

壁厚对某 Ni₃Al 基高温合金铸件的微观组织及性能影响研究

孙长波¹, 王健楠¹, 王福德², 吴保平³, 孙嘉言⁴, 冯秋水⁴, 许庆彦⁴

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110043; 2. 空军装备部驻沈阳地区第二军事代表室, 辽宁沈阳 110043; 3. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750; 4. 清华大学材料学院, 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 通过设计不同壁厚薄板铸件, 研究了不同壁厚对 Ni₃Al 基高温合金铸件组织和性能的影响。随着壁厚的增加, 合金的二次枝晶臂随之增加。从元素分布上看, 壁厚的增加会降低合金中 Hf、Cr 和 Mo 元素的偏析程度, 促进 Ti 元素向枝晶间的偏析以及 Al 元素向枝晶干偏析, W 元素的偏析程度则总体下降。从力学性能上看, 壁厚增加会导致合金的拉伸强度和拉伸塑性显著增加。

关键词: Ni₃Al 基; 高温合金; 偏析; 力学性能

随着现代航空工业的飞速发展, 航空发动机的性能不断提高, 这也对材料的性能提出了更高的要求^[1-3]。与传统的镍基高温合金不同, 作为一种比较典型金属间化合物, Ni₃Al 基高温合金具有较高的比强度、优异的高温强度和蠕变抗力等特点, 有望成为航空航天、机械制造、化工冶金等军民业领域的重要结构材料^[4-6]。

形成尾喷口的尾喷管作为一种重要构件是决定战机综合性能的关键部分^[3]。作为航空发动机排气系统的核心部件, 尾喷管的主要作用是将流过涡轮的燃气加速膨胀, 让高温燃气的焓转变为动能以高速燃气的形式向后排出, 进而对飞机产生二次加力推力^[7]。需要承受非常大的高温机械载荷, 这对尾喷管材料——Ni₃Al 金属化合物高温合金的高温热力学性能提出了较高的要求。已有相关理论研究表明, Ni₃Al 基合金在接近熔点时的强度要比常规镍基高温合金高出三倍以上^[8]。但是, 从目前的研究进展来看, 针对某 Ni₃Al 基高温合金的研究仍主要针对成分优化及组织性能, 少有针对铸造结构与微观组织及性能的关系研究^[9]。作者通过研究不同壁厚对 Ni₃Al 基高温合金组织和性能的影响规律, 掌握铸件不同位置 and 不同组织的相应性能规律。

作者简介:

孙长波(1978-), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事熔模铸造工艺设计及计算机数值模拟技术研究工作。E-mail: sunchangbo@126.com

中图分类号: TG132.3+2
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2023)03-0310-05

收稿日期:

2022-03-11 收到初稿,
2022-05-05 收到修订稿。

1 试验方案

1.1 试验材料

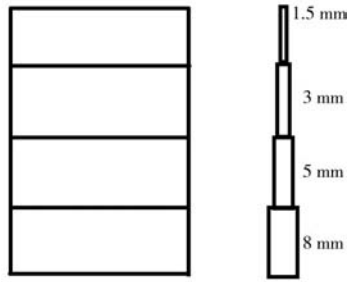
试验材料为某 Ni₃Al 金属间化合物高温合金, 其成分如表 1 所示。

1.2 试验方法

本研究所设计的薄板铸件结构如图 1 所示, 铸件各部分的厚度自上而下分别为 1.5 mm, 3 mm, 5 mm 和 8 mm, 宽度均为 100 mm。使用 15 kg 真空感应炉生产, 采用

表 1 某型 Ni₃Al 金属间化合物高温合金化学成分表
Table 1 Chemical composition of a Ni₃Al intermetallic superalloy w_B /%

Al	C	Cr	W	Mo	Ti	Hf	B
8.0	0.08	7.5	1.8	4.09	0.8	0.4	0.014



(a) 铸件主视图 (b) 铸件侧视图

图1 不同壁厚的某Ni₃Al金属间化合物高温合金薄板示意图
Fig. 1 The diagram of a Ni₃Al intermetallic superalloy sheet with different wall thicknesses

真空二次冶炼工艺，浇注工艺参数为：浇注温度 1 460 ℃，型壳温度900 ℃。

1.3 微观组织及性能测试

使用场发射扫描电子显微镜及电子探针技术，观察铸件不同壁厚部分组织形貌特征。此后，将各部分铸件加工成如图2所示（其中 $a=1$ ）标准拉伸试样，试样取样位置为铸件不同壁厚部分的中心。所得试样在 1 100 ℃下开展拉伸性能测试，探究不同壁厚组织的拉伸性能差异。

