DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3068

低熔点合金浇注燃气涡轮叶片加工基准的金属型铸造工艺研究

周惦武[1],刘　澳[1],张红丽[2],叶利丽[2],覃事鹏[2],廖　鑫[2],杨　娜[2],文　婷[2],毛建中[1]

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室，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:航空发动机燃气涡轮叶片机械加工时,需根据叶片型面非规则的几何形状设计专用工装,存在加工基准转换频繁、叶片加工质量和生产效率低等问题。采用低熔点合金浇注的方法再造加工基准,并对其金属型铸造工艺进行了实验研究。结果表明,使用金属型铸造工艺生产燃气涡轮叶片加工基准,满足工件装夹的硬度要求,通过机械破碎的方式可实现工件与基准块之间的快速分离,该工艺缩短了产品制造周期,提高了生产效率。

关键词:涡轮叶片;金属型铸造;模具;机械破碎

中图分类号:TG292　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)11-1062-06

Metal Mold Casting Process of Machining Benchmark for Gas Turbine Blades with Low Melting Point Alloy

ZHOU Dianwu[1], LIU Ao[1], ZHANG Hongli[2], YE Lili[2], QIN Shipeng[2], LIAO Xin[2], YANG Na[2], WEN Ting[2], MAO Jianzhong[1]

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Aecc South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Special tools were designed according to the irregular geometry of the blade profile when aero-engine gas turbine blades were machined, and problems such as frequent conversion of machining datum, low machining quality and low production efficiency existed. In this paper, a low melting point alloy casting method was used to reconstruct the machining benchmark, and the metal mold casting process was studied experimentally. The results show that the machining benchmark of the gas turbine blade produced by the metal mold casting process can meet the hardness requirements of workpiece clamping. The rapid separation between the workpiece and benchmark block could be realized by mechanical crushing, hence the process could shorten the manufacturing cycle and improve the production efficiency.

Key words: turbine blades; metal mold casting; mold; mechanical crushing

航空发动机燃气涡轮叶片产品附加值高,其零件加工质量要求高、加工难度大,复杂的结构与表面特征让工件定位变得困难,如何直接依据叶身部分余量,快速高效地确定叶片的新加工基准显得尤为重要[1-3]。传统的叶片基准确定方法主要有机械夹紧法、线切割法,但需要对叶片进行二次加工,易造成对叶片毛坯难以逆转的改动,因此确定加工基准时,需要设计专用的叶片夹具来满足叶片新基准的需求[4-6]。

航空发动机燃气涡轮叶片加工流程复杂,需根据叶片型面的非规则的几何形状设计专用工装,加工基准转换频繁,导致叶片加工质量不稳定、生产效率低。叶片的叶盆、叶背型面的轮廓精度要求高,加工方案和工艺参数鲜有公开,直到现在,国内还没有一种方法能解决叶片前后缘的精密加工问题，仍依赖后续手工抛磨。Wang 等[7]提出一种涡轮叶片装夹定位误差和加工误差测量、计算方法,为叶片的夹具优化设计提供了依据。北京航空航天大学陈志同等[8]提出一种柔性且能够自适应叶片型面的摇篮式叶片加工夹具，利用双端过定位辅助装夹大幅度提高叶

收稿日期:2023-03-21

作者简介:周惦武,1971 年生,教授.研究方向为高性能金属成形工艺.Email:zdwe_mail@126.com.

引用格式:周惦武,刘澳,张红丽,等.低熔点合金浇注燃气涡轮叶片加工基准的金属型铸造工艺研究[J].铸造技术,2023,44(11):1062-1067

ZHOU D W, LIU A, ZHANG H L, et al. Metal mold casting process of machining benchmark for gas turbine blades with low melting point alloy[J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 1062-1067

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

片抵抗受力变形的能力，可以将高温合金叶片的铣削加工变形控制在 0.05 mm 以内，提高叶片在加工过程中的“让刀”变形。在叶片长度较大时，叶尖辅助支撑提高加工精度的效果更为明显。为缩短工艺流程，减少装夹的次数，采用结合六点定位原理和低熔点合金浇注的方法，来设计适应航空发动机叶片加工的工装夹具，即通过六点定位法将叶片调整到理论姿态后，通过浇注低熔点合金将理论姿态的基准传递到易于机加操作的基准块上[9-10]。目前叶片夹具基准块所用低熔点合金浇注多采用压力铸造工艺，但是成本较高，且基准块存在较软、易变形和清洗困难等问题。为此，本文研制了锌铝合金以满足涡轮叶片加工基准高硬度和脆性的要求。

