热终轧工艺对Al-4.8Mg合金组织性能的影响

戴青松¹,罗任¹,苏新¹,兰阳春¹,曹柳絮^{1,2}

¹湖南湘投轻材科技股份有限公司,湖南 湘西 ²中南大学粉末冶金研究院,湖南 长沙

收稿日期: 2023年5月18日; 录用日期: 2023年7月14日; 发布日期: 2023年7月25日

摘要

本文采用室温拉伸、弯曲试验、晶间腐蚀试验、光学显微镜、扫描电镜与透射电镜等分析手段,研究了 热终轧工艺参数对Al-4.8Mg合金组织性能的影响。研究结果表明:当终轧工艺由低温低速向高温高速转 变时,材料力学强度下降,而成形性能与抗晶间腐蚀性能提升;当材料金相组织由纤维状向细小再结晶 晶粒转变时,通过扫描电镜观察到第二相特征差别不大,但透射电镜观察到位错密度明显下降。

关键词

Al-4.8Mg合金,热轧,工艺参数,组织与性能

The Influence of Microstructure and Properties of Al-4.8Mg Alloy after Hot Final Rolling Process

Qingsong Dai¹, Ren Luo¹, Xin Su¹, Yangchun Lan¹, Liuxu Cao^{1,2}

¹Hunan Xiangtou Lightweight Material Technology Co., Ltd., Xiangxi Hunan ²Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha Hunan

Received: May 18th, 2023; accepted: Jul. 14th, 2023; published: Jul. 25th, 2023

Abstract

The influence of microstructure and properties of Al-4.8Mg alloy was studied after hot final rolling process parameters using room temperature tensile, bending test, intergranular corrosion test, light microscope, scanning electron microscopy and transmission electron microscopy in this work. When the final rolling process changes from low temperature and low speed to high temperature and high speed, the mechanical strength of the material decreases, but the forming performance

and intergranular corrosion resistance increase. When the metallographic structure of the material changes from fibrous to fine recrystallized grains, the second phase characteristics are no difference by scanning electron microscopy, but the density of dislocation decreases significantly by transmission electron microscopy.

Keywords

Al-4.8Mg Alloy, Hot Rolling, Process Parameters, Microstructure and Properties

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC ① Open Access

1. 引言

Al-Mg 合金中厚板具有中等强度、低密度、抗腐蚀等特性,被广泛应用于海洋船舶、油罐车、运煤 敞车等交通装备领域[1] [2]。热连轧是制备铝合金中厚板的重要工序,现代 Al-Mg 合金中厚板热连轧生 产中,各工厂希望合理设计热连轧工艺参数,利用铝材热连轧后的卷取余热实现自退火,并控制成品组 织性能,省去传统生产流程中的再结晶退火、冷轧、清洗、成品退火等工序,实现降本增效[3]。诸多学 者结合热连轧工况特征研究了热变形参数对铝合金组织性能的影响。黄星星[4]通过盐浴退火试验研究了 Al-4.5Mg 合金的静态再结晶行为,并构建了静态再结晶动力学模型,借助 3003 铝合金实际生产中的工 艺参数分析了 Al-4.5Mg 合金热连轧后的静态再结晶特征,为 Al-4.5Mg 合金热连轧工艺制定提供了依据。 史博等[5]建立了 7085 铝合金流变应力本构方程,并对 7085 铝合金多道次热轧过程进行仿真分析与试验 验证,指导了 7085 铝合金汇艺参数优化。陈振华等[6]根据应力随应变、变形温度和应变速率变化的数据 及有限元仿真,对 6082 铝合金的 4 机架热连轧规程进行优化,对实际生产具有指导作业。可见,研究热 连轧工艺参数对铝合金组织性能调控具有重要意义。本文以某 1 + 4 热连轧生产线制备 5 mm 厚 Al-4.8Mg 合金中厚板为背景,研究不同热终轧工艺参数对 Al-4.8Mg 合金组织性能的影响,为热连轧工艺参数的设 计提供参考。

2. 实验方法

实验材料为5组5mm厚Al-4.8Mg合金中厚板,中厚板制备工序为:将厚度为620mm的铸锭进行 420℃/2h+500℃/12h均匀化处理后热粗轧至23mm,然后经4连轧机组热精轧至5mm厚。5组试样的 材料成分、均匀化工艺、热粗轧工艺一致,热精轧压下率一致,但热精轧采用不同轧制温度与速度,其 中热精轧最后道次轧制温度与速度如表1所示,即结合工业生产实际情况按照低温低速、中温中速、高 温高速的思路设置了5组不同的热终轧工艺参数。

