

Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料均匀化热处理研究

任 政, 张 潇, 朱秀荣, 成建国, 连付奎, 徐国辉, 徐 英, 赵宝荣

(中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘 要: 对 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料通过不同热处理温度和保温时间进行了均匀化热处理研究, 并对均匀化热处理后的微观组织、硬度和微观成分分布进行了分析。结果表明: Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料经过均匀化热处理后, Al-Si 合金一侧的微观组织由粗大的网状结构转化成点状或短棒状混合组织, Al-Mn 合金一侧微观组织趋于均匀一致, 复合界面处的界限更加明显; 均匀化热处理后 Al-Si 合金硬度有明显下降, 但对 Al-Mn 合金的影响较小; 微观元素分布分析表明均匀化热处理后溶质元素更加均匀, 在复合界面处溶质元素出现互扩散现象, 特别是 Mg 元素扩散后复合界面模糊; 综合分析表明, Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料在 480 °C 保温 15 h 后效果最佳。

关键词: Al-Si/Al-Mn; 均匀化; 复合坯料

中图分类号: TG166.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2014)04-0986-04

铝合金层状复合材料是金属复合材料中一种应用较为广泛的新型复合材料^[1]。目前铝合金层状复合材料制造主要采用轧制复合工艺, 存在工序复杂、加工周期长、复合层结合强度低、生产成本高等诸多问题。而铝合金复合连铸技术易于实现批量化、连续化和自动化生产, 有利于降低成本和减少生产工艺流程, 其研究和开发受到越来越广泛的关注^[2-6]。近年来, 美国等国家的世界铝业巨头陆续宣布掌握了铝合金复合连铸技术, 而国内在铝合金复合连铸方面也取得了突破^[7], 但还处于初始阶段, 特别是在复合铸坯热处理、轧制变形等方面的研究还鲜有报道。

Al-Si/Al-Mn 是一种常用的制造汽车热交换器用的铝合金层状复合材料^[8], 结合了 Al-Si 良好的钎焊性能^[9]和 Al-Mn 优异的耐腐蚀性能^[10,11]。本研究主要针对利用复合连铸技术制备的 Al-Si/Al-Mn 层状复合坯料的均匀化热处理进行研究。

1 实 验

Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料的中两种合金的化学成分如表 1 所示。Al-Si、Al-Mn 两种合金采用反射炉进行加热熔化, 待合金完全熔化后利用氩气进行除气处理, Al-Si、Al-Mn 两种合金成分根据荧光光谱(XRF-1800)分析在浇铸前进行成分调整, 然后利用自行设计的复合连铸设备制备出具有冶金结合的高质量

Al-Si/Al-Mn 层状复合坯料^[7]。

在 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料过渡区域用线切割加工成尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm 的热处理试样, 然后用乙醇清洗试样上的油脂。热处理试验在温控精度在±1 °C 的箱式电阻炉中进行, 炉温升至预定温度后放入试样保温, 到预定保温时间后, 随炉降温至 200 °C, 然后将试样从炉中取出空冷至室温。由于 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料的特殊性, 不能选择热处理温度较高的 Al-Mn 合金作为复合连铸坯料的均匀化热处理温度, 但由于 Al-Mn 的合金含量较低, 塑性好, 所以较低的均匀化温度对其影响较小, 同时可以通过延长热处理时间达到均匀化热处理的效果。综合考虑两种铝合金的均匀化热处理特性, 最终选择 450、480、510 °C 保温 6、9、12、15、18 h 进行试验研究, 优化出最优的热处理工艺制度。

实验得到的热处理试样经 200#砂纸打磨后利用 HB-3000-1 布氏硬度仪测试硬度。在 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料结合界面上通过 200#、400#、600#、800#、1000#、1200#砂纸打磨后抛光, 抛光后用 4%硝酸乙醇

表 1 Al-Si、Al-Mn 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Al-Si and Al-Mn alloys (wt%)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
Al-Si	9.0~10.5	0.8	0.25	0.10	1.0~2.0	0.10	Bal.
Al-Mn	0.5~0.7	0.7	0.05~0.2	1.0~1.5	—	0.20	Bal.