1　锌铝合金的熔制

为使低熔点合金达到符合叶片加工基准的再造要求，基于 Zn-x 二元相图，从熔点、流动性、脆性等角度考虑，制备 Zn-Al 低熔点合金[11-13]。合金熔制时，原材料采用纯锌(99.99%)，纯铝(99.99%)，纯镁(99.9%)，先将井式坩埚电阻炉加热至 200 ℃，放入石墨坩埚，保温后，将锌锭放入坩埚内，提高炉内温度至 580 ℃，进行保温(搅拌辅助熔化)。接着放入铝锭，待完全熔化后，加入精炼剂并不断搅拌，使气体充分溢出，使用扒渣勺进行扒渣处理，提高电阻炉温度至 740 ℃，添加镁锭，搅拌 5~10 min，将 Ti-B 复合盐变质剂，用钟罩压入合金液中，充分搅拌，保温、扒渣、静置，合金液温度降至 450 ℃时进入浇铸温度。

将熔炼完成后的锌铝合金液浇入预先制成的金属模具型腔中，即采用金属型铸造的方法再造叶片加工基准；采用型号为 WMJ-9930BD 的金相显微镜，对浇注的基准块合金与叶片边缘进行观察；采用 5%NHO_3+95%无水乙醇(体积分数)对金相试样进行腐蚀；采用型号为 UHV-1000ZF 的自动转塔显微维氏硬度计，对基准块及其重熔合金的硬度进行检测；采用型号为 TESCAN MIRA3 的扫描电镜，对基准块合金的显微组织及成分进行检测；采用机械研磨+化学抛光的方法制备扫描电镜所用试样。

2　叶片加工基准的金属型铸造工艺

图 1a 为某涡轮叶片结构，叶片前后有弧形曲面。图 1b 为基准块与该叶片的夹持图，基准块与工件互相镶嵌，通过叶片上的凸台定位卡紧。叶片加工时，以基准块的型面作为加工基准，避免叶片在加工过程中基准的不断转换，提高加工效率，同时降低转换基准时带来的误差。

2.1　金属型铸造工艺难点

采用金属型铸造生产涡轮叶片加工基准，为确保六点定位基准与低熔点基准的转化关系，依据六点定位原理，把叶片六点定位基准转化为易于五轴机床连续加工定位的基准块上，保证 3 个定位基准面的相互垂直位置精度，满足叶片加工精度要求，因此要保证铸件表面质量良好。合金液充填金属型铸造模具时，热量散失快，合金流动性降低，通过控制模具工作温度及合金液的浇注速度，避免了低熔点合金基准块铸件出现冷隔、浇不足等缺陷[14-16]。

金属型铸造时，浇注的合金液与涡轮叶片之间可能出现晶间腐蚀和原子迁移等问题，导致叶片性能降低[17-18]，为满足机械击碎脱合金的目的，在模具设计时，布置应力集中点，通过机械破碎的方式，实现工件与基准块之间的快速分离，保证叶片加工质量，大幅提高叶片加工的生产效率。

2.2　模具设计及准备

图 2 为金属型铸造模具的结构简图。根据六点定位原理，将零件上的定位基准转化至基准块的 3 个基准面上，开设排气孔 2 保证合金液浇注过程中的顺利填充，采用可拆分的活块结构方便产品的脱模，布置应力集中点实现基准块的机械破碎。进行低熔点锌铝浇注时，通过冒口套 1 进入型腔，腔内的气体通过预置的排气孔 2 排出；当合金液充满整个型腔后，继续浇注合金液以充满整个冒口，对铸件进行补缩；保持一定时间后，移开固定板 6，分离活块 5，

