

电磁搅拌对 GH4169 合金 1 t 电渣锭凝固组织的影响

吕 达 张 雲 飞 张 福 利 韩 彦 光 任 帅 崔 毅 白 丽 娟
(河北钢铁技术研究总院, 石家庄 050000)

摘 要 研究了 1 t 电渣锭重熔过程未加电磁搅拌和 6 Hz, 50 ~ 200 A 电磁搅拌对 GH4169 合金(/% : 0.04C, 0.21Si, 0.05Mn, 52.85Ni, 19.80Cr, 5.20Nb, 3.05Mo, 0.55Al, 1.02Ti) 凝固组织的影响。结果表明, 电磁搅拌可以显著细化合金晶粒, 增大等轴晶比率, 降低二次枝晶间距; 但当搅拌电流 ≥ 100 A 时, 电渣锭的共晶组织增多, 降低了电渣锭的塑性; 当电流为 50 A, 频率为 6 Hz 时, 等轴晶比例最高, 二次枝晶间距最小, 电渣锭中心位置 Laves 相含量最低, 合金中共晶组织最少, 合金塑性最好。

关键词 GH4169 合金 1 t 电渣锭 电磁搅拌 凝固组织 二次枝晶间距 Laves 相

Effect of Electromagnetic Stirring on Solidification Structure of 1 t Electroslag Remelting Ingot of Alloy GH4169

Lü Da, Zhang Yunfei, Zhang Fuli, Han Yanguang, Ren Shuai, Cui Yi and Bai Lijuan
(Hebei Iron and Steel Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000)

Abstract Effect of the non-electromagnetic stirring (non-EMS) and the EMS with 6 Hz and 50 ~ 200 A in 1 t electroslag remelting (ESR) process on solidification structure of alloy GH4169 (/% : 0.04C, 0.21Si, 0.05Mn, 52.85Ni, 19.80Cr, 5.20Nb, 3.05Mo, 0.55Al, 1.02Ti) has been studied. Results show that the EMS may obviously fine grains of alloy, increase ratio of equiaxed crystal and decrease spacing between secondary dendritic arms; but as stirring electric current intensity is ≥ 100 A, the eutectic structure in ESR ingot increases to reduce the plasticity of ingot; as the current intensity is 50 A with frequency 6 Hz, the ratio of equiaxed crystal is max and the spacing between secondary dendritic arms is minimum, the Laves phase content in center of ESR ingot is lowest and the alloy with minor eutectic structure to get excellent plasticity of alloy.

Material Index Alloy GH4169, 1 t Electroslag Remelting Ingot, Electromagnetic Stirring, Solidification Structure, Spacing between Secondary Dendritic Arms, Laves Phase

GH4169 镍基高温合金在 -253 ~ 700 °C 具有良好的综合性能, 广泛应用于航空、航天、能源等领域^[1-3]。由于 GH4169 高温合金中加入了大量的 Cr、Nb、Mo、Ti、Al 等合金元素进行强化, 尤其是 Nb 的偏析会生成大量富 Nb 的 Laves 相, 由于 Laves 相是脆性相, 会降低合金的冲击性能和塑性^[4]。通过在金属凝固过程中施加电磁场, 电磁场对金属溶液产生的电磁搅拌作用可以减轻中心偏析、细化晶粒, 改善铸坯质量, 提高综合力学性^[5-7]。

在电渣重熔过程中施加旋转磁场, 通过改变电磁搅拌的参数, 如电流、频率等来调整电磁力, 电磁力的大小决定了熔体的对流、传热和传质, 从而影响合金的凝固组织。鲁辉^[8]通过 DSP 特斯拉计测试了搅拌器通电电流对磁场强度的影响发现: 同一位置的磁场强度随电流的增大而明显增大, 而频率对磁场强度的影响很小; 并且, 随着距旋转磁场距离的增加, 磁场强度逐渐降低。本文通过对电渣重熔过程中 GH4169 施加旋转磁场, 分析了电磁搅拌对

GH4169 凝固组织的影响。

1 试验材料与方法

试验材料为 GH4169 合金真空锭, 其成分如表 1 所示。试验装置为 1 t 保护气氛电渣炉, 电渣过程中采用惰性气体保护, 在电渣重熔位置施加旋转磁场, 试验参数如表 2 所示。

表 1 GH4169 合金化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of alloy GH4169 / %								
C	Si	Mn	Ni	Cr	Nb	Mo	Al	Ti
0.04	0.21	0.05	52.85	19.80	5.20	3.05	0.55	1.02

