

基于正交试验的铸造高Nb-TiAl合金收缩率研究*

刘金虎¹, 丁贤飞^{1,2,3}, 冯新^{1,2,3}, 南海^{1,2,3}

- (1. 中国航发北京航空材料研究院铸造钛合金技术中心, 北京 100095;
2. 北京百慕航材科技股份有限公司, 北京 100094;
3. 北京市先进钛合金精密成型工程技术中心, 北京 100095)

[摘要] 采用正交试验法研究了几何形状、是否受阻收缩和试样尺寸3个因素对两种高Nb-TiAl合金熔模铸造的线收缩率的影响。结果表明: Ti-45Al-8Nb平均线收缩率为2.12%~3.28%, Ti-48Al-7.5Nb的平均线收缩率为2.55%~3.39%, 后者线收缩率更大。受阻收缩试样在非受阻方向上的线收缩率比自由收缩试样的线收缩率高出44.8%~47.7%, 几何形状与尺寸对线收缩率影响较小, 凝固收缩受阻情况对线收缩率影响较大。随着试样尺寸的增加, 线收缩量虽然增大100%, 但线收缩率逐渐减小到20%。

关键词: 线收缩率; 高Nb-TiAl合金; 正交试验; 熔模铸造; 凝固收缩率

Study on Shrinkage Ratio of Cast High Nb-TiAl Alloy Based on Orthogonal Test

LIU Jinhu¹, DING Xianfei^{1,2,3}, FENG Xin^{1,2,3}, NAN Hai^{1,2,3}

- (1. Cast Titanium Alloy R&D Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
2. BAIMTEC Material Co., Ltd, Beijing 100094, China;
3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100095, China)

[ABSTRACT] The effects of geometric shape, resisted shrinkage and free shrinkage, sample size on the linear shrinkage ratio of two high Nb-TiAl alloy investment castings were investigated by orthogonal test. The results show that the average linear shrinkage ratio of Ti-45Al-8Nb is 2.12%~3.28%, and the average linear shrinkage ratio of Ti-48Al-7.5Nb is 2.55%~3.39%, and the linear shrinkage ratio of the latter is larger. The linear shrinkage ratio of the resisted shrinkage specimen in the unblocked direction is 44.8%~47.7% higher than that of the free shrinkage specimen. The geometry and size have little effect on the linear shrinkage ratio, and resistance to solidification shrinkage has a greater impact on linear shrinkage ratio. As the sample size increases, the linear shrinkage increases by 100%, but the linear shrinkage ratio gradually decreases to 20%.

Keywords: Linear shrinkage; High Nb-TiAl alloy; Orthogonal test; Investment casting; Solidification shrinkage ratio

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.21.072

TiAl合金因其低密度(3.8~4.1g·cm⁻³, 约为高温合金的一半)、优良的抗蠕变性能、良好的高温强度在高温部件上得到了广泛研究, 已在航空发动机叶片、汽车用涡轮增压器与排气阀等方面实现初步应用^[1-5], 其中最典型的案例当属GE公司开发的Ti4822合金涡轮叶片, 装配在波音787dreamline客机的GE-NX发动机上, 另外

* 基金项目: 中国国家自然科学基金(No. 51671026); 新金属材料国家重点实验室开放基金资助项目(No. 2019-ZD05)

典型的TiAl合金如TNM合金与45XD合金等也逐步实现了装机使用^[6]。虽然TiAl合金展现出了广阔的应用前景, 但是目前的航空用TiAl合金使用温度多集中在750℃以下^[2], 随着服役温度的升高, 暴露出高温抗氧化、抗蠕变性能不足等问题。Nb合金化能提高合金的高温性能进而提高合金的服役温度, 当Nb原子分数达到5%~10%时, 称为高Nb-TiAl, 该合金具有优异的高温抗氧化性能^[7], 良好的抗蠕变性能与高温强度^[8-9]。铸造成

形技术由于成本低,且可以避开 TiAl 合金低塑性引起的变形加工困难的问题,已成为该类合金重要的成形技术。高 Nb-TiAl 合金的铸造性能优劣是能否获得优质铸件的关键因素,直接影响该合金的成形制备和工程化应用。