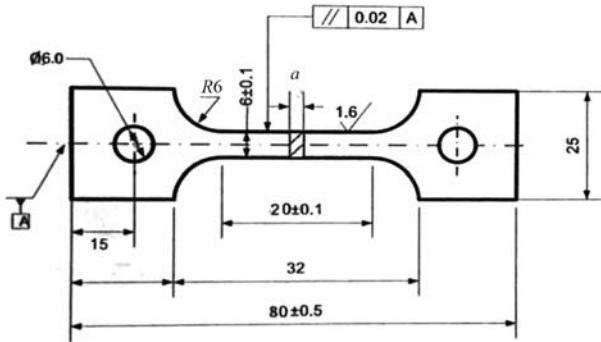


图2 金属拉伸试样示意图

Fig. 2 The diagram of the metal tensile specimen

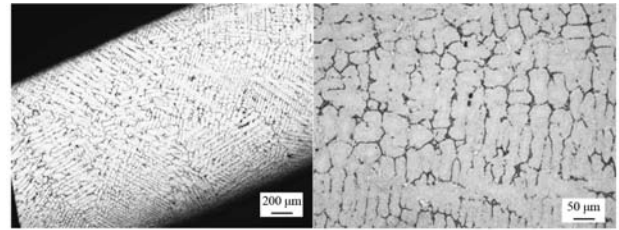
2 试验结果与分析

2.1 壁厚对显微组织的影响

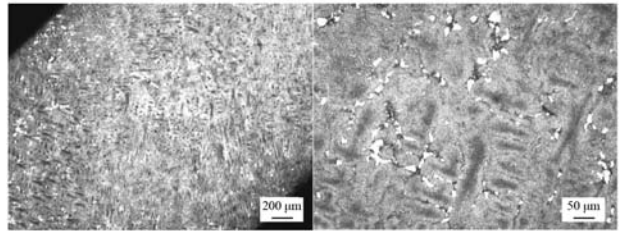
对铸件不同壁厚部分的组织观察结果如图3所示。从图中可以看出，随着壁厚的增加，合金的一次枝晶臂间距有所增加，二次枝晶臂间距随之增加，当壁厚由1.5 mm增加到8 mm后，合金二次枝晶臂间距逐渐由 24.4 μm增加到60.9 μm。在微观组织结构方面，随着壁厚的增加，枝晶边界逐渐变得不明显，枝晶间组织有所减少。

2.2 壁厚对元素偏析情况的影响

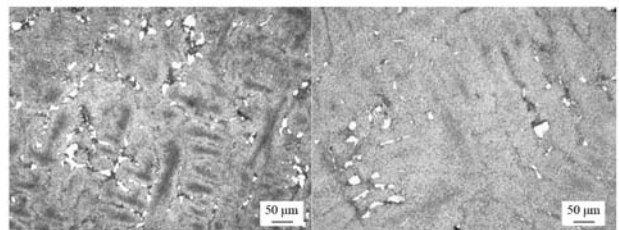
为研究某Ni₃Al金属间化合物高温合金中各元素在组织中的分布情况，对1.5 mm，3 mm，5 mm和8 mm



