

离心场对钛合金铸造性能的影响

历长云¹, 崔红保¹, 王狂飞¹, 米国发¹, 吴士平², 郭景杰², 傅恒志^{1,2}

(1. 河南理工大学, 河南 焦作 454000)

(2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在立式离心场下和重力场下对石墨型钛合金铸件在铸造过程的充填及凝固情况进行研究。结果表明: 在立式离心场下钛合金熔体的铸造性能好, 其流动性和充填性得到很大改善; 尤其对 3 mm 壁厚薄壁件, 在重力场下由于充填阻力大于充填力, 合金熔体无法完全充填铸型, 而在离心场下可以实现全部充填, 且最小壁厚可达到 0.3 mm。此外, 离心场下由于离心力和科氏力的共同作用, 铸件的缺陷明显减少, 且随铸型转速的增加而不断减小。

关键词: 立式离心场; 钛合金; 充填; 凝固; 铸造性能

中图分类号: TG319

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)05-0803-04

钛合金密度小、比强度高、抗腐蚀性能强。因而在航空、航天、舰船上得到广泛的应用^[1~4]。近年来, 由于钛的民用推广, 在建筑、汽车、海洋工程、医疗、造纸、石油工业和体育用品等方面的应用研究开始增多, 如钛合金假牙、人工关节、高尔夫球头以及眼镜框等^[5~9]。

虽然钛合金被广泛应用到航空、航天及民用领域, 但是, 由于钛合金件的生产成本较高, 使得钛合金不能大批量的应用在这些领域。为了降低钛合金件的生产成本, 目前, 净成形的铸造方式得到国内外很多研究者的重视。但是, 钛合金熔体本身粘度大、流动性差、且在高温条件下容易和其他物质发生化学反应, 导致钛合金熔体的铸造性能较差。因此, 国内外很多学者对钛合金铸造过程都做了大量深入的研究, 包括流动性的研究, 凝固缺陷的分析等。日本学者 K.Watanabe^[10]对多种钛合金材料的研究发现, Ti-Cu 合金充不满型腔是因为其流动性差, 粘制力强的缘故, 提出流动方向不仅仅受控于离心力, 同时也受控于浇道内合金流动性的变化。K. Liu^[11]在研究 TiAl 基排气阀离心铸造中提出, 过热度越高, 则充填率越好。德国学者 A Choudhury 和 M Blum^[12]研究发现, 铸型加热 1000 °C 可以避免铸件中缩孔缺陷的产生。前人的研究主要是针对铸造性能的某一方面进行的, 且多数只给出定性预测。本研究通过实验手段, 研究了立式离心场下石墨型钛合金熔体的铸造性能。

设计了钛合金柱状件、楔形件以及薄壁件, 其位置以及铸型的尺寸如图 1 所示。柱状件的设计是为了考察立式离心场下钛合金铸件缺陷形成规律, 梯形流动性试件的设计是为了考察钛合金熔体的流动性及充填性, 楔形件的设计是为了考察钛合金的充填尖角的能力。针对所设计的钛合金铸件, 分别研究了钛合金熔体在重力场和离心场下的充填状态及铸造性能, 其中离心场下转速分别为 160 和 280 r/min。

3 种铸件的尺寸分别如图 2 所示。其中薄壁件最厚处只有 3 mm, 为了考察熔体充填薄壁铸件尖角的能力, 其截面设计为梯形形状。铸型上设计了两套相同的铸件型腔, 主要是考察在立式离心场下, 熔体的充填顺序以及旋转半径对熔体充填及铸件缺陷形成的影响。

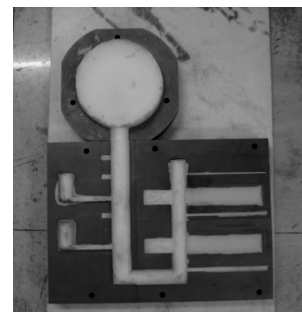


图 1 立式离心铸造石墨型铸型

Fig.1 The graphite mold of vertical centrifugal casting

1 实验

收稿日期: 2008-05-19

基金项目: 河南理工大学博士启动基金(B2008-27)

