

冷却强度对 8079 铝合金铸轧板组织性能的影响

宋芳¹ 潘昊亮² 祝庆³

(1.焦作大学机电工程学院; 2.河南机电职业学院智能工程学院; 3.商丘阳光铝材有限公司)

摘要 以 8079 铝合金为研究对象,用电解铝液直接铸轧双零铝箔用铸轧板卷。利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和能谱分析仪等检测分析手段,研究了不同冷却强度对 8079 铝合金铸轧板晶粒组织和中心偏析的影响。结果表明,当冷却强度为 3 500 W/(m²·K)时,合金铸轧板晶粒组织粗大,中心区域出现较为严重的偏析现象;冷却强度提高到 4 000 W/(m²·K)时,晶粒尺寸逐渐减小,中心区域偏析现象减弱;当冷却强度为 4 500~5 500 W/(m²·K)时,随着冷却强度提高,试验合金组织和晶粒尺寸无明显变化,平均晶粒尺寸约为 54 μm,中心区域未发现明显偏析现象;继续提高冷却强度到 6 000 W/(m²·K),晶粒尺寸过于细小,中心区域未发现偏析现象。当冷却强度为 4 500~5 500 W/(m²·K)时,可获得组织均匀细小和无中心偏析的铝合金铸轧板。

关键词 冷却强度;8079 铝合金;铸轧板;微观组织;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG292

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cooling Intensity on Microstructure and Mechanical Properties of 8079 Aluminum Alloy Cast-rolled Plate

Song Fang¹, Pan Haoliang², Zhu Qing³

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaozuo University; 2.School of Intelligent Engineering, Henan Mechanical and Electrical Vocational College; 3.Shangqiu Sunshine Aluminum Co., Ltd.)

Abstract: Taking 8079 aluminum alloy as the research object, sheet for double zero aluminum foil was cast rolled directly with electrolytic aluminum liquid. The effects of different cooling intensities on the grain structure and central layer segregation of 8079 aluminum alloy cast-rolled plate were systematically investigated by means of optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The results indicate that when the cooling intensity is 3 500 W/(m²·K), the grain is coarsened with grade 3, and the segregation phenomenon presents severe in the center layer of tested specimens. When the cooling intensity is increased to 4 000 W/(m²·K), the grain size is gradually decreased, and the central layer segregation is weakened. When the cooling intensity is 4 500~5 500 W/(m²·K), the grain size keeps stable with the increase of cooling intensity, which is about 54 μm, and absence of segregation is observed in the center layer. When the cooling intensity is increased to 6 000 W/(m²·K), the grain size is excessively fine and absence of obvious segregation is observed in the center layer. When the cooling intensity ranging from 4 500 W/(m²·K) to 5 500 W/(m²·K), the aluminum alloy cast-rolled plate without central segregation can be obtained, which exhibits uniform and fine microstructure.

Key Words: Cooling Intensity, 8079 Aluminum Alloy, Cast-rolled Plate, Microstructure, Mechanical Properties

双零铝箔因拥有材质轻、无毒无味、防潮、抗氧化和隔菌等优良品质,被广泛应用于医药、电子产品、日用品和食品等领域^[1~5]。因 8079 铝合金所生产的双零铝箔具有综合力学性能高、轧制速率高且断带几率低、品质高等特点,在医药和食品包装等领域出现逐渐代替

1235 铝合金的趋势^[6~8]。双零铝箔用坯料采用铸轧法生产,其具有节能降耗、生态环保、低生产成本和高生产效率等特点^[9]。双零铝箔品质很大程度上受到铸轧板品质的影响。铸轧板与铸轧速度、铸轧辊参数和材质、铸嘴参数、冷却水温、冷却强度等关系很大,研究者对此