Table 1. Five different hot finish rolling processes 表 1.5 组不同的热终轧工艺

工艺参数	工艺 A	工艺 B	工艺 C	工艺 D	工艺 E
轧制温度(℃)	250	280	300	320	350
轧制速度(m/s)	0.8	1.1	1.6	2.2	3.0
轧制压下率(%)	27	27	27	27	27

对所制备的 5 组试样进行力学性能、成形性能、抗晶间腐蚀性能测试,并对中厚板纵截面的金相组 织、扫描组织、透射组织进行检测。力学性能按照 GB/T 228.1-2010 (金属材料拉伸试验 - 第 1 部分:室 温试验方法) [7]标准在 DDL100 电子万能材料试验机上进行。成形性能参照 GB/T 232-2010 (金属材料弯 曲试验方法) [8]标准在 BHT 3165 弯曲试验机上进行弯曲性能测试。抗晶间腐蚀试验参照 GB/T 26491-2011 (5xxx 系铝合金晶间腐蚀试验方法 - 质量损失法) [9]标准执行。在型号为 AXIO Scope A1 的金 相显微镜观察试样的金相组织。采用 ZEISS MA10 型场发射扫描电子显微镜检测试样断口形貌及第二相 特征,并利用 Oxford EDS 型能谱仪对第二相颗粒进行能谱分析。采用 FEI Tecnai G2 20 型透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)观察试样透射组织。

3. 实验结果与分析

3.1. 材料性能

1) 力学性能

表 2 为试样室温拉伸力学性能测试结果,在终轧温度为 250℃时,材料平均抗拉强度、屈服强度分 别为 337.3 MPa、243.7 MPa,延伸率为 17.7%,随着终轧温度的提升,材料强度下降,延伸率提高。当 终轧温度由 250℃提高到 350℃时,平均抗拉强度为 300.8 Mpa,屈服强度为 141.4 MPa,延伸率为 26.5%, 平均抗拉强度降低了 11.1%,屈服强度降低了 41.9%。

Table 2. Mechanical properties at room temperature of Al-4.8Mg alloy
表 2. Al-4.8Mg 合金室温拉伸力学性能

丁	Rm/I	MPa	Rp _{0.2}	/MPa	A _{50mm} /%		
上乙什丽	测试值	平均值	测试值	平均值	测试值	平均值	
	343.3		248.4		16.2		
А	333.2	337.3	239.6	243.7	17.7	17.7	
	335.5		243.1		19.3		
	317.2		204.9		21.6		
В	324.4	321.2	212.3	209.1	18.9	20.0	
	322.1		210.2		19.5		
	314.8		172.4		23.6		
С	309.2	311.0	167.3	170.0	24.5	23.6	
	309.1		170.3		22.8		
	306.5		152.1		25.3		
D	301.2	303.6	148.6	150.1	26.1	25.4	
	303.2		149.7		24.8		
	303.7		143.3		26.2		
Е	296.5	300.8	139.2	141.4	27.2	26.5	
	302.1		141.8		26.2		

2) 成形性能

选用弯曲半径 2.5 mm 的模具对板材进行弯曲,如图 1 所示,终轧温度为 250℃所制备的板材弯曲至 108°时产生了裂纹,终轧温度为 280℃所制备的板材弯曲至 132°时产生了裂纹,当终轧温度达到 300℃及 以上时,弯曲至 180°未产生裂纹,但板材弯曲 180°后变形纹较为严重,而终轧温度 320℃、350℃所制备 的板材试样弯曲后表面依旧光滑细腻,表现出更优的成形能力。



Figure 1. Maximum bending angle 图 1. 最大弯曲角度

3) 抗晶间腐蚀性能

试样的晶间腐蚀速率如表 3 所示,由表可知,随着终轧温度的提升,材料晶间腐蚀速率明显下降, 当终轧温度为 250℃时,晶间腐蚀速率最大为 11.29 mg/cm²,当终轧温度提高到 350℃时,其值下降至 3.86 mg/cm²。工业上,船板用 Al-Mg 合金对腐蚀性能的要求相对最高,要求晶间腐蚀速率 ≤ 15 mg/cm²,显 然,5 种工艺制备的材料均达到船用版的性能要求,说明 5 种工艺所制备的材料耐晶间腐蚀性能较好。

工艺	长度 (mm)	宽度 (mm)	厚度 (mm)	蚀前重 (g)	蚀后重 (g)	失重 (g)	腐蚀速率 (mg/cm ²)
А	50.79	25.67	4.95	17.14	16.76	0.38	11.29
В	50.48	25.78	4.97	17.16	16.85	0.31	9.22
С	50.43	26.13	5.03	17.61	17.34	0.27	7.93
D	50.71	25.78	4.98	17.32	17.15	0.17	5.03
Е	50.87	25.64	4.95	17.16	17.03	0.13	3.86