TiAl 合金凝固时发生收缩是导致铸件内部产生铸造缺陷的主要原因。缩孔缩松与热裂等问题都是由合金凝固收缩导致的^[10-11],因此凝固收缩率是制定铸造工艺的重要依据之一。在合金的收缩率测定方面,目前报道的研究主要采用铸型法、线收缩仪法和熔盐法。Zheng 等^[12]通过铸型法对熔模铸造 ZL114A 合金的凝固收缩开展了研究,发现该合金的凝固收缩率在 0.77%~1.12% 之间,且收缩率随铸件尺寸变化较大。魏战雷等^[13]通过铸型法对 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金收缩率开展研究,发现该合金的自由线收缩率在 3.11%~2.09% 之间。薛冠霞等^[14]通过线收缩仪测量了 3 种 7 系铝合金的收缩行为和微观组织对热裂敏感性的影响,发现 3 种铝合金的凝固收缩行为表现出明显的差异。坚增运等^[15]通过熔盐法研究了 Al-25%Si 合金凝固收缩率随熔体温度处理和合金化元素的变化规律,发现该合金凝固收缩率随过热温度的升高先减小后增大,随降温后保温时间的延长而逐渐减小。冯新等^[16]开展了高 Nb-TiAl 合金多孔合金体积变化规律研究,揭示了该合金烧结过程元素扩散、相形成及孔隙率等对合金体积变化的影响。Yong 等^[17]研究了不同温度梯度下 Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金的收缩率与孔隙率,通过模拟与试验确定了该合金收缩孔隙率的 Niyama 准则的临界值,发现合金浇铸温度与熔体压力对收缩率与孔隙率无明显影响,而且通过对熔模铸造熔池状态的模拟,准确地计算了等效熔池中凝固收缩与相应缩孔的尺寸与形成位置。以上研究仅考虑温度梯度或铸件尺寸等单一因素对收缩率的影响,特别是在不同几何形状下铸件各个部位的冷却速度不同和收缩受阻情况下,其收缩率变化规律仍不清楚,同时目前针对高 Nb-TiAl 合金的收缩率研究也尚未报道,因此非常有必要对高 Nb-TiAl 合金收缩率问题展开研究。

本试验选用两种高 Nb-TiAl 合金成分,通过正交试验设计的方法,对几何形状、受阻收缩与自由收缩、铸件尺寸 3 个因素对合金收缩率的影响展开研究。使用 3D 打印的方法制备蜡模,采用熔模铸造工艺制备铸造试样,通过对 3D 打印蜡模尺寸与最终铸件尺寸的对比,得到合金的线收缩率,为高 Nb-TiAl 合金的熔模铸造工艺制定提供依据。

1 试验及方法

1.1 正交试验设计

如表 1 所示,为了充分衡量各因素对凝固收缩的影

响,设计了三因素两水平 $L_4(2^3)$ 的试验。从铸造实践案例来看,不同几何形状的收缩变形与缺陷分布各不相同,在本试验中针对影响因素 A 设计两种典型的几何形状,即代表旋转体的圆柱体与代表立方体的方型块;受阻收缩与自由收缩常表现出不同的收缩特征,在本试验中针对影响因素 B 设计了受阻与非受阻试样以观察其变形特点;不同尺寸的铸件因为散热速率不同,在凝固时收缩率往往相差较大,本试验中针对影响因素 C 设计不同厚度的试样来评估这一影响。通过正交试验设计,可以有效地减少试验组数,并通过数理统计的方法来衡量各个因素的影响,非常适合铸造这种影响因素较多的试验。

1.2 3D 打印蜡模制备

如表 2 所示设计 4 种蜡模,蜡模通过激光 3D 打印设备制备,一共制备 4 种试样(图 1)。为便于区分铸件,受阻收缩粗圆棒设计两种尺寸,其中图 1(b)为 Ti-45Al-8Nb 合金试样尺寸,图 1(c)为 Ti-48Al-7.5Nb 合金试样尺寸。因为 3D 蜡模制备出的试样与设计尺寸有误差,为最大限度消除误差,每种试样制备 4 个,并如图 1(f)所示使用游标卡尺测量长、宽、高等在不同位置的值后取平均值。

1.3 合金熔炼与浇注

本试验选用两种高 Nb-TiAl 合金成分 Ti-45Al-8Nb(原子分数)与 Ti-48Al-7.5Nb(原子分数)。试验所用材料采用 0 级海绵钛、铝豆和中间合金,压制电极后,采用真空感应凝壳炉与真空自耗电极电弧熔炼炉进行 3 次熔炼,获得 $\Phi 120 \times 240 \text{mm}$ 的铸锭。在 20kg 水冷铜坩埚真空感应熔炼炉进行重力浇注,熔炼功率约为 450kW。

表1 正交试验的因素水平

Table 1 Factor level of orthogonal experiment

水平	因素		
	A(几何形状)	B(是否受阻收缩)	C(尺寸)
1	方块	受阻收缩	薄/细
2	圆柱	自由收缩	厚/粗

表2 正交试验的测试方案

Table 2 Orthogonal experiment test plan

因素			相应蜡模
A(几何形状)	B(是否受阻收缩)	C(尺寸)	
1	1	1	受阻收缩薄方块
1	2	2	自由收缩厚方块
2	1	2	受阻收缩粗圆柱
2	2	1	自由收缩细圆柱

型壳使用氧化物陶瓷型壳,型壳预热温度 800℃。

1.4 铸件尺寸测量

为了保证测量数据的可比性,在蜡模测量位置刻有痕迹,使用游标卡尺测量蜡模及铸件相同位置刻痕附近的尺寸(图2)。由于受阻圆棒受阻方向上的高度几乎没有

变化,因此没有测量,自由收缩圆棒因与浇道相连,线切割后高度无法精确测得,因此也只测量直径变化。受阻收缩薄方块受阻方向上的高度几乎没有变化,因此没有测量。测量的尺寸有:(1)自由收缩细圆棒的直径;(2)受阻收缩粗圆棒的直径;(3)受阻收缩薄方块的长、宽;(4)自由收缩厚方块的长、宽、高。