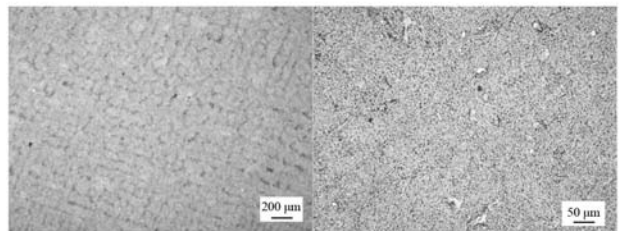
(a) 1.5 mm



(b) 3 mm



(c) 5 mm



(d) 8 mm

图3 铸件不同壁厚部位合金组织形貌

Fig. 3 Microstructures of the castings with different wall thicknesses

不同壁厚部位组织进行了电子探针扫描分析，图4、图5分别为选取有代表性的1.5 mm和8 mm壁厚的合金电子

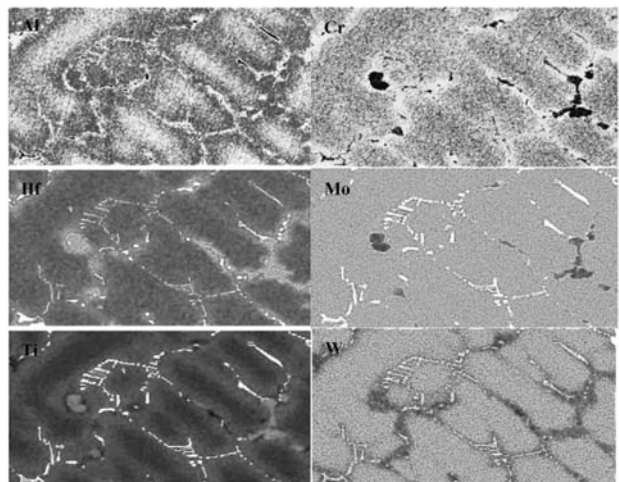


图4 1.5 mm壁厚铸件合金的电子探针扫描图

Fig. 4 Electron probe scan of 1.5 mm wall thickness casting alloy

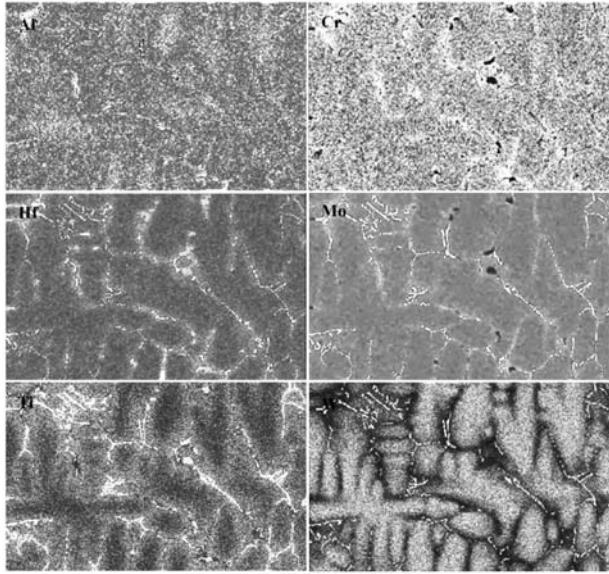


图5 8 mm壁厚铸件的电子探针扫描图

Fig. 5 Electron probe scan results of the casting with 8 mm wall thickness

探针组织形貌。从图中可以看出, Al、Ti、Hf、Mo、Cr偏析于枝晶间, W元素偏析于枝晶干。

为定量研究各元素在合金组织中的分布情况及壁厚对其所产生的影响, 通过电子探针扫描技术测定铸件不同壁厚部位组织中各元素在枝晶干及枝晶间的平均分布情况。一般采用偏析系数 k' 来定量描述偏析的程度:

$$k' = \frac{C_s^*}{C_1^*} \quad (1)$$

式中, C_s^* 和 C_1^* 分别为枝晶干及枝晶间的溶质浓度。当

$k' > 1$ 时, 元素偏析于枝晶干, 为负偏析元素, 且 k' 越大, 偏析越严重; 当 $k' < 1$ 时, 元素偏析于枝晶间液相, 且 k' 越小, 凝固过程中偏析越严重。

表2中可以看出, 各元素在组织中的含量会随着壁厚的变化而发生改变。Ti元素在枝晶间和枝晶干组织中的含量随壁厚的增加而增加。Cr元素随着壁厚的增加, 在枝晶间组织中的含量先降低后升高, 而在枝晶干组织中的含量先升高后降低。Hf元素在枝晶间组织中的含量随着壁厚的增加而增加, 而在枝晶干组织中的含量没有发生明显变动。Al元素在枝晶间组织中的含量随着壁厚的增加而降低, 而在枝晶干组织中的含量则随着壁厚的增加而增加, 这会导致偏析系数的明显增加; 当壁厚为8 mm时, Al元素的偏析系数大于1, 由较薄壁厚时的枝晶间组织偏析倾向转变为向枝晶干组织偏析。Mo元素在枝晶间组织中的含量随着壁厚的增加先降低后增加, 在枝晶干的含量变化不大。W元素在枝晶间组织中的含量随着壁厚的增加先升高后降低, 在枝晶干组织中的含量则变化不大。

为了更进一步理解不同壁厚的合金元素的偏析行为, 图6和图7对各合金元素的偏析系数进行了总结。从图中可以看出, 随着壁厚的增加, Hf、Cr和Mo元素的偏析情况有所缓解; 而对Ti元素及Al元素, 壁厚的增大会加剧该元素的偏析情况, 使Ti元素进一步向枝晶间组织偏析, 同时会使Al元素的偏析倾向由枝晶间逐渐转为枝晶干组织。而对于负偏析元素W, 随着壁厚的增加, W元素的偏析程度呈总体下降趋势。