收稿日期: 2013-04-27

基金项目: 浙江省自然科学基金资助 (LQ12E01002); 宁波市自然科学基金资助 (2012A610059)

作者简介: 任 政, 男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103, 电话: 0574-87902206, E-mail: renzheng1981@163.com

溶液进行浸蚀,浸蚀后在 MEF-4A 金相显微镜下进行金相观察。为了分析合金元素热处理后在基体中的分布状况,利用 EPMA-1600 型电子探针分析仪对合金中的元素分布状况进行扫描分析。

2 结果与讨论

2.1 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料热处理后的微观组织

Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料均匀化热处理前后的微观组织如图 1 所示。从图 1a 中可以看出,Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料的铸态组织的 Al-Si 一侧主要由粗大的树枝晶组成,而在 Al-Mn 合金一侧主要以 α Al 和少量 Al_6Mn 组成。通过不同温度 12 h 保温处理后(图 1b, 1c, 1d),Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料的过渡区域更加明显,对比图 1a 可以看出,经过 12 h 保温处理后,Al-Si、Al-Mn 两种合金的析出相出现不同程度的固溶,特别是在 480、510 °C 保温 12 h 后,Al-Si 铝合金由铸态时的网状结构的析出相变成点状或短棒状的混合组织,而 Al-Mn 铝合金析出了细小 $MnAl_6$ 相,但在 510 °C 保温 12 h 后在复合界面处出现了“锯齿状”的过渡区。

图 2 是 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料在 480 °C 保温 6、9、12、15、18 h 后的微观组织。对比可以看出,Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料在 480 °C 保温时,随着保温时间的增加,Al-Si、Al-Mn 两种合金在铸态时形成的析出相逐渐溶解,呈细小、弥散状分布,但当保温时间超过 15 h 后,Al-Si、Al-Mn 两种合金的晶粒均出现不同程度的长大。

图 3 是 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料在 480 °C 保温 15 h 后的复合界面处的微观组织。从图中可以看出,复合连铸坯料两种合金过渡区域微观组织在 Al-Si、

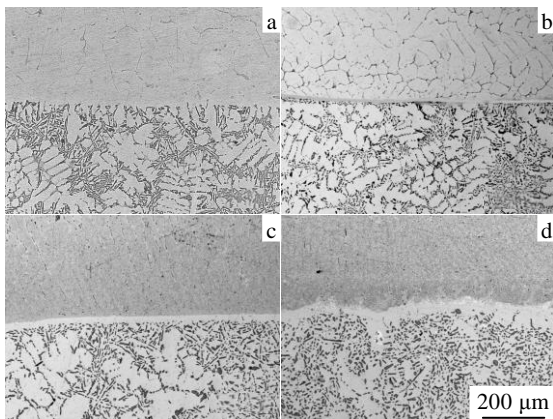


图 1 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料铸态及不同温度下保温 12 h 的微观组织

Fig.1 Microstructures of as-cast and uniform heat treated Al-Si/Al-Mn clad slab: (a) as-cast, (b) 450 °C, (c) 480 °C, and (d) 510 °C

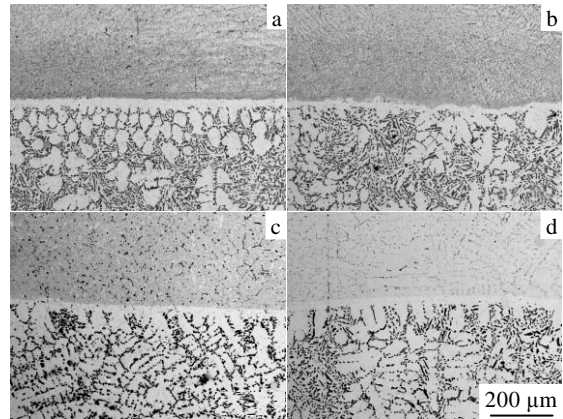


图 2 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料在 480 °C 温度下保温不同时间后的微观组织