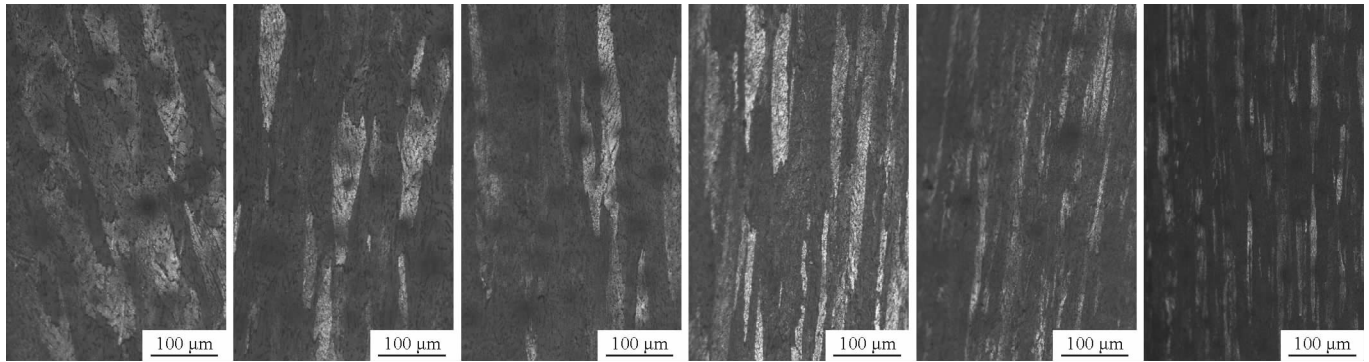
收稿日期:2021-01-12;修改稿收到日期:2021-02-01
基金项目:河南省重点研发与推广专项科技攻关资助项目(182102310917)
第一作者简介:宋芳,女,1980 年出生,讲师,河南焦作(454000),E-mail:songfang1980@tom.com
引用格式:宋芳,潘昊亮,祝庆. 冷却强度对 8079 铝合金铸轧板组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):880-883.
SONG F, PAN H L, ZHU Q. Effects of cooling intensity on microstructure and mechanical properties of 8079 aluminum alloy cast-rolled plate[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):880-883.

进行了大量研究并取得了一定的成果^[10~14]。司开田^[15]通过合理控制铸轧工艺分析了铸轧板中心层偏析产生的原因。罗晓锋^[16]以不锈钢为研究对象,利用有限元分析软件对冷却强度和铸轧速度等工艺参数对熔池内温度场和铸轧温度场的影响进行数值模拟,提出了不同工艺条件下熔池和铸轧辊的影响规律。

由上述研究可知,铸轧工艺的微小变化就会影响到铸轧板品质。然而,有关冷却强度对 8079 铝合金铸轧板品质影响的研究报道很少,因此有必要系统研究冷却强度对铸轧板微观组织的影响。结合生产实际情况,在其他生产条件保持不变的情况下,本课题主要研究冷却强度对 8079 铝合金铸轧板晶粒组织和中心偏析层的影响,为后续研究和铝合金生产提供参考。

1 试样材料与方法

试验在倾斜式双驱动铸轧机上进行。铝合金熔体采用燃气加热、容积为 25 t 的熔炼炉进行熔炼,冷料添加量为 30% 左右(质量分数,下同),包括 25% 重熔铝锭和 5% 冷轧工艺废料^[4]。铝合金熔体经过静置扒渣、两次精炼,化学成分合格后进行倒炉,接着在保温炉进行气体精炼,前箱温度约为 690 ℃,在线添加 2% 的 Al-5Ti-1B 晶粒细化剂,使用在线除气装置和双层泡沫陶瓷过滤板进行除杂去气,熔体氢含量控制在 0.12 mL/(100 g Al) 以下。铸嘴开口度约为 4.3 mm,铸轧区长度约为 65 mm,铸辊间隙约为 0.5 mm,铸轧速度约为 1 100 mm/min。冷却强度分别取 3 500、4 000、4 500、5 000、5 500、6 000 W/(m² · K)。铸轧板尺寸为 7 mm×1 050 mm,检测分析试样从铸轧板上截取。表 1 为 8079 铝合金铸轧板名义化学成分。



(a) 3 500 W/(m² · K) (b) 4 000 W/(m² · K) (c) 4 500 W/(m² · K) (d) 5 000 W/(m² · K) (e) 5 500 W/(m² · K) (f) 6 000 W/(m² · K)

图 1 8079 铝合金铸轧板晶粒组织

Fig.1 Grain structures of 8079 cast-rolled plates

趋缓;当形核率小于长大速率时,晶粒数目少,晶粒趋向长大。当冷却强度为 3 500 W/(m² · K) 时,晶粒组织较粗大,平均晶粒尺寸约为 100 μm,见图 1a。这是因为

表 1 8079 铝合金铸轧板的化学成分									
Tab.1 Chemical compositions of 8079 aluminum alloy									
cast-rolled plate									%
w _B									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	其他杂质		Al
							单个	合计	
0.1~0.2	0.8~1.2	0.05	—	—	0.10	—	≤0.05	≤0.15	余量

