● 实用成型技术 Practical Shaping Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.018

铸轧速率对 Al-9Si-0.25Mg 合金铸轧板微观组织的影响

包俞颉,李 洋,魏伯文,徐博岳,许光明
(东北大学 材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要:通过实验室立式双辊铸轧机制备板坯,研究了铸轧速度对 Al-9Si-0.25Mg 合金中共晶硅尺寸和形态的影响。结果表明,在较低的铸轧速度 1 m/min 时,合金中共晶硅形态为针片状,分布相对分散,平均长径比为 9.7,平均长度为 3.61 μm。随着铸轧速度的提高,共晶硅尺寸明显减小。当铸轧速度增加到 20 m/min 时,针片状的共晶硅消失,共晶硅呈现为纤维状,其分布相对比较集中,且平均长径比减小到 2.1,平均长度减小到 0.75 μm。然而,铸轧板材宏观组织中硅反偏析现象加重。

关键词:共晶硅;铸轧速率;铸轧;晶粒细化

中图分类号:TG335; TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)10-0974-05

Effect of Cast-rolling Rate on Microstructure of Al-9Si-0.25Mg Alloy Cast-rolling Sheet

BAO Yujie, LI Yang, WEI Bowen, XU Boyue, XU Guangming
(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The effect of casting and rolling speed on the size and shape of eutectic silicon in Al-9SI-0.25 Mg alloy was studied by using vertical two-roll casting and rolling mechanism to prepare slab in laboratory. The results show that at a low casting and rolling speed of 1 m/min, the morphology of the alloy is needle shaped, the distribution is relatively dispersed, the average aspect ratio is 9.7, and the average length is 3.61 μm. With the increase of casting and rolling speed, the size of eutectic silicon decrease obviously. When the casting and rolling speed increased to 20 m/min, the needle-flake eutectic silicon disappeared, and eutectic silicon appeared as fiber, its distribution is relatively concentrated, and the average aspect ratio decrease to 2.1, and the average length decrease to 0.75 μm. However, the reverse segregation of silicon in the macrostructure of cast and rolled sheet is aggravated.

Key words: eutectic silicon; casting-rolling rate; casting-rolling; grain refinement

铝硅合金作为重要的工业合金之一,根据合金中硅含量的不同,还可以分为共晶铝硅合金,过共晶铝硅合金和亚共晶铝硅合金。其中硅含量小于12.6%的亚共晶铝硅合金具有优异的铸造性能,良好的耐腐蚀性能和焊接性能等特点。传统的钎焊材料 4343 铝合金正是由于其良好的润湿性和流动性而被广泛应用于钎焊复合板的包覆层。在亚共晶铝硅合金中硅作为主要的合金元素,不仅可以改善流动性、减少缩松、提高气密性,而且获得的铸件组织致密,还能提高合金的铸造性能,降低热裂倾向[1-3]。但是,硅的存在也有些坏处,如它在增加基体强度的同时,会使基体的塑性降低。因此,Al-Si 合金中 Si 的形态与分布和其机械性能是紧密相连的。通过添加变质剂,细化剂或快速凝固等可以细化合金中粗大的硅相,改变其形态,使其对基体性能的削弱作用大大减小,这是合金获得优良机械性能的有效途径[4]。Al-9Si-0.25Mg 合金与传统的钎焊材料 4343 铝合金相比,其硅含量更高,其液相线也比 4343 铝合金低,且合金中添加的镁元素可以去除铝合金表面氧化物。这是铝合金钎料的发展方向,即开发以 Al-Si 系为基础的低熔点钎料。

然而,Al-9Si-0.25Mg 合金中 Si 含量较多,共晶硅多呈现长针状和粗大的片状,还存在一些块状的初晶硅。这些粗大的硅相严重割裂基体,使合金的力学性能大幅下降,尤其对塑性的影响更为显著,因此在轧制时容易出现轧裂,降低成材率。因此,国内外学者一直致力于减小共晶硅尺寸和改变其形态的研

收稿日期:2020-07-18
基金项目:国家自然基金项目(51790485)
作者简介:包俞颉(1996-),安徽池州人,硕士生.研究方向:铝合金铸轧加工.电话:18540198847,
E-mail:2206561517@qq.com

