

电渣重熔对 4J36 合金组织和力学性能的影响

李大航^{1,2} 王思成³ 刘璇^{1,2} 赵刚^{1,2} 朱义轩² 张友鹏^{1,2} 周洪庆^{1,2}

(1 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室,鞍山 114009;2 鞍钢集团钢铁研究院,鞍山 114009;
3 鞍钢股份有限公司,鞍山 114021)

摘要 通过对电渣重熔前后 4J36 合金($\% : 0.17 \sim 0.18\text{C}, 0.18 \sim 0.27\text{Si}, 0.39 \sim 0.40\text{Mn}, 0.009\text{P}, < 0.0005\text{S}, 35.8 \sim 36.0\text{Ni}$)显微组织、夹杂物及化学成分和力学性能进行分析检测,并研究了电渣重熔对 4J36 合金组织和力学性能的影响。结果表明,经过电渣重熔后,4J36 合金化学成分几乎无变化,其晶粒尺寸减小,同时其内部的夹杂物数量减少、尺寸减小。屈服强度和抗拉强度均有一定提高,伸长率由原 34% 提高至 58%, $-196\text{ }^\circ\text{C}$ 冲击功由原 145 J 提高至 208 J。

关键词 4J36 合金 力学性能 显微组织 电渣重熔

Effect of Electroslag Remelting on Microstructure and Mechanical Properties of 4J36 Alloy

Li Dahang^{1,2}, Wang Sicheng³, Liu Xuan^{1,2}, Zhao Gang^{1,2}, Zhu Yixuan²,
Zhang Youpeng^{1,2} and Zhou Hongqing^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009;
2 Ansteel Iron & Steel Research Institute, Anshan 114009; 3 Angang Steel Company Limited, Anshan 114021)

Abstract By analyzing microstructure and inclusions, analyzing chemical composition and mechanical properties of 4J36 alloy ($\% : 0.17 \sim 0.18\text{C}, 0.18 \sim 0.27\text{Si}, 0.39 \sim 0.40\text{Mn}, 0.009\text{P}, < 0.0005\text{S}, 35.8 \sim 36.0\text{Ni}$) before and after ESR (electro-slag remelting), the effect of ESR on microstructure and mechanical properties of 4J36 alloy is studied. The results show that after ESR the chemical composition of 4J36 has almost no change, the sizes of grains decrease, and the amount and sizes of inclusions also decrease. Yield strength and tensile strength are improved to a certain extent, elongation increases from original 34% to 58%, and impact energy at $-196\text{ }^\circ\text{C}$ increases from original 145 J to 208 J.

Material Index 4J36 Alloy, Mechanical Properties, Microstructure, ESR

绝大多数金属和合金都是在受热时体积膨胀、冷却时体积收缩,但因瓦合金(牌号为 4J36),由于它的铁磁性,在很大的温度范围内具有因瓦效应的反常热膨胀,膨胀系数极低,有时甚至为零或负值^[1-2]。正是由于这种特性,4J36 合金主要应用在对环境温度要求近似恒定的场合,包括精密仪器、长度标尺、倍容量导线、液化天然气储罐以及石油套管、大型飞机复合材料的模具等方面^[3-5]。4J36 合金锭主要采用真空或非真空中频感应炉冶炼,模铸生产。真空冶炼质量较好但成本较高,非真空中频冶炼产品质量难以得到较好的保证。模铸钢锭凝固的基本特点是从侧壁向中心进行,上部有缩孔,底部为沉积三角锥,钢锭内部还存在显微缩孔,倒 V 型偏析和 V 型偏析依次存在于柱状晶与等轴晶界面和等轴晶区,这些缺陷对 4J36 产品的组织和力学性能影响严重^[6]。电渣重熔可以去除钢中大部分原始夹杂物,同时集精炼和浇铸为一体,避免钢水受耐火材料的污染及二次氧化,进行可控的定向凝固,

改善钢锭的凝固组织,保证了钢的纯净度和均匀性^[7-9]。经电渣重熔的铸锭,非金属夹杂物少、纯度高(C、N、O、S 元素含量低)、铸锭表面光滑、组织均匀致密、各个合金元素成分均匀。电渣钢的铸态机械性能可达到或超过同钢种锻件的指标^[10]。目前关于电渣重熔对 4J36 合金组织和性能影响的参考文献较少,本文通过对比热轧模铸 4J36 合金板和电渣重熔 4J36 合金板的组织和力学性能,对电渣重熔工艺对 4J36 组织和力学性能的影响进行了研究。

1 试验材料及方法

采用感应炉 + LF 精炼 + VD 脱气 + 模铸的工艺生产出一块 12.5 t 的模铸 4J36 合金锭,尺寸(mm) $230 \times 1100 \times 6300$,两块尺寸 10 t 的模铸 4J36 合金锭,尺寸(mm): $1970 \times (1330 \times 575) \times (1278 \times 452)$ 。利用 12.5 t 合金锭作为自耗电极,采用数控型全密闭气氛保护同轴导电电渣炉和 15 t 结晶器,结合采用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2\text{-CaO}$ 三元渣系,在电流 1000 ~