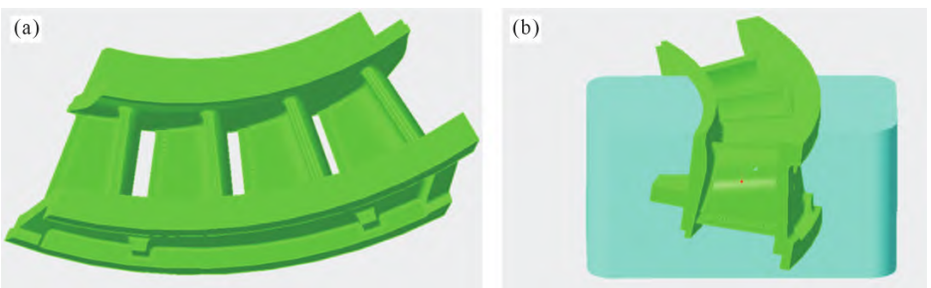

图 1　基准块结构：(a) 叶片结构，(b) 基准块夹持叶片图

Fig.1　Structure of the benchmark block: (a) blade structure, (b) diagram of the benchmark block clamping blade

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

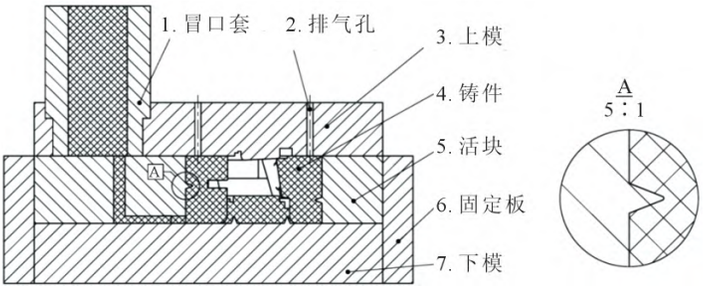

图 2 金属型铸造模具结构简图
Fig.2 Structure sketch of metal type casting mold

取出铸件,合模,完成一次工艺流程。金属型铸造模具的主要设计参数及结构参数见表 1。

表 1 金属型铸造模具的主要设计参数及结构参数
Tab.1 Main design parameters and structural parameters of metal type casting molds

参数	值
模具长度 /mm	270
模具高度 /mm	185
模具宽度 /mm	225
排气孔直径 /mm	4
模具材料	45# 钢
模具预热方式	电阻炉加热,氧气-乙炔火焰补充预热
模具热处理	840 ℃淬火 600 ℃回火
模具冷却方式	空冷
模具涂料成分	专用
涂料喷涂方式	喷枪喷涂

浇注前,为保证合金液的顺利充型,对金属型模具进行预热处理。具体步骤为:①喷涂脱模剂前的预热处理,预热温度控制在 150~250 ℃,保证喷涂后涂料中的水分迅速蒸干。喷涂的涂料要求均匀致密,便于后续脱模。②浇注前的预热处理,预热温度控制在 350~400 ℃,减小浇注合金液与金属型模具之间的温度差,降低合金液的冷却速度,保证合金液充满整个型腔。金属模具浇注前的预热处理有助于提高铸件性能,保证金属型模具的使用寿命[19-20]。

2.3 浇注及后续处理

采用底注法进行浇注,浇注过程中,尽量避免合金液产生飞溅,保证浇注速度稳定;浇注速度的控制做到慢一快一慢,浇注过程中始终保证液流平稳;浇注温度控制在 460~520 ℃的范围内。浇注完成后,通过测量模具表面温度,确定是否脱模,检测模具温度在 350~400 ℃范围时,取出基准块铸件。

3 结果及分析

3.1 铸件表面质量及硬度

图 3 为低熔点合金浇注燃气涡轮叶片加工基准块的实物,铸件表面质量良好,未见明显铸造缺陷。为保证浇注基准块对工件的夹持刚度,对基准块及其重熔合金硬度进行检测,结果如表 2 所示。发现基准块合金重熔后的硬度下降并不明显。本文基准块合金为含 Mg 的锌铝合金,其显微组织如图 4 所示,发现主要由富锌相 η-Zn 枝晶、锌铝共晶组织 β+η、富镁相 $MgZn_2$ 和 Mg_2Zn_{11} 组成[21-26]。通常 η 相硬度最小,共析体 α+η 其次,接着 $MgZn_2$,硬度最大的是 Mg_2Zn_{11},而高硬度富镁相 $MgZn_2$ 和 Mg_2Zn_{11} 对锌铝合金的硬度变化有重要影响[27],低熔点合金的高硬度且重熔后硬度衰退不显著,可能源于此。