作者简介: 历长云, 女, 1978 年生, 博士, 讲师, 河南理工大学材料学院, 河南 焦作 454000, 电话: 0391-3983353, E-mail:lucy1226@126.com

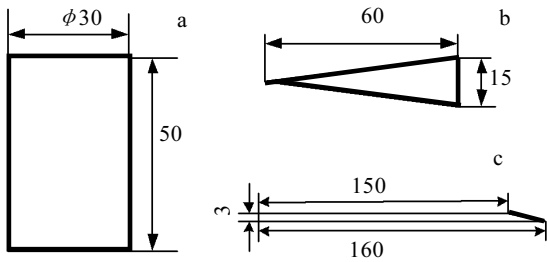


图 2 3 种钛合金铸件尺寸

Fig.2 Schematic drawing of titanium alloy castings: (a) cylindrical casting, (b) wedge casting, and (c) thin-walled casting

采用的炉料是海绵钛和 Al-85%V 中间合金。由于石墨和钛合金反应弱，因此采用 T5 石墨作为造型材料，其铸型结构如图 1 所示。由于钛合金难熔，且化学活性高，在熔融状态下几乎能与所有耐火材料和气体反应，这大大增加了钛合金的铸造难度。因此，钛合金熔炼采用德国产水冷铜坩埚真空感应熔炼炉 (ISM) 进行熔炼，其装置示意图如图 3 所示。首先将配料放入坩埚内，海绵钛放入底部，中间放入铝钒合金，上面放入纯铝块；然后关闭舱门，通过机械泵抽真空到 10 Pa，然后加热 40 min 后到合金熔化开始保温，同时打开旋转装置，这样做的目的是为了保证合金熔体浇入铸型前，铸型装置已经进入平稳旋转状态。然后旋转倾斜装置，合金熔体通过导流器 5 进入放在旋转装置上的铸型 6 里面，同时保证铸型继续旋转 5 min，以便使合金熔体能够充分充填到铸型里面。

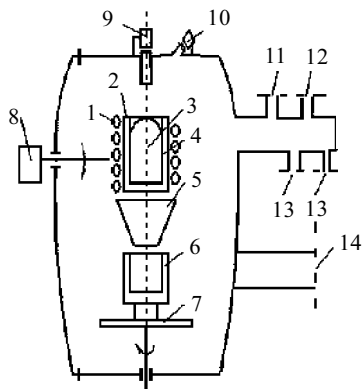


图 3 ISM 设备示意图

Fig.3 Scheme of ISM apparatus: (1) induction coil; (2) water cooled copper crucible; (3) melt; (4) skull; (5) guide plate; (6) mould; (7) centrifugal turntable; (8) dump device; (9) heat radiation pyrometer; (10) camera position; (11) inert gas entry hole; (12) air entry hole; (13) vacuum gage interface; (14) vacuum system interface

在重力场和离心场下研究钛合金的铸造性能，并且在离心场下铸型的旋转方向为逆时针方向，铸型温度为常温 25 °C，其工艺参数如表 1 所示。

表 1 钛合金铸造工艺参数

Table 1 Technological parameters used in the experiments

Castings	Gravity field	Centrifugal field
Rotational velocity /r·min ⁻¹	0	160 and 280
Rotational direction	/	counter-clockwise
Temperature of mould/°C	25	25

2 结果与讨论

图 4 分别给出了钛合金熔体在重力场下和立式离心场下的成形状态。通过比较图 4a 和图 4b，可以非常清晰的看到在重力场下，合金熔体只能实现部分充填，浇不足现象非常严重，对于 3 mm 厚的梯形薄壁件，重力场下无法实现成形，并且直浇道内存留大量钛合金；然而在立式离心场下，铸件成形良好，薄壁件实现全部充填，最薄处可达 0.3 mm，剖开铸件，内部缩松较少。且直浇道内钛合金存留较少，多数钛合金熔体通过离心力和柯氏力的作用进入型腔。

