

ZTA15 钛合金骨架开裂分析及改善

孟波波, 杜延乐, 杨莹, 孙宏喆, 张彦飞, 麻毅, 李晓宇

(洛阳双瑞精铸钛业有限公司, 河南洛阳 471000)

摘要: ZTA15钛合金骨架在机械加工过程中连续两件在相同位置处出现开裂问题。针对该问题, 对开裂处进行断口形貌、金相组织、化学成分及力学性能等分析, 确定了开裂性质和原因。结果表明, 断口呈典型的微孔聚集型断裂特征; 铸件内部的缩孔是骨架断裂的诱因, 其形成与铸件结构有关; 裂纹发生在工艺块与横梁的拐角处, 该区域有小缩孔存在; 骨架横梁后期进行校形, 造成缩孔处出现内部裂纹。通过结构优化, 改善了此处横梁的在校正过程中的应力集中状况; 增加X射线检测, 避免铸件内裂纹的存在。采取以上措施避免了开裂问题再次发生。

关键词: ZTA15钛合金; 缩孔; 裂纹; 应力集中; 铸件缺陷; 工艺优化

中图分类号: TG146.23; TG292 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0283-05

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0039

Analysis and Improvement of Cracking in ZTA15 Titanium Alloy Skeleton

MENG Bo-bo, DU Yan-le, YANG Ying, SUN Hong-zhe, ZHANG Yan-fei, MA Yi, LI Xiao-yu
(Luoyang Shuangrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: During the machining processes of ZTA15 titanium alloy skeletons, crack problems consecutively occurred at the same positions of two pieces. To address this issue, fracture morphology analysis, metallographic structure inspection, chemical composition analysis, and mechanical property testing have been carried out on the cracked regions to determine the nature and causes of the cracks. The results show that the fracture surface exhibit typical characteristics of micropore aggregation-induced fracture, the shrinkage cavity inside the casting is the inducement of skeleton fracture, and its formation is associated with the structure of the casting, there are small shrinkage cavities existed in the area, where the cracks occurred, of the corner between the process block and the crossbeam, the straightening of the skeleton crossbeam in the later stage results in the generation of internal crack at the shrinkage cavity area. Through structural optimization, the stress concentration condition of the crossbeam here during the streightening process was improved, X-ray inspection was added to prevent internal cracks from existing in castings. The recurrence of crack problem has been avoided by adopting above measures.

Key words: ZTA15 titanium alloy; shrinkage cavity; crack; stress concentration; casting defect; process optimization

钛合金具有高强度、低密度和耐腐蚀等核心优势, 被广泛应用于航空航天、海洋运输和医疗卫生等领域^[1-3]。ZTA15钛合金骨架在满足钛合金的所有性能外, 又因其密度小的设计特性成为飞机机身框架、机翼骨架、发动机部件等关重件的首选结构之一^[4-6]。能在减重的同时保证结构强度, 适用于高空、高温等极端环境^[7-10]。

我司生产的一批ZTA15骨架, 外形尺寸为812.8 mm × 243.4 mm × 55.3 mm, 壁厚5 mm, 通过熔模铸造检验合格后交付客户。客户在对铸件进行机加工过程中,

陆续发现有两件铸件存在开裂的问题。在了解到第二件铸件发现开裂的问题后, 我司立即派人入厂了解情况。经观察两件开裂的铸件裂纹均为穿透性缺陷, 裂纹中间存在间隙, 两侧断口不完全闭合, 且均位于铸件的同一位置, 如图1所示。

骨架生产所有流程进行复查后, 分别在两件骨架开裂处取试样送检进行失效分析。具体对开裂处进行了形貌分析、化学成分分析、力学分析、扫描电镜金相分析和金相分析等。旨在找出失效原因, 并针对性地提出改善措施, 为后续同类产品提供生产思路, 提

基金项目: 中国船舶集团有限公司第七二五研究所研发基金项目(3724025001)。

收稿日期: 2025-12-18 收到初稿, 2026-01-15 收到修订稿。

作者简介: 孟波波(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事钛合金铸造工艺研究工作。E-mail: 18638836415@163.com

引用格式: 孟波波, 杜延乐, 杨莹, 等. ZTA15 钛合金骨架开裂分析及改善 [J]. 铸造, 2026, 75(3): 283-287.

MENG Bobo, DU Yanle, YANG Ying, et al. Analysis and improvement of cracking in ZTA15 titanium alloy skeleton [J]. Foundry, 2026, 75(3): 283-287.

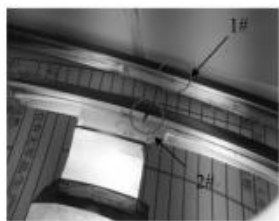


图1 骨架断裂情况照片

Fig. 1 Photo of the fracture cases of skeletons

高产品质量。

1 试验过程与分析

1.1 宏观分析

1#骨架断裂裂纹送检试样宏观形貌如图2(a)所示。裂纹附近外表面金属光泽明显，裂纹不能闭合，中间部位有较大缝隙。肉眼观察断口，未发现明显自

由面，将断口置于三维视频显微镜下观察，一侧断口发现一处光亮区域，形貌如图2(b)和(c)所示。

2#骨架断裂裂纹送检试样宏观形貌如图3所示。裂纹附近外表面金属光泽明显，分别对裂纹两面进行观察，裂纹两面均不完全闭合，中间部位有较大缝隙；裂纹下端两面可观察到裂纹均已贯穿试样表面，裂纹上部仍有部分区域相连。