图 3 叶片加工基准块实物
Fig.3 Blade machining benchmark block

表2 锌铝合金不同重熔次数下的维氏硬度(HV)
Tab.2 Vickers hardness of the zinc-aluminum alloy at different remelting times

重熔次数	1	2	3	4	5	平均硬度(HV)
0	157.6	175.2	157.6	166.1	157.6	162.8
1	124.8	115.1	151.3	144.0	132.0	133.4
2	135.8	123.7	134.5	137.1	152.9	136.8
3	126.0	144.0	118.2	146.8	141.2	135.2

3.2 铸件破碎和侵蚀

采用低熔点合金浇注的加工基准来装夹叶片,机加后,通过设计的专用破碎装置(图 5),进行基准块的破碎实验。通过图 5 中的液压装置对预留应力集中点进行加压,发现工件与基准块之间可以实现快速分离,破碎的浇注基准块如图 6 所示。另取浇注样件,使用线切割取样,经抛光腐蚀后通过金相显微镜,对浇注加工基准块样件与叶片边缘进行观察,如

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

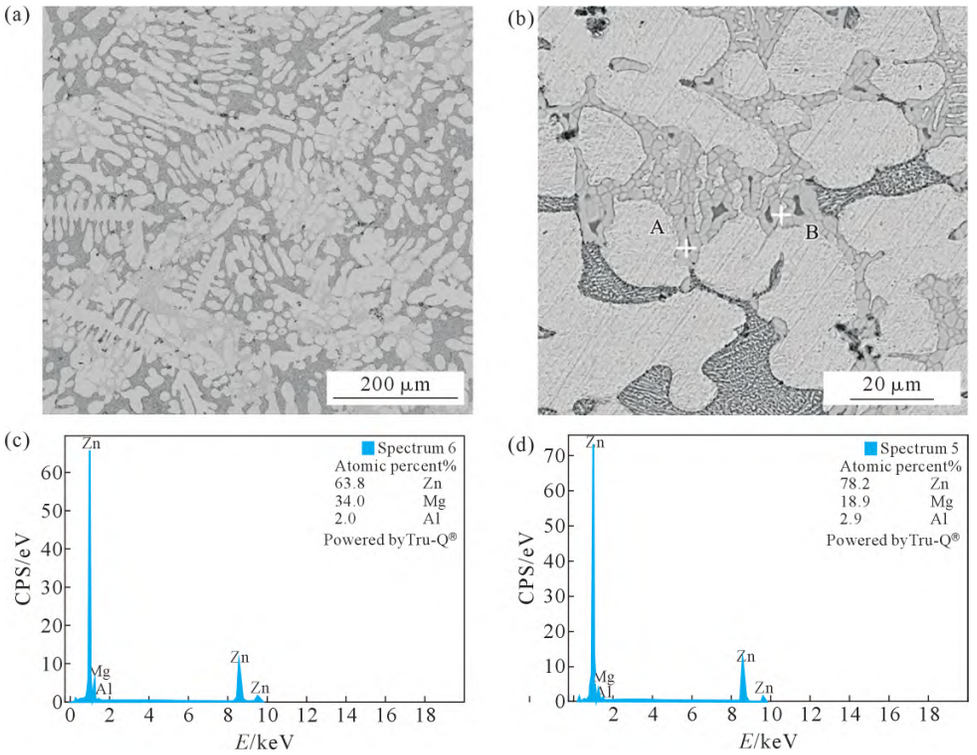

图 4　锌铝合金显微组织：(a~b) SEM 图像，(c) A 点能谱，(d) B 点能谱

Fig.4　Microstructure of the zinc-aluminum alloy: (a~b) SEM images, (c) energy spectrum of point A, (d) energy spectrum of point B

