

# 燃气涡轮二级导向器再造加工基准方法

姚欧阳<sup>1</sup>, 毛建中<sup>1</sup>, 颀运佳<sup>2</sup>, 张红丽<sup>2</sup>, 覃事鹏<sup>2</sup>, 叶利丽<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 中国航发南方工业有限公司, 湖南株洲 412002)

**摘要:** 针对燃气涡轮二级导向器叶片形状复杂, 加工基准多次转换导致加工质量差, 生产效率低的现状, 提出一种再造加工基准方法: 寻找一种低熔点合金配方并设计相应铸型, 实现导向器叶片在铸型中的定位, 并在其周围浇注形状规则的合金块作为加工基准。该目标合金具有较低的熔点、好的液态流动性、凝固后具有较大的硬度, 可保证机加工时装夹稳定、同时具有较高的脆性以保证能够实现机械破碎, 脱离导向器叶片; 优化后的铸型可保证导向器叶片的定位精度要求以及机加工的精度要求, 且避免产生浇注缺陷。

**关键词:** 铸型; 金属型铸造; 加工基准

目前航空发动机叶片加工工艺流程复杂, 需根据叶片型面的非规则几何特征设计专用装置, 加工基准多次转换, 造成叶片加工质量不稳定、生产效率低的现状, 因此, 开辟新的叶片加工工艺方法已变得刻不容缓。

随着机械加工设备自动化技术日益成熟, 叶片自动化生产已成为一种新的发展趋势, 而要实现生产自动化就必须解决叶片加工基准的问题<sup>[1]</sup>。传统的叶片基准确定方法主要包括机械夹紧法、浇注合金法和线切割法, 这些方法都需要对叶片本身进行二次加工, 加工过程繁琐并容易对叶片毛坯造成难以逆转的改动。而结合六点定位原理和低熔点合金浇注的方法再造加工基准, 并以此基准装夹定位设计适应叶片自动化加工的装置夹具, 可以合并加工工序, 缩短工艺流程和减少装夹次数, 从而提高叶片的加工质量和效率<sup>[2]</sup>。

针对上述问题与现状, 提出一种再造加工基准方法: 即寻找一种合金配方并设计一种铸型以在导向器叶片周围浇注形状规则的合金块作为加工基准。目标合金应具备以下性能与特点: ①较低的熔点防止浇注时温度过高, 对导向器叶片造成不可逆的损伤; ②好的液态流动性以保证浇注时快速充型; ③凝固后应具有较大的刚度以保证机加工时装夹稳定; ④具有较高的脆性以保证能够机械破碎<sup>[3]</sup>; ⑤合金液在浇注和凝固过程中不会对导向器叶片产生侵蚀; ⑥能够进行重熔回收利用, 节省成本, 减少污染。

所设计铸型应保证导向器叶片在其中定位可靠, 浇注所得加工基准满足精度要求, 避免出现缩松缩孔等铸造缺陷, 所得加工基准能在导向器叶片加工完成后进行机械破碎拆除。

## 1 总体分析设计

### 1.1 导向器叶片结构分析

燃气涡轮二级导向器叶片结构复杂, 且内部存在孔洞, 需要进行机加工的表面为上下表面与两侧面, 如图1中深色部分所示, 导向器叶片本身难以夹持, 加工时基准转换次数繁多, 对加工质量和生产效率有较大负面影响。

### 1.2 低熔点合金配方

经过多次试验探索, 发现Zn-2Al-2Mg该种合金能够较好地满足性能需求<sup>[4]</sup>, 如

作者简介:

姚 欧阳 (2000-), 硕士生, 主要研究方向为非标装备设计与仿真。E-mail: y15190361771@163.com

中图分类号: TG132.3<sup>+1</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

03-0337-06

基金项目:

燃气涡轮二级导向器加工基准再造技术研究。

收稿日期:

2023-04-11 收到初稿,

2023-12-30 收到修订稿。

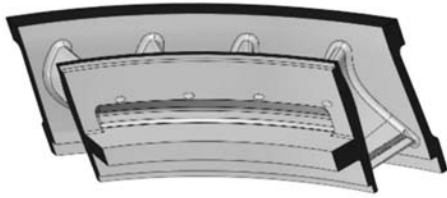


图1 导向器叶片模型  
Fig. 1 Guide model

表1所示：以Zn作为基底合金保证其熔点较低，略高于420℃；其液态流动性良好，能满足充型需求；且其晶格为密排六方结构，滑移系少，脆性好；凝固后硬度为HV160左右，重熔3次后硬度维持在HV130以上，如表2所示；且重熔浇注时保持了良好的流动性，浇注过程中充型快速完整，重熔三次后浇注的加工基准如图2所示。