17 000 A 的电制度下,生产出1块10.8 t 4J36 电渣重熔锭,尺寸(mm)3 600 × 1 280 × 300。

本试验分别在两块合金锭对应位置上进行取样,尺寸(mm)为200 × 260 × 250,在550 实验轧机上进行热轧,热轧板最终厚度为20 mm。对轧后合金板在 YFX96/12G-YC 箱式电阻炉内进行退火热处理,退火温度800 °C,保温1.5 h。热处理后沿垂直于轧制方向从合金板取样并分别加工出3个板拉伸试样和1组10 mm × 10 mm × 55 mm 的冲击试样,按 GB/T228-2002 和 GB/T229-2007 进行拉伸和-196 °C 冲击性能测试,计算拉伸性能和冲击性能的平均值;在退火后的4J36 合金板上切取金相试样,将试样打磨、抛光,采用4 g 硫酸铜溶解于20 ml 盐酸、12 ml 硫酸和25 ml 水的混合液作浸蚀剂浸蚀,在 DMI5000M 显微镜下观察试样显微组织和夹杂物粒度分布。

2 结果与讨论

2.1 电渣重熔前后化学成分的变化

4J36 模铸合金锭和电渣重熔合金锭的化学成分如表1所示。从表1可见,本次试验的模铸锭和电渣锭的化学成分均符合 YB/T5241-2005《膨胀合金》中对4J36 合金的要求。模铸锭经电渣重熔后 C、Mn、Ni、P、S 等化学元素基本没有发生变化,而 Si 含量降低。这是由于 Si 与4J36 合金中其他化学元素相比属于与 O 亲和力最强的元素,在电渣重熔过程中 Si 与熔渣及钢液中的不稳定氧化物或 O₂ 接触形成 SiO₂,进而产生烧损。电渣重熔过程中通过添加 Al 粉有效控制了 Si 元素的烧损量,电渣后 Si 元素的烧损量较小,对力学性能无影响。

2.2 电渣重熔对显微组织的影响

模铸坯和电渣重熔坯料热轧后钢板的组织如图1和2所示,从图1和图2中可见,模铸锭和电渣锭热轧退火后钢板的组织均为单一的奥氏体组织且为等轴晶,并且伴随一定量的退火孪晶,这是由于奥氏体的层错能较低,退火过程中新晶粒界面在推进过程中产生堆垛层错造成的。电渣锭热轧退火后的晶粒尺寸明显比模铸坯料的更加细小均匀。模铸合金锭经过电渣重熔工艺后,合金经历了再一次的结晶



图1 模铸4J36合金20 mm热轧板800 °C 1.5 h退火的组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of mould cast 4J36 alloy 20 mm hot rolled plate annealed at 800 °C for 1.5 h

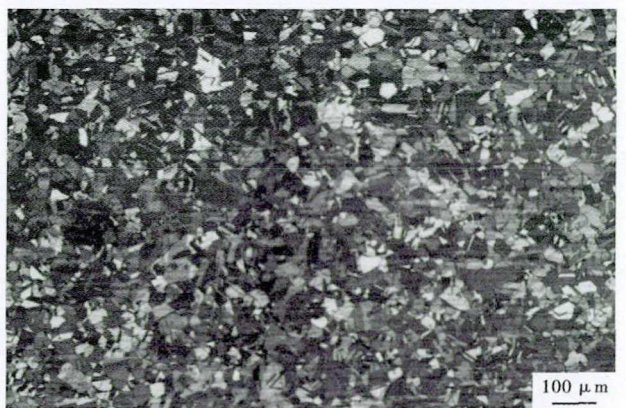


图2 模铸-电渣重熔4J36合金20 mm热轧板800 °C 1.5 h退火的组织形貌

Fig. 2 Morphology of structure of mould cast-ESR 4J36 alloy 20 mm hot rolled plate annealed at 800 °C for 1.5 h

过程,在电渣重熔过程中,电极熔化和熔融金属的结晶是同时进行的,电极熔化形成的金属熔滴不断向结晶部分供给液体金属以及结晶器中的金属受到底部和侧面的强烈冷却,电渣锭的凝固只在形成钢锭横断面的很小体积内进行,温度均匀且较低,过冷度较小,进而导致电渣重熔后电渣锭的晶粒尺寸得到细化。又由于从锭轧制成型到钢板,晶粒尺寸具有遗传的特性,同种工艺生产后,利用电渣锭生产的合金板的晶粒尺寸较小。

2.3 电渣重熔对力学性能的影响

模铸锭和电渣锭热轧退火后钢板的拉伸性能和冲击性能如表2所示,从表2中可见,经过电渣重熔的4J36 合金板的屈服强度和抗拉强度出现小幅提高,屈服强度提高幅度约7.5%,抗拉强度提高幅度约5%,伸长率出现大幅提高,提高幅度约70.6%。与此同时,经过电渣重熔的4J36合金板的-196 °C