Table 3. Intergranular corrosion rate of Al-4.8Mg alloy 表 3. Al-4.8Mg 合金晶间腐蚀速率

3.2. Al-4.8Mg 合金微观组织

1) 金相组织

图 2 为 5 种试样纵截面的金相组织照片,由图可知,热终轧工艺参数对材料自退火行为影响显著,随着终轧温度的提高,金相组织逐步由纤维状演变为等轴状。如图 2(a)所示,当终轧温度为 250℃时,材料纵截面晶粒组织明显沿变形方向拉长呈纤维组织,说明终轧温度为 250℃时,卷取余热不足以驱动试样发生静态再结晶。随着终轧温度的提高,纤维组织含量减少,当终轧温度提高至 320℃时,如图 2(d) 所示,纤维组织已基本转变为再结晶组织,仅在试样中心部位能发现纤维组织痕迹。当变形温度进一步升至 350℃时,静态再结晶更加充分,晶粒已全部转化为等轴晶粒。



Figure 2. Metallographic of Al-4.8Mg alloy under different process. (a) Process A; (b) Process B; (c) Process C; (d) Process D; (e) Process E

图 2. 不同工艺下的 Al-4.8Mg 合金金相照片。(a) 工艺 A; (b) 工艺 B; (c) 工艺 C; (d) 工艺 D; (e) 工艺 E

Al-4.8Mg 合金在高温高速轧制条件下,内部更容易积累能量,形成动态再结晶,此外,材料轧制完 成瞬间能形成更多的高能不稳定亚晶组织,有利于轧制后亚晶快速吸收能量发生静态再结晶晶粒[2]。当 轧制温度与轧制速度低至一定程度时,材料在轧制过程所累积的能量通过动态回复释放,轧制完成后所 处环境温度较低,材料所吸收的能量对静态再结晶的驱动作用有限[2]。因此,终轧温度为 250℃的样品 未发生再结晶,变形出最大的抗拉强度,随着终轧温度提升,材料静态再结晶程度提升,力学强度下降。 同时,细小再结晶晶粒可提高材料的变形协调性,使得图 1 中试样 E 表现出更佳的弯曲成形性能。

2) 扫描组织

图 3 为 5 种试样沿纵截面的扫描电镜组织照片。照片中均分布着大量不规则块状或颗粒状的第二相 粒子,尺寸约 1~8 μm,采用 EDS 能谱对粗大第二相粒子的微区成分进行了分析,其结果如表 4 所示, EDS 检测结果表明,这些粒子主要为 Al(FeMnCr)Si 相,说明铸锭多道次热轧后铸锭中的 Al(FeMnCr)Si 粒子被轧制破碎,并沿轧制方向分布。从扫描电镜组织可以看出,5 种试样第二相粒子的尺寸、分布及 成分没有明显的差别。这是因为本章所制备的材料其合金配料、熔铸工艺相同,均匀化温度低于 Al(FeMnCr)Si 粒子的溶解温度[10] [11],均匀化过程难以将铸锭中的 Al(FeMnCr)Si 粒子回溶到铝基体中,使得铸锭轧制前保留了相同的第二相特征。热轧过程中经多次高温往返轧制,Al(FeMnCr)Si 粒子逐渐沿轧制方向破碎,但试样总轧制变形量一致,虽然热终轧工艺不一致,但热变形温度均低于 Al(FeMnCr)Si 相的回溶温度,因此,5种试样的第二相粒子整体特征基本一致。



Figure 3. SEM images of Al-4.8Mg alloy under different process. (a) and (b) Process A; (c) and (d) Process B; (e) and (f) Process C; (g) and (h) Process D; (i) and (j) Process E 图 3. 不同工艺下的 Al-4.8Mg 合金 SEM 形貌。(a)和(b) 工艺 A;(c)和(d) 工艺 B;(e)和(f) 工 艺 C; (g)和(h) 工艺 D; (i)和(j) 工艺 E

Elements (wt%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Al	66.7	75.11	66.69	66.17	73.66	73.73	76	80.57	78.18	76.53
Si	4.22	2.79	4.22	3.98	3.51	3.02	1.02	1.5	1.87	1.66
Cr	0.88	0.72	1.88	0.91	1.92	0.98	0.98	0.31	0.46	0.65
Mn	9.91	9.23	8.92	9.82	8.16	7.7	7.7	6.51	6.01	6.86
Fe	18.29	12.15	18.29	19.12	12.75	14.57	14.3	11.11	13.48	14.3

Table 4. EDS analysis results of the second phase of Al-4.8Mg alloy 表 4. Al-4.8Mg 合金第二相 EDS 能谱分析结果