1.2 化学成分分析

分别对1#骨架和2#骨架在靠近裂纹处取样进行化学成分分析，结果如表1所示。检测结果显示1#试样和2#试样各元素含量均符合技术指标要求。

1.3 力学性能分析

分别在1#骨架和2#骨架上取样进行室温拉伸力学性能测试，结果如表2所示。试验结果显示试样的抗拉强



(a) 1#宏观形貌

(b) 肉眼观察整体形貌

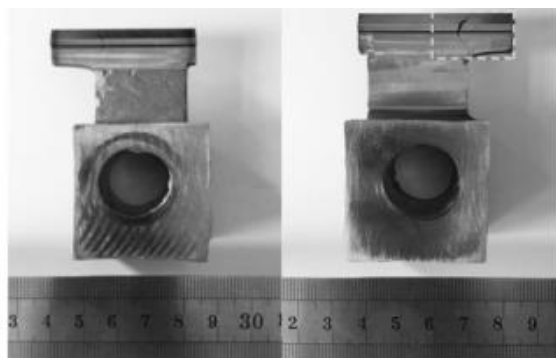
(c) 部分断口放大形貌

图2 1#送检试样宏观形貌

Fig. 2 Macro morphologies of the sample No.1 for inspection

表1 化学成分
Tab. 1 Chemical compositions

项目	Al	V	Mo	Zr	Fe	Si	C	O	N	H	Ti
1#实测值	6.63	2.03	1.84	1.89	0.045	0.023	0.026	0.148	0.012	0.003 8	余量
2#实测值	6.65	2.05	1.73	2.03	0.053	0.041	0.018	0.142	0.013	0.003 3	余量
技术要求	5.5~6.8	0.8~2.5	0.5~2.0	1.5~2.5	≤0.30	≤0.15	≤0.13	≤0.16	≤0.05	≤0.01	余量



(a) 2#试样裂纹一面

(b) 2#试样裂纹另一面

图3 2#送检试样宏观形貌

Fig. 3 Macro morphologies of the sample No.2 for inspection

表2 室温力学性能
Tab. 2 The mechanical properties at room temperature

项目	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$
标准要求	≥784	882~1 127	≥5	≥12
1#实测值	865	975	13	25
	864	972	11.5	23
2#实测值	863	974	12.6	24
	864	973	13.5	25

度、屈服强度、伸长率以及断面收缩率等检测项目均满足技术指标要求。

1.4 扫描电镜分析

将1[#]试样断口置于扫描电镜中进行观察，试样低倍形貌如图4(a)所示。将试样断口形貌从右至左依次放大，微观形貌如图4(b)-(d)所示。其中最右侧图4(b)区域中存在类似自由面的特征，中间区域图4(c)和最左侧区域图4(d)微观形貌均表现为韧窝特征，属于韧性断裂。

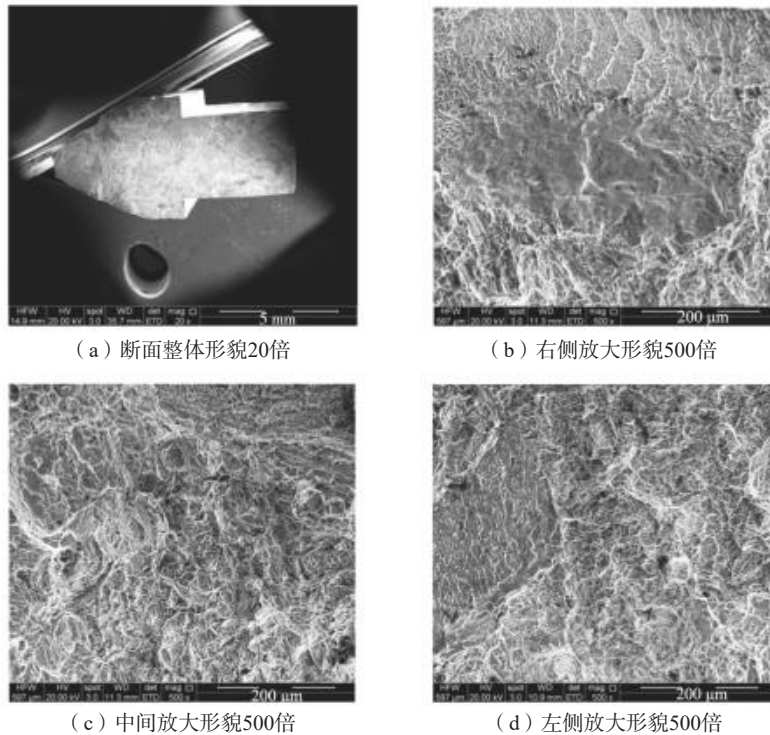


图4 1[#]试样断口微观形貌

Fig. 4 The fracture microstructures of sample No.1

1.5 金相分析

在1[#]试样和2[#]试样裂纹源区附近取截面进行金相分析。1[#]裂纹源区附近截面金相组织如图6所示，2[#]裂纹源区附近截面金相组织如图7所示。从图6和图7中观察到裂纹源区金相组织为魏氏组织，晶界清晰， α 相呈片状分布，组织均由由片状 α +晶间 β +晶界 α 组成，无明显冶金缺陷。

2 结果与讨论

试验结果表明，骨架断面整体表现为韧窝断裂特征，仅在个别区域发现有类似自由面特征，金相符合铸态组织，无明显冶金缺陷。该区域肉眼观察断口存在不能闭合的间隙，此处应为铸造产生的原始缩孔缺陷^[11-13]。该缩孔缺陷正好位于工艺块与铸件横梁的拐角处，缩孔直径仅为0.3 mm左右，根据技术协议标准为非超标缺陷。

骨架为薄平板结构，非常容易出现较大的变形，

将2[#]断口打开后置于扫描电镜进行观察。试样低倍形貌如图5(a)所示，断口右侧放大形貌如图5(b)-(c)所示，整体表现为韧窝断裂特征；个别区域发现有类似自由面特征，且近似表现有沿晶的形态，形貌如图5(d)-(e)所示。中间区域放大形貌和最左侧新打开断口形貌如图5(f)-(g)所示，均表现为韧窝特征，未发现明显的冶金缺陷。

特别是该处的横梁跨度较大，刚性差，因此某些铸件此处横梁的变形也较大。校正压迫此处工艺块将横梁压平的过程中，应力容易在此处集中，再加上工艺块与铸件横梁拐角处的缩孔的存在，应力集中于缩孔处，最终造成铸件在缩孔处出现开裂。而此处的开裂形成的是内部裂纹，因此在校正后的荧光工序没有被发现，如图8所示。

