

# 热处理对A286材料组织和力学性能的影响

王发<sup>1</sup>, 刘美川<sup>1</sup>, 周嘉玲<sup>2</sup>, 郝妮娜<sup>2</sup>, 黄泽<sup>2</sup>, 于学勇<sup>2</sup>, 戴军<sup>2</sup>

1. 锐新昌科技(常熟)有限公司 江苏常熟 215500

2. 常熟理工学院汽车工程学院 江苏常熟 215500

**摘要:** 利用CMT-5000材料万能试验机、能量色散X射线谱仪(EDS)、扫描电子显微镜(SEM)和X射线衍射仪(XRD), 研究了A286合金经982℃固溶热处理1h、水冷+720℃时效热处理17h后的材料组织及力学性能。结果表明: 经过热处理的A286合金展现出了优异的力学性能, 抗拉强度1027MPa、屈服强度746MPa、断后伸长率37.5%及断面收缩率42%。这些性能指标表明, A286合金在经过适当的热处理后, 能够满足高端工业应用的性能要求。

**关键词:** A286合金; 热处理; 微观组织; 力学性能

## Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A286 alloy

WANG Fa<sup>1</sup>, LIU Meichuan<sup>1</sup>, ZHOU Jialing<sup>2</sup>, HAO Nina<sup>2</sup>, HUANG Ze<sup>2</sup>, YU Xueyong<sup>2</sup>, DAI Jun<sup>2</sup>

1. Ruixin Chang Technology (Changshu) Co., Ltd., Changshu 215500, Jiangsu, China

2. School of Automotive Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, Jiangsu, China

**Abstract:** The microstructure and mechanical properties of A286 alloy after solution heat treatment at 982℃ for 1 hour and water cooling+720℃ aging heat treatment for 17 hours were studied using a CMT-5000 universal testing machine, energy dispersive X-ray spectrometer (EDS), scanning electron microscope (SEM), and modern X-ray diffractometer (XRD). The results showed that the A286 alloy after heat treatment exhibited good mechanical properties. The tensile strength is 1027MPa, the yield strength is 746MPa, the elongation after fracture is 37.5%, and the reduction in area is 42%. The performance indicate that A286 alloy can meet the requirements of high-end industrial applications after appropriate heat treatment.

**Keywords:** A286 alloy; heat treatment; microstructure; mechanical properties

### 1 序言

在现代工业应用中, 材料的性能往往决定了产品的性能和可靠性。材料的微观结构和宏观性能之间的关联性, 尤其是热处理工艺对合金性能的调控

作用, 一直是材料科学领域的研究热点。A286合金是在Fe-25Ni-15Cr基高温合金的基础上加入Mo、Ti、Al、V及微量B综合强化而得到的<sup>[1]</sup>, 因其出色的高温抗蠕变能力、良好的疲劳强度和耐蚀性而被

基金项目: 江苏省产学研合作项目(BY2021279)。

通信作者: 戴军, 教授, 主要研究方向为金属材料连接技术, E-mail: jdaijs@163.com。

广泛应用于航空航天领域。

李吉东等<sup>[2]</sup>对A286合金进行了固溶处理和硬度研究。结果表明,随着固溶处理温度的升高和时间的延长,晶界有较大尺寸磷化物析出,合金硬度逐渐降低。代礼斌等<sup>[3]</sup>对A286合金固溶温度和低温力学性能的关系进行了研究。结果表明,随着固溶温度的升高,合金抗拉强度基本不变,但是屈服强度降低。固溶温度对低温拉伸性能影响并不明显,随着测试温度的降低,最低冲击吸收能量为45J,合金仍保持良好的韧性。金万军等<sup>[4]</sup>的研究结果表明,当时效温度从650℃提高到704℃时,合金的强度呈单调上升,而塑性单调下降,延长保温时间对合金力学性能的影响不明显。姚志浩等<sup>[5]</sup>研究了固溶时效两段式热处理工艺对组织演变的规律发现,在固溶热处理过程中,该合金随着固溶处理温度提高及固溶时间延长, $\gamma'$ 相回溶入基体;经过固溶后的合

金,在时效过程中,时效温度提高至700℃才析出 $\gamma'$ 强化相;随着时效时间延长,析出的 $\gamma'$ 强化相发生粗化长大。优选的最佳热处理工艺制度为960℃ $\times$ 1h。