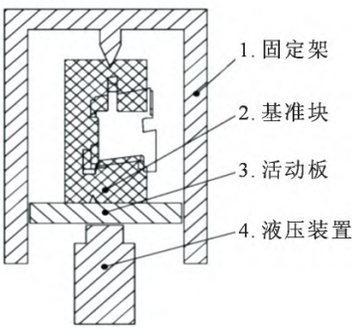

图 5　破碎装置

Fig.5　Crushing device

图 6　浇注基准块及破碎块

Fig.6　Casting reference block and crushing block

图 7 所示。发现浇注基准块与涡轮叶片边缘拐角处有较小间隙，铸件与叶片边界清晰，低熔点合金液对叶片未造成侵蚀。

4　结论

(1)采用金属型铸造生产低熔点合金再造加工基准，满足工件装夹的硬度要求，通过机械破碎的方式可实现工件与基准块之间的快速分离。

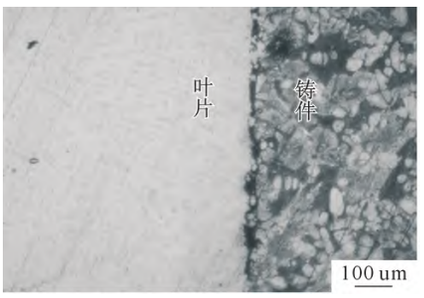

图 7　浇注基准块与叶片边缘接触界面

Fig.7　Contact interface between casting reference block and blade edge

(2)使用金属型铸造工艺生产燃气涡轮叶片加工基准，缩短产品制造周期，简化工艺，重熔后合金硬度降低不明显，材料利用率得到提升，低熔点合金液对叶片未造成侵蚀，大幅降低燃气涡轮叶片加工基准的生产成本，提高了生产效率。

参考文献：

[1]　王广林，郑振峰. 航空发动机压气机转子叶片的加工工艺路线的制定[J]. 湖南农机，2013, 40(3): 88-89.
WANG G L, ZHENG Z F. The formulation of an aero-engine compressor rotor blade processing routes[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2013, 40(3): 88-89.

[2]　吴越，谌永祥，李双跃，等. 静叶片四轴数控加工定位分析[J]. 机床与液压，2013, 41(10): 1-3.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

WU Y, CHEN Y X, LI S Y, et al. Positioning analysis of four-axis NC machining for static blades[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(10): 1-3.

[3] 郭文有. 恢复加工基准法降低叶片复制生产成本[J]. 航空工艺技术,1994(4): 17-18.
GUO W Y. Datum-restoring method to decrease production cost of blade replication[J]. Aeronautical Process Technology, 1994(4): 17-18.

[4] 胡炜,李向阳,陈永峰,等. 铸件骨架加工基准的设置[J]. 金属加工(冷加工), 2021(12): 26-28.
HU W, LI X Y, CHEN Y F, et al. Setting of casting skeleton machining reference[J]. Metal Working(Cold Working), 2021(12): 26-28.

[5] 谭健祥,魏森,张观福. 一种三维空间角从图纸基准到加工基准的转换方法[J]. 时代汽车,2021(10): 87-88.
TAN J X, WEI S, ZHANG G F. A conversion method of three-dimensional space angle from drawing reference to processing reference[J]. Auto Time, 2021(10): 87-88.

[6] 程景龙. 改进基准设置优化拆块加工流程[J]. 汽车工艺与材料, 2017(8): 68-72.
CHENG J L. Improved benchmark settings to optimize the process of block removal[J]. Automobile Technology & Material, 2017(8): 68-72.

[7] WANG Y , CHEN X , GINDY N. Surface error decomposition for fixture development [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 31: 948-956.

[8] 陈志同,李伟良,陈五一,等. 一种用于叶片数控加工的柔性多点支撑装置:CN101092020A[P]. 2008-01-01.
CHEN Z T, LI W L, CHEN W Y, et al. A flexible multi-point support device for blade CNC machining: CN101092020A[P]. 2008-01-01.

[9] 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.
WANG S. The application of six-point positioning principle in design of aero-engine blade fixture[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(4): 24-27.

[10] 明发秀. 六点定位原理在加工尺寸调整中的应用[J]. 装备制造技术,2013(7): 191-193.
MING F X. Six-point positioning application in machining size [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013(7): 191-193.

[11] 刘洋. 锌铝合金的组织性能优化及相关基础研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
LIU Y. Optimization of microstructure and properties and its relative basic research of zinc-aluminum alloy[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[12] 李元元. 新型材料与科学技术(金属材料卷)[M]. 广州:华南理工大学出版社,2012.
LI Y Y. New materials and science and technology (metallic materials volume)[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2012.

[13] 张慧. Mg 和 Cu 元素对 ZA27 阻尼合金显微组织和性能的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
ZHANG H. Effect of Mg and Cu elements on microstructure and properties of ZA27 damping alloy[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.