究。T. Hosch[5]等采用 Bridgman 法进行定向凝固，发现在较低的生长速度下，共晶硅为粗大的片层状；当生长速度较高时，共晶硅呈纤维状。李豹[6]在研究 Al-Si-7Mg 合金发现共晶硅长大存在某个临界冷却速度，而且冷却速度对共晶硅形貌的影响与这个临界冷却速度紧密相关。铝硅合金在传统工艺条件下组织比较粗大、分布不均；亚快速凝固是非平衡凝固，因此，当实验合金的成分为近共晶成分时，在非平衡冷却下有可能得到共晶组织。

本文在立式双辊铸轧机上改变铸轧速度，控制其他铸轧参数不变，以保证熔体的冷却速度只与铸轧速度有关，从而研究冷却速度对共晶硅形貌和尺寸的影响。为了防止变质剂和细化剂对共晶硅的细化效果，掩盖铸轧速度对共晶硅微观形貌的影响，实验未添加任何变质剂和细化剂。

1　实验材料及方法

1.1　实验材料

实验材料由 99.99% 纯铝、99.99% 纯镁和 Al-20Si 中间合金配制而成。合金成分如表 1 所示。

表1 实验合金成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of experimental alloy

合金成分	标准含量范围(%)	成分分析结果(%)
Al	余量	余量
Mg	0.25	0.23
Si	9	8.8

1.2　铸轧实验

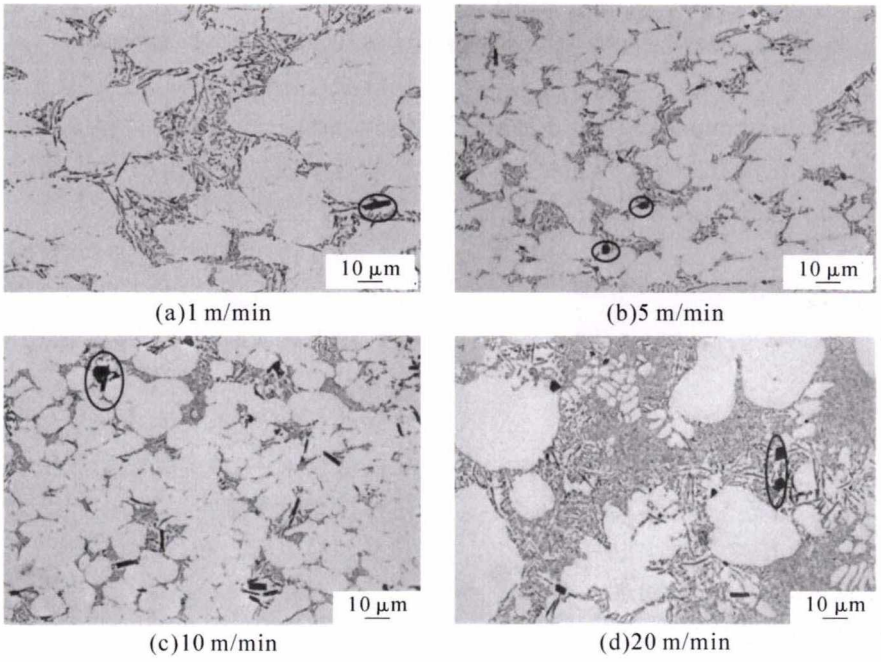
采用石墨坩埚在工业电阻炉中进行熔炼。熔炼温度 710 ℃，710 ℃后随炉冷却至浇铸温度 650 ℃，对熔体除气，扒渣后进行铸轧实验。双辊铸轧铝带坯试验在轧辊直径为 360 mm 的小型铸轧机上进行的。采用循环冷却水对轧辊进行冷却，在铸轧辊表面喷涂石墨进行润滑，以防止粘辊。铸轧实验共四组，每组实验的浇铸温度和轧制力分别设定为 650 ℃和 150 kN。铸轧速度分别设定为1，5，10，20 m/min。