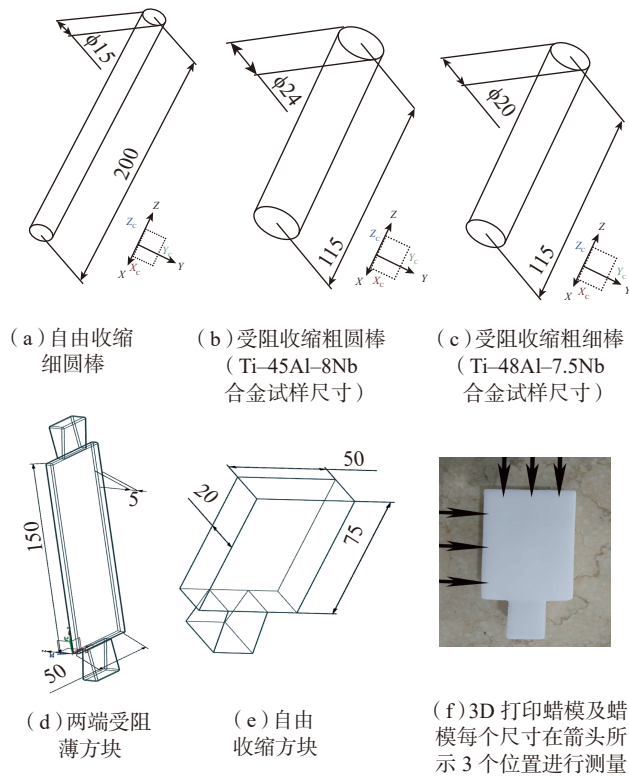


图1 4种收缩率3D打印蜡模

Fig.1 3D printing wax patterns of four kinds of shrinkage ratio

2 结果与讨论

2.1 凝固收缩率

浇注后获得的 Ti-45Al-8Nb 与 Ti-48Al-7.5Nb 合金收缩率试样铸件见图3,对4种铸造试样测量相应尺寸。将附件中尺寸数据取平均值后得到表3和4所示数据,其中线收缩量 $L_{线}=L_{蜡}-L_{铸}$,线收缩率

$$\psi_{线} = \frac{L_{线}}{L_{蜡}} \times 100\%, \psi_{均} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \psi_{线}$$

由表3、4可见, Ti-45Al-8Nb 熔模铸造线收缩率在 2.12%~3.28% 之间; Ti-48Al-7.5Nb 的线收缩率为 2.55%~3.39%,其中受阻收缩薄方块试样收缩过于剧烈产生变形,导致无法测出精确尺寸,因此不采用 5.33% 作为最大线收缩率。两种合金的线收缩率远高于 TC4 合金的 1.2%^[18]。这说明即使主合金元素含量接近,工艺状态相同,合金的线收缩率还是有一定的差别。

在铸件尺寸-线收缩率-线收缩量三者对比中,由图4、5可见,随着铸件尺寸的增大,线收缩量增大,但线收缩率却减小。例如图4中 X 轴上坐标为3处深灰色代表的(c)长和坐标为2处浅灰色代表的(b)直

表3 Ti-45Al-8Nb的线收缩数据

Table 3 Line shrinkage data of Ti-45Al-8Nb

试样		蜡模尺寸 $L_{蜡}/mm$				铸件尺寸 $L_{铸}/mm$				线收缩量 $L_{线}/mm$				线收缩率 $\psi_{线}/\%$				平均线收缩率 $\psi_{均}/\%$				
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4					
(a) 自由收缩细圆棒 4个试样	直径	14.91	14.98	14.95	15.00	14.65	14.73	14.60	14.59	0.26	0.25	0.35	0.41	1.74	1.67	2.34	2.73	2.12(±0.51)				
	(b) 受阻收缩粗圆棒 4个试样	直径	19.49	19.76	19.55	19.64	18.97	19.10	18.92	19.04	0.52	0.66	0.63	0.60	2.67	3.34	3.22		3.05	3.07(±0.29)		
		(d) 受阻收缩薄方块 4个试样	长	50.85	50.52	50.40	50.47	49.82	49.48	49.22	49.35	1.03	1.04	1.18	1.12	2.03	2.05		2.34		2.22	3.28(±1.72)
			宽	5.39	5.26	5.45	5.59	5.15	5.04	5.33	5.21	0.24	0.22	0.12	0.38	4.45	4.18		2.20		6.80	
(e) 自由收缩厚方块 4个试样	长	50.08	50.17	50.10	49.38	49.04	48.94	49.07	48.89	1.04	1.23	1.03	0.49	2.07	2.45	2.06	1.00	2.22(±0.72)				
	宽	20.16	20.34	20.00	20.21	19.67	19.76	19.46	19.45	0.49	0.58	0.54	0.76	2.43	2.85	2.70	3.76					
	高	75.38	75.51	75.59	75.35	73.92	74.31	73.78	74.27	1.46	1.20	1.81	1.08	1.93	1.61	2.39	1.43					