根据EN 10269:2013《高低温钢和镍合金紧固件性能规范》,在实际电厂使用该材料紧固件时需要长时间时效处理,抗拉强度应达到895MPa以上,伸长率应达到25%以上。目前,虽然有一些文献研究A286合金,但是对于长时间时效处理对组织和性能影响的研究较少。本文通过对A286合金进行固溶处理和长时间时效处理,研究组织和力学性能的变化规律,对A286合金紧固件在电厂的生产使用有实际指导意义。

## 2 试验材料与方法

本文采用热轧态A286合金棒材作为研究对象,其化学成分见表1。

表1 A286合金化学成分(质量分数) (%)

| C    | Mn  | Si  | Cr   | Ni   | Mo  | Ti  | V    | Al  | B     | Co  | Cu  | S     | P     | Fe   |
|------|-----|-----|------|------|-----|-----|------|-----|-------|-----|-----|-------|-------|------|
| 0.03 | 1.4 | 0.3 | 15.4 | 25.6 | 1.3 | 1.9 | 0.25 | 0.2 | 0.005 | 0.4 | 0.2 | 0.001 | 0.001 | Bal. |

对直径为30mm的热轧棒材进行固溶处理和时效处理,样品被置于高温炉内,设定温度为982℃,达到982℃后保温1h,再快速水冷。时效处理则是将固溶处理冷却的样品在720℃的条件下保温17h后空冷。热轧态及热处理后的试样制成金相试样,使用 $\text{FeCl}_3$ (5g) +  $\text{HCl}$ (35mL) +  $\text{H}_2\text{O}$ (60mL)腐蚀液腐蚀,采用光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)表征材料的微观组织,采用材料万能试验机测试其强度,拉伸试样如图1所示。



图1 A286合金拉伸试样

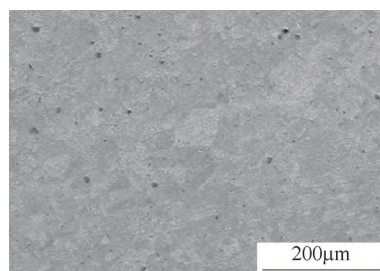
## 3 试验结果与分析

### 3.1 显微组织

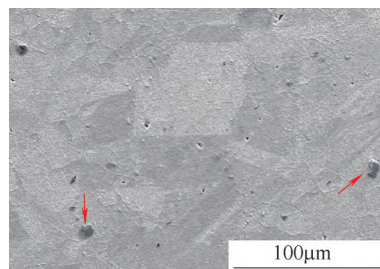
图2所示为A286热轧态显微组织。根据前期研

究,热轧态合金基体为再结晶的均匀奥氏体晶粒组织,同时存在一次碳氮化物(见图2中箭头所指),与李吉东等<sup>[2]</sup>的研究结果一致。

经固溶和时效处理后的显微组织如图3所示。从图3可看出,热处理后的晶界变得更加明显,晶粒有



a) 热轧态组织 (200 $\times$ )



b) 热轧态组织 (500 $\times$ )