2　结果与讨论

2.1　实验结果

图 1 为 Al-9Si-0.25Mg 合金在不同铸轧速度的铸轧板材金相显微组织，可见当铸轧速度在 1 m/min 时，共晶硅以长针状及少许板片状存在，分布相对分散；当铸轧速度 5 m/min 时，长针状的共晶硅尺寸有所减小，但效果不显著。当铸轧速度增加到 10 m/min 和 20 m/min 时，共晶硅大多为纤维状，只有少量针状共晶硅，且分布较为聚集，且 20 m/min 时，共晶硅的尺寸最细小，分布最聚集。另外，无论是在较低的铸轧速度还是较高的铸轧速度下，合金中除了共晶硅相外，均存在大块状的初晶硅，如图 1 中圈内标出部分，且分布在共晶硅聚集区域。初晶硅和共晶硅的能谱分析可以看出，初晶硅的硅含量比共晶硅高很多，如图 2 所示。

图 3 为采用 Image-Pro-Plus 软件计算的不同铸轧速度下共晶硅的平均长径比、平均长度及平均面积，可见随着铸轧速度的提高，共晶硅的平均长径比、平均长度和平均面积均在逐渐减小，即共晶硅形

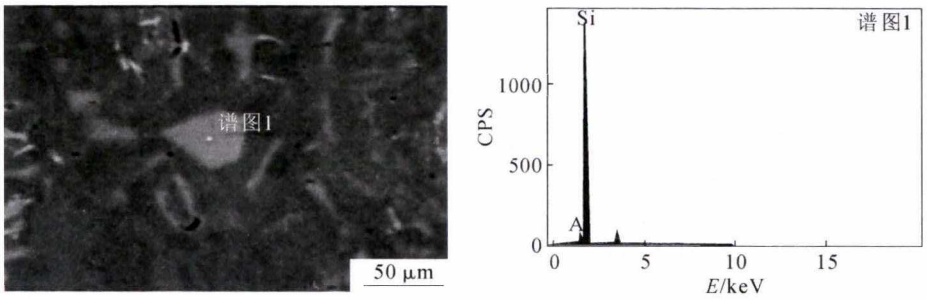


(a)1 m/min　(b)5 m/min

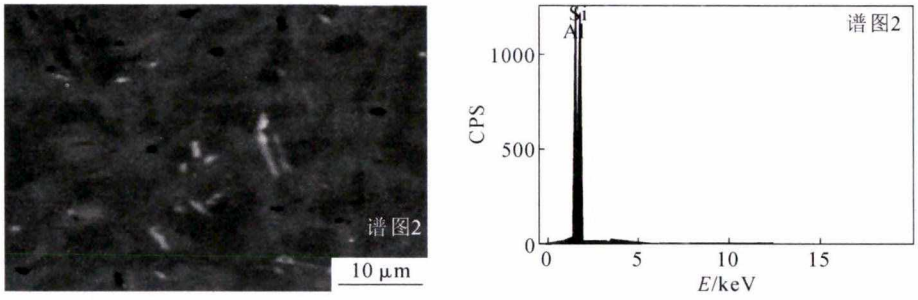
(c)10 m/min　(d)20 m/min

图 1 不同铸轧速度下 Al-9Si-0.25Mg 合金铸轧板材金相组织

Fig.1 Microstructures of Al-9Si-0.25Mg alloy cast-rolling sheet at different casting-rolling speeds