3 改进措施

铸件在校正过程中有生出裂纹的隐患，可能会出现外部裂纹，该情况可以通过校正后的荧光渗透检查发现。但除此之外，也有可能由于铸件内部缩孔缺陷而在此处出现校正应力集中，最终产生的内部裂纹，通过常规的荧光渗透检查无法发现，只有通过X射线照相检查才可以发现^[14-15]。

因此，建议今后在铸件产生较大局部变形的时候，在校正完后，除了进行常规的荧光渗透检查之

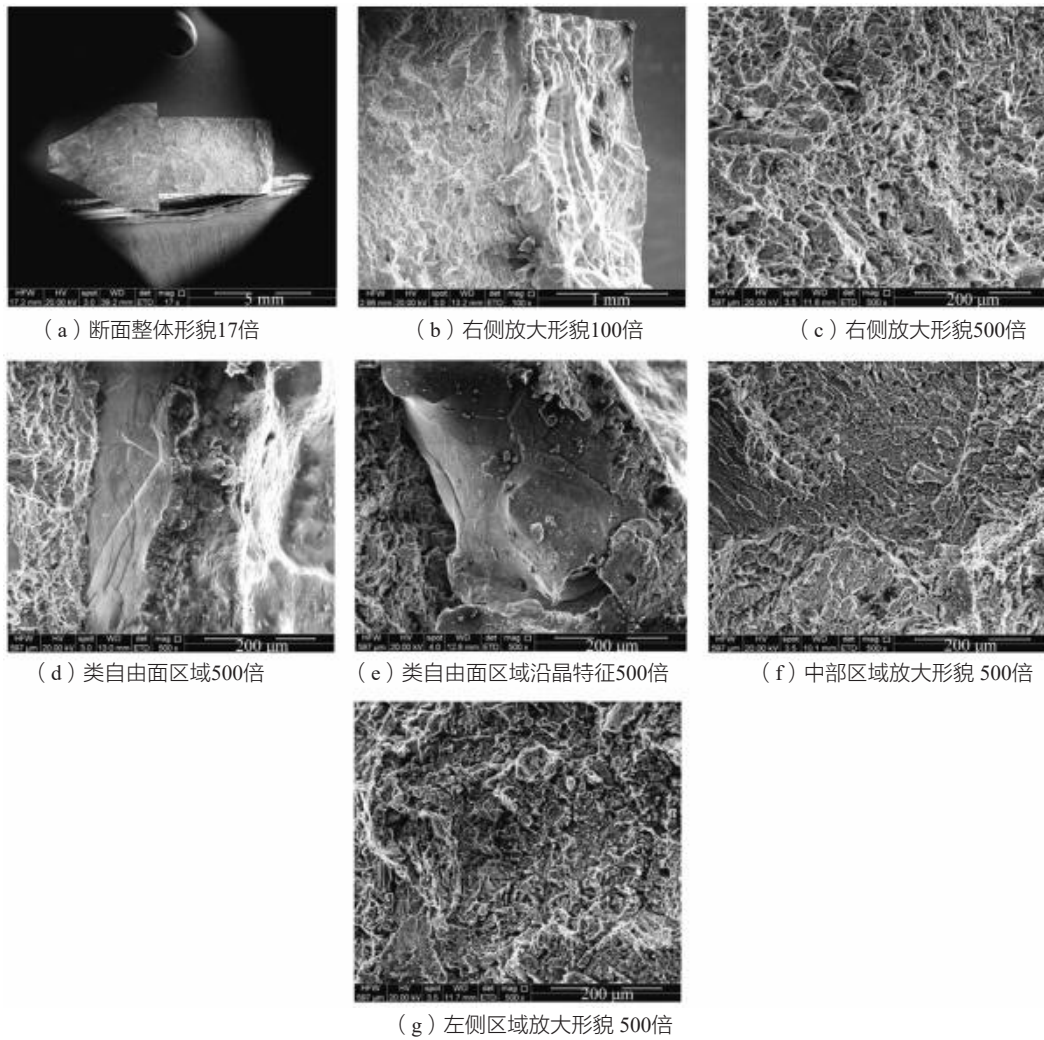


图5 2#试样断口微观形貌

Fig. 5 The fracture microstructures of sample No.2

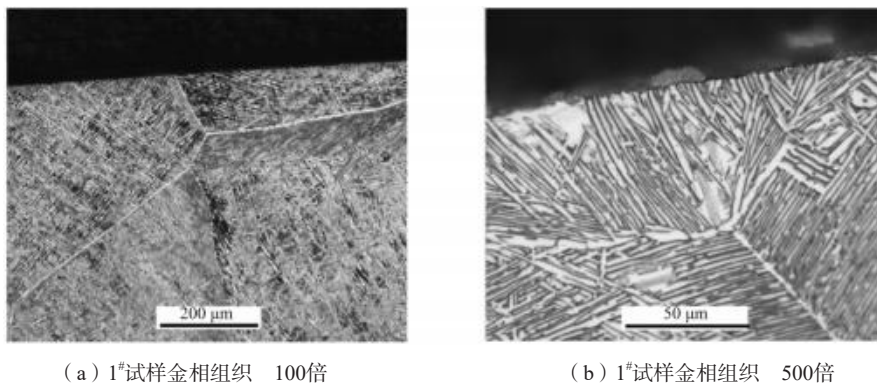


图6 1#试样裂纹源区金相组织

Fig. 6 The metallographic structures of the crack source area of sample No.1

外，必须对产生较大变形的局部进行X射线照相检查。另外，针对骨架断裂有两件在同一处出现开裂的问题，虽然与小缩孔缺陷有关，但是对此类缺陷在铸件中无法避免，因此对该结构处做如下更改：将与骨架一端连接的工艺凸台改为与骨架两端连接，如图9所示。