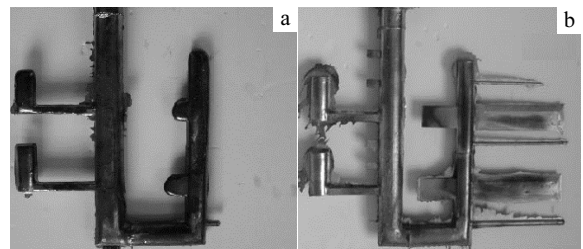


图 4 不同铸造工艺条件下的成形状态

Fig.4 Formation results of titanium alloy under different casting technologies: (a) gravity casting and (b) vertical centrifugal casting

2.1 钛合金缺陷形成分析

图 5 分别给出重力场下以及离心场下柱形铸件成形状态及缺陷位置。由图 5 可以清晰的看到，铸件在重力场下无法完全成形，外部形成很大的圆角，且铸件表面形成较大凹形缺陷(如图 5a 所示)。

由图 5b 可以看出，铸件右上方存在较大的缩气孔。说明钛合金熔体在充填过程中有气体卷入，较大的缩孔之所以出现在铸件的右上角，这和熔体的充填有关系，在立式离心场下，型腔中熔体的自由液面是以旋转轴为中心的弧状液面，熔体的等压面也是弧状，所以在铸型的充填过程中，其右上角是最后充填位置，

且其压力也是最小值, 则卷入熔体内部的气体被排挤到该处而无法排出铸型, 较小的压力导致熔体无法进一步补缩, 所以缺陷位置出现在铸件距离旋转中心较近处。比较图 5b 和 5c 可以发现, 铸件缺陷随转速的增加而减小, 这是由于转速较高, 熔体所受的离心力和柯氏力较大, 补缩效果好, 同时卷入的气体可以较迅速排出铸型。

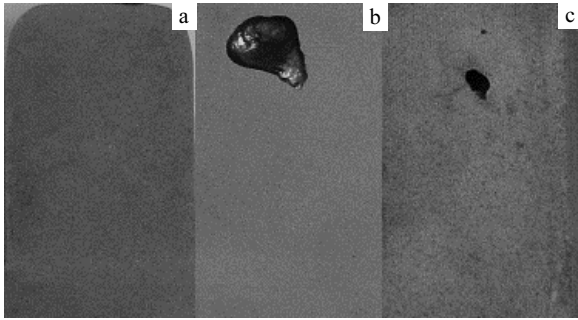


图 5 不同转速下钛合金柱形铸件的缺陷位置

Fig.5 Position of defects of titanium alloy castings at different rotational velocities: (a) 0 r/min, (b)160 r/min, and (c) 280 r/min

2.2 钛合金薄壁件成形分析

图 6 给出了在立式离心场下, 钛合金薄壁件在不同转速下的成形状态。



图 6 立式离心场下钛合金薄壁件不同转速下的成形状态

Fig.6 The forming state of thin-walled titanium alloy casting at different rotational velocities: (a) 160 r/min and (b) 280 r/min

由图 6b 可以看出, 钛合金薄壁件可以完全充填, 且尖角处充填效果良好。当转速为 160 r/min 时, 尖角处充填可达到 0.4 mm, 当转速为 280 r/min 时, 尖角处充填可达到 0.3 mm, 薄壁件的成形效果随转速的增

加而增加。把钛合金薄壁件从中心做线切割可以看到, 薄壁件内部有少量缩松, 转速的改变对钛合金薄壁件的内部缩松的影响不大, 这主要是由于在实验过程中采用导热效果比较好的石墨型铸型, 在常温下浇注, 且铸件只有 3 mm 壁厚, 导致合金熔体充填铸型后由于铸型的激冷作用而迅速凝固, 熔体无法补缩。对于薄壁件而言, 转速的增加只能使合金熔体迅速充满型腔, 成形效果较好, 对内部缺陷的影响较小。