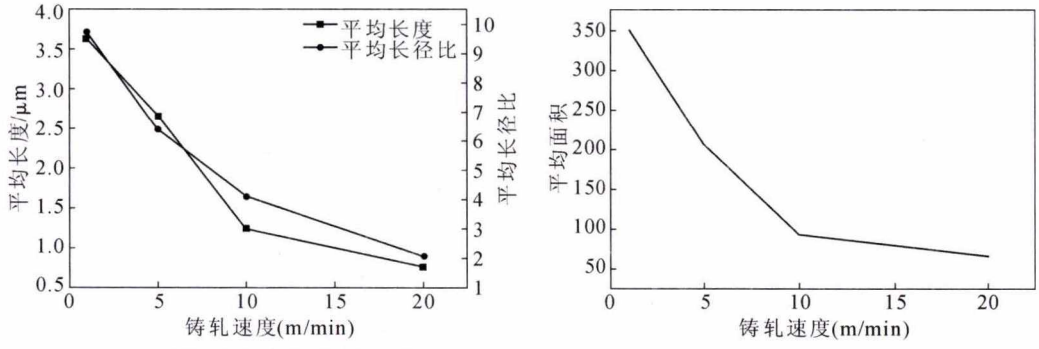
(a)初晶硅



(b)共晶硅

图 2 初晶硅与共晶硅 EDS 分析结果

Fig.2 EDS analysis results of primary and eutectic silicon



(a)平均长径比和平均长度　　(b)平均面积

图 3 不同铸轧速度下共晶硅特征

Fig.3 Eutectic silicon characteristics at different casting and rolling speeds

态逐渐趋于圆整。

图 4 为铸轧速度为 20 m/min 时 Al-9Si-0.25Mg 合金铸轧板材宏观形貌，在板材边缘出现了共晶硅反偏析现象。能谱分析可见板材边缘组织的硅含量比心部含量高，如图 5 所示。

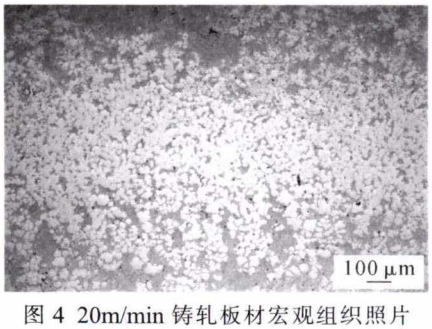


图 4 20m/min 铸轧板材宏观组织照片

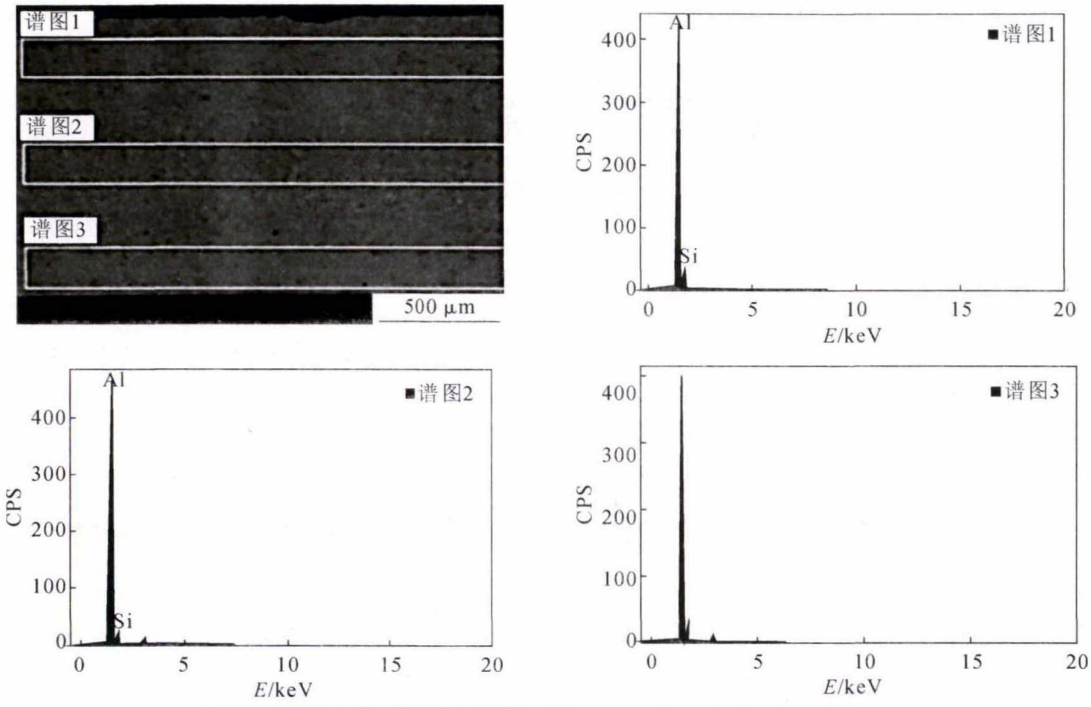
Fig.4 Macrostructure of the sheet with 20m/min cast-rolling speed

2.2 讨论

实验铸轧速度为铸轧辊转动时的线速度，高温铝液通过轧辊传热降温，铸轧速度的提高使轧辊传热能力增强，合金凝固过程的冷却速率也随之提高。冷却速率的提高使组织中共晶硅尺寸变小变短，形态由针片状转变为纤维状。