Fig.2 Microstructures of Al-Si/Al-Mn clad slab uniform heat treated at 480 °C for different time: (a) 6 h, (b) 9 h, (c) 15 h, and (d) 18 h

Al-Mn 两侧均表现为点状、均匀析出,这种均匀细小的微观组织减少了粗大析出相对基体的割裂,对 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料后续的轧制变形时有利的,具有更好的延展性。

2.2 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料热处理后的硬度

Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料硬度-热处理后的时间关系图如图 4 所示。从图中可以看出,热处理温度、保温时间对 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料 Al-Mn 一侧合金的硬度影响较小,随着保温时间的增加,硬度呈先升高后降低的趋势,但合金的硬度整体变化不大。而 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料 Al-Si 一侧,不同温度处理后硬度的变化较为一致,随着保温时间的增加,合金的硬度呈下降的趋势,但当保温时间达到 15 h 后,合金的硬度变化趋于平稳,对比不同温度对应的时间硬度曲线可以看出,热处理温度越高,硬度降低越快。

2.3 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料热处理后元素分布

Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料的元素分布如

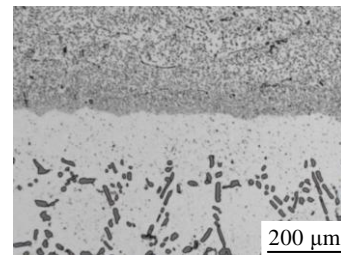


图 3 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料在 480 °C 温度下 15 h 保温后复合界面处的微观组织

Fig.3 Microstructure of the interface for Al-Si/Al-Mn clad slab after uniform heat treating at 480 °C for 15 h

图 5 所示。从图中可以看出，在 Al-Si 合金一侧，元素 Si 以共晶和固溶两种形式存在，而在复合连铸坯料的界面处 Si 元素存在点状的少量扩散，溶质元素 Mg 的分布主要以固溶态存在，可以看到在复合界面处存在一定的扩散。在 Al-Mn 合金一侧，主要合金元素 Mn 分布较为均匀，点状聚集的元素 Mn 主要是由于复合连铸非平衡凝固形成 $MnAl_6$ 的缘故，而在复合界面处 Mn 存在向 Al-Si 合金一侧扩散的趋向。通过利用 Photoshop 合成元素 Si 和 Mn 的元素分布可以看出，在复合界面处存在一个约 20 μm 宽的溶质元素“赤贫区”。

Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料均匀化热处理后的元素分布如图 6 所示。从图中可以看出，复合铸锭热处理后的元素分布与微观组织的变化一致，合金中溶质元素区域趋向于均匀分布，合金元素 Si 由铸态时的片状聚集向棒状或点状变化，通过利用 Photoshop 合并两种主元 Si 和 Mn 的元素分布可以看出，在复合连铸坯料的过渡区域出现的溶质元素“赤贫区”均匀化热处理后变小，Si 和 Mn 元素均有向对方一侧扩散的趋向。从溶质元素 Mg 的元素分布可以看出，在复合铸锭的过渡

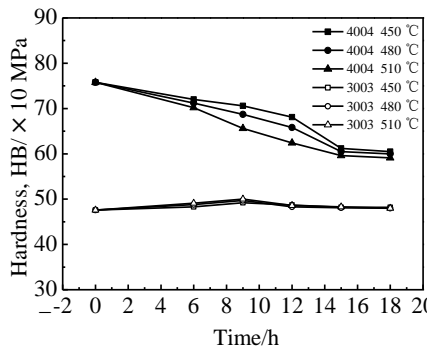


图 4 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料硬度-热处理时间关系

Fig.4 Variations of hardness for Al-Si/Al-Mn clad slab with time after uniform heat treating at different temperatures