3) 透射组织

图 4 为试样的 TEM 照片。如图 4(a)所示,当终轧温度为 250℃时,照片中分布着大量位错及位错胞 状组织,提高终轧温度后位错逐渐减少。当温度提至 320℃时,如图 4(e)所示,晶界非常清晰,位错胞状 结构基本消除,仅在晶内存在少量位错。Al-Mg 合金热轧过程中,位错随着应变增大快速形成的同时, 也随着变形能的积累不断转化为亚晶组织和再结晶晶粒,热轧结束后,在卷取余热的自退火作用下位错 和位错胞状结构进一步消除。因此,图 4(d)与图 4(e)中的位错胞状结构基本消失。



Figure 4. TEM images of Al-4.8Mg alloy under different process. (a) Process A; (b) Process B; (c) Process C; (d) Process D; (e) Process E; (f) Process F 图 4. 不同工艺下的 Al-4.8Mg 合金 TEM 照片。(a) 工艺 A; (b) 工艺 B; (c) 工 艺 C; (d) 工艺 D; (e) 工艺 E; (f) 工艺 F

在 Al-Mg 合金中,Mg 元素在基体中的溶解度较大,主要析出相 β 相(AlMg 相)在室温下难以析出[4], 因而具有优异的抗腐蚀性能。5 组试制材料的化学成分一致,扫描电镜观察到的第二相特征基本一致, 可认为化学成分和第二相粒子在腐蚀试验过程中对材料的影响基本相当。由于热连轧工艺不同,2 组试 样抗腐蚀性能存在一定差异,试样 E 抗腐蚀性能最优。研究发现[12],铝合金抗腐蚀性能与其位错、亚 结构和晶内储能显著相关,位错密度越大、亚结构含量越多,其晶内储能越高,试样在腐蚀环境中更容 易腐蚀。由图 4 可知,试样 A 晶粒组织中保留了大量亚晶,且其位错密度明显高于试样 E,可见试样 E 晶内储存的能量在静态再结晶过程中释放更充分,而试样 A 晶内残留了更高的能量,相对更容易被腐蚀。

4. 结论

1) Al-4.8Mg 合金在热终轧温度为250℃条件下,材料平均抗拉强度、屈服强度分别为337.3 MPa、243.7 MPa,随着热终轧温度的提升,材料金相组织逐步由纤维状向等轴再结晶晶粒转变,使得材料强度下降、 变形协调性提升,当终轧温度为350℃时,材料平均抗拉强度降至300.8 MPa,屈服强度降至141.4 MPa, 但表现出更佳的弯曲成形性能。

2) 当 Al-4.8Mg 合金热终轧温度由 250℃提升至 350℃时,扫描电镜下观察到的形貌及第二相特征无明显区别,但透射电镜下观察到的位错密度明显下降,说明晶内储能降低,表现出更好的抗腐蚀性能,材料腐蚀速率从 11.29 mg/cm² 降至 3.86 mg/cm²。

基金项目

湖南省科技人才托举工程项目(2022TJ-N19),湖南省重点研发计划项目(2022GK2041)。

参考文献

- [1] 邓运来, 张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2115-2141.
- [2] 张新明. 铝热连轧原理与技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
- [3] 钟利,马英义,谢延翠.铝合金中厚板生产技术[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [4] 黄星星. 5182 铝合金热变形及再结晶研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2000.
- [5] 史博, 湛利华, 许晓龙, 等. 7085 铝合金超厚板热连轧过程的宏观场分析[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(1): 78-84.
- [6] 陈振华, 蔡庆伍, 宋勇, 等. 6082 铝合金板带热连轧规程优化[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(3): 22-25.
- [7] 高怡斐,梁新帮,董莉,等. GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验-第1部分:室温试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- [8] 王萍, 刘卫平, 董莉, 等. GB/T232-2010 金属材料弯曲试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [9] 周仁良, 温庆红, 张钰, 等. GB/T 26491-2011 5xxx 系铝合金晶间腐蚀试验方法-质量损失法[S]. 北京: 中国标准 出版社, 2011.
- [10] Ratchev, P., Verlinden, B. and Houtte, P.V. (1995) Effect of Preheat Temperature on the Orientation Relationship of (Mn, Fe)Al₆ Precipitates in an AA 5182 Aluminium-Magnesium Alloy. *Acta Metallurgica et Materialia*, **43**, 621-629. https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)00261-F
- [11] Tan, L. and Allen, T.R. (2010) Effect of Thermomechanical Treatment on the Corrosion of AA5083. *Corrosion Science*, 52, 548-554. <u>https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.10.013</u>
- [12] Zhou, X., Luo, C., Ma, Y., *et al.* (2013) Grain-Stored Energy and the Propagation of Intergranular Corrosion in AA2xxx Aluminium Alloys. *Surface and Interface Analysis*, **45**, 1543-1547. <u>https://doi.org/10.1002/sia.5218</u>