通过改变铸件在先前出现开裂横梁位置的结构，

可大幅改善铸件在校正过程中的应力集中的状况，也可增加铸件在此处横梁的刚度，减少横梁的变形，从而达到避免在此处出现校正裂纹的目的。

4 结论

骨架断裂的开裂问题是由于在校正具有较大变形

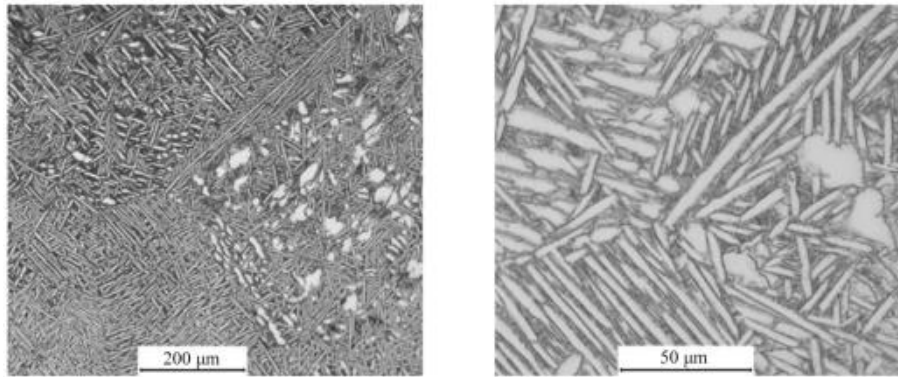
(a) 2[#]试样金相组织 100倍(b) 2[#]试样金相组织 500倍图7 2[#]试样裂纹源区金相组织

Fig. 7 The metallographic structures of the crack source area of sample No.2

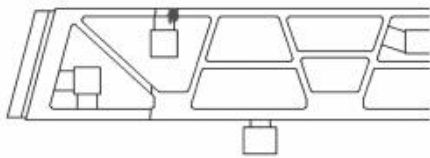
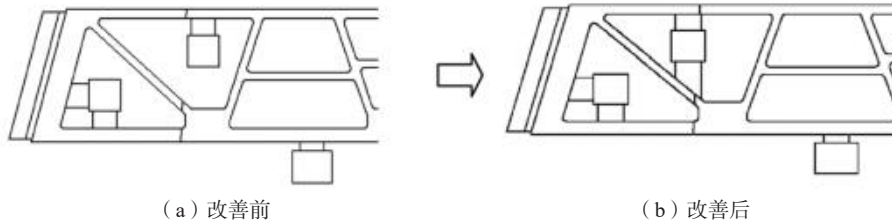


图8 骨架开裂的横梁区域在校正过程中的应力集中(标记区域)
Fig. 8 Stress concentration (marked area) in the crossbeam area where the skeleton cracked during the straightening process



(a) 改善前

(b) 改善后

图9 骨架开裂横梁处的结构改善

Fig. 9 The structure improvement of the crossbeam area where the skeleton cracked

量的横梁的过程中,在与工艺块交接的区域出现应力集中,再加上该区域有小缩孔的存在,加重了应力集中严重程度,造成铸件在此处出现内部裂纹。通过改变此处结构增加横梁刚度,改善此处横梁在校正过程中的应力集中状况,以及增加校正后对出现较大变形的局部增加X射线照相检查工序,可有效杜绝此类问题的发生。

参考文献:

- [1] 李金山, 晏琪, 陈彪. 航空航天用钛基复合材料的开发与应用进展 [J]. 材料开发与应用, 2024, 39 (6): 1-23.
- [2] 刘高扬, 赵文侠, 王曦. ZTA15钛合金铸件异常组织形成及对拉伸行为的影响 [J]. 航空材料学报, 2020, 40 (4): 45-51.
- [3] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25 (2): 280-292.
- [4] 谢成木. 钛及钛合金铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 张志正, 孟波波, 杜延乐, 等. ZTA15-Cr钛合金隔板失效分析 [J]. 铸造工程, 2025, 49 (5): 11-13.
- [6] 孙冰, 麻毅, 乔海滨, 等. ZTA15钛合金精铸件漏油失效原因分析 [J]. 铸造工程, 2023, 47 (3): 17-20.
- [7] 杨克娜, 徐勇, 董显娟, 等. TA15钛合金魏氏组织变形局域化行为研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (11): 1174-1178.
- [8] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology [J]. Acta Materialia, 2013, 61: 844-879.
- [9] ZHOU Yu, WANG Ke, WEN Xin, et al. Achieving synergy enhancement of strength and ductility in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si alloy by fabricating a new multiscale microstructure [J]. Scripta Materialia, 2023, 226: 115-233.
- [10] ZHAO Yongqing, WU Cong, WANG Huan, et al. Advance in relationship between tensile strength and toughness for 1200 MPa high strength and high toughness Ti-alloy with damage tolerance [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (12): 4389-4397.
- [11] 郑壮壮, 陆子川, 杨建辉, 等. 不同Mo当量钛合金的显微组织演变与低温变形机理 [J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54 (8): 2086-2093.
- [12] 张安, 张元东, 刘秀良. 先进航空钛合金材料研究进展 [J]. 科技与创新, 2023 (13): 90-92.
- [13] 隋楠, 弭家宝, 曹京霞, 等. 近 α 型高温钛合金富氧燃烧组织特征及形成机制研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (9): 3263-3275.
- [14] 赵丹丹. 钛合金在航空领域的发展与应用 [J]. 铸造, 2014, 63 (11): 1114-1117.
- [15] 闫平, 王利, 赵军, 等. 高强度铸造钛合金的应用及发展 [J]. 铸造, 2007, 56 (5): 451-454.

以温度场均匀稳定性为核心的 钛合金智能铸造设计研究

李宝文¹, 王雪峰²

(1. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西宝鸡 721014; 2. 西安工业大学兵器科学与技术学院, 陕西西安 710021)

摘要: 钛合金铸造因为高活性熔体与复杂型腔的强交互作用, 导致其调控精度难以控制。为突破瓶颈, 提出构建基于多物理场耦合模型的熔体流动与传热协同优化机制, 以及开发融合高维特征提取与降维技术的铸造过程温度场实时闭环控制系统。期望本研究构建的智能控制系统框架为钛合金铸件铸造提供理论支撑与技术保障。

关键词: 钛合金铸造; 温度场均匀性; 智能控制系统; 高维特征降维; 多模态感知

中图分类号: TG146.23; TG131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0288-05

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0040

Design and Research of Intelligent Casting of Titanium Alloy Taking Homogeneity and Stability of Temperature Field as the Core

LI Bao-wen¹, WANG Xue-feng²

(1. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, Shaanxi, China; 2. College of Weapon Science and Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: Titanium alloy casting faces challenges in precise control due to the strong mutual interaction between highly reactive melt and complex mold cavities. In order to break through this bottleneck, a collaborative optimization mechanism for melt flow and heat transfer based on multi-physics coupling models was proposed, and a real-time closed-loop temperature control system during casting process integrating high-dimensional feature extraction and dimensionality reduction technologies was developed. It is expected that the intelligent control framework built through this research could provide theoretical and technical supports for the manufacturing of titanium alloy castings.