表1 Zn-2Al-2Mg性能  
Table 1 Properties of Zn-2Al-2Mg

熔点/℃	流动性	硬度HV	脆性	重复使用性
420	好	160	好	好

表2 不同重熔次数下合金维氏硬度  
Table 2 Vickers hardness of alloy after different remelting times

重熔次数	五次硬度检测平均值HV
0	162.8
1	133.4
2	136.8
3	135.2

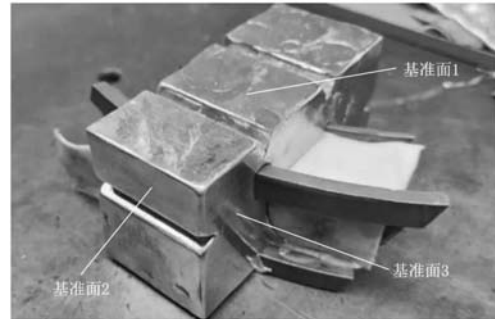


图2 重熔三次后浇注的加工基准  
Fig. 2 Machining benchmark of pouring after three-times remelting

为考察Zn-2Al-2Mg合金液在浇注时是否会对导向器叶片产生侵蚀，进行浇注试验。图3为金相显微镜下Zn-2Al-2Mg铸锭与导向器叶片边缘接触处的图像，显然，铸锭与导向器叶片微观组织边界清晰，合金液未对导向器叶片造成侵蚀。



图3 铸锭与导向器叶片边缘接触处  
Fig. 3 Contact area between the ingot and the guide

对导向器叶片/铸锭试样截面进行电镜分析与线扫描分析，结果如图4与图5所示。可以看出：导向器叶片主要元素Co、Cr、Ni分布变化不大；且铸锭主要元素Zn、Al、Mg未与导向器叶片发生混合。