表4 Ti-48Al-7.5Nb的线收缩数据
Table 4 Line shrinkage data of Ti-48Al-7.5Nb

		蜡模尺寸 $L_{蜡}/mm$				铸件尺寸 $L_{铸}/mm$				线收缩量 $L_{线}/mm$				线收缩率 $\psi_{线}/\%$				平均线收缩率 $\psi_{均}/\%$
(a) 自由收缩细圆棒 4个试样	直径	14.95	14.97	15.05	14.84	14.54	14.50	14.41	14.52	0.41	0.47	0.64	0.32	2.74	3.13	4.25	2.16	3.07 (±0.88)
	(c) 受阻收缩粗圆棒 4个试样	直径	24.32	24.65	24.64	24.36	23.53	23.84	23.69	23.59	0.79	0.81	0.95	0.77	3.25	3.29	3.86	
(d) 受阻收缩薄方块 4个试样	长	50.35	50.60	50.38	50.23	49.23	49.11	49.07	19.24	1.12	1.49	1.31	0.99	2.22	2.94	2.60	1.97	5.33 (±3.61)
	宽	5.30	5.34	5.38	5.32	5.07	4.81	4.81	4.89	0.23	0.53	0.57	0.43	4.33	9.92	10.60	8.08	
(e) 自由收缩厚方块 4个试样	长	50.10	50.03	50.10	50.16	18.87	48.73	48.78	48.85	1.23	1.30	1.32	1.31	2.46	2.60	2.63	2.61	2.55 (±0.53)
	宽	20.04	20.26	20.12	20.06	19.59	19.68	19.45	19.38	0.45	0.58	0.67	0.68	2.24	2.86	3.33	3.38	
	高	75.22	75.25	75.37	75.35	74.12	73.69	73.32	73.70	1.10	1.56	2.05	1.65	1.46	2.07	2.72	2.19	

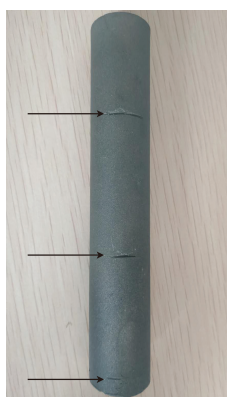


图2 铸件尺寸测量位置

Fig.2 Casting size measurement position



(a) Ti-45Al-8Nb

(b) Ti-48Al-7.5Nb

图3 两种合金铸造试样

Fig.3 Two kinds of alloys casting sample

径相比,前者的铸件尺寸比后者大100%,前者的线收缩量比后者大47.9%,但前者的线收缩率反而比后者小39.5%;而在同一试样的不同尺寸如Y轴坐标为5、6、7这3种颜色的尺寸数据,坐标为6处的粉色方块代表的尺寸中,铸件尺寸远小于5、7两处,线收缩量也小于5、7两处,但线收缩率远大于5、7两处,这说明线收缩率随着铸件尺寸增大而减小的情况不管是在两组试样之间还是同一试样的不同尺寸之间都是普遍存在的,但对于其机理的解释只停留在较大尺寸的铸件散热较慢导致收缩率较小的阶段,缺少更进一步的具体解释,所以这种线收缩率随着铸件尺寸增大而减小的情况有待进一步的试验探索分析。对受阻收缩方块与自由收缩方块的数据分析可见,受阻收缩的非受阻方向上的线收缩率比自由收缩的线收缩率高,例如受阻收缩方块的长、宽尺寸为非受阻方向,比自由收缩方块的长、宽尺寸的线收缩率高出44.8%~47.7%,这是因为受阻收缩试样在两端与浇注系统相连,在凝固时与浇注系统连接方向上无法进行收缩,只有在其他方向上进行收缩,在假设体收缩率相差不大的前提下,非受阻方向上的线收缩率就要偏大,而自由收缩试样可以在多个方向上进行收缩,所以线收缩率较小。

在两种合金的平均线收缩率值误差范围的比较中可见少数组的均方差较大,由图6所示。图6(a)中两种合金的蜡模与铸件误差表现出相同的变化规律,这说明铸件尺寸误差主要由蜡模误差引起;图6(b)中两种合金的收缩率误差值变化趋势一致,说明收缩率误差与合金种类无关,只与测量仪器精度有关,属于系统误差。测量时产生的随机误差可以通过增加同一种数据的测