Key words: titanium alloy casting; temperature field homogeneity; intelligent control system; high-dimensional feature dimensionality reduction; multimodal perception

钛熔体化学活性极强, 与型壳材料易发生界面反应, 且复杂型腔结构导致熔体流动路径不规则, 流动阻力与传热边界条件动态变化, 使得温度场与流场耦合机制难以精准描述。以提升钛合金铸造过程温度场均匀性与充型稳定性为核心目标, 围绕多物理场耦合模型构建、高维数据特征降维和多模态感知融合等关键技术设计智能控制系统框架, 实现对铸造过程的精准调控与异常工况的主动干预。

1 钛合金铸造温度场与充型稳定性 相关概念界定

温度场均匀性是指在熔融钛合金充填型腔直至完

全凝固的整个时空过程中, 熔体内部及熔体-型壳界面区域温度在空间分布上的均一化程度^[1]。温度场的不均匀性会导致凝固收缩不一致, 产生的局部热应力集中, 这是铸件变形和开裂等宏观缺陷的主要根源^[2]。局部过热区域还会加剧熔体与陶瓷型壳材料的界面反应, 导致铸件表面渗氧/氮层增厚和脆性金属间化合物增多, 损害表面质量和抗疲劳性能^[3]。充型稳定性则是指熔融钛合金在特定压力驱动下, 能连续、平稳且完整地填充复杂型腔通道的能力和状态^[4]。充型过程的不稳定性会造成剧烈的湍流、飞溅或表面波动, 极易将气体或型壳表面剥落的夹杂物卷入熔体内部, 形成气孔和氧化夹杂等缺陷, 在极端情况下会造成铸件充型

基金项目: 陕西自然科学基金项目 (2022J1-568)。

收稿日期: 2025-10-31 收到初稿, 2026-11-21 收到修订稿。

作者简介: 李宝文 (1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为控制工程。电话: 13809176652, E-mail: intend2016@126.com

引用格式: 李宝文, 王雪峰. 以温度场均匀稳定性为核心的钛合金智能铸造设计研究 [J]. 铸造, 2026, 75 (3): 288-292.

LI Baowen, WANG Xuefeng. Design and research of intelligent casting of titanium alloy taking homogeneity and stability of temperature field as the core [J]. Foundry, 2026, 75 (3): 288-292.

不完整而报废^[5]。钛合金熔体的高活性使得其与型壁的润湿行为对流动状态极为敏感,不稳定的流动更容易加剧界面反应的不一致性^[6]。

2 钛合金铸造温度场均匀性与充型稳定性控制难点分析

2.1 钛合金高活性熔体与复杂型腔交互作用机制复杂

钛合金熔体在高温下具有极强的化学活性,几乎能与所有已知的耐火材料发生反应,这一特性使其与复杂型腔结构的交互作用变得极其复杂且难以预测^[7]。型腔表面的微观粗糙度、涂层状态、局部几何突变以及型壳材料在高温下的热物理性能变化,共同构成高度动态和非线性的流动边界条件与传热边界条件^[8]。高活性熔体流经这些复杂表面时,其流动状态和界面热交换效率会随位置和时间发生剧烈变化^[9]。局部区域的流动分离或滞止容易加剧熔体与型壳的接触时间,导致界面反应层增厚,改变局部传热系数,甚至堵塞细小流道;型腔几何突变处易形成涡流或低压区,增加气体卷入风险,同时涡流导致的局部热积累会破坏温度场均匀性;薄壁区域散热快,易导致熔体前沿过早凝固,阻碍后续熔体充填,引发冷隔或充不满;而厚大区域则容易因散热慢而形成局部热点,加剧凝固偏析^[10]。熔体高活性与型腔结构复杂性相互耦合、动态演变的交互作用机制,使得精确描述和预测熔体在型腔内的流动行为与温度分布变得异常困难,给均匀温度场和平稳充型的实现带来了根本性的挑战^[11]。

2.2 多物理场强耦合下温度场实时精准调控难度大

熔体流动直接影响热量的输运与分布,温度场的变化又反过来影响熔体的粘度、密度等物性参数,进而改变流动状态和压力分布^[12]。在凝固前沿附近,相变潜热的释放更是与流动和传热紧密耦合^[13]。强耦合特性意味着对温度场的调控不能孤立进行,必须同时考虑其对流场的影响以及流场对其的反作用^[14]。在实际铸造过程中,为了实现温度场的实时精准调控,需基于当前状态和耦合模型预测未来短时温度变化趋势,计算出最优的控制指令并执行^[15]。高维数据的实时处理、复杂耦合模型的快速求解以及控制决策的即时生成,在现有计算能力和传感技术的限制下构成巨大的技术瓶颈,任何环节的延迟或误差都会导致调控滞后或失准,难以实现温度场在空间和时间上的高度均匀性。

2.3 极端工况下充型过程稳定性在线感知与决策滞后

钛合金铸造常在接近极限的条件下进行,使得充

型过程极易受到各种内外部扰动的冲击,及时发现并准确评估稳定性变化是实施干预的前提^[16]。但单一类型的传感器只能捕捉到充型状态的局部或片面信息,需要融合多源异构传感器信息进行综合判断,但这又增加了数据同步、特征提取和状态辨识的复杂性^[17]。并且从感知到潜在不稳定信号,到分析判断其性质、程度和演化趋势,再到生成并执行有效的控制决策,此过程需要过多的时间^[18]。在极端工况快速演变的背景下,传统的基于离线分析或简单阈值报警的决策模式存在滞后,无法在缺陷形成的关键窗口期内实施干预,是制约高质量钛合金铸件稳定生产的关键瓶颈问题^[19]。