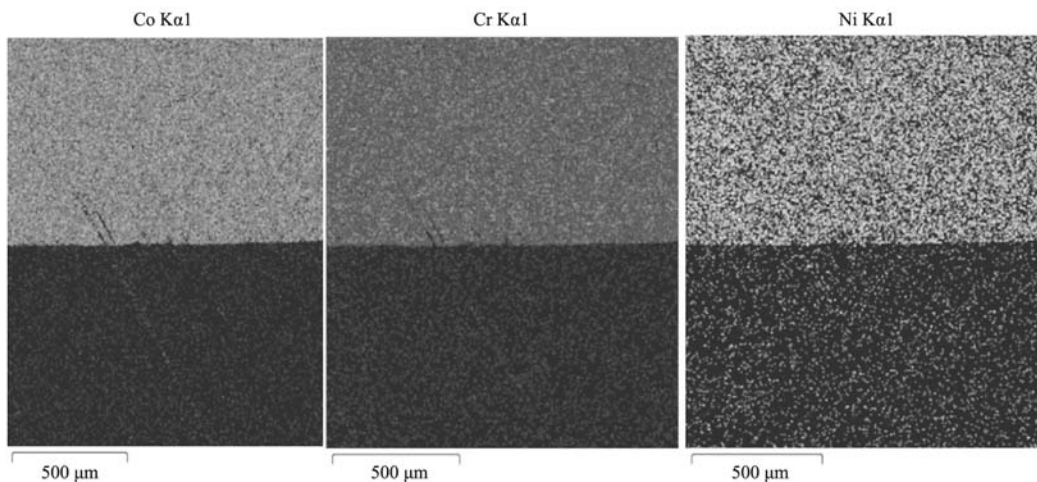


图4 铸锭与导向器叶片元素面扫描  
Fig. 4 Element surface scanning of ingot and guide

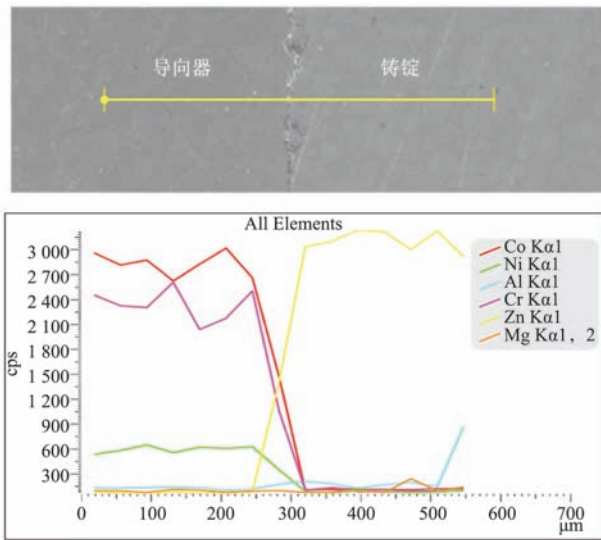


图5 铸锭与导向器叶片元素线扫描  
Fig. 5 Element line scanning of ingot and guide

根据以上性能数据与验证，最终选定Zn-2Al-2Mg为目标合金材料。

### 1.3 铸型设计

由于Zn-2Al-2Mg合金固液相点位于380~390℃，故选择浇注温度为450℃；相应的，铸造方案选择金属型重力铸造，铸型材料选择H13，其具有高的淬透性和抗热裂能力、碳和钒含量较高，耐磨性好、且具有良好的耐热性。

考虑到导向器叶片零件内部存在孔洞，为避免浇注时低熔点合金液进入导向器叶片内部孔洞，需先用耐火纸与耐火泥进行填充，填充后的导向器叶片如图6。此外，为保证导向器叶片在铸型中的定位，需使用两个定位块放置于导向器叶片两端，铸型爆炸图与装配图如图7与图8所示。

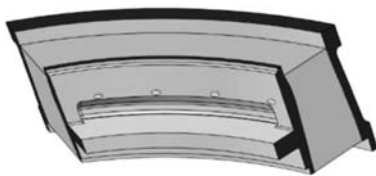


图6 填充处理后的导向器叶片  
Fig. 6 Guide after filling

### 1.4 浇注工艺

为了更加直观的表现浇注过程，计划采用外挂式的浇注系统。熔炼完成后的合金液浇入铸型后，依靠重力经由直浇道、横浇道、内浇道流入铸型型腔底部，并逐渐上涨充填整个型腔，当合金液液面高度达到冒口位置时，继续将少量合金液从冒口处浇入，及

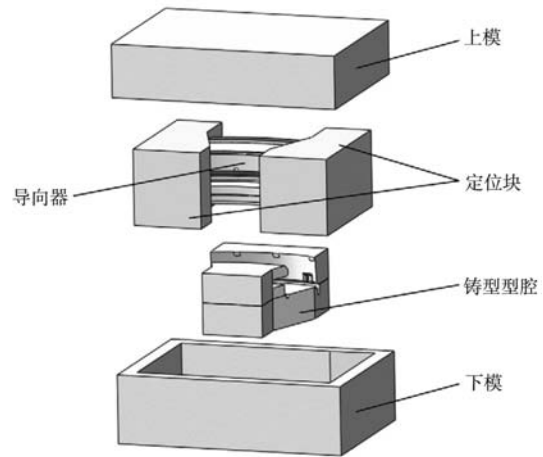


图7 铸型装配爆炸图  
Fig. 7 Mold assembly explosion

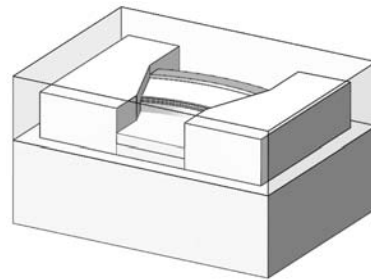


图8 铸型装配图  
Fig. 8 Mold assembly

时进行补缩；铸型冷却脱模后即可得到带低熔点合金块加工基准的导向器叶片。

### 1.5 设计方案存在的问题

经过一系列仿真和试验，初版方案暴露出以下亟待解决的问题：浇道过长、铸型型腔过大导致浇注过程中温度下降过多，充型过程中合金液流动性急剧下降，无法充填完全；此外，浇注所得加工基准未预留应力集中点，难以进行机械破碎，强行进行破碎可能损害导向器叶片。