表 2 1 t 电渣锭电磁搅拌工艺参数

Table 2 Parameters of electromagnetic stirring process for 1 t electroslag remelting ingot

铸坯序号	频率 / Hz	电流 / A	熔速 / (kg · min ⁻¹)
1	-	-	3.8 ~ 4.0
2	6	50	3.8 ~ 4.0
3	6	100	3.8 ~ 4.0
4	6	200	3.8 ~ 4.0

对不同工艺条件的电渣锭分别在中心位置、1/2 R 处及边部位置取样,通过光学显微镜进行金相组织观察,并采用扫描电镜(SEM)分析观察试样中 Laves 相的组织形态。

2 试验结果与讨论

2.1 电磁搅拌对 GH4169 合金枝晶形貌的影响

通过对比图 1 中不同工艺参数下的枝晶形貌可知,无电磁搅拌时,铸坯边部和 1/2R 处均为垂直于铸坯表面的粗大的柱状晶组织,枝晶生长十分发达,中心为粗大的等轴晶组织;施加电磁搅拌以后,中心位置等轴晶明显细化,尤其是当电流为 50 A 时,中心位置等轴晶细化效果最好,1/2R 处和边部位置出

现了一定的等轴晶,铸坯等轴晶比例增大;当电流增大到 100 A 以后,中心位置的等轴晶有一定的粗化,1/2R 处柱状晶比例增大,等轴晶很少;随着电流的进一步增大,在铸锭中心位置呈现较为细小的柱状晶组织,这是由于取样位置接近电渣锭底部,铸锭冷却较快造成的。

当没有施加电磁搅拌时,枝晶以一定的过冷度沿固-液前沿由边部向中心逐渐凝固,枝晶彼此平行生长,形成垂直于铸坯表面的柱状晶组织。施加旋转磁场以后,边部位置受到较强的磁场和较大的冷却强度的共同作用,强大的磁场带动金属液的流动不断冲刷着一次枝晶,较大的冷却强度导致铸坯边