3 面向均匀温度场与稳定充型的智能控制系统核心设计策略

3.1 基于多物理场耦合模型的熔体流动与传热协同优化

在钛合金铸造过程中,熔体流动与传热过程相互影响、相互耦合,最终影响温度场的均匀性和充型的稳定性^[20]。为了实现对这两个过程的协同优化,需要建立基于多物理场耦合的数学模型,熔体流动过程满足纳维尔-斯托克斯方程,其动量守恒方程如下:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = \nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (1)$$

式中: ρ 为熔体密度; u 为熔体速度矢量; t 为时间; p 为压力; μ 为动力粘度; g 为重力加速度矢量。

连续性计算如下:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

传热过程遵循能量守恒定律,考虑熔体的相变潜热,能量守恒过程如下:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (3)$$

式中: T 为温度; c_p 为定压比热容; k 为导热系数; S 为包括相变潜热等在内的内热源项。

结合钛合金铸造充型过程的特点对熔体自由表面进行隐式表征,将自由表面的运动边界条件、相界面追踪要求嵌入至纳维尔-斯托克斯方程(式1)和连续性方程(式2)的求解边界与离散格式中,通过体积分数的输运与重构实现自由表面形态和运动过程描述,故不单独建立自由表面运动控制方程,简化多物理场耦合建模的复杂度。式(1)-(3)采用有限体积法(FVM)进行数值求解,先对钛合金铸造的模具与熔体区域进行结构化网格划分,将瞬态的动量、质量、能量守恒方程离散为网格节点上的代数方程组,采用SIMPLEC算法实现速度-压力的耦合求解,引入焓法对

式(3)中相变潜热对应的内热源项进行定量处理,通过时间步长的迭代计算,逐步求解得到不同铸造时刻熔体的速度场、压力场以及模具与熔体的全域温度场分布,求解过程中同步通过VOF法的体积分数判据更新熔体自由表面的位置与形态,保证流场与温度场的耦合一致性。

为了提升温度场均匀性与充型稳定性,需要定义优化目标函数,温度场均匀性通过温度方差来衡量,表达如下:

$$J_1 = \frac{1}{V} (T - T_{avg})^2 dV \quad (4)$$

式中: V 为模具体积; T_{avg} 为模具内平均温度。

充型稳定性通过熔体流动速度的均匀性来表征,定义为:

$$J_2 = \frac{1}{A} \int A (|u| - \bar{u})^2 dA \quad (5)$$

式中: A 为充型通道横截面积, u 为平均流动速度。

针对钛合金熔体的高活性,系统通过多物理场耦合模型Explicitly引入界面反应动力学方程,将局部温度与反应速率关联,如在优化目标中添加界面反应层厚度最小化项,从而在协同优化中直接抑制高活性带来的负面影响。

式(1)-(3)求解得到的全域温度场代入式(4)完成温度方差的定量计算,实现温度场均匀性的量化表征;将充型通道内的熔体速度场分布代入式(5),计算得到流动速度均匀性指标,实现充型稳定性的量化评价;将局部微区的温度场数据代入界面反应动力学方程,用阿伦尼乌斯公式完成局部界面反应速率的计算,积分得到界面反应层厚度分布,为多目标优化体系补充界面反应抑制的量化指标,最终将温度场均匀性、充型稳定性、界面反应层厚度三类量化指标整合为协同优化的综合目标函数。

采用粒子群优化算法(PSO)对多物理场耦合模型进行求解,每个粒子的状态由位置和速度表示,第*i*个粒子在第*k*次迭代时的速度和位置更新公式为:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1 (pbest_i^k - x_i^k) + c_2r_2 (gbest^k - x_i^k) \quad (6)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (7)$$

式中: w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为加速常数; r_1 、 r_2 为[0, 1]区间的随机数; $pbest_i$ 为第*i*个粒子的个体最优位置; $gbest$ 为全局最优位置。

PSO算法以加热功率、充型压力为优化变量(粒子位置),将综合目标函数的最小值作为算法寻优目标,通过式(6)-(7)完成粒子速度与位置的迭代更新,得到新的工艺参数组合;随后将新的工艺参数代入多物理场耦合模型,重新求解式(1)-(3)得到更新后的流场、温度场及界面反应数据,再次计算综

合目标函数并评价粒子适应度,以此形成“多物理场耦合求解(式1-3)→优化目标量化计算→PSO算法参数寻优→模型重新求解”的闭环迭代过程,直至粒子适应度满足收敛条件,实现工艺参数的自适应调控。如当模型求解式(1)-(3)后预测到局部过热会加剧界面反应时,PSO算法自动迭代降低该区域加热功率并优化充型压力分布,调整后的参数反代入模型重新求解流场与温度场,实现对界面反应的精准抑制与充型过程的稳定控制。

3.2 融合高维特征降维的铸造过程温度场实时闭环控制

在钛合金铸造过程中,温度场检测数据具有高维特性,如果直接处理会增加计算复杂度,所以为了实现温度场的实时闭环控制,采用高维特征降维技术对检测数据进行处理^[21]。利用分布在模具各部位的温度传感器,实时采集温度数据,形成高维温度数据向量 $T=[T_1, T_2, \dots, T_n]^T$,其中*n*为传感器数量。

采用主成分分析(PCA)和局部线性嵌入(LLE)相结合的降维方法,对高维温度数据进行降维处理,首先对温度数据进行标准化处理,计算协方差矩阵*C*:

$$C = \frac{1}{m-1} X^T X \quad (8)$$

式中: X 为标准化后的温度数据矩阵; m 为样本数。

求解协方差矩阵的特征值和特征向量,选取前*d*个主成分,使得累计方差贡献率达到95%以上。主成分变换矩阵为 W_p ,降维后的数据为 $Y_p = XW_p$ 。

