

合金元素含量对 K487 合金组织和性能的影响

杨曼利, 王祯, 韩伟, 谢秋峰, 吴亚夫, 薛鑫, 孔胜国, 李俊涛

(钢铁研究总院高温材料研究所, 北京 100081)

摘要: 研究了 Al、Ti、W、Mo、Cr 合金元素含量分别在偏上线、中线、下线时 K487 合金的组织 and 性能。结果表明: 合金元素含量在偏下线时, 合金中析出少量的碳化物和 γ' 相, 合金元素含量提高到偏中线, 合金中碳化物和 γ' 相析出量增加, 合金元素含量提高到偏上线, 合金中碳化物和 γ' 相析出量进一步增加, 同时合金中析出大量针状 μ 相。同时, 随着合金元素含量的增加, 合金的室温抗拉强度及屈服强度、750℃ 高温的抗拉强度及屈服强度较上线和中线明显提高; 室温伸长率及 750℃ 伸长率较上线和中线明显下降。综合来看, 合金元素含量在偏中线时, K487 合金具有较好的综合性能。

关键词: K487 合金; 元素含量; 组织; 性能

The Effects of Alloy Element Contents on Microstructures and Properties of Superalloy K487

YANG Man-li, WANG Zhen, HAN Wei, XIE Qiu-feng,

WU Ya-fu, XUE Xin, KONG Sheng-guo, LI Jun-tao

(Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The effects of Al, Ti, W, Mo, Cr composition on Microstructures and Properties of Superalloy K487 have been studied. The results show that there are less carbide and γ' phase precipitated when the composition is near to low limit, and the carbide and γ' phase increase when the composition is near to mid-line, and the carbide and γ' phase increase more and acicular μ phase precipitated when the composition is near to top limit. At the same time, with the increase of alloy element contents, the room-temperature and 750℃-temperature tensile strength and yield strength increase obviously, and the room-temperature and 750℃-temperature elongation fall down obviously. The K487 alloy has good combination properties when the composition is near to mid-line.

Key words: superalloy K487; composition; microstructure; property

我国某新型航天弹用发动机用关键部件工作温度为 750℃, 短时工作温度可达 900℃, 其上焊接有多种元器件, 该部件结构复杂, 采用整体无余量精密铸造工艺制造, 要求所用铸造高温合金不仅要具有良好的高温性能, 而且还应具有很好的工艺性能, 特别是焊接性能。为了满足这一需求, 钢铁研究总院在具有可铸可锻可焊、高热强性的俄罗斯 ЭП487 合金的基础上研制了 K487 合金 (合金成分如表 1 所示), 该合金 W、Mo 含量较高, 特别是 Mo 含量达到了 9%~11%, 合金兼顾了 W、Mo 固溶强化和 γ' 相沉淀强化, 经固溶+时效处理后, 合金中主要析出物为 γ' 相, 碳化物和 μ 相^[1]。本文系统地研究了合金元素 Al、Ti、W、Mo、Cr 分别同时取偏上线、中线、下线时 K487 合金组织和性能。

作者简介: 杨曼利(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事高温合金材料研究及熔模精密铸造工艺研究, E-mail: yangmanli-007@163.com。

表 1 K487 合金化学成分

Table1 The composition of K487 alloy

元素含量, wt%							
C	Cr	Mo	Ti	Al	W	B	Ni
0.05~0.08	17.0~20.0	9.0~11.0	2.2~2.8	1.0~1.5	4.0~5.0	≤0.02	余

1 试验方法

试验所用 K487 母合金锭采用 ZG200 真空感应炉熔炼而成。试棒由母合金锭在 ZG10 真空感应炉重熔浇注。合金试棒采用 1120℃×4h, 空冷+900℃×5h, 空冷的热处理制度。一般组织观察采用的电解腐蚀液为 HNO₃: 乙酸: H₂O=1: 2: 17, γ'相观察采用的电解腐蚀液为 HCl: HNO₃: 甘油=1: 2: 6。金相组织观察在 Leica DM4000 光学显微镜下进行, 扫描电镜在 JSM-6480LV 扫描电子显微镜下进行。

2 试验结果及讨论

在合金成分设计范围内, 本文研究了 K487 合金在主要元素成分 Al、Ti、W、Mo、Cr 元素同时取偏上线、中线和下线时合金的显微组织及性能。Al、Ti、W、Mo、Cr 合金元素分别在偏上线、中线、下线的成分含量分析如表 2 所示, 性能测试结果如表 3 所示。

