloy cast-rolling plate		
试样	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1	67.0	17.7
2	109.7	37.7
3	108.7	38.0
4	81.3	18.3

3 结 论

(1)在铸轧区长度为 60~70 mm 范围内,随着铸轧区长度增加,合金铸轧板晶粒尺寸先减小后增加,合金铸轧板中心区域偏析先减弱后加重。当铸轧区长度在 63~67 mm 内,合金铸轧板晶粒细小均匀、组织致密,无明显中心偏析现象。

(2)在铸轧区长度为 60~70 mm 内,随着铸轧区长度增加,合金铸轧板抗拉强度和伸长长的先增加后减少,当铸轧区长度在 63~67 mm 内时,合金铸轧板综合力学性能良好。

参 考 文 献

[1] 刘民章. 用电解铝液直接生产铝合金产品的优缺点分析及其应对措施[J]. 有色冶金节能, 2015, 31(6): 12-16.

[2] 季策, 许石民, 黄华贵. 金属包覆材料固-液铸轧复合技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2021, 13(6): 12-22.

[3] 张学平. 电解铝液生产铝箔坯料的工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(2): 24-27.

[4] 刘志文, 朱松峰, 卢燕, 等. 铸轧液体炉料比例提升熔炼技术研究[J]. 有色金属加工, 2021, 50(5): 49-52.

[5] 白世森, 刘民章. 大规格 3104 铝合金扁锭的熔铸工艺及表面偏析缺陷的预防措施[J]. 轻金属, 2021(9): 45-51.

[6] 牛旭东, 张能发, 贾娟娟, 等. 用电解铝液生产 7050 铝合金圆铸锭的质量缺陷及其预防措施[J]. 有色冶金节能, 2018, 34(6): 20-23.

[7] 宋芳, 李蒙, 孟银娜, 等. 熔体复合在线净化对双零铝箔用铸轧板微观组织的影响[J]. 有色金属工程, 2021, 11(6): 36-42.

[8] 李蒙, 祝庆, 张秀领, 等. 1235 铝合金铸轧板熔体净化工艺的改进[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 15-18.

[9] 覃铭, 杨途才. A356 铝合金熔体净化处理及其机理研究[J]. 现代制

造技术与装备, 2016(9): 52-54.

[10] 陈文勇, 楼华山. 铝熔体净化用功能化多孔碳石墨材料制备合成的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1 138-1 143.

[11] 宋芳, 潘昊亮, 孟银娜, 等. 不同冷轧废料添加的 8079 铝合金铸轧板组织分析[J]. 热加工工艺, 2021, 50(15): 33-36.

[12] 李蒙, 司国斌, 祝庆. 熔体温度处理对铸轧超薄双零铝箔用坯料组织的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(19): 58-61.

[13] HAGHAYEGHI R, BAHAI H, KAPRANOS P. Effect of ultrasonic argon degassing on dissolved hydrogen in aluminium alloy [J]. Materials Letters, 2012, 82(9): 230-232.

[14] ALBA-BAENA N, PABEL T, VILLA-SIERRA N, et al. Effect of ultrasonic melt treatment on degassing and structure of aluminium alloys[J]. Materials Science Forum, 2013, 765: 271-275.

[15] 李蒙, 潘昊亮, 祝庆. 铸轧速度对 1145 铝合金铸轧板显微组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(9): 933-936.

[16] MALCIOGLU A U, DOGAN C, INEL C, et al. Effects of casting speed on thin gauge foil surface quality of 8079 aluminum alloy produced by twin roll casting method[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(4): 1 001-1 011.

[17] TOSHIO H. Development of twin roll caster with high casting speed and high cooling ability for aluminum alloys[J]. Journal of Japan Foundry Engineering Society, 2014, 86(1): 47-53.

[18] WU J S, ZHANG Y J. Research on calculation model of rolling force in twin roll inclined strip casting process[J]. Metalurgija, 2021, 60(3-4): 281-283.

[19] 飞尚才, 蒋小霞. 铸轧生产中铸嘴对铝箔坯料质量的影响[J]. 铝加工, 2021, 262(5): 24-26.

[20] 宋芳, 潘昊亮, 祝庆. 冷却强度对 8079 铝合金铸轧板组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(7): 880-883.

[21] 尹小丹, 潘秋红, 安彤舸, 等. 铸轧区长度对 Al-8Si 合金铸轧板显微组织的影响[J]. 锻压技术, 2021, 46(1): 170-174.

[22] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

[23] 司开田. 1235 合金铸轧带材中心层偏析机制的研究及其预防措施[J]. 轻合金加工技术, 2007, 36(10): 5-6.

[24] 刘晓波, 邹圆刚, 马善红. 不同铸轧条件下铸轧区温度场分析[J]. 江西理工大学学报, 2007, 28(6): 1-4.

[25] 石伯承. 铝合金连续净化过程中夹杂物变化规律的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.

[26] 张韶垒. AA1235 双零铝箔坯料组织团状物缺陷的研究及控制[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.

(编辑: 栗万仲)

2021 年铝(镁)合金铸件产量 720 万 t

近日,中国铸造协会发布了《2021 年中国铸造行业数据》。数据显示,2021 年,中国铸件总产量达到 5 405 万 t,同比增长 4%,两年平均增长 5.3%,铸造行业实现了相对平稳的发展。

其中,2021 年汽车铸件产量为 1 540 万 t,汽车工业是铸件最大需求用户,2021 年汽车铸件占比为 28.5%,由于出口的拉动作用,汽车铸件产量同比增长 2.7%。从材质铸件产量数据显示,其中,铝(镁)合金铸件产量 720 万 t,铜合金铸件产量 90 万 t。

(摘自压铸周刊)