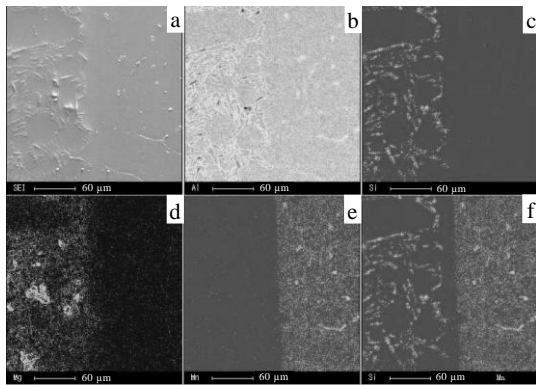


图 5 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料铸态微区元素分布

Fig.5 Elemental EPMA mappings for the distribution in as-cast Al-Si/Al-Mn clad slab: (a) SEI, (b) Al, (c) Si, (d) Mg, (e) Mn, and (f) Si/Mn synthetic map

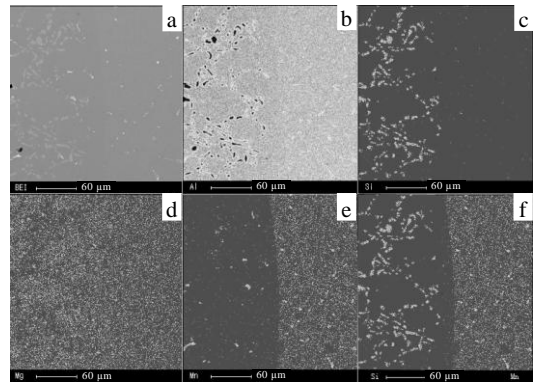


图 6 Al-Si/Al-Mn 复合连铸坯料热处理态 (480 °C, 15 h) 微区元素分布

Fig.6 Elemental EPMA mappings for the distribution in uniform heat treated Al-Si/Al-Mn clad slab (480 °C, 15 h): (a) SEI, (b) Al, (c) Si, (d) Mg, (e) Mn, and (f) Si/Mn synthetic map

区域 Mg 元素出现的明显的元素扩散，在复合连铸坯料的过渡区域，Mg 元素扩散后两种合金的界限模糊。

2.4 讨论

分析图 1~图 3 可以看出，铸态 Al-Si 合金中的共晶硅呈棱角比较分明的长片状，而且在晶界处呈网状分布，Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料均匀化处理时，共晶硅由于部分溶解到 α -Al 基体中 (Si 在铝中的最大溶解度 1.65%) 而变成细小的点状和短棒状，这种变化在 Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料均匀化后的硬度测试中得到了证实，Al-Si 合金经过均匀化热处理后硬度出现明显的下降，这主要是溶质元素的变化使析出相的形态、大小、分布、数量发生了变化。Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料均匀化处理时，Al-Mn 合金铸态时由于连续铸造的快速冷却条件下来不及沉淀而以过饱和状态保留在固溶体中溶质元素 Mn，在均匀化退火温度下加热时，固溶体发生分解，析出细小的 $MnAl_6$ ；同时，不平衡共晶组织固溶到 α -Al 中，使枝晶网状组织部分消失或全部消失，但由于 Al-Mn 合金中合金元素 Mn 的含量较低，所以对 Al-Mn 合金的硬度影响不大。从 Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料均匀化后硬度变化和微观组织分析得出，当 Al-Si/Al-Mn 铝合金层状复合铸锭选择在 480 °C 保温 15 h 时热处理效果最佳。

分析图 5、图 6 可以看出，Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料热处理后微区成分的分布与微观组织的变化是一致的，通过均匀化热处理后，Al-Si、Al-Mn 合金中溶质元素分布更加均匀一致，而且在复合界面处出现了相互扩散的现象，促使复合界面处的溶质元素“赤贫区”减小。根据菲克第一定律^[12]：

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

式中, J 为扩散流量; D 为扩散系数; $\frac{dC}{dx}$ 为体积浓度梯度, 负号表示物质的扩散流方向与浓度梯度的方向相反。

Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料在复合连铸的过程中在两种合金的界面处形成了溶质元素的过渡区域, 使过渡区的溶质元素较合金含量降低, 当复合坯料进行均匀化热处理时, 溶质元素充分扩散, 而在复合坯料的界面处, 由于界面处与合金中溶质元素存在浓度梯度而导致复合界面处溶质元素的扩散, 促使复合界面处溶质元素“赤贫区”减小, 特别是在铝合金中扩散系数较大的 Mg 元素表现的更为明显, 这种变化在 Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料界面处的微观组织中得到证实 (如图 3), 由于合金元素的相互扩散促使复合连铸坯料界面处析出大量均匀细小的点状析出相。