图2 A286热轧态的显微组织

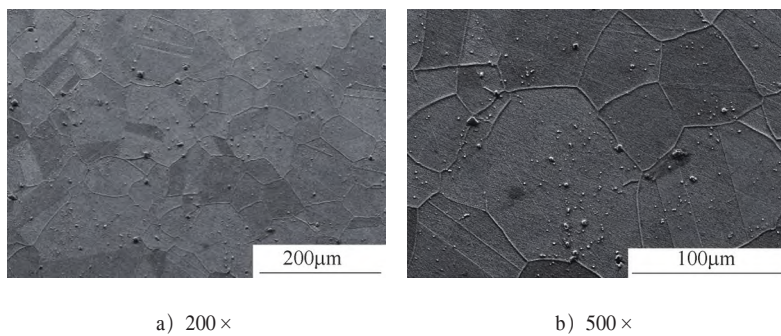


图3 A286热处理后试样的显微组织

长大迹象，晶粒内有明显的析出物<sup>[6, 7]</sup>。

对晶粒内尺寸较大的析出相进行了元素分布检测，结果如图4所示。从图4可看出，析出相主要富集Ti和C元素，贫Cr、Ni和Fe，推断其为TiC。

图5所示为经过时效热处理的室温变形试样的XRD结果。从图5可看出，在时效处理17h后，XRD

图谱中的峰位置为(111)、(200)、(220)、(311)、(222)晶面，峰强度普遍高于未处理前<sup>[8, 9]</sup>。

目前，镍基高温合金析出相长大粗化规律，一般遵循Ostwald熟化理论，根据该理论，A286合金在时效过程中其强化相长大规律符合强化相粗化或

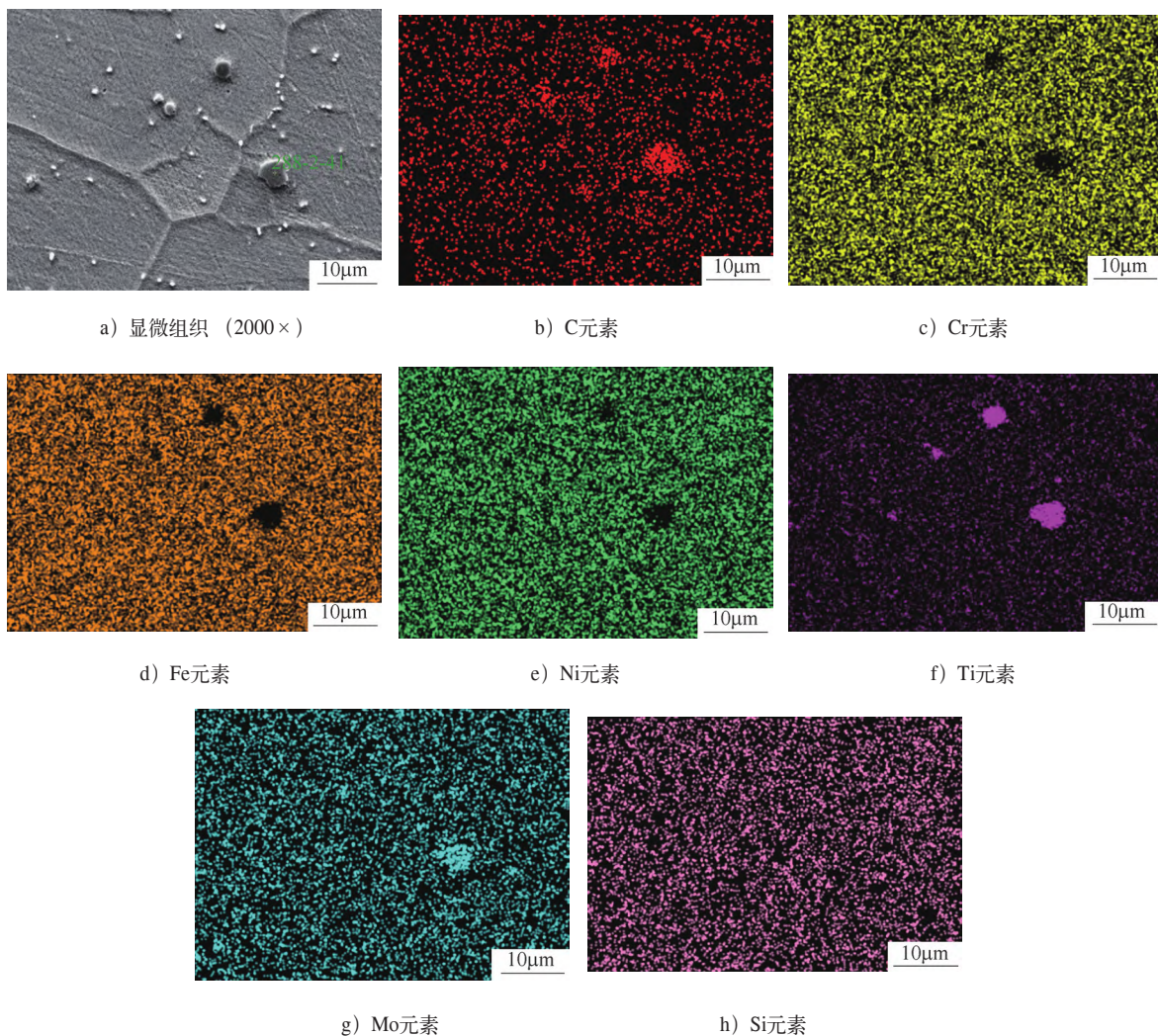


图4 组织中元素分布

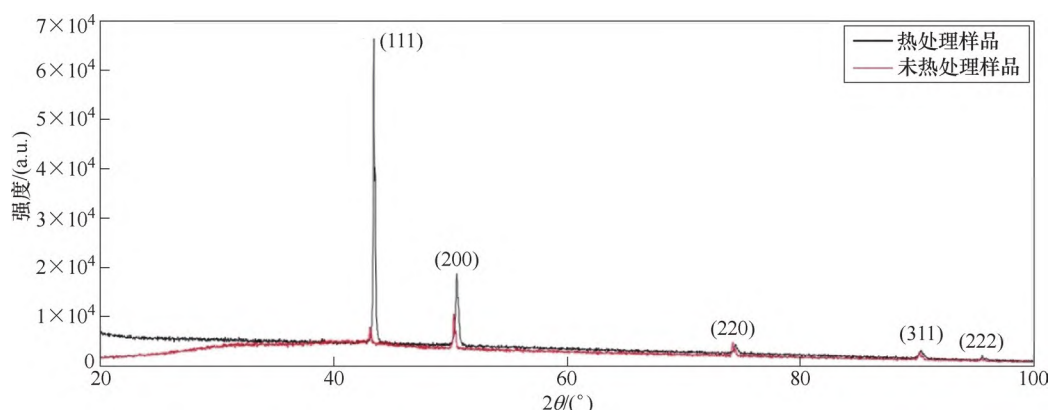


图5 时效处理后室温形变试样的XRD图

熟化长大规律,即可获得如下关系模型,即

$$D^3 = 2200.2 + 1873.5t$$

式中  $D$  ——合金中  $\gamma'$  强化相直径 (nm);

$t$  ——时效处理时间 (h)。

随着时效处理时间延长,析出的  $\gamma'$  强化相发生粗化长大<sup>[5]</sup>。强化相尺寸从最初的10nm长大到30nm。长时间的时效,使得强化相分布更加弥散均匀。