表 2 K487 元素含量分析结果

Table2 The result of composition analyzing

元素含量	Cr	Al	Ti	Mo	W
下线	16.55	1.07	2.28	9.16	3.69
中线	18.71	1.32	2.52	10.14	4.27
上线	19.88	1.44	2.80	10.72	5.00

表 3 不同元素含量的 K487 合金性能

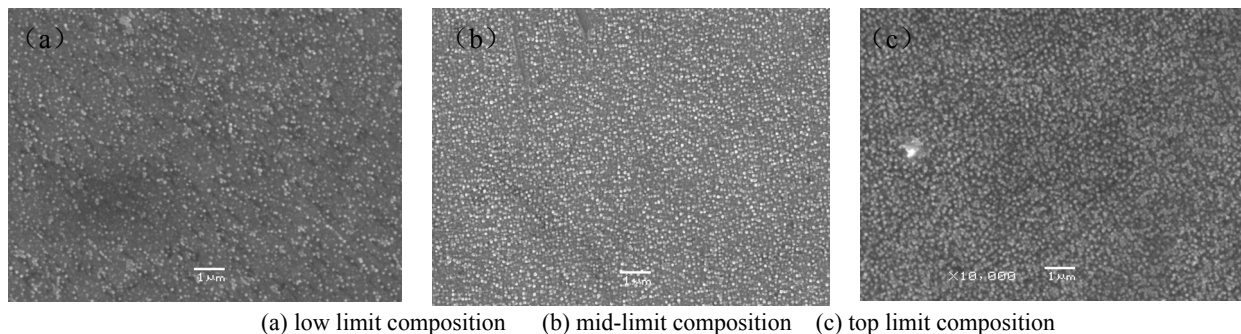
Table3 The properties of different composition

元素 含量	室温拉伸				750℃高温拉伸			
	抗拉强度	屈服强度	伸长率	收缩率	抗拉强度	屈服强度	伸长率	收缩率
	R_m	R_{eL}	A	Z	R_m	R_{eL}	A	Z
下线	680	450	16.5	15.75	612.5	420	20.5	24.25
中线	923	650	11	13	848	573	12	16
上线	1035	812.5	6.5	7.75	972.5	770	3.75	7.25

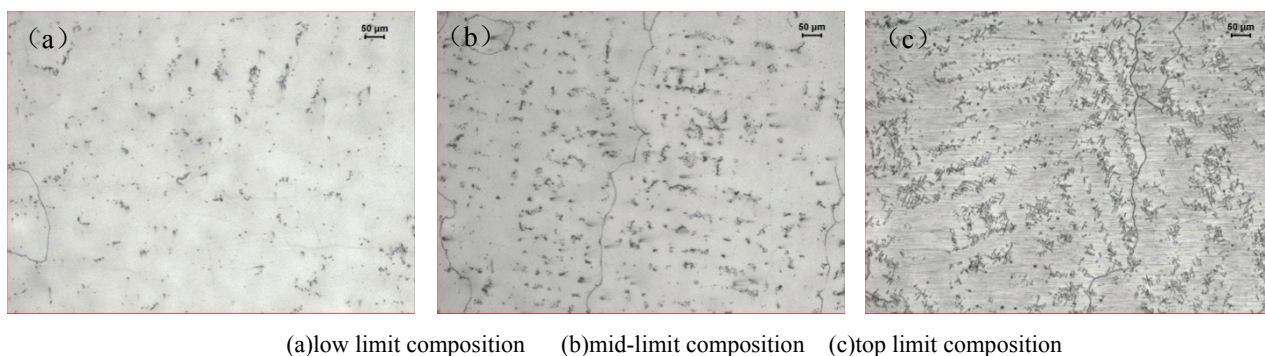
从表 3 可以看出, 随着 Al、Ti、W、Mo、Cr 合金元素从下线提高到中线, 合金的强度增加, 室温的抗拉强度从 680MPa 提高到 923MPa, 屈服强度从 450MPa 提高到 650MPa, 750℃高温抗拉强度从 612.5MPa 提高到 848MPa, 屈服强度从 420MPa 提高到 573MPa。但是合金元素从下线提高到中线时, 合金塑性下降, 室温伸长率从 16.5%下降到 11%, 750℃高温伸长率从 20.5%下降到 12%。进一步提高 Al、Ti、W、Mo、Cr 合金元素到上线, 结果表明: 室温和 750℃高温的抗拉强度继续提高, 室温抗拉强度从 923 MPa 提高到 1035 MPa, 屈服强度从 650 MPa 提高到 812.5 MPa, 750℃高温抗拉强度从 848 MPa 提高到 972.5 MPa, 屈服强度从 573 MPa 提高到 770 MPa。同时合金塑性继续下降, 室温伸长率从 11%下降到 6.5%, 750℃高温伸长率从 12%下降到 3.75%。