表1 试验4J36合金的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of investigated 4J36 alloy/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni
模铸	0.18	0.27	0.40	0.008 8	<0.000 5	36.0
电渣重熔	0.17	0.18	0.39	0.008 9	<0.000 5	35.8

表 2 模铸和模铸-电渣重熔 4J36 合金 20 mm 热轧板 800 °C, 1.5 h 退火后的力学性能

Table 2 Mechanical properties of mould casting and mould cast-ESR 4J36 alloy 20 mm hot-rolled plate annealed at 800 °C for 1.5 h

项目	R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$A_{kv}(-196\text{ °C})/\text{J}$
模铸	265	443	34	145
电渣重熔	285	465	58	208

冲击韧性不但没有下降,反而较模铸的合金板有了较大的提高,提高幅度约 43.4%。由此可以得出,经过电渣重熔工艺后,4J36 合金板的强度得到了小幅提升,而塑性和韧性得到了大幅提升。

对比模铸钢板和电渣钢板的夹杂物面积百分含量和粒度分布如表 3 所示,可以看出经过电渣重熔后钢中的夹杂的数量明显减少,夹杂物的尺寸明显减小,均在 5 μm 以下。这是因为在电渣重熔时,金属液滴在通过熔渣层时,金属液滴的比表面要比镜面金属液相大几百倍,电渣重熔增加了金属液滴-熔渣界面面积,熔渣吸附金属液滴中的夹杂物能力得到增强。夹杂物可以作为断裂的源头,促使合金在外力作用下发生断裂,进而降低合金的塑性和韧性。

经过电渣重熔后的 4J36 合金,由于电渣重熔的作用而导致晶粒细化,夹杂物数量减少、尺寸减小,这几种因素相加导致电渣重熔所生产的 4J36 合金

表 3 模铸和模铸-电渣重熔 4J36 合金 20 mm 热轧板夹杂物含量和尺寸分布

Table 3 Inclusion content and size distribution in mould cast and mould cast-ESR 4J36 alloy 20 mm hot-rolled plate

工艺	单位面积(mm^2) 夹杂物含量/%	夹杂物尺寸分布/%		
		<5 μm	5~10 μm	>10 μm
模铸	0.012 6	62	21	17
电渣重熔	0.002 2	100	0	0

板强度、塑性和韧性都得到提升。

3 结论

(1) 电渣重熔后,4J36 合金板的主要化学成分几乎无变化,Si 烧损程度较小。

(2) 通过电渣重熔、热轧和退火工艺试制的 4J36 合金板与模铸 4J36 合金板相比,组织无变化为单一的奥氏体且为等轴晶,并且伴随一定量的退火孪晶,其晶粒尺寸减小,同时其内部的夹杂物数量减少、尺寸减小。

(3) 通过电渣重熔、热轧和退火工艺试制的 4J36 合金板与模铸 4J36 合金板相比,电渣重熔后 4J36 合金板的屈服强度和抗拉强度分别由 265、443 MPa 提高到 285、465 MPa; 伸长率和 -196 °C 冲击韧性有了较大的提高,分别由 34%、145 J 提高到 58%、208 J。

参考文献

- [1] 陈 昀,张明霞,苗 承,等. Ni36Fe 因瓦合金-老材料和新用途[J]. 金属世界,2009(6):92-97.
- [2] 刘 江. 低膨胀合金的应用和发展. 金属功能材料[J]. 2007,14(5):33-37.
- [3] 袁均平,易丹青,余志明,等. 变形与热处理对 Invar 合金组织及性能的影响[J]. 金属热处理,2005,30(2):50-53.
- [4] 陆建生,沈黎明. Fe-36Ni 因瓦合金研究进展[J]. 功能材料,2004,35(Z1):3424-3427.
- [5] 杨 博,李 宏,曹正华. 殷钢在复合材料成形模具中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料,2010(6):68-69.
- [6] 刘熙章. 厚钢板坯生产制备方法的研究[J]. 宽厚板,2009,15(3):40-43.
- [7] Mitchell A. Oxide Inclusion Behaviour during Consumable Electrode Remelting[J]. Ironmaking Steelmaking,1974,1(3):172-179.
- [8] 陈希春,史成斌,王 飞,等. 气体保护电渣重熔过程中电渣锭的净化控制[J]. 材料与冶金学报,2013,12(1):27-32.
- [9] 赵海东,陈 列,严清忠,等. 电渣重熔对 GCr15 轴承钢化学成分和夹杂物特性的影响[J]. 特殊钢,2016,37(4):44-48.
- [10] 陶志刚. 低膨胀合金的应用前景[J]. 首钢科技,1994(8):46-48.

李大航(1984-),男,硕士(2010年北京科技大学),工程师,2007年北京科技大学(本科)毕业,特殊钢板研究。

E-mail: lidahang0207@sina.com

收稿日期:2019-09-30