2.3 钛合金熔体充填性分析

图 7 为不同转速条件下钛合金充填尖角的状态。由图 7 可以看出, 钛合金熔体在重力条件下充填尖角的能力最差, 随着转速的增加, 尖角处充填能力逐渐增加。

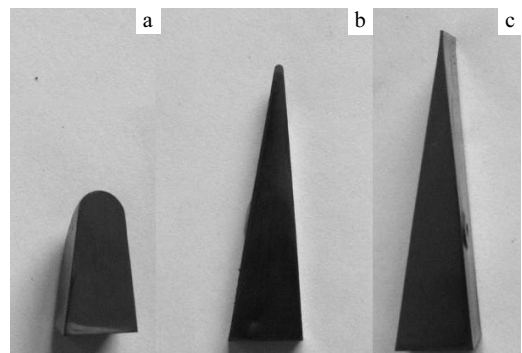


图 7 不同转速下钛合金充填尖角的状态

Fig.7 Forming state of wedge titanium alloy casting at different rotational velocities: (a)0, (b) 160 r/min, and (c)280 r/min

3 结 论

- 1) 合金熔体在立式离心场下充填效果好于重力场。
- 2) 在立式离心场下, 缩孔位置往往出现在距离旋转中心较近处; 铸件缺陷体积随转速的增加而减小。
- 3) 对于 3 mm 壁厚的钛合金薄壁件, 在重力场下无法成形; 在离心场下成形效果随转速的增加而增加, 铸型转速对薄壁件内部缺陷的影响较小。
- 4) 在重力场下, 钛合金熔体充填尖角的能力较差, 合金熔体充填性以及流动性随铸型转速的增加而增加。

参考文献 References

- [1] Gorynin I V. *Materials Science and Engineering A*[J], 1999, 263: 112

- [2] Boyer R R. *Materials Science and Engineering A*[J], 1996, 213: 103
- [3] Leyens C, Peters M. Translated by Chen Zhenhua(陈振华). *Titanium and Titanium Alloy*(钛与钛合金)[M]. Beijing: Publishing House of Chemical Industry
- [4] Nan Hai(南海), Xie Chengmu(谢成木). *China Foundry Equipment and Technology*(中国铸造装备与技术)[J], 2003(6): 1
- [5] Schutz R W, Watkins H B. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 243: 305
- [6] Lian Z, Guozhen L. *Material Science and Engineering A*[J], 1998, 243: 294
- [7] Bania P J, Hutt A J, Adams R E. *Titanium'92 Science and Technology*[C]. Warrendale: TMS, 1993: 2787
- [8] Thilo Brenner, Thomas Glatzel, Roland Zengerle *et al.* *7th International Conference on Miniaturized Chemical and Biochemical Analysis Systems*[C]. Beijing: [S.I.], 2003: 903
- [9] Eylon D, Keller M M, Jones P E. *Intermetallics*[J], 1998, (6): 703
- [10] Watanabe K, Miyakawa O, Takada Y *et al.* *Biomaterials*[J], 2003, 24: 1737
- [11] Liu K, Ma Y C, Gao M *et al.* *Inermetallics*[J], 2005, 13: 925
- [12] Choudhury A, Blum M. *Vacuum*[J], 1996: 829

Effect of Centrifugal Field on Casting Characteristic of Titanium Alloy

Li Changyun¹, Cui Hongbao¹, Wang Kuangfei¹, Mi Guofa¹, Wu Shiping², Guo Jingjie², Fu Hengzhi²

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

(2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The filling and solidification process of titanium alloy melt in graphite mold was investigated in vertical centrifugal field and in gravity field, respectively. The results show that the process in the former is better than that in the later. The flowability and the filling ability of the melt in the centrifugal field are much improved, it is especially favorable for producing the castings with 3 mm thin wall. The mold can not be fully filled by the melt in the gravity field, in such case the filing resistance is larger than filling force. The full filling can be realized in the centrifugal field. By which the minimum wall thickness of a casting can reach 0.3 mm In addition, under the common action of Coriolis force and centrifugal force, the defects of titanium alloy casting decreases with increasing of rotational velocity.

Key words: vertical centrifugal casting; filling; titanium alloy; solidification; casting characteristic

Biography: Li Changyun, Ph.D., Lecturer, School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, P. R. China, Tel: 0086-391-3983353, E-mail: lucy1226@126.com