对于非线性结构的温度数据,采用LLE进行降维,通过构建局部线性重构权重矩阵,保持数据的局部几何结构,计算每个数据点的局部重构权重 W_l ,如下:

$$\min_{W_l} \sum_i \|x_i - \sum_j W_{ij} x_j\|^2 \quad (9)$$

约束条件为 $\sum_j W_{ij} = 1$ 。求解广义特征值问题,得到低维嵌入坐标 Y_l 。

为建立温度场与铸造缺陷之间的关系模型,系统集成历史数据构建缺陷概率预测函数,将温度方差与缺陷类型关联,建立温度场的状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (10)$$

式中: x 为包括各关键部位的温度在内的状态向量; u 为加热装置的控制输入; y 为输出向量,即降温后的温度特征; A 、 B 、 C 、 D 为状态空间矩阵。

采用线性二次型调节器(LQR)设计控制器,目标函数为:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (11)$$

式中： Q 和 R 为权重矩阵；通过求解代数黎卡提方程得到最优控制律 $u = -Kx$ ，其中 $K = R^{-1}B^T P$ ， P 为黎卡提方程的解^[22]。智能化调控通过LQR实时优化控制输入，如当缺陷模型预测到气孔风险升高时，系统自动增加局部加热功率以提升温度均匀性，体现毫秒级响应和自适应决策。

3.3 集成多模态感知的充型稳定性在线评估与自适应决策

充型稳定性受到温度场、熔体流动速度等多种因素的影响，传感器安装于内浇道入口、型腔壁面的熔体贴合处与熔体流道对应的型壳关键段外壁，构建多模态感知向量 $S = [T^T, P^T, Q^T]^T$ ，其中 P 为压力数据向量， Q 为流量数据向量^[23]。

采用支持向量机（SVM）建立充型稳定性分类模型。将充型状态分为稳定、临界稳定和不稳定三类，以多模态感知数据作为输入，通过核函数将数据映射到高维特征空间，构造最优分类超平面，核函数选择径向基函数（RBF）表示如下：

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2) \quad (12)$$

式中： γ 为核函数参数。

通过结构风险最小化原则，求解优化问题：

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} \|W\|^2 + C \sum_{i=1}^m \xi_i \quad (13)$$

约束条件为 $y_i[w \cdot \phi(x_i) + b] \geq 1 - \xi_i$ ， $\xi_i \geq 0$ 。其中 w 为权重向量； b 为偏置； ξ_i 为松弛变量； C 为惩罚参数。系统考虑高活性影响，在SVM模型中添加界面反应指标作为特征，通过红外传感器实时监测型壳表面温度变化，间接评估反应层增长，从而在决策中优先控制高活性区域。

基于模型预测控制（MPC）设计自适应决策算法，根据充型稳定性评估结果，预测未来一段时间内的充型状态，并调整控制策略，预测模型如下：

$$x(k+1) = f[x(k), u(k)] \quad (14)$$

式中： f 为非线性预测函数。

滚动优化目标函数如下：

$$J = \sum_{i=1}^N \|y(k+i|k) - y_r(k+i)\|^2 + 2\rho \sum_{i=0}^{N-1} \|u(k+i)\|^2 \quad (15)$$

式中： N 为预测时域， y_r 为参考轨迹， ρ 为控制输入权重。

通过求解滚动优化问题，得到最优控制序列，仅将第一个控制量施加到系统中，实现对充型过程的动态调整^[24]。MPC进行实时滚动优化，当多模态感知检测到流动不稳定信号时，系统立即调整压力参数以避

免飞溅，减少气体卷入，确保充型平稳。

4 仿真验证

采用COMSOL Multiphysics 6.0构建有限元模型，并利用MATLAB R2023a开发并集成实时智能控制系统，对某型复杂曲面薄壁叶片铸件的充型与凝固过程进行闭环优化仿真，仿真对象为某航空发动机钛合金叶片，其型腔为典型的复杂曲面薄壁结构，包络尺寸约为120 mm长、60 mm宽、5 mm厚。将从CAD软件导出的型腔三维几何模型导入COMSOL Multiphysics工作环境。熔体密度设为4 500 kg/m³，动力粘度设为0.002 Pa·s，凝固过程定义为从液相线温度1 650 ℃至固相线温度1 600 ℃的温度区间。陶瓷型壳的导热系数设定为1.2 W/(m·K)。初始工艺条件设置为熔体过热温度50 ℃，即初始浇注温度为1 700 ℃，型壳预热温度为800 ℃，以减少热冲击并促进顺序凝固。研究中施加0.5 MPa充型压力，模拟低压铸造或差压铸造等精密成形工艺条件。

试验流程如下：①在COMSOL中建立包含流体流动与传热模块的多物理场耦合模型，采用非结构四面体网格对计算域进行离散，并在薄壁区域及圆角处进行局部加密以确保计算精度，完成所有物理场的边界条件与初始条件设置，将上述材料属性与工艺参数赋予模型；②配置COMSOL与MATLAB的实时通信接口，在MATLAB中部署智能控制算法，算法输入为从COMSOL仿真中实时读取的、分布于型腔关键位置的多个传感器虚拟测温点的温度数据以及浇口与前沿的平均流速，其输出为动态调整的充型压力设定值或补充加热功率；③运行常规控制模式下的基准仿真，即在整个模拟过程中保持浇口处熔体温度与充型压力恒定不变，以此作为对比基线；④启动智能控制联合仿真，COMSOL求解器以10 ms为步长推进计算，每一步将当前步的温度场与流场数据发送至MATLAB控制算法，算法计算得到新的优化控制参数并实时回馈至COMSOL模型中，更新边界条件；⑤在充型及后续凝固过程中，同步记录两种模式下所有监测点的温度时序数据、型腔内熔体前沿速度变化历程，并基于凝固模拟结果与缺陷判据进行缺陷统计分析；⑥在后处理阶段，利用定义的量化指标进行性能评估，其中式（4）用于计算整个型腔在关键时刻的温度场方差，以衡量温度均匀性，式（5）用于计算流动均匀性系数，以评价充型平稳度，并统计模拟预测的气孔与冷隔等缺陷的体积占比或数量占比。