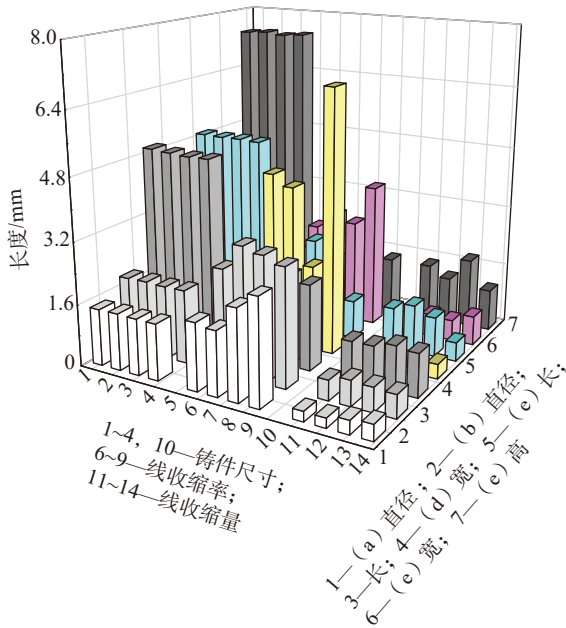


图4 Ti-45Al-8Nb的线收缩数据对比
Fig.4 Comparison of line shrinkage data of Ti-45Al-8Nb

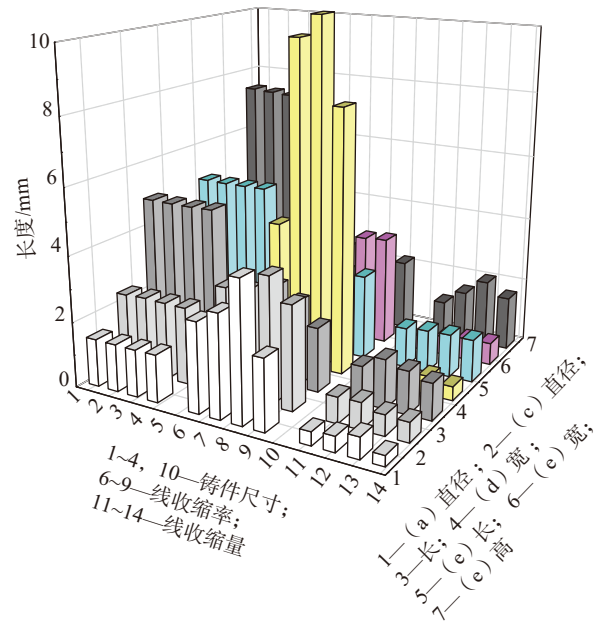
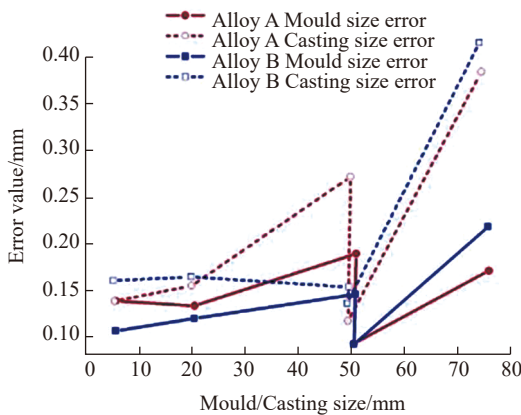
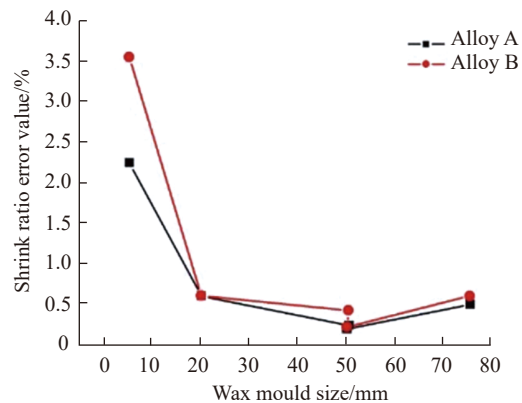


图5 Ti-48Al-7.5Nb的收缩率数据对比
Fig.5 Comparison of line shrinkage data of Ti-48Al-7.5Nb



(a) 铸件 / 蜡模误差值随尺寸变化关系



(b) 收缩率误差值与蜡模尺寸的关系

图6 测量与计算数据的误差分析
Fig.6 Error analysis of measured and calculated values

量次数(本次试验同一类数据测量取得了12个)来消除。通过误差分析可知本试验的误差与仪器精度关系较大,在可控的范围内。

2.2 正交试验表分析

由表5、6、7可知,对两种合金来说,3种因素中B因素的离差平方和S最大,说明B因素对平均线收缩率的影响最大,A因素的平均影响较小,说明本试验中的尺寸形状导致的冷却速度不同对合金的影响较小,而C因素的平均影响较大,仅次于B因素,可见铸件尺寸对线收缩率是有一定影响的,且线收缩率随着铸件尺寸增大而减小。

由金属熔体研究可知,熔融状态下处于一种长程无序的状态,此时原子排列无规律,密度较小。而随着冷

却凝固过程的进行,熔融状态的原子逐渐结合,依靠金属键与共价键相连接,结合更为紧密,密度更高,通过这一过程发生了密度的变化,通常在固液相变时金属的体积平均减少3.8%^[19],从而导致合金收缩。从另一方面来说,在合金冷却过程中,随着固态相变的发生,不同相之间的密度不同,也会导致合金的收缩。由TiAl相图可知,本文所选的两种高Nb-TiAl合金从高温到低温的相变为 $L \rightarrow L + \beta \rightarrow \beta \rightarrow \beta + \alpha \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \gamma + \alpha_2$,二者的高温相为 β 相, β 相是一种高温相,晶胞为bcc结构,致密度为0.68,而如图7所示,两种合金的铸态组织由 $\gamma + \alpha_2$ 片层与 γ 等轴晶组成,铸态组织为 γ 与 α_2 相;如图8所示, γ 相为fcc型 $L1_0$ 结构, α_2 相为hcp型 $D0_{19}$ 结构,