2.3 壁厚对铸件高温力学性能的影响

针对铸件不同壁厚部位组织, 开展了1 100 °C下拉

表2 不同壁厚合金枝晶干与枝晶间各元素成分 (wt.%) 及偏析系数 k'
Table 2 Elemental composition (wt.%) and segregation coefficient k' of dendrite stem and interdendrite in the alloys with different wall thicknesses

项目	1.5 mm		3 mm		5 mm		8 mm		
	C_1^*	C_s^*	C_1^*	C_s^*	C_1^*	C_s^*	C_1^*	C_s^*	
Ti	wt.%	1.16	0.93	1.19	0.97	1.25	0.95	1.29	0.97
	k'	0.80		0.82		0.76		0.75	
Cr	wt.%	10.24	7.94	9.91	8.02	8.99	8.19	9.28	8.14
	k'	0.78		0.81		0.91		0.88	
Hf	wt.%	3.60	2.23	3.28	2.23	2.77	2.24	2.68	2.25
	k'	0.62		0.68		0.81		0.84	
Al	wt.%	5.20	4.82	5.45	5.13	5.26	4.96	4.93	5.28
	k'	0.93		0.94		0.94		1.07	
Mo	wt.%	4.49	3.68	4.37	3.76	4.04	3.72	4.29	3.79
	k'	0.82		0.86		0.92		0.89	
W	wt.%	1.04	2.56	1.23	2.65	1.15	2.68	1.39	2.69
	k'	2.47		2.16		2.34		1.94	

伸性能测试试验, 试验结果如表3所示。由试验结果可得, σ_b 与 δ 随壁厚的变化曲线, 如图8、图9所示。

从试验结果曲线可以看出, 随着壁厚的增加, 合金的拉伸强度和拉伸塑性显著增加, 当壁厚由1.5 mm增加到5 mm时, 铸件组织在1 100 °C下的 σ_b 由275 MPa

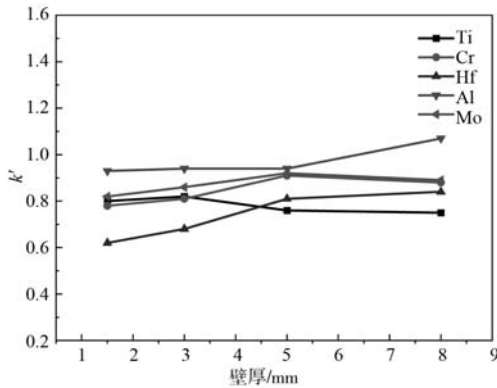


图6 不同壁厚铸件组织中正偏析元素的偏析系数

Fig. 6 Segregation coefficients of positive segregation elements in the microstructures of the castings with different wall thicknesses

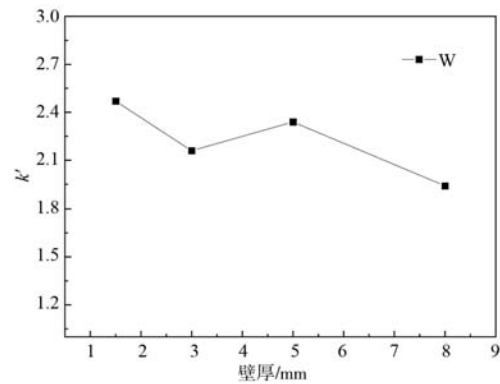


图7 不同壁厚的合金中负偏析元素的偏析系数

Fig. 7 Segregation coefficients of negative segregation elements in the microstructures of the castings with different wall thicknesses

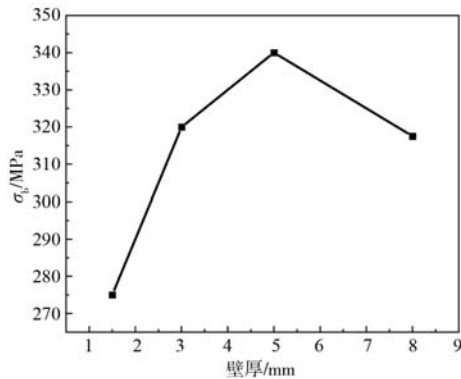


图8 σ_b 随壁厚的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of σ_b with wall thickness