把经过不同型号砂纸研磨、机械抛光和电解抛光后的试样分成两组,抛光液使用体积比为 1 : 9 的 HClO₄ : C₂ H₅ OH 配制,制膜液使用体积比为 38 : 43 : 19 的 H₂SO₄、H₃PO₄ 和 H₂O。其中一组合金试样经覆膜后用去离子水冲洗且吹干后使用型号为 Axiovert 40 MAT 型万能倒置光学显微镜(OM)进行显微组织观察分析,另一组试样经阳极覆膜后在光学显微镜上进行低倍偏光晶粒组织观察,观察面为铸轧板轧面,晶粒尺寸采用截线法测量;经电解抛光后的试样无需阳极覆膜而直接利用 Quanta-2000 扫描电镜(SEM)对偏析层和表面条纹形貌进行观察,其观察面为纵截面,并借助其附带的能谱分析仪(EDS)进行微区分析。拉伸试验在 WA-300 拉伸试验机上进行。

2 试验结果与分析

2.1 晶粒组织分析

图 1 为不同冷却强度条件下 8079 铝合金铸轧板试样纵剖面偏光晶粒组织。可以看出,随着冷却强度增加,铸轧板试样晶粒尺寸先减小,而后逐渐平稳,接着又减小。结晶时,形核率和长大速率决定了晶粒尺寸大小,增加过冷度,形核率和长大速率都会提高,但是提高程度不同^[17]。当形核率大于长大速率时,晶粒数目增多,晶粒细化;当形核率和长大速率接近时,晶粒长大

冷却强度小,液态金属凝固时过冷度小,熔体中晶粒数目少,熔体凝固时间长,造成金属试样晶粒粗大,导致冷轧过程中晶粒破碎难度大,材料组织和性能不均匀,难

以控制箔轧时板形,尤其轧制到更薄时板形难度更高,易出现断带。当冷却强度增加到 $4\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时,晶粒变细,平均晶粒尺寸约为 $92\text{ }\mu\text{m}$,见图 1b。随冷却强度增加,熔体过冷度提高,晶粒数目增加,熔体凝固时间短,晶粒形核率与长大速率差距逐渐缩小。当冷却强度在 $4\,500\sim5\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时,随着冷却强度提高,晶粒尺寸无明显变化,晶粒分布均匀细小,平均晶粒尺寸约为 $54\text{ }\mu\text{m}$,见图 1c~图 1e。这说明此时冷却强度使得熔体结晶形核率和晶粒长大速率接近。继续提高冷却强度到 $6\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时,晶粒更细小,平均晶粒尺寸约为 $45\text{ }\mu\text{m}$,见图 1f。这表明形核率远远大于晶粒长大速率,短时间内在金属液中形成了大量的晶核,这些晶核没有充足的时间长大便相互接触,故晶粒尺寸更小。但是,晶粒尺寸过小,增加了后续轧制的变形抗力,提高了加工硬化程度,增加铝箔针孔产生几率,容易造成轧制过程中断带现象发生^[18]。由以上分析可知,冷却强度为 $4\,500\sim5\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时,能够获得分布均匀细小的晶粒组织,有利于后续轧制的顺利进行。