两者的致密度约为 0.74^[20], 可见在固态相变的过程中合金的体积会发生变化从而导致收缩。

普通钛合金收缩率较小, 如 Ti6Al4V 的收缩率不超过 1.2%, 相应地收缩量与各种由收缩引起的铸造缺陷并不严重, 但在 TiAl 尤其是高 Nb-TiAl 的熔模精密铸造实践中, 铸件在凝固过程中由于各个部位冷却速度各不相同引起应力从而导致变形开裂等缺陷, 从凝固的高温阶段到低温阶段依次会引起缩孔缩松、热裂、变形、冷裂、残余应力、残余应变等铸造缺陷。其中缩孔缩松的形成主要与合金的熔体特性有关, 如果一种合金的固液相线相差较大, 则在凝固过程中容易形成缩孔缩松。而在凝固期间枝晶形成, 枝晶间的金属液尚未充分补充进入枝晶间隙时, 如果合金收缩速度过大, 则容易在枝晶间较薄弱部位产生开裂。如图 9 所示, 两端受阻的铸造试样的缩孔缩松基本上集中于中心轴线处呈梨形分布, 这说

明受阻方向上的拉应力是造成缩孔缩松的原因, 而圆棒状试样的缩孔缩松分布则呈随机分布状态, 这也进一步印证了上文中收缩率的变化主要与是否受阻有关, 而与几何形状与尺寸关系较小。在金属完全凝固后, 在冷却过程中由于热胀冷缩和固态相变, 会造成体积的进一步变化。此过程产生的内应力导致铸件的变形, 当变形的程度小于弹性极限时, 内应力会残留在铸件内形成残余应力, 残余应力在后续加工和使用中会降低强度或产生变形。当变形的程度大于弹性极限时, 铸件会产生变形乃至开裂。因此, 研究高 Nb-TiAl 合金铸造过程中的收缩规律, 对降低铸造应力、减少铸造缺陷有重大的意义。

从试验数据可见, 不同几何形状对收缩率的影响极其微小, 而最需要考虑的是铸件受阻收缩的情况, 特别是在薄壁件受阻收缩时, 不仅因为冷却速率大, 在其最小尺度方向上的收缩率偏大, 而且会因收缩产生极大的应力,

表5 两种合金的正交试验结果
Table 5 Orthogonal experiment result of two alloys

因素			平均线收缩率	
A (几何形状)	B (是否受阻)	C (厚度)	Ti-45Al-8Nb	Ti-48Al-7.5Nb
1	1	1	3.28	5.33
1	2	2	2.22	2.55
2	1	2	3.07	3.39
2	2	1	2.12	3.07

表6 Ti-45Al-8Nb正交试验的方差分析
Table 6 Variance analysis of Ti-45Al-8Nb orthogonal experiment

因素	线收缩率		
	k_1	k_2	S
A	6.50	5.19	0.43
B	6.35	4.34	1.01
C	5.40	5.29	0.01

表7 Ti-48Al-7.5Nb正交试验的方差分析
Table 7 Variance analysis of Ti-48Al-7.5Nb orthogonal experiment

因素	线收缩率		
	k_1	k_2	S
A	7.88	6.46	0.50
B	8.72	5.62	2.40
C	8.40	5.94	1.51

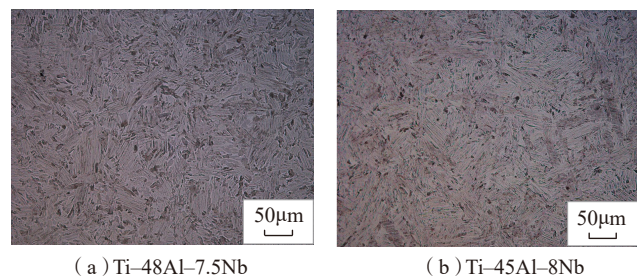


图7 两种合金铸态的光学显微组织
Fig.7 Optical microstructure of two as-cast alloys

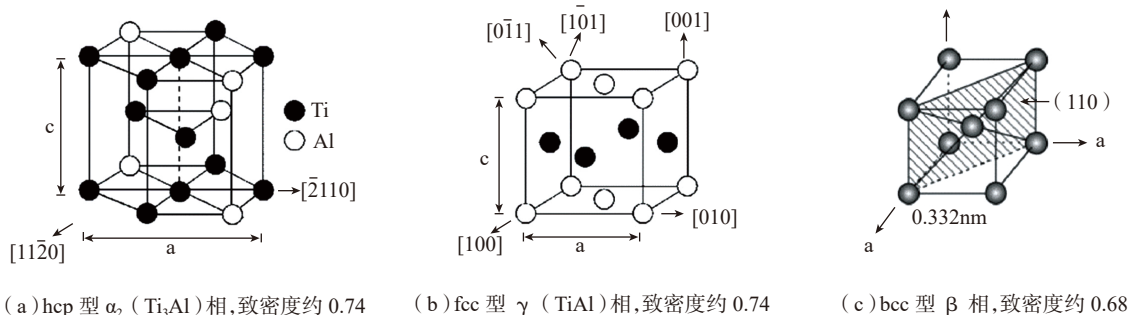


图8 3种常见的TiAl合金室温相
Fig.8 Three major room temperature phase of TiAl alloys



(a) 两端受阻收缩试样 X 光图, 白亮色缩孔缩松如黑线所示呈梨形分布
(b) 自由收缩试样 X 光图, 白亮色缩孔缩松呈随机分布

图9 试样内部缩孔缩松分布情况
Fig.9 Internal shrinkage distribution of samples

甚至导致铸件变形开裂。另一方面,铸件收缩不仅要考虑合金自身,还要考虑到铸件与型壳的作用,应针对每个铸件特点,依据其受阻收缩的情况与散热速率,针对性设计浇注系统与型壳结构,从而保证铸件的质量。