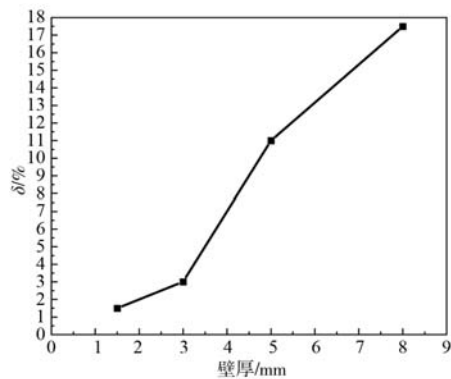


图9 δ 随壁厚的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of δ with wall thickness

表3 不同壁厚的合金1 100 °C的拉伸性能
Table 3 Tensile properties of the alloys with different wall thicknesses at 1 100 °C

壁厚/mm	σ_b /MPa	δ /%
1.5	275	1.5
3	320	3
5	340	11.0
8	317.5	17.5

3 结论

(1) 随着壁厚的增加, 合金的二次枝晶臂随之增

增加到了340 MPa, 同时, δ 由1.5%增加到了11.0%。但当壁厚达到8 mm时, 合金的拉伸塑性继续增加, δ 增加到17.5%, 而拉伸强度有所降低, σ_b 下降到了317.5 MPa。

加, 当壁厚由1.5 mm增加到8 mm后, 合金二次枝晶臂逐渐由24.4 μm 增加到了60.9 μm 。

(2) 在某 Ni_3Al 金属间化合物合金中, 分析铸件组织中各元素含量发现, Al、Ti、Hf、Mo、Cr倾向于分布在枝晶间, 而W元素倾向于分布在枝晶干。壁厚的增加, 会降低Hf、Cr和Mo元素的偏析程度; 促进Ti元素向枝晶间的偏析以及Al元素向枝晶干偏析。随着壁厚的增加, W元素的偏析程度总体下降。

(3) 随着壁厚的增加, 合金的拉伸强度和拉伸塑性显著增加, 但当壁厚达到8 mm时, 合金的拉伸塑性继续增加, 而拉伸强度降低。

参考文献:

- [1] 师昌绪, 仲增墉. 中国高温合金40年 [J]. 金属学报, 1997, 33 (1) : 1-8.
- [2] 仲增墉. 我国高温合金的发展与创新 [J]. 金属学报, 2010, 46 (11) : 1281-1288.
- [3] 李建锋, 吕俊复. 短距起飞/垂直降落战斗机升力风扇驱动方案研究 [J]. 热科学与技术, 2020, 19 (2) : 193-204.
- [4] DEEVI S C, SIKKA V K. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications [J]. Intermetallics, 1996, 4 (5) : 357-375.
- [5] PICHON L, DUBOIS J B, CHOLLET S, et al. Low temperature nitriding behaviour of Ni₃Al-like γ' precipitates in nickel-based superalloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 176-186.
- [6] LIU H, XUAN W, XIE X, et al. Microstructure evolution and room temperature fracture toughness of directionally solidified NiAl-31Cr-3Mo-0.2Si near-eutectic alloy at different withdrawal rates [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 678: 243-251.
- [7] 任志彬, 孟光, 李防战. 基于Dymola的航空发动机尾喷管建模与仿真 [J]. 计算机仿真, 2006, 23 (7) : 60-63.
- [8] LIU C T, WHITE C L, HORTON J A. Effect of boron on grain-boundaries in Ni₃Al [J]. Acta Materialia, 1984, 33 (2) : 213-229.
- [9] ZHONG J, SUN C, WU J, et al. Study on high temperature mechanical behavior and microstructure evolution of Ni₃Al-based superalloy JG4246A [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (3) : 6745-6758.

Influence of Wall Thickness on Microstructure and Properties of a Ni₃Al Intermetallic Superalloy

SUN Chang-bo¹, WANG Jian-nan¹, WANG Fu-de², WU Bao-ping³, SUN Jia-yan⁴, FENG Qiu-shui⁴, XU Qing-yan⁴

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110143, Liaoning, China; 2. Second Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Shenyang, Shenyang 110043, Liaoning, China; 3. DEKAI Intelligent Casting Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China; 4. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology (MOE), School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract:

By designing thin plate castings with different wall thicknesses, the influence of different wall thicknesses on the microstructure and properties of the Ni₃Al superalloy was studied. As the wall thickness increased, the secondary dendrite wall of the alloy increased, and the segregation of Al, Ti, Hf, Mo, Cr, W and other elements in the structure changed. The tensile strength and tensile ductility of the alloy significantly increased.

Key words:

Ni₃Al-based; superalloy; segregation; mechanical properties