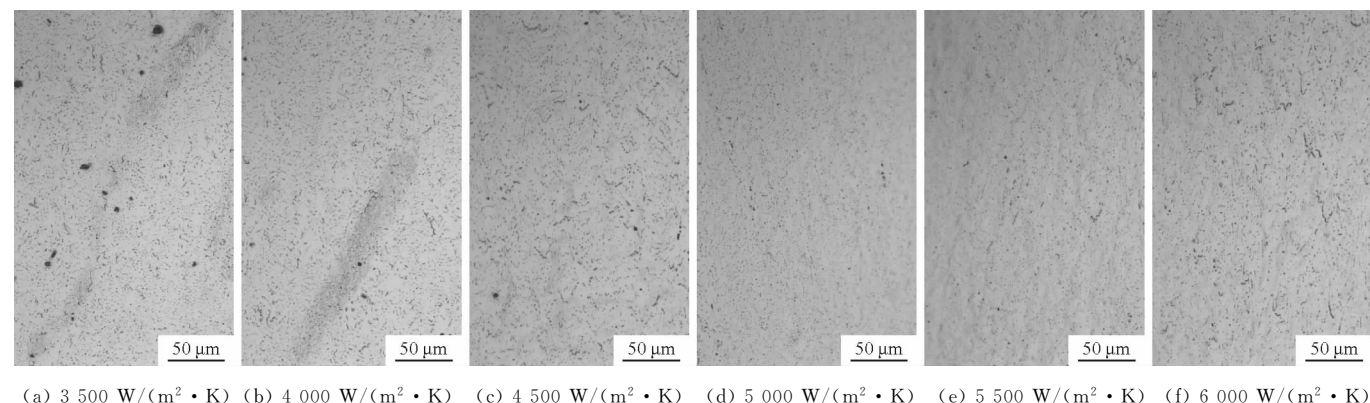


图 2 8079 铝合金铸轧板纵剖面金相组织

Fig.2 Longitudinal-section metallographic structures of 8079 cast-rolled plates

扩散到中心层,导致中心偏析区域加重^[19]。由此可知,适当提高冷却强度,可以消除或减轻铸轧板中心区域偏析程度,改善铸轧板力学性能和使用性能,有利于提高产品成产率。结合图 1,冷却强度控制在 $4\,500\sim5\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 范围内是可行的。

2.3 SEM 观察及 EDS 能谱分析

图 3 是冷却强度为 $3\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时 8079 铝合金铸轧板中心偏析区域的 SEM 和 EDS 图。从图 3a 可以看出,中心区域偏析物整体上呈现白色,偏析层沿着合金铸轧板中心方向延伸,偏析长度约为 $240\text{ }\mu\text{m}$,其中偏析区域存在不同形状的颗粒状相。对铸轧板中心偏析区域 A 处进行能谱分析发现(见图 3b),铸轧板中心区域偏析物组成比较复杂,偏析物主要由 Al、Fe、Si 和 Ti 元素组成,这说明中心区域主要发生了以上 4 种

2.2 中心层偏析分析

图 2 为不同冷却强度条件下 8079 铝合金铸轧板纵剖面显微组织。可以看出,当冷却强度较低时,试样组织中出现不同程度的中心区域偏析现象。当冷却强度为 $3\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时,试样中心区域出现严重偏析现象,由中心向外扩展,偏析尺寸在 $240\text{ }\mu\text{m}$ 以上,见图 2a;随着冷却强度提高到 $4\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时,偏析程度减弱,偏析尺寸约为 $160\text{ }\mu\text{m}$,见图 2b。这表明冷却强度低时,易导致铸轧板中心区域出现偏析现象,将严重降低铸轧板品质。当冷却强度在 $4\,500\sim6\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时,继续提高冷却强度,铸轧板中心区域未发现明显偏析,见图 2c~图 2f。在铝合金铸轧过程中,在轧辊冷却作用下铸轧板表面先结晶,因轧制力作用于富含合金元素的铝合金熔体从较冷区域沿着枝晶间隙被推到温度较高的中间区域所形成的,即所谓的孔道效应作用^[15]。冷却强度过低,铸轧辊与板坯热交换率降低,过冷度低,熔体结晶速度缓慢,拉长了熔体液穴,有充足的时间促使富含合金元素和杂质的熔体通过孔道效应

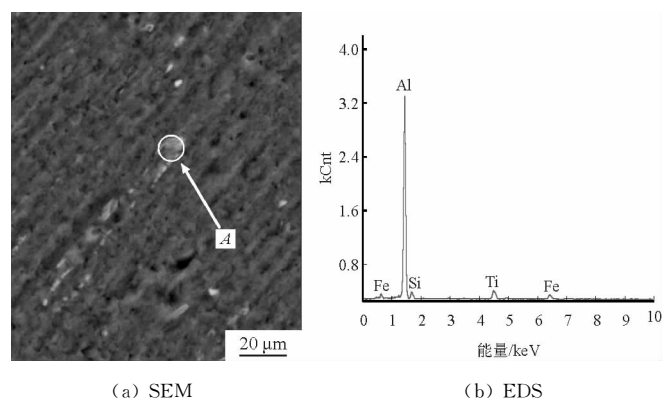


图 3 冷却强度为 $3\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 时 8079 铸轧板中心偏析 SEM 照片和 EDS 分析

Fig.3 SEM image and EDS analysis of the central segregation layer of 8079 cast-rolled plate with cooling intensity of $3\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

元素的偏析。8079 铝合金铸轧板中存在不同形状的析出相 FeSiAl 金属间化合物^[7,8],因此可以确定铸轧板中心偏析区域中存在 FeSiAl 金属间化合物,另外该偏析区域中还存在元素 Ti,可能是熔体中细化剂发生溶解使 Ti 偏析聚集所导致^[18]。由此可以判断,铸轧板中心偏析区域是由于合金元素等在轧制力作用下沿着枝晶间隙向液穴中进行不断扩散所导致的。结合图 1 和图 2 可知,冷却强度控制在 4 500~5 500 W/(m²·K)范围内,可获得晶粒尺寸细小均匀且无偏析发生的铸轧板,能够满足后续冷轧和箔轧需求的毛料。