3 结论

(1) Ti-45Al-8Nb 比 Ti-45Al-7.5Nb 的平均线收缩率略高,二者在 2.12%~3.39% 之间,与 Ti4822 的 2.09%~3.11% 接近,但远高于 TC4 合金的 1.2%,所以在高 Nb-TiAl 的铸造中就要更加注重合金的收缩对铸件质量的影响。

(2) 几何形状与尺寸大小对收缩率影响较小,是否为受阻收缩影响较大。这说明自由收缩过程基本上各向同等收缩,而受阻收缩情况下,非受阻方向会表现出比自由收缩更强烈的收缩倾向。

(3) 随着尺寸的增加,收缩量增大,收缩率逐渐减小。试验中测得铸件某一尺寸 A 比 B 大 100% 时, A 的线收缩量比 B 大 47.9%,但 A 的线收缩率反而比 B 小 39.5%。

参考文献

[1] APPEL F, OEHRING M, WAGNER R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys[J]. *Intermetallics*, 2000, 8(9-11): 1283-1312.

[2] CLEMENS H, MAYER S. Design, processing, microstructure, properties, and applications of advanced intermetallic TiAl alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2013, 15(4): 191-215.

[3] 陈国良. 金属间化合物结构材料研究现状与发展 [J]. *材料导报*, 2000, 14(9): 1-5.
CHEN Guoliang. R&D status and prospect on the ordered structural intermetallics[J]. *Materials Review*, 2000, 14(9): 1-5.

[4] 陈玉勇, 肖树龙, 孔凡涛. 高温钛合金及 TiAl 金属间化合物的精密铸造技术及应用前景 [J]. *金属学报*, 2002, 38(z1): 39-44.
CHEN Yuyong, XIAO Shulong, KONG Fantao. Application and investment casting of high temperature titanium alloys and TiAl intermetallics[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(z1): 39-44.

[5] 李飞, 王飞, 陈光, 等. 熔模精密铸造 TiAl 基金属间化合

物研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2010, 29(2): 24-30.

LI Fei, WANG Fei, CHEN Guang, et al. Review of the investment casting of TiAl based intermetallic alloys[J]. *Materials China*, 2010, 29(2): 24-30.

[6] KIM Y W, KIM S L. Advances in gammalloy materials—processes—application technology: successes, dilemmas, and future[J]. *JOM*, 2018, 70(4): 553-560.

[7] LIN J P, ZHAO L L, LI G Y, et al. Effect of Nb on oxidation behavior of high Nb containing TiAl alloys[J]. *Intermetallics*, 2011, 19(2): 131-136.

[8] CHEN G L, XU X J, TENG Z K, et al. Microsegregation in high Nb containing TiAl alloy ingots beyond laboratory scale[J]. *Intermetallics*, 2007, 15(5-6): 625-631.

[9] CHEN G L, ZHANG W J, LIU Z C, et al. Microstructures and properties of high-Nb containing TiAl-base alloys[J]. *Intermetallics*, 2002, 10(7): 653-659.

[10] 潘利文, 郑立静, 张虎, 等. Niyama 判据对铸件缩孔缩松预测的适用性 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(12): 1534-1540.
PAN Liwen, ZHENG Lijing, ZHANG Hu, et al. Applicability of shrinkage porosity prediction for casting with Niyama criterion[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(12): 1534-1540.

[11] 丁浩, 傅恒志, 刘忠元, 等. 凝固收缩补偿与合金的热裂倾向 [J]. *金属学报*, 1997, 33(9): 921-926.
DING Hao, FU Hengzhi, LIU Zhongyuan, et al. Compensation of solidification contraction and hot cracking tendency of alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1997, 33(9): 921-926.

[12] ZHENG W, FAN Z, WANG D, et al. Solidification shrinkage research of zL114A aluminum alloy components based on 3D rapid printing technology[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2017, 6(17).

[13] 魏战雷, 任贵娟, 李建崇, 等. Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金铸造收缩特性研究 [J]. *精密成形工程*, 2018, 10(3): 18-21.
WEI Zhanlei, REN Guijuan, LI Jianchong, et al. Contraction characteristics of Ti-48Al-2Nb-2Cr casting alloy[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2018, 10(3): 18-21.

[14] 薛冠霞, 长海博文, 赵州星, 等. 7xxx 系铝合金凝固过程中收缩行为的测定 [J]. *有色金属加工*, 2016, 45(4): 18-23.
XUE Guanxia, NAGAUMI Hiromi, ZHAO Zhouxing, et al. Study of determination of contraction behavior of 7xxx aluminum alloys during solidification[J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2016, 45(4): 18-23.