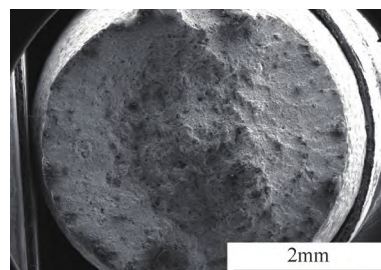
### 3.2 力学性能

对固溶时效处理后的合金材料进行室温拉伸试验,结果见表2。从表2可看出,982℃固溶处理后,再720℃时效处理17h的A286合金的抗拉强度为991~1048MPa,平均值为1027MPa。这表明,经过固溶+时效热处理后的A286合金具有较高的抗拉强度。A286合金的屈服强度在718~760MPa,平均值为746MPa。A286合金的断面收缩率为39%~45%,平均值为42%。较高的断面收缩率进一步证实了改进固溶和时效热处理有效提高了A286合金的韧性。对比标准热处理条件下的拉伸数据,当合金进行960℃×1h热处理后,抗拉强度达到1249MPa,而断后伸长率仅为18.1%,不满足使用要求。A286合金在720℃时效处理17h后虽然强度有所降低,但伸长率明显增加,综合性能符合电厂实际需求<sup>[5]</sup>。由于  $\gamma'$  相的数量、尺寸和分布是合金强化效果的直接影响因素,720℃长时间时效有利于  $\gamma'$  相均匀地弥散分布在基体上,数量最多、尺寸较为合适,因此增加了材料的综合性能。

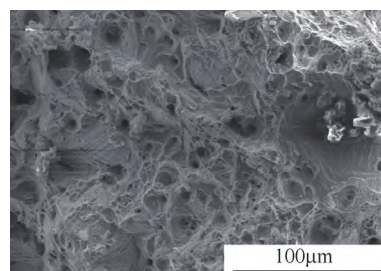
图6所示为A286合金经982℃固溶+720℃时效17h后空冷至常温时的拉伸断口形貌。从图6可看出,断口分布着密集细小的韧窝,表现为韧性断裂