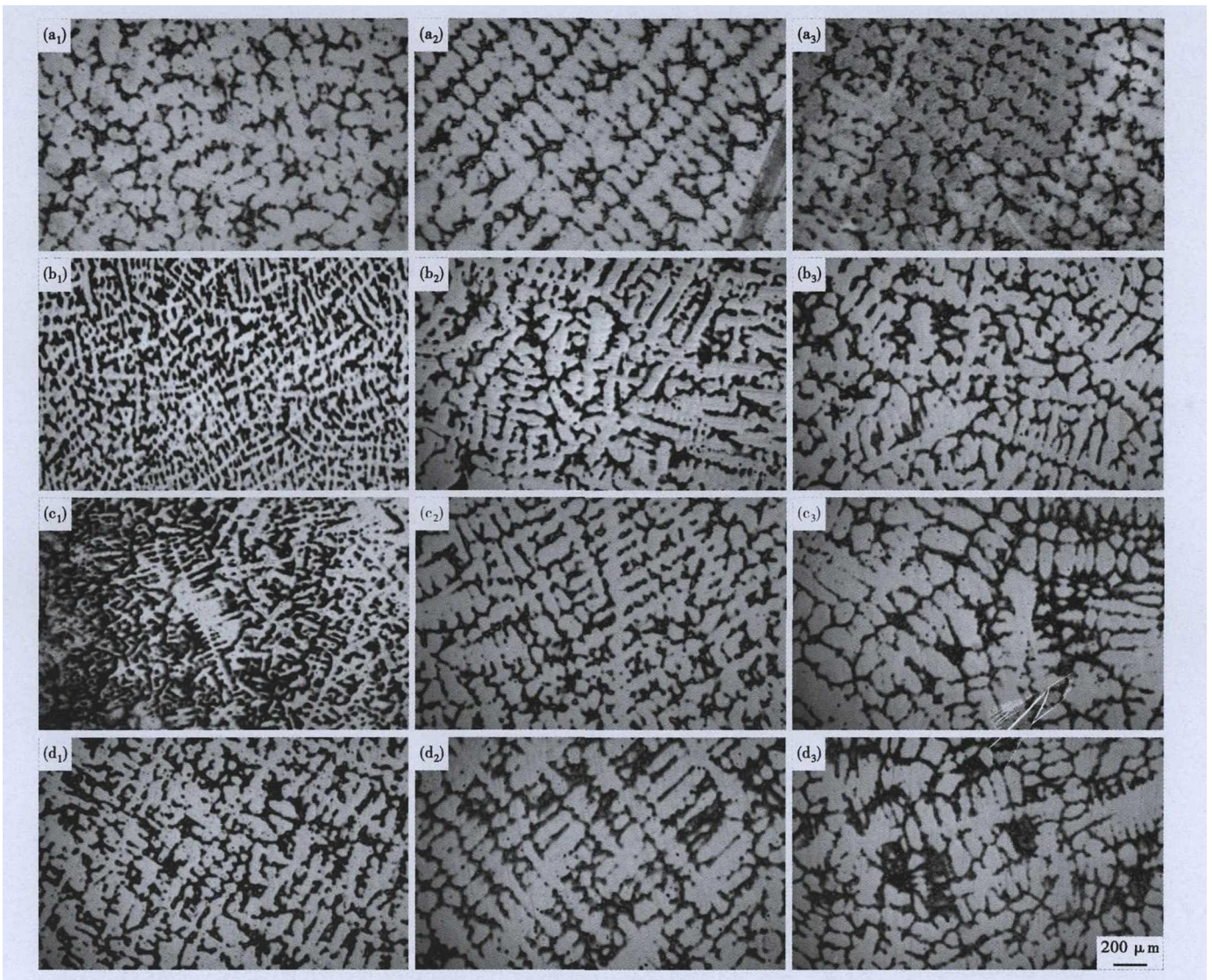


图 1 电磁搅拌对 GH4169 合金 1 t 电渣锭枝晶形貌的影响:未电磁搅拌(a₁)(a₂)(a₃);电磁搅拌 50 A (b₁)(b₂)(b₃),100 A (c₁)(c₂)(c₃),200 A (d₁)(d₂)(d₃);(a₁)(b₁)(c₁)(d₁)中心,(a₂)(b₂)(c₂)(d₂)1/2R,(a₃)(b₃)(c₃)(d₃)边部

Fig. 1 Effect of electromagnetic stirring (EMS) on morphology of dendrite in 1 t electroslag remelting ingot of alloy GH4169: non EMS (a₁)(a₂)(a₃); EMS with 50 A (b₁)(b₂)(b₃), 100 A (c₁)(c₂)(c₃) and 200 A (d₁)(d₂)(d₃); (a₁)(b₁)(c₁) and (d₁) center, (a₂)(b₂)(c₂) and (d₂) 1/2R, (a₃)(b₃)(c₃) and (d₃) edge

部凝固较快,最终边部位置形成的一次枝晶短小粗大;中心位置的磁场强度较小,冷却强度也较低,金属液的流动破碎了枝晶,增加的形核数目,单位体积内的形核质点增多,枝晶得到细化,促进了等轴晶的形成。

2.2 电磁搅拌对 GH4169 合金二次枝晶间距的影响

通过 Nano Measurer 分别测量不同电流作用下二次枝晶间距,其结果如图 2 所示。

图 2 统计了铸锭不同位置在不同电流作用下二次枝晶间距的变化。当不施加电磁搅拌时中心位置平均二次枝晶间距为 99.81 μm ,1/2 半径处二次枝晶间距为 67.06 μm ,边部二次枝晶间距为 42.25 μm 。当电流为 50 A 时,中心位置平均二次枝晶间距为 46.08 μm ,1/2 半径处二次枝晶间距为 45.76 μm ,边部二次枝晶间距为 57.44 μm 。当电流为 100 A 时,中心位置平均二次枝晶间距为 43.97 μm ,1/2 半径处二次枝晶间距为 62.73 μm ,边部二次枝晶间距为 68.33 μm 。当电流为 200 A 时,各个位置的二次枝晶间距均比电流为 50 A 时有了明显增大。这说明电磁搅拌对 GH4169 铸锭的二次枝晶间距有明显的影响,并且当电流为 50 A 时,铸坯二次枝晶间距最小。

二次枝晶臂间距对金属材料在凝固过程中的偏析行为及组织有重要影响,冷却速度直接影响二次枝晶间距的大小。当金属液没有施加电磁搅拌时,GH4169 二次枝晶尺寸粗大,二次枝晶间距较大,尤其是铸锭中心位置凝固之间最长,凝固组织的二次枝晶间距最大;施加电磁搅拌以后,中心位置的熔体获得了更大的过冷度,冷却速度加快,局部的凝固时间降低,因此,二次枝晶间距明显减小。随着电流的增大,中心位置二次枝晶间距变化不大,这可能是因为当电流为 50 A 时,搅拌力度足以折断二次枝晶,因此,当电流再增大时,中心位置的二次枝晶间距没有产生明显的变