## 2 设计方案优化

由于原方案存在浇道过长、型腔过大以及加工基准难以破碎等问题，因此，需对其进行优化。优化后铸型采用模块化设计，由浇口、上模、下模、定位块及侧板等零件组成，图9为铸型爆炸示意图。

为解决原版方案中浇道过长导致合金液流动性下降的问题，优化后的铸型减少了浇道长度，将横浇道与内浇道合二为一，以保证浇注时合金液的温度合适，流动性良好，如图10所示。

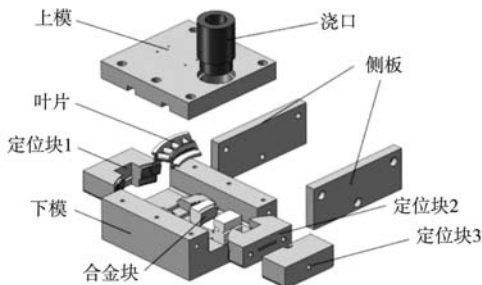


图9 铸型爆炸示意图  
Fig. 9 Mold explosion

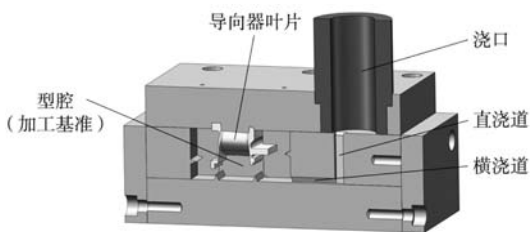


图10 铸型剖面示意图  
Fig. 10 Mold profile

此外，优化后铸型还减小了铸型型腔的体积，不仅保证了充型要求，而且减少了所需合金液的体积，节省了成本。最重要的是，优化后在铸型下模和定位块上设计了三角形凸台，如图11。这样，经过浇注所得加工基准上就会具有相同形状的凹槽，人为设置应力集中部位，便于加工基准后续的破碎拆除。

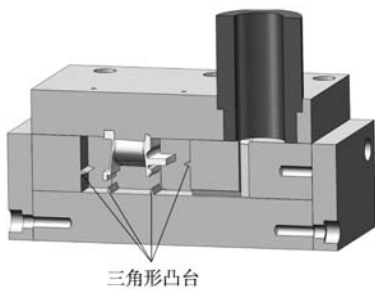


图11 三角形凸台示意图  
Fig. 11 Triangular boss

优化方案在铸型细节方面也做了一些调整，例如在上模上开设了四个冒口用于合金液冷却收缩阶段的补缩，也可用于判断浇注时合金液是否完全填充，在上模侧面开设4个排气口以排出多余气体，防止其在铸件内部堆积，产生气孔等缺陷，如图12所示。图13为铸型实物图<sup>[5]</sup>。

### 3 仿真与试验

#### 3.1 浇注仿真与试验

首先使用ProCAST软件简化模型并进行浇注过程

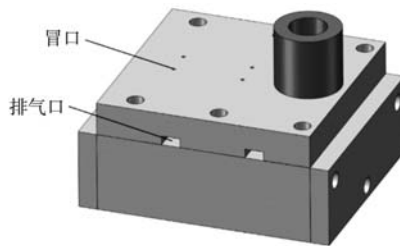


图12 铸型细节示意图  
Fig. 12 Mold details

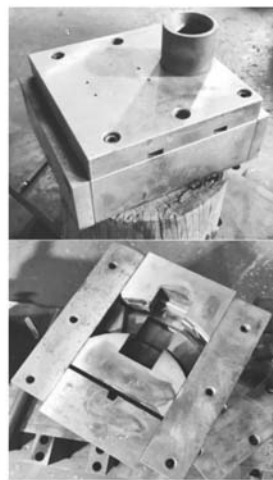


图13 铸型实物图  
Fig. 13 Real mold

仿真<sup>[6-7]</sup>，仿真结果如图14所示。合金液流动性良好，在5 s时完成充型，在57 s左右完全凝固，无铸造缺陷。经过试验试浇注，加工基准表面有少许收缩，整体形