[14] 陈洪峰. 金属型铝合金重力浇注装置及其模具设计的研究[J]. 机械,2009, 36(10): 53-55, 75.
CHEN H F. Metal-based alloy gravity die casting plant and the research design[J]. Machinery, 2009, 36(10): 53-55, 75.

[15] 王宁国. 金属型重力铸造条件下的铝合金铸件生产技术[J]. 装备制造技术,2011(10): 174-177.
WANG N G. Technology of aluminum alloy casting production based on heat exchange characteristic of permanent gravity mould [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(10): 174-177.

[16] 陈玉平,史开旺. 铝合金铸件金属型重力铸造生产工艺[J]. 铸造技术,2010, 31(10): 1364-1366.
CHEN Y P, SHI K W. Technology of aluminum alloy casting production based on heat exchange characteristic of permanent gravity mould[J]. Foundry Technology, 2010, 31(10): 1364-1366.

[17] 隋永枫,蓝吉兵,魏佳明,等. 某燃气轮机涡轮动叶片腐蚀疲劳失效分析[J]. 热力发电,2022, 51(12): 112-118.
SUI Y F, LAN J B, WEI J M, et al. Corrosion-fatigue failure analysis of a gas turbine moving blades [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(12): 112-118.

[18] 武威,滕旭东,隋海鸥. 燃气涡轮起动机离心叶轮叶片断裂分析[J]. 失效分析与预防,2020, 15(3): 196-201.
WU W, TENG X D, SUI H O. Fracture analysis of centrifugal impeller blade of gas turbine starter[J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15(3): 196-201.

[19] 张洪峰,张继海. 提高压铸模使用寿命的途径[J]. 特种铸造及有色合金,2008, 28(5): 375-377.
ZHANG H F, ZHANG J H. Ways to improve die casting die life [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28(5): 375-377.

[20] 胡心平,戴挺,吴炳尧. 压铸模具钢的选择与提高压铸模寿命的途径[J]. 特种铸造及有色合金,2003, 23(4): 41-43.
HU X P, DAI T, WU B Y. Selection of tool steel and way of prolonging service life for die casting die[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2003, 23(4): 41-43.

[21] ZHANG Y J, XU M Y, MA R N, et al. Effect of oxide scale on hot dip Zn-Al-Mg alloy coating prepared by reduction combined with induction heating[J]. Metals, 2020, 10(11): 1519.

[22] 金永清,郭太雄,董学强,等. Mg 含量对 1.6%Al 锌铝镁合金镀层组织影响研究[J]. 钢铁钒钛,2022, 43(5): 191-196.
JIN Y Q, GUO T X, DONG X Q, et al. The study of the role of Mg content in microstructure of Zn-1.6Al-x Mg alloy coatings[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(5): 191-196.

[23] 周惦武,刘金水,舒震. 铸造 ZA27 合金的盐类复合变质研究[J]. 特种铸造及有色合金,2008, 28(5): 348-350.
ZHOU D W, LIU J S, SHU Z. Salt-composite modification on ZA27 cast alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28 (5): 348-350.

[24] 许红胜,谢沐杨,颜东煌,等. Zn-Al-Mg 合金镀层钢丝热浸镀工艺研究[J]. 全面腐蚀控制,2021, 35(8): 94-98.
XU H S, XIE M Y, YAN D H, et al. Study on hot dip galvanizing process of Zn-Al-Mg alloy coated steel wire[J]. Total Corrosion Control, 2021, 35(8): 94-98.

[25] 宋嘉良,白子恒,李曌亮,等. Mg 和 RE 对电弧喷涂 Zn-Al 合金涂层耐腐蚀性能的影响[J]. 材料保护,2020, 53(2): 1-7, 20.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

SONG J L, BAI Z H, LI Z L, et al. Effect of Mg and RE on the corrosion resistance of electric arc spraying Zn Al alloy coatings[J]. Materials Protection, 2020, 53(2): 1-7, 20.

[26] LEE J W, SON I, KIM S J. Newly designed surface control using Si addition in trace quantity for Zn-2Al-3Mg alloy coated steel sheet with improved corrosion resistance[J]. Applied Surface Science, 2022, 598: 153868.

[27] 高辉霞. 不同冷速对共晶 Zn-4Al-3Mg 合金组织形成及其性能的影响[D]. 天津：天津大学，2010.
GAO H X. Influence of cooling rates on microstructure and properties of Zn-4Al-3Mg alloy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net