[15] 坚增运, 党博, 常芳娥, 等. 熔体温度处理和合金成分对铝硅合金凝固收缩率的影响 [J]. *西安工业大学学报*, 2014(2): 124-130.
JIAN Zengyun, DANG Bo, CHANG Fang'e, et al. Effect of the melt temperature treatment and alloy composition on the solidification shrinkage of Al-Si alloy[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2014(2): 124-130.

[16] 冯新, 林均品, 张国庆, 等. 高 Nb-TiAl 多孔合金的制备及其焊接接头孔隙结构与性能 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(12): 29-33, 39.
FENG Xin, LIN Junpin, ZHANG Guoqing, et al. Fabrication of high Nb containing TiAl porous alloy and pore structure and property of its welded joint[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(12): 29-33, 39.

[17] 李邦盛, 王狂飞, 吴士平, 等. TiAl 合金熔模精铸件缩孔形成的数值模拟及预测 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2005(5): 280-283, 254.
LI Bangsheng, WANG Kuangfei, WU Shiping, et al. Numerical simulation for shrinkage hole (porosity) formation in TiAl alloy product in investment casting[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2005(5): 280-283, 254.

(下转第100页)

32-37.

[5] 张国庆, 杨永强, 张自勉. 激光选区熔化成型零件支撑结构优化设计[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 2-8.

ZHANG Guoqing, YANG Yongqiang, ZHANG Zimian. Optimal design of support structures in selective laser melting of parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 2-8.

[6] 陈少文. 选区激光熔化技术中零件支撑自动生成算法及实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

CHEN Shaowen. Automatic generation algorithm and implementation of support structures in selective laser melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016.

[7] 卞宏友, 刘伟军, 王天然, 等. 基于 STL 模型垂直切片的支撑自动生成算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(2): 212-215.

BIAN Hongyou, LIU Weijun, WANG Tianran, et al. Support generation algorithm based on the vertical slice of STL model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(2): 212-215.

[8] 沈威, 陶孟仑, 李立杰, 等. 快速成型支撑结构设计的算法研究[J]. 武汉: 武汉理工大学学报, 2014, 36(6): 63-68.

SHEN Wei, TAO Menglun, LI Lijie, et al. Study on algorithm of support generation in rapid prototyping[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(6): 63-68.

[9] 王彦云, 陈鸿, 谢明师, 等. FDM 快速成型支撑结构自动生成算法的研究[J]. 电子技术应用, 2015, 41(8): 146-148.

WANG Yanyun, CHEN Hong, XIE Mingshi, et al. Research on algorithm of the automatic support generation for FDM rapid prototyping[J]. Application of Electronic Technique, 2015, 41(8): 146-148.

[10] 李东方. 基于激光选区熔化成型的支撑结构优化及工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.

LI Dongfang. Optimization of support structure and technology research based on selective laser melting[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.

[11] 张凯, 刘婷婷, 张长东, 等. 基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 135-141.

ZHANG Kai, LIU Tingting, ZHANG Changdong, et al. Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 135-141.

通讯作者: 孟月梅, 研究员级高工, 研究方向为计算机辅助软件研究与开发, E-mail: meng625_105@163.com.

(责编 知舟)

(上接第78页)

[18] 姜贯涛, 孙建科, 杨学东, 等. 铝和钼对铸造钛合金铸造性能的影响[J]. 铸造, 2003, 52(12): 1163-1165.

LOU Guantao, SUN Jianke, YANG Xuedong, et al. Effects of Al and Mo content on castability of cast titanium alloys[J]. Foundry, 2003, 52(12): 1163-1165.

[19] 田孝道, 罗格里克·格斯里. 液态金属的物理性能[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

TAKAIMCHI L D, Guthrie T I L. The physical properties of liquid metals[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[20] 张永刚. 金属间化合物结构材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

ZHANG Yonggang. Structural intermetallics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.

通讯作者: 南海, 研究员, 研究方向为航空航天、兵器等领域的钛合金、钛铬合金精密成形技术, E-mail: nanhai531@yahoo.com.

(责编 一元)

(上接第93页)

[20] YAN L, YUAN S, LIU Q. Influence of minimum quantity lubrication parameters on tool wear and surface roughness in milling of forged steel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3): 419-429.

[21] ALJUWAYHEL N F, NELLIS G F, KLEIN S A. Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 442-450.

[22] 陈日耀. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 57-59.

CHEN Riyao. The theory of metal cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 57-59.

[23] GUPTA K, LAUBSCHER R F. Sustainable machining of titanium alloys: a critical review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(14): 2543-2560.

[24] SUN S, BRANDT M, DARGUSCH M S. Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(7-8): 561-568.

[25] 中山一雄. 金属切削加工理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985: 137-138.

NAKAYAMA K. The theory of metal machining[M]. Beijing: China Machine Press, 1985: 137-138.

通讯作者: 袁松梅, 教授, 博士生导师, 研究领域为先进制造, E-mail: yuansm@buaa.edu.cn.

(责编 知舟)