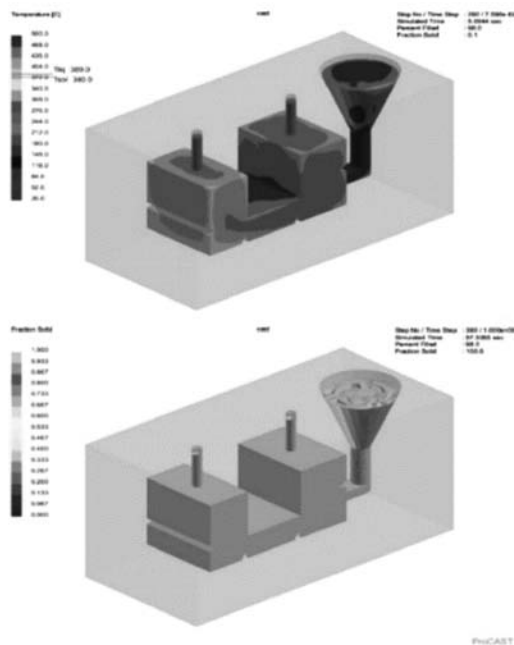


图14 ProCAST浇注仿真  
Fig. 14 ProCAST pouring simulation

状良好，表面质量好、硬度高、脆性高、易破碎，如图15所示。



图15 导向器叶片与浇注加工基准实物图  
Fig. 15 Guide and pouring machining benchmark

### 3.2 机加试验

将浇注所得加工基准与导向器叶片进行机加磨削试验，待加工尺寸32 mm，目标尺寸 $30.2\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ ，加工余量1.8 mm。磨削后测量得尺寸下偏差为-0.02 mm，上偏差为+0.03 mm，满足目标尺寸精度要求。

此外，采用了该加工基准的加工工艺相比现有工艺，加工效率得到了提升，如表3所示。现加工工艺耗时约180 s，新加工工艺耗时约100 s，单件加工效率提升约44.4%。

表3 加工工艺效率对比  
Table 3 Comparison of processing efficiency

新加工工艺		现加工工艺	
工艺流程	耗时/s	工艺流程	耗时/s
定位装夹	20	定位装夹	60
磨削加工	60	磨削加工	60
工装拆卸	20	工装拆卸	60
总耗时	100	总耗时	180

### 3.3 破碎过程仿真与试验

使用Abaqus软件进行模型简化与破碎过程的力学仿真，结果如图16所示。加工基准破碎前一刻，槽口处最大应力约为391 MPa，证明该合金强度高。再对破碎凹槽底部的力—位移响应进行曲线绘制，如图17所示，A点对应的力大小仅为765 N，证明优化方案设计的加工基准能够较为轻松的破碎去除。图18为使用以小型千斤顶为力源的简易破碎装置破碎后的加工基准。

## 4 设计方案对比

优化方案铸型采用模块化设计，主要由上模、下模、定位块、侧板和浇口等部件组成；并设有冒口与排气口，冒口用于判断浇注时是否完全充型，并能在

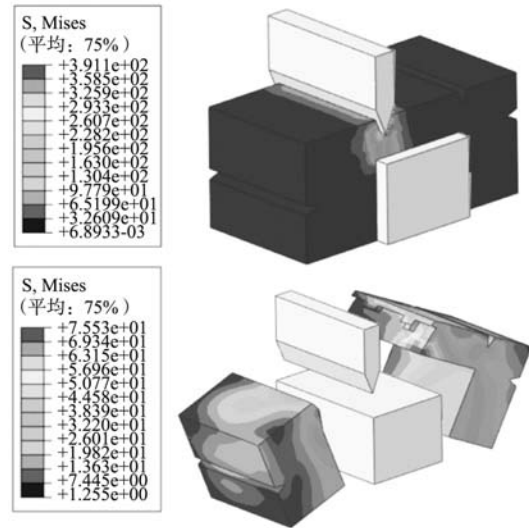


图16 Abaqus仿真结果  
Fig. 16 Abaqus simulation results

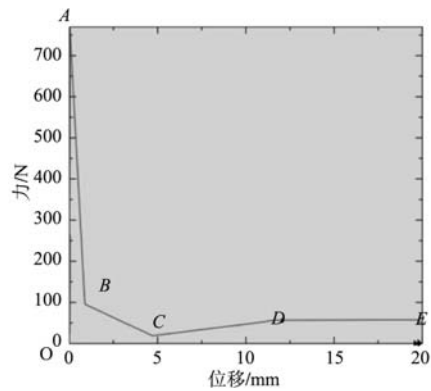


图17 力-位移曲线  
Fig. 17 Force-displacement curve



图18 机械破碎后的加工基准  
Fig. 18 Machining benchmark after crushing

合金液凝固收缩阶段进行补缩；排气口能够排出浇注过程中型腔内部积蓄的气体，防止产生气孔等缺陷；将横浇道与内浇道合二为一以减少浇道长度，铸造所得加工基准能够满足强度、脆性、精度要求，且结构凹槽处便于后续破碎拆除。