2.4 力学性能分析

表 2 为不同冷却强度条件下 8079 铸轧铝合金板的力学性能。可以看出,当冷却强度较低时,抗拉强度和伸长率均比较低。这是因为冷却强度低,熔体结晶过冷度低,晶粒变得粗大,各向异性大,在外力作用下晶粒之间不能发生协调变形,故力学性能差;结合图 1 可知,晶粒细小,各向异性小,在外力作用下变形均匀,合金元素和杂质分布更均匀,故铸轧板力学性能和加工性能较好;当冷却强度过高时,尽管力学性能增加,但同时增加变形抗力,易造成断带,不利于后续冷轧和箔轧。

表 2 8079 铝合金铸轧板的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of 8079 aluminum alloy cast-rolled plate		
冷却强度/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	抗拉强度/MPa	伸长率/%
3 500	98	24
4 000	112	26
4 500	128	37
5 000	130	37
5 500	129	36
6 000	137	38

3 结 论

- (1)冷却强度对 8079 铝合金铸轧板晶粒组织有着重要影响。冷却强度过低,铸轧板晶粒粗大;随着冷却强度增加,铸轧板晶粒逐渐细化;当冷却强度控制在 4 500~5 500 W/(m²·K)范围内,铸轧板晶粒细小均匀、组织致密;当冷却强度超过 5 500 W/(m²·K)时,铸轧板晶粒过于细小,增加变形抗力,易造成断带。
- (2)冷却强度影响铸轧板中心偏析程度。冷却强度过低,铸轧板中心偏析严重;随着冷却强度增加,偏析程度降低。当冷却强度控制在 4 500~6 000 W/(m²·K)范围内,铸轧板中心未发现明显的偏析现象。能谱分析表明,铸轧板中心发生了 Al、Fe、Si 和 Ti 等元素偏析。
- (3)不改变其他铸轧工艺条件下,冷却强度控制在

4 500~5 500 W/(m²·K)范围内,可获得晶粒组织细小均匀和无中心偏析的铸轧板。

参 考 文 献

[1] PAOLA F, GABRIELE S, ALESSANDRO M, et al. Quantification of the aluminum content leached into foods baked using aluminum foil[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(22): 8 357-8 366.

[2] 谭国寅,岳有成,杨钢,等.1235 超薄双零铝箔坯料中 Al-Fe-Si 第二相粒子在轧制过程中演化行为[J].稀有金属材料与工程, 2016, 45(4): 979-981.

[3] 付理,尹登峰,胡婷,等.AA8079 双零铝箔的中间退火工艺[J].金属热处理, 2019, 44(1): 18-21.

[4] BIROL Y. Interannealing twin-roll cast Al-Fe-Si strips without homogenization[J]. Scripta Materialia, 2009, 61(2): 185-188.

[5] ROY R K, KAR S, DAS K, et al. A study of precipitation and recrystallization behaviour of aluminium alloy AA1235[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(4): 1 039-1 045.

[6] 焦建刚,雷延霞,裴长世,等.电解铝液直接配料生产 8079 铝合金双零箔铸轧板的质量控制[J].轻金属, 2019(11): 37-41.

[7] 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.

[8] 时国成.AA8079 铝箔坯料显微组织及性能研究[D].郑州:郑州大学, 2015.

[9] HAGA T. 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.

[10] 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.

[11] 陈思阳.铸轧辊冷却水道设计及其对冷却效果的影响[D].辽宁鞍山:辽宁科技大学, 2019.

[12] 孙亚琴,潘嘉祺,陈建斌,等.工艺参数对上引连铸铜镁合金杆微观组织的影响[J].有色金属工程, 2017, 7(5): 16-19.

[13] CALDERON-RAMOS I, MORALES R D. Influence of turbulent flows in the nozzle on melt flow within a slab mold and stability of the metal-flux interface[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2016, B47(3): 1 866-1 881.

[14] 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.

[15] 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, 35(10): 5-6,52.

[16] 罗晓锋.铸轧速度和冷却强度对立板过程影响的研究[D].太原:太原科技大学, 2009.

[17] 崔忠圻.金属学与热处理[M].北京:机械工业出版社, 1988.

[18] 马锡量.铝带坯连续铸轧生产[M].长沙:中南工业大学出版社, 1992.

[19] 曹汉权,张放,李继林.高锰锌 3 系铝合金铸轧板材组织缺陷分析研究[J].铸造技术, 2016, 37(5): 853-856,859.

(编辑:栗万仲)