随着铸轧速度的增加，熔体的冷却速度也随之增大，此时可以获得较大的过冷度，而熔体在较大的过冷度下凝固时间会减少，液相中的硅原子来不及向有利于形核生长位置扩散迁移。同时根据经典形核理论，过冷度越大形核率越高，在固定的空间内晶粒的数目越多，单个晶粒的体积则越小。与此同时，过冷度增大也细化了 α-Al 组织，而共晶硅是在 α-Al 枝晶间隙中析出和长大的，所以共晶硅的尺寸势必会受到影响。

铝硅合金是非常具有代表性的非小平面–小平面共晶合金，而这种非规则共晶合金的领先相一般都是小平面生长的高熔点相。在铝硅合金的凝固过



元素 /wt%	Al	Si
谱图 1	86.73	13.27
谱图 2	91.12	8.88
谱图 3	86.37	13.63

图 5 20 m/min 铸轧板材能谱分析结果
Fig.5 EDS spectrum of 20 m/min cast-rolled sheet

程中领先相为高熔点的硅相，而低熔点的 α-Al 则会依附于硅相表面形核，这样两相交替搭桥生长。由于硅是小平面相，而小平面相的生长方式通常为二维形核生长，这种生长方式对凝固条件的反应极为敏感，因此，硅相的生长很容易受过冷度和冷却速率的影响。而 α-Al 相为非小平面相，它的长大机制为连续生长机制，生长速度较快。当铸轧速度较小时，熔体的冷却速度也较小，Si 就有足够的时间扩散，这样共晶 Si 才能与生长速度较快的 α 基体竞争生长。然而，由于受到两侧 α-AL 基体的“挤压”，共晶硅逐渐生长成为细针状或板状。当铸轧速度较高时，冷却速率增大，合金中过冷度变大，此时大的过冷度对 Si 原子的扩散影响更为严重，使 Si 原子扩散来不及。而共晶硅两边的 α-Al 基体是非小平面生长，冷却速率对其影响不大，导致 α-Al 的生长速度将快速超过共晶硅，并可能将共晶硅团团包裹住，使其晶粒无法继续长大，从而达到细化的目的[7]。图 6 为共晶生长方式示意图。

铸轧速度较高时，铸轧区内的液穴深度过大，此时熔体可能会出现还未来得及冷却凝固便过早进入轧制状态的情况，铸轧辊的挤压作用会使液态的熔体由中心向表面扩散。由于硅的流动性更好，

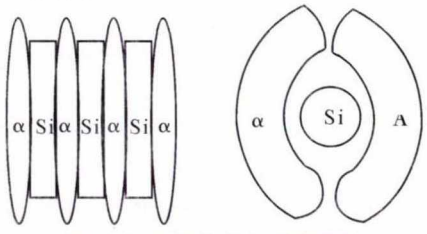


图 6 共晶硅生长方式示意图
Fig.6 Schematic diagram of eutectic silicon growth method

因此中心处的硅会沿着(Al)枝晶由中间空隙向表面移动，此时大量的硅聚集在表面导致共晶硅的反偏析，共晶硅反偏析如图 7 所示。

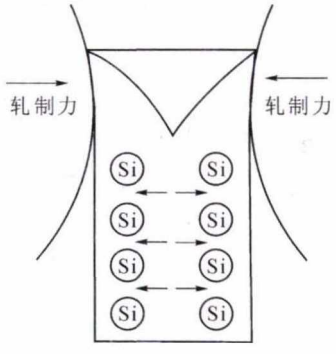


图 7 共晶硅反偏析示意图
Fig.7 Schematic diagram of eutectic silicon reverse segregation

（下转第 985 页）

表 8 正常轧制与低温轧制力学性能对比

Tab.8 Comparison of mechanical properties between normal rolling and low temperature rolling

项目	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)	面缩率(%)	KU2 冲击功 /J
标准要求	≥870	≥550	≥16	≥36	≥30
正常轧制 -1	904	593	18.5	55	48.4/58.1/43.4/38.8
正常轧制 -7	912	607	19.0	50	
低温轧制 -1	882	595	18.5	49	49.0/53.9/48.1/38.8
低温轧制 -8	877	595	18.0	46	