仿真结果显示，在温度场控制方面，常规恒参数控制下，由于热损失不均，型腔内部温度方差达到

85 °C²，而智能控制系统通过动态微调工艺参数，使温度方差降低至23 °C²，均匀性提升幅度高达73%。在充型过程稳定性方面，常规控制下的熔体前沿速度波动剧烈，幅度达到±15%，易导致湍流和卷气；智能控制通过实时压力补偿，将速度波动幅度有效抑制在±4%的狭窄范围内，实现接近平稳的层流填充。模拟预测的铸造缺陷总发生率从12.3%下降至3.1%。从数据发送到执行控制指令的整个闭环响应时间在仿真环境中被验证为8 ms，证明集成系统具备应对铸造过程快速变化的实时调控能力。

5 结语

研究针对钛合金铸造过程中温度场均匀性与充

型稳定性控制的共性难题，指出钛合金高活性熔体与复杂型腔的强动态交互作用是温度场失稳与充型缺陷的根源，认为通过建立熔体流动与传热的联合数学模型，结合粒子群优化算法动态优化模具加热功率分布，能提升温度场空间均匀性与流动稳定性。基于此，提出采用PCA-LLE混合降维技术压缩温度传感数据维度，结合LQR最优控制算法实现毫秒级响应。通过温度场均匀性控制减少凝固偏析与热应力缺陷能为航空发动机叶片、航天承力构件等高端铸件的“一次成形”提供可控且可靠的制造范式，推动钛合金精密铸造向数字化和智能化转型升级。

参考文献:

- [1] 李伟杰, 才耀淇, 刘青, 等. 温度/超声/速度对BT14钛合金拉伸性能的影响 [J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 7 (6): 1-5.
- [2] 陆珍, 王斌, 郝静, 等. 钛合金在自动控制系统中的结构优化分析 [J]. 冶金与材料, 2025, 45 (5): 25-27.
- [3] 范春浩, 胡俊山, 杨智勇, 等. 固化残余应力和变形对钛合金损伤构件CFRP单面贴补结构的拉伸性能影响研究 [J]. 航空学报, 2025, 6 (7): 1-17.
- [4] 陈坤, 徐少峰, 潘晓冬, 等. 小径TA16钛合金管对接焊缝的缺陷修复工艺研究 [J]. 电焊机, 2025, 55 (6): 125-131.
- [5] 付艳恕, 吴祖锡, 黄晓文, 等. 激光摆动熔丝增材制造TC11钛合金成形参数及显微组织演变规律 [J]. 中国激光, 2025, 52 (12): 264-274.
- [6] 张政, 丁来法, 张宇鹏, 等. 时效温度对Ti35421钛合金真空电子束接头组织和力学性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2025, 7 (6): 1-11.
- [7] 甘世旭, 付航. 基于钛合金材料的航空发动机叶盘精密加工技术研究 [J]. 内燃机与配件, 2025 (11): 122-124.
- [8] 姜爽, 史春景, 李金泉. 基于神经网络的钛合金切削振动预测模型研究 [J]. 制造技术与机床, 2025, 7 (6): 1-7.
- [9] 张恩亮, 杨文刚, 谢晓斐, 等. 高温梭式窑温度均匀性的模拟分析与设计优化 [J]. 工业加热, 2025, 54 (4): 19-25.
- [10] 田家全, 姜宏, 章翔峰, 等. 超声气体温度场重建算法研究 [J]. 制造业自动化, 2025, 47 (3): 149-155.
- [11] 李灿, 王龙, 熊俊驰, 等. 基于遗传算法的神经网络对大体积混凝土监测优化研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (3): 134-139.
- [12] 杨帆, 高三策, 王嘉玮, 等. 磁-热耦合应力下的变压器绕组形变研究 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 11 (7): 1-12.
- [13] 吴高生, 周瑞红, 杨叶, 等. 基于ABAQUS的钛合金铣孔二维切削仿真与试验研究 [J]. 工具技术, 2025, 59 (6): 107-112.
- [14] 李朋, 王世路, 李志勇, 等. 2A12铝合金交流ASMT工艺的熔滴过渡及焊缝成形研究 [J]. 热加工工艺, 2025, 11 (7): 1-8.
- [15] 闫珊, 付天宇, 古云飞, 等. 基于改进粒子群PID的CFRP感应加热升温调控 [J]. 工程塑料应用, 2024, 52 (8): 72-80.
- [16] 黄灵芝, 张朝森, 司政, 等. 基于遗传算法的碾压混凝土重力坝温度场多测点反演 [J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35 (4): 83-91.
- [17] 黄嘉庆, 沈玲, 贺建军, 等. 大规格尖端铝合金锻件温度场协同解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2025, 11 (7): 1-10.
- [18] 毛家龙, 刘清倦, 潘旭, 等. 机载探空温度传感器设计与研究 [J]. 电子测量技术, 2024, 47 (13): 1-9.
- [19] 李元鏊, 赵洛延, 宋博, 等. 管式连续结晶器温度分布的高斯过程回归建模与预测 [J]. 化学工业与工程, 2024, 41 (6): 169-175.
- [20] 冯英, 祁祺, 李小华, 等. 基于神经网络的汽车空调送风格栅角度优化与乘员舱降温性能改进 [J]. 汽车工程学报, 2025, 15 (2): 177-186.
- [21] 刘新, 王晓, 杨博, 等. 基于神经网络与NSGA-II算法的钢轨闪光焊工艺参数优化 [J]. 铁道学报, 2024, 46 (12): 104-112.
- [22] 蔡高参, 胡宇恒, 刘辉, 等. 支柱尺寸对钛合金点阵结构薄壁件温度变化和残余应力的影响 [J]. 航空制造技术, 2025, 68 (10): 50-57.
- [23] 彭金波, 叶受智, 全琼蕊. TC2钛合金板焊接接头残余应力分布及焊后热处理应力松弛效应模拟 [J]. 金属热处理, 2025, 50 (5): 300-308.
- [24] 高强, 程旺军, 孙耀宁, 等. 超低温下42CrMo模具钢拉深凸模温度场模拟与实验研究 [J]. 锻压技术, 2025, 50 (5): 226-233.