表2 合金拉伸性能

| 样品编号 | 抗拉强度 /MPa | 屈服强度 /MPa | 断后伸长率 (%) | 断面收缩率 (%) |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1    | 1048      | 747       | 41.5      | 39        |
| 2    | 1032      | 751       | 37.5      | 42        |
| 3    | 1036      | 753       | 40.5      | 42        |
| 4    | 1026      | 760       | 33.0      | 43        |
| 5    | 991       | 718       | 35.0      | 45        |
| 平均   | 1027      | 746       | 37.5      | 42        |



a) 断口宏观形貌 (25×)



b) 断口微观形貌 (500×)

图6 A286合金经982℃固溶+720℃时效17h后拉伸断口形貌特征。

### 4 结束语

通过上述试验与分析,可得出如下结论。

1) A286合金采用982℃固溶处理+720℃×17h

(下转第133页)

VI级；从图7b可看出，按GB/T 9441—2009要求，铁素体 $\geq 90\%$ ，碳化物含量 $\leq 1\%$ 。力学性能和金相组织检测结果见表6。

采用上述工艺方案生产的球墨铸铁机体（见图

8），按照技术要求的标准进行了外观、尺寸、无损检测、金相组织及力学性能等检测，所有的检测结果均为合格，铸件质量满足技术要求，铸件实现一次性设计、研发并试制成功，当前已开始稳定生产。

表6 附铸试块力学性能和金相组织检测结果

| 力学性能     |          |          |       | 金相组织   |        |
|----------|----------|----------|-------|--------|--------|
| 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 断后伸长率(%) | 硬度HBW | 球化率(%) | 珠光体(%) |
| 567      | 350      | 13.5     | 179   | 84     | 45     |



图8 铸件实体

## 6 结束语

研究和实践结果表明，通过合理的砂芯分芯、浇注系统、补缩系统等3D铸造工艺及熔炼工艺的分

析制定，利用MAGMA模拟有效规避风险，成功研发并生产了各项指标均满足技术质量要求的轻量化发动机机体。

### 参考文献：

- [1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册（第5卷）：铸造工艺[M]. 北京：机械工业出版社，2003.
- [2] 郝石坚. 现代铸铁学[M]. 北京：冶金工业出版社，2009.
- [3] 魏兵，袁森，张卫华. 铸件均衡凝固技术及其应用[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

MW 20241030

（上接第127页）

时效处理有助于改善室温塑性，室温屈服强度和抗拉强度分别达到746MPa、1027MPa，显示出良好的强韧性，满足电厂使用要求。

2) A286合金中的主要析出相为TiC和 $\gamma'$ 相。720℃下17h时效处理有利于 $\gamma'$ 相均匀地弥散分布在基体上，数量最多、尺寸较为合适，从而增加了材料的综合性能。

### 参考文献：

- [1] 齐跃，万志慧，余传魁，等. 紧固件用A286高温合金AMS标准解读与应用[J]. 金属加工（热加工），2021（9）：32-34.
- [2] 李吉东，王岩，谷宇，等. 固溶处理对A286合金组织与硬度的影响[J]. 金属热处理，2023，48（2）：223-227.
- [3] 代礼斌，杨章程，邓雄，等. 固溶温度对A286合金低温力学性能的影响[J]. 金属热处理，2023，48（3）：96-99.
- [4] 金万军，程定宇，王建宏，等. 热处理对A286合金力

学性能的影响[J]. 热加工工艺，2018，47（24）：236-237.

- [5] 姚志浩，阮雅婷，董建新，等. 固溶时效热处理对A286合金组织演变规律的影响[J]. 材料热处理学报，2016，37（7）：40-47.
- [6] 张胜全，王玉慧. Inconel 600合金元素偏聚及对组织影响的研究[J]. 热加工工艺，2015，44（12）：167-169.
- [7] 米大为. 固溶温度对GH5605高温合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理，2018，43（12）：191-194.
- [8] 柳思成，许彦伟，殷小健. 形变量及时效制度对A286高温合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理，2019，44（5）：167-171.
- [9] 陈琪，陈雅文，孔凡亚. 热处理对超大变形量GH2132合金力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2012，41（20）：184-188.

MW 20241030