温轧制力学性能无明显差异。

作为生产曲轴的原材料，之后还要进行感应加热，加热温度约 1 200 ℃。原材进行控制轧制和控制冷却对最终成品性能影响程度尚未研究。故与钢厂的下游用户联合研发，通过调整非调质曲轴用钢的微量合金元素，逐步达到提高曲轴综合机械性能的目的[10]，是避免钢厂质量过剩和机械加工厂问题解决的进一步研究方向。

4 结论

(1)含氮非调质钢 S38MnSiV 具有高强、高韧等性能，在生产曲轴时，只需空冷以作为正火工艺，具有可以节减热处理工序，消除热处理带来的污染，缩短生产周期等优点。

(2)VD 破空后喂入氮化锰线，可以保证氮含量合格，后期经过软吹、保护浇注等措施可以满足夹杂物要求。

(3)控制轧后冷却速率 0.1~0.5 ℃/s 时，S38MnSiV 钢 1/2R 珠光体球团晶粒度 6.5~5.0 级，提高 2 级，提高了钢的韧性，但是强度并未有显著提高。

参考文献：

[1] 王开远. 丹东五一八内燃机配件厂. 汽车发动机曲轴技术条件标准新旧版本比对[M]. 车标准化, 2006.

[2] 王荣武，卢秉军. ϕ160mm 高强韧性非调质钢 S38MnSiV 的研制[J]. 特殊钢，2007，28(6):54-55.

[3] 董成瑞，任海鹏，金同哲，等. 微合金非调质钢[M]. 北京:冶金工业出版社，2000:3.

[4] 范连明. 转炉矩形坯生产非调质曲轴钢S38MnSiV 工艺实践[J]. 本钢技术，2010(4):12-14.

[5] 刘超芽，贺鹏，罗继来. 45 t 顶吹转炉拉碳出钢工艺探索与实践[J]. 浙江冶金，2014(4):35-38.

[6] 魏巍，李虹. BOF→LF→VD→CC 流程生产 38CrMoAl 钢实践[J]. 炼钢，2010，35(1):76-78.

[7] 张红云，赵阳，陈礼清，等. 冷却速率对 S38MnSiV 非调质钢显微组织的影响[J]. 汽车工艺与材料，2013(6):38-42.

[8] 王文军，刘金刚，李战军，等. 钢包软吹氩对钢中夹杂物去除效果的研究[J]. 钢铁，2010，45(9):28-31.

[9] 王立涛，薛正良，张乔英，等. 钢包炉吹氩与夹杂物去除[J]. 钢铁研究学报，2005，17(3):34-38.

[10] 周亚倬，金文辉，于勤，等. 非调质钢曲轴用材发展趋势[J]. 热处理技术与装备，2018(4):61-64.

(上接第 977 页)

3 结论

(1)铸轧速度增加时，共晶硅的平均长度，平均长径比，平均面积都随之减小。即提高冷却速度可以细化共晶硅尺寸。

(2)铸轧速度较小时，共晶硅为针片状；当铸轧速度较大时，针片状共晶硅转变为纤维状。提高冷却速度可以改变共晶硅的形态。

(3)铸轧速度较高时，铸轧板材可能会出现共晶硅反偏析的现象。板材边部组织的硅含量高于心部组织。

参考文献：

[1] 陈淑英，王建中. AL-Si 合金在汽车工业中的应用前景及研究现状[J]. 辽宁工学院学报, 2000, 20(3): 5-7.

[2] 熊艳才，刘伯操. 铸造铝合金现状及未来发展[J]. 特种铸造及有色合金, 1998 (4): 1-4.

[3] 王益志. 铝铸件的世界市场 [J]. 特种铸造及有色合金, 1999 (1): 36-40.

[4] 廖恒成，方们贤，孙国雄. 铸造 AL-SI 合金熔体处理—晶粒细化[J]. 特种铸造及有色合金, 1999 (3): 49-53.

[5] Hosch T, Napolitano R E. The effect of the flake to fiber transition in silicon morphology on the tensile properties of Al-Si eutectic alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2010(528): 226-232.

[6] 李豹. A1Si7Mg 合金共晶硅变质规律及其微观机 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学，2011.

[7] 黄治黎. 受控扩散凝固法制备 A390 铝合金微观结构及其形成机制研究[D]. 重庆:重庆大学，2017.