3 结 论

1) Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料均匀化热处理后, Al-Si 合金由粗大网状的共晶体转变成点状或短棒状混合组织, Al-Mn 合金的 $MnAl_6$ 相更加均匀细小, 复合界面更加明显。

2) Al-Si 合金均匀化热处理后合金硬度在不同温度下均表现为随着保温时间延长硬度下降, 而均匀化热处理工艺对 Al-Mn 表现为不敏感性。

3) Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料均匀化热处理后溶质元素分布更加均匀, 复合界面处出现相互扩散现象, 其中 Mg 元素表现得最为明显, 合金元素的相互扩散促使复合连铸坯料界面处析出大量均匀细小

的点状析出相。

4) 综合分析表明, Al-Si/Al-Mn 铝合金复合连铸坯料在 480 °C 保温 15 h 均匀化热处理的效果最佳。

参考文献 References

- [1] Zu Guoyin(祖国胤), Li Bing(李 兵), Li Hong(李 鸿). *Journal of Northeastern University, Natural Science*(东北大学学报自然科学版)[J], 2008, 29(5): 689
- [2] George Durst. *Journal of Metals*[J], 1956, 11(2): 71
- [3] Robert B Wagstaff, Llodg D J, Bischoff T F. *Materials Science Forum*[J], 2006, 519-521: 1809
- [4] Joseph C Benedyk. *Light Metal Age*[J], 2006, 8: 48
- [5] Gow-Yi T Zou, Huang Mingnan. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 140: 625
- [6] Wen W Z, Mia Jusheng, Zhang Wenxia. *Chinese Science Bulletin*[J], 1998, 43(11): 911
- [7] Zheng Ren, Xiurong Zhu, Jianbo Sun *et al. Advanced Materials Research*[J], 2012, 479-481: 318
- [8] Pan Cunxiao(潘春旭), Dusan P Sekulic. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2002, 12(3): 481
- [9] Feng Zhenghai(冯正海), Wei Jicheng(魏继承), Lu Jie(卢 杰) *et al. Light Alloy Process Technology*(轻合金加工技术)[J], 2009, 37(8): 23
- [10] Kong C Y, Soar R C, Dickens P M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 146(2): 181
- [11] Dehmasa M, Weisbeckera P, Geandierb G *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2005, 400(1-2): 116
- [12] Cui Zhongqi. *Principles of Metallography and Heat Treatment* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001

Uniform Heat Treatment of Direct Chill Continuous Casting Al-Si/Al-Mn Clad Slab

Ren Zheng, Zhang Xiao, Zhu Xiurong, Cheng Jianguo, Lian Fukui, Xu Guohui, Xu Ying, Zhao Baorong

(The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, China)

Abstract: The uniform heat treatment of direct chill continuous casting Al-Si/Al-Mn clad slab was investigated with different temperatures and time, and the microstructure, hardness and solute distribution of the uniform heat treated samples was studied. The results show that the coarse net-work compounds of Al-Si alloy change into spot and short-bar compounds, the Mn element distribution is more uniform, and the interface of Al-Si/Al-Mn clad slab is clearer because of element solution. The hardness of Al-Si alloy is reduced after the treatment, but the hardness of Al-Mn alloy is not sensitive to temperatures and time of the uniform heat treatment. The elemental EPMA mappings show that the distribution of solute elements are more uniform, and elements are diffused on the interface of Al-Si/Al-Mn clad slab, especially Mg element becomes not obvious on the interface after uniform heat treatment. It can be concluded that the best Al-Si/Al-Mn clad slab is obtained when the uniform heat treating temperature is 480 °C and the time is 15 h.

Key words: Al-Si/Al-Mn; uniform heat treatment; clad slab

Corresponding author: Ren Zheng, Ph. D., Associate Researcher, The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, P. R. China, Tel: 0086-574-87902206, E-mail: renzheng1981@163.com