随着合金主要元素成分从下线增加至上线,合金强度上升而塑性下降。K487 合金在 Al、Ti、W、Mo、Cr 合金元素取偏上线时,合金强度最高。与取偏下线元素成分相比,室温抗拉强度提高了 355MPa,屈服强度提高了 362.5MPa,750℃高温抗拉强度提高了 360MPa,屈服强度提高了 350MPa,而室温伸长率则下降了 10%,750℃高温伸长率下降了 16.75%。

合金性能随着 Al、Ti、W、Mo、Cr 合金元素的提高,强度增加,这是因为在 Al、Ti、W、Mo、Cr 合金元素偏下线时,合金中 γ' 相最少,而合金元素在偏中线成分和偏上线成分状态时,合金的 γ' 相数量明显增多(图 1)。 γ' 相作为高温合金中最主要的强化相^[2-3],其数量与合金的强度性能直接相关,合金中的 Al、Ti 元素是主要的 γ' 相形成元素,而 W, Mo, Cr 元素也是 γ' 相的重要强化元素,因此,当这几种元素含量取偏上线时,合金的强度性能较高。

图 1 γ' 相Fig.1 γ' phase

合金性能随着 Al、Ti、W、Mo、Cr 合金元素的提高,塑性下降,这是因为在 Al、Ti、W、Mo、Cr 合金元素偏下线时,合金中的碳化物数量最少,中线成分时碳化物明显增多,而在上线成分时析出大量的碳化物,同时析出了大量的针状析出相(图 2)。铸造高温合金中,当 $(\text{Mo}+\text{W})$ (原子分数) 超过 8%, $\text{Mo}\% / (\text{W}+\text{Mo})\%$ (原子分数) 超过 0.17 时,将析出 TCP 相。K487 合金 W, Mo (原子分数) 总量为 13%~16%, $\text{Mo}\% / (\text{W}+\text{Mo})\%$ (原子分数) 为 0.69, μ 相析出倾向较大,而 μ 相的大量析出是 K487 合金组织的一个特点,析出的 μ 相主要分布在枝晶间和晶界上^[4-6]。针状 μ 相的析出对合金的塑性有不利影响,从而导致合金塑性下降。

图 2 碳化物及 μ 相Fig.2 Carbide and μ phase

合金在取偏上线时,合金的强度较高,但塑性低;合金在取偏下线时,合金的塑性较高,但强度低;合金元素偏中线时,合金具有较好强度性能和塑性性能。因此在合金取偏中线时,合金具有较好的综合性能,可以满足合金的使用要求。但是合金中单个元素及微量元素对合金组织和性能的影响,以及如何调整合金元素成分来进一步提高合金的综合性能,这些还需要进一步的研究。

3 结论

(1) 当合金元素偏下线时, 合金中析出较少的 γ' 量及少量碳化物, 随着合金元素含量的增加, 合金中 γ' 量和碳化物量逐渐增加, 当合金元素偏上线时, 合金中析出大量的 γ' 相、碳化物和 针状 μ 相。

(2) 当合金元素偏下线时, 合金的强度低, 塑性较高, 当合金元素偏上线时, 合金强度较高, 但塑性下降, 综合来说, 当合金元素偏中线时, 合金具有较好的综合性能, 满足合金使用要求。

参考文献:

- [1] 王祯,邵冲,孔胜国等.时效温度对 K487 合金组织和性能的影响.钢铁研究学报[J].2008.1(28):50-53.
- [2] 刘丽荣, 金涛等. 热处理对一种镍基单晶高温合金微观组织和持久性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 5.
- [3] 杨曼利,周志华,王祯等.时效热处理对 K487 合金组织和性能的影响[J].热加工工艺 2008, 37(8): 63-65.
- [4] 郑运荣.铸造高温合金中的初生 μ 相[J].金属学报.1999,12.
- [5] 郑运荣,张德堂.高温合金与钢的彩色金相研究[M].北京:国防工业出版社.1999.
- [6] 王祯,李俊涛,赵明汉等.K487 铸造高温合金的显微组织和性能研究[C].动力与能源用高温合金结构材料第十一届中国高温合金年会论文集.冶金工业出版社.2007. 360-363.