优化方案解决了原方案存在的不足：①浇道过长、铸型型腔过大导致浇注过程中温度下降过多，充

型过程中合金液流动性急剧下降,无法充填完全;②此外,浇注所得加工基准未预留应力集中点,难以进行机械破碎,强行进行破碎可能损害导向器叶片。

如表4所示,优化方案的铸型型腔体积对比原方案下降了14.7%,可减少浇注合金液用量,节省材料,降低成本;在保证铸件质量的前提下,在5 s内完成浇注,极大地提高了生产效率;且所得加工基准能够在简单施加一定机械力后被破碎拆除,满足需求。

表4 方案对比  
Table 4 Comparison of schemes

方案	型腔体积/mm <sup>3</sup>	浇注时间/s	破碎力/N
原方案	158 790	无法完全充型	难以破碎
优化方案	135 424	5	765

#### 参考文献:

- [1] 刘国库,王威.航空发动机叶片制造及再制造技术研究[J].科技创新与应用,2022,12(33):145-148.
- [2] 王山.六点定位原理在发动机叶片夹具设计中的应用[J].机械设计与制造,2020(4):24-27.
- [3] 李智慧,师俊平,汤安民.金属材料脆性断裂机理的实验研究[J].应用力学学报,2012(29):48-83.
- [4] 张永.Zn-Al-Mg合金的熔炼及其腐蚀机理研究[D].北京:中国矿业大学,2017.
- [5] 曹世伟.金属型铸造模具的理论分析与实践[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
- [6] 汪煦,赵玉涛,苏大为,等.ProCAST在金属型重力铸造充型和模具温度场中的应用[J].铸造,2008,57(12):1263-1266.
- [7] 卢阳光,赵磊,石静静,等.基于ProCAST的铝合金回转支承内圈铸造工艺数值模拟及优化[J/OL].热加工工艺,1-4.https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20212741.

## 5 结束语

经过方案优化、仿真与试验,最终成功找到合适的合金配方并设计出满足要求的铸型,完成了再造加工基准方法的设计。目标合金Zn-2Al-2Mg熔点低,防止浇注时对导向器叶片造成损伤;液态流动性好,浇注时充型快速完整;凝固后刚度较大,保证机加工时装夹稳定,脆性较高,能够进行机械破碎;合金液在浇注和凝固过程中不会对导向器叶片产生侵蚀;能够进行重熔回收利用。

设计铸型可实现导向器叶片在铸型中的可靠定位,浇注所得加工基准满足后续加工精度要求,浇注过程不出现铸造缺陷,所得加工基准能在导向器叶片加工完成后进行机械破碎拆除,使用所得加工基准进行磨削加工时可提高加工效率。

## Method of the Remanufacturing Machining Benchmark of Gas Turbine Secondary Guide

YAO Ou-yang<sup>1</sup>, MAO Jian-zhong<sup>1</sup>, XIE Yun-jia<sup>2</sup>, ZHANG Hong-li<sup>2</sup>, QIN Shi-peng<sup>2</sup>, YE Li-li<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Aecc South Industry Company Limited, Zhuzhou 412002, Hunan, China)

#### Abstract:

In view of the complex shape of gas turbine secondary guide, poor machining quality and low production efficiency caused by multiple conversion of machining benchmarks, a method of remanufacturing machining benchmark is proposed: searching for a low-melting point alloy formula and designing the corresponding mold to realize the orientation of the guide in the mold, and pouring a regular-shape alloy block around as machining benchmark. The target alloy has a low melting point, good liquid fluidity, and high stiffness after solidification to ensure the stability of clamping and high brittleness to ensure that it can be broken and disengage the guide. The optimized mold can ensure the accuracy requirements of the guide orientation and the machining, also can avoid casting defects.

#### Key words:

mold; metal mold casting; machining benchmark