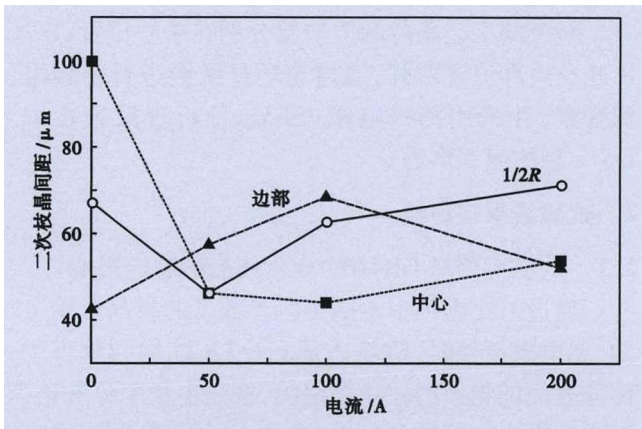


图 2 搅拌电流对 GH4169 合金 1 t 电渣锭二次枝晶间距的影响

Fig. 2 Effect of stirring current on spacing between secondary dendritic arms in 1 t electroslag remelting ingot of alloy GH4169

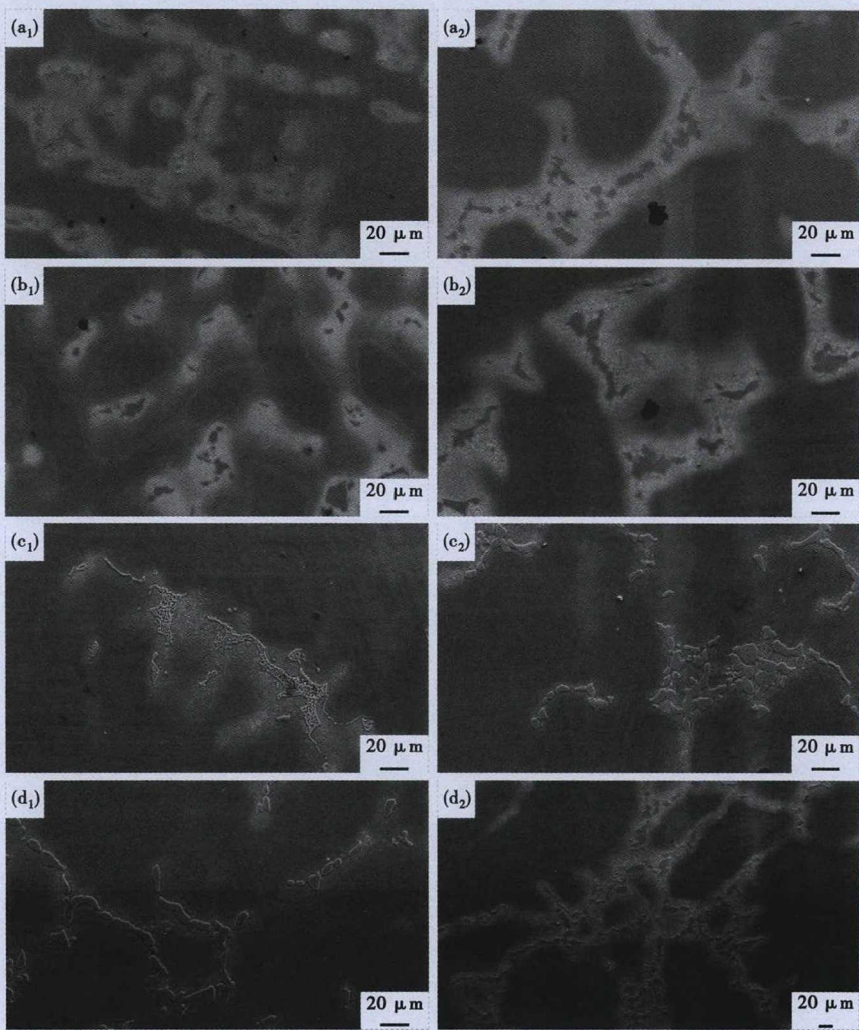


图 3 GH4169 合金 1 t 电渣锭 Laves 相的形貌:未电磁搅拌(a₁)(a₂);电磁搅拌 50 A(b₁)(b₂),100 A(c₁)(c₂),200 A(d₁)(d₂);(a₁)(b₁)(c₁)(d₁)心部,(a₂)(b₂)(c₂)(d₂)边部

Fig. 3 Morphology of Laves phase in alloy GH4169 1 t electroslag remelting ingot: non EMS (a₁) and (a₂); EMS with 50 A (b₁) and (b₂), 100 A (c₁) and (c₂), and 200 A (d₁) and (d₂); (a₁) (b₁) (c₁) and (d₁) center, and (a₂) (b₂) (c₂) and (d₂) edge

化。当电流为 50 A 时,铸锭的凝固组织最细密,此时元素的偏析程度最小,铸锭比较容易通过热处理达到均匀化。

2.3 电磁搅拌对 GH4169 合金 Laves 相的影响

不同工艺条件作用下 Laves 相的形貌,如图 3 所示。

由图 3 可以清晰的看到,无电磁搅拌时,中心位置 Laves 相呈链状分布,并且视场内 Laves 相含量较高;当电流为 50 A 时,中心位置 Laves 相呈分散分布,并且视场内 Laves 相含量明显降低;当电流为 100 A 时,中心位置出现大量的共晶组织;当电流为 200 A 时,中心位置 Laves 相又呈链状分布。在不同工艺参数的作用下,铸锭边部 Laves 相的聚集状态较没有明显改善。

无电磁搅拌时,铸锭中心位置冷却速度最慢,由于凝固的不平衡性导致中心位置溶质元素的富集最为严重,所以无电磁搅拌时中心位置 Laves 相含量较高;采用电磁搅拌以后,加强了熔体的对流,中心位置凝固加快,减少了 Laves 相的数量并使 Laves 相弥散分布。但是,对于铸锭的边部位置恰好相反,当无电磁搅拌时,铸锭边部冷却速度很快,溶质元素偏析较轻而不易形成 Laves 相;采用电磁搅拌以后,铸锭中心的热量由于熔体的对流而被带到铸锭边部,从而铸锭边部凝固速度有所降低,导致元素偏析而形成了大量的链状 Laves 相。

3 结论

(1) 未施加电磁搅拌时,电渣锭 1/2R 及边部的凝固组织为粗大的柱状晶,中心为粗大的等轴晶组织;施加电磁搅拌以后,中心位置可以获得细小的等轴晶组织,随着电流的增大,铸锭截面等轴晶比例呈现先增大后减小的趋势,当电流为 50 A 时,等轴晶比例最高。

(2) 采用合适的工艺参数可以降低二次枝晶间

距,尤其是中心位置的二次枝晶间距下降幅度可达 50% 以上;当电磁搅拌参数不合理时,电渣锭中心位置会生成大量的 Laves 相共晶组织;采用以上三种工艺参数,电渣锭边部位置 Laves 相的聚集状态没有明显的改善。

(3) 当电流为 50 A,频率为 6 Hz 时,电渣锭中心位置等轴晶组织致密,二次枝晶间距最小,可以最大程度的控制中心偏析,并且此时铸锭中心 Laves 相含量较低,没有共晶组织,合金的塑性最好。

参考文献

- [1] 李爱兰,汤 鑫,盖其东,等. 热处理工艺对 K4169 合金微观组织的影响[J]. 航空材料学报,2006,26(3):311-312.
- [2] 庄景云,杜金辉,邓 群,等. 变形高温合金 GH4169[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:13.
- [3] Rao G A, Prasad K S and Kumar M, et al. Characterisation of Hot Isostatically Pressed Nickel Base Superalloy Inconel 718[J]. Material Science and Technology,2003,19(3):313-321.
- [4] Schirra J J, Caless R H and Hatala R W. The Effect of Laves Phase on the Mechanical Properties of Wrought and Cast + HIP Inconel 718 [J]. Superalloys 718,625,706 and Various Derivatives,1991:375-388.
- [5] Metana V, Eigenfeld K and Eckert S, et al. Grain Size Control in Al-Si Alloys by Grain Refinement and Electromagnetic Stirring [J]. Journal of Alloys and Compounds,2009,487(1-2):163-172.
- [6] 金文中,张 伟,李廷举,等. K417 高温合金电磁搅拌法真空晶粒细化技术研究[J]. 真空科学与技术学报,2011,31(2):201-207.
- [7] Ma X P, Li Y J and Yang Y S. The Origin of Nuclei and the Refinement Mechanism for Solidified Superalloy IN718 under Pulsed Magnetic Field[J]. Journal of Materials Research,2009,24(12):3689-3692.
- [8] 鲁 辉. 电磁搅拌对 Inconel625 合金凝固组织的影响[D]. 沈阳:东北大学,2012:24-25.

吕 达(1987-),男,硕士(2016 年华北理工大学),工程师,2010 年河北理工大学(本科)毕业,钢铁材料研究。
E-mail:694929902@qq.com

收稿日期:2018-06-13

欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告