

冰点之下的火焰奇迹：亚冬会“澎湃”火炬如何扛住极寒与狂风？

Flame Miracle Under Freezing Point: How Does the "Pengpai" Torch for Asian Winter Games Withstand Extreme Cold and Strong Winds?

供稿|张俊海 / ZHANG Junhai

内
容
导
读

在零下 25℃ 的极寒与 10 级狂风交织的哈尔滨松花江畔，2025 年亚冬会火炬“澎湃”实现了“冰与火共存”的奇迹。为应对冰雪、低温和强风三重挑战，本文基于一项自主专利技术，构建了一套从极端环境需求出发，贯穿材料选择、工艺创新到性能验证的完整研发体系。文章介绍了 316L 不锈钢、TC4 钛合金和 GH4169 高温合金 3 种金属材料如何“各司其职”——有的耐腐蚀、有的轻如羽、有的坚如钢，并通过激光深熔焊、3D 打印蜡模铸造、深冷处理等前沿工艺，打造出既轻盈又坚固的火炬核心部件。实验结果表明，火炬在-25℃ 无风环境下可连续燃烧 20 h，在-10℃、10 级强风中火焰依然稳定挺拔。这套技术不仅为大型赛事火炬提供了可靠方案，也为极地装备、航空发动机等极端环境设备的材料与工艺创新提供了可借鉴的思路。

火炬设计背景与金属材料核心需求

2025 年 1 月，哈尔滨松花江畔，零下 25℃ 的严寒中，凛冽的北风卷着雪粒呼啸而过。一位火炬手高举“澎湃”火炬，火焰在 10 级狂风中依然挺拔如松，橙红色的焰光映照着皑皑白雪。这看似不可能的任务——在极寒与强风的双重夹击下维持稳定燃烧——正是本文所要揭示的材料与工艺创新故事。

哈尔滨亚冬会火炬传递路线包含松花江畔、中央大街等高寒户外区域，而松花江畔冬季受西伯利亚冷空气强烈影响，平均风速 3~5 m/s，瞬时阵风可达 10 级，江面蒸发的水汽极易在火炬表面结霜，因此亚冬会火炬必然要面对极端环境下燃烧稳定性、结构可靠性、综合性能平衡的三大难题。具体而言：燃烧稳定性要求火炬在-25℃ 低温、10 级强风

作者单位：北京科技大学机械工程学院，北京 100083

及积雪覆盖条件下火焰连续、规整，结构可靠性要求火炬能耐受 800~1000 °C 燃烧高温及 -25 °C 低温交替冲击，无脆裂变形且抗碰撞性能良好，综合性能平衡则要求单支火炬净重 ≤ 2 kg，抗冰雪腐蚀，外观兼具金属质感与赛事文化内涵，实现功能与美学统一^[1]。重要的是，所有这些性能指标，最终都根植于燃烧系统核心材料中所选用的金属材料的精准选型、性能优化及合理的加工工艺。可以说，金属材料的耐高温性、抗低温韧性、力学强度等参数直接决定了火炬的工作效能及使用寿命。

本文以所依托的自主知识产权的“一种多重保障火炬持续燃烧系统”专利技术（ZL202011099770.8）^[2]为基础，建立了“极端环境需求驱动-材料性能精准匹配-创新工艺集成实现-多维性能全面验证”四维一体的技术研发体系：从极端环境需求出发，做到材料性能与部件功能精准匹配，用创新工艺实现结构优化，再以多维性能验证保证系统可靠性。

专利“一种多重保障火炬持续燃烧系统”^[2]是“澎湃”火炬设计之初确保稳定燃烧的核心，专利系统由燃气供给与混合模块、燃烧与稳定模块、环境保护模块及视觉模块四大核心模块构成，如图 1 所示。燃气供给与混合模块采用双螺旋多孔气道，以 316L 不锈钢为材质，通过螺旋曲面引导燃气与空气预混，透气孔总面积占气道表面积 35%，实现丙烷汽化效率提升 40%；燃烧与稳定模块设内燃舱与外

焰舱隔板，采用 TC4 钛合金，隔板设等腰梯形导流槽，引导二次气流形成“气幕”抵御 10 级风扰；环境保护模块顶部防护罩采用 TC4 钛合金，半球形气动外形使风阻系数较传统设计降低 30%；视觉模块焰色反应条载体采用 GH4169 高温合金，固定稀土金属盐，高温下激发有色火焰，契合冬奥会主题。金属材料因优异力学、热物理性能及加工性成为唯一满足要求的材料，聚合物材料长期使用温度不足，陶瓷材料脆性大，复合材料界面稳定性差，均被排除。

火炬核心部件的金属材料创新选型

基于“性能需求-材料特性-场景适配”体系，选型过程采用正交试验设计，对 12 种候选材料（包括 304 不锈钢、Ti-6Al-4V 超低间隙元素（ELI）钛合金、Inconel625 高温合金等）进行“耐高温-抗低温-轻量化-成本”四维评价，确定 316L 不锈钢、TC4 钛合金、GH4169 高温合金为核心材料，如图 2 所示。3 种材料关键性能对比如表 1 所示^[3]：

在材料选型初期，研发团队曾面临艰难抉择：GH4169 高温合金虽耐高温性能优异，但密度较大；TC4 钛合金轻量化效果显著，却需解决低温脆性问题。一次低温试验中，某型号合金在 -25 °C 冲击试验中出现微裂纹，团队连续 72 h 攻关，最终通过深冷处理工艺将冲击功提升至 95 J，确保了材料在极端环境下的可靠性。

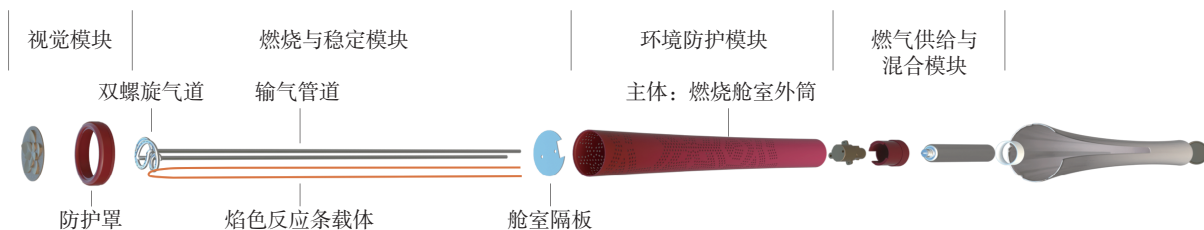


图 1 一种多重保障火炬持续燃烧系统示意图（以澎湃火炬为例）

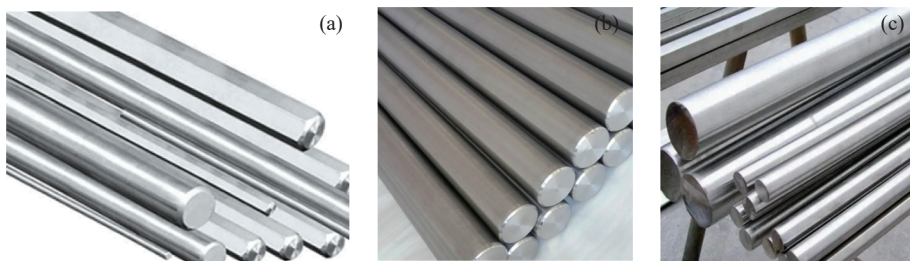


图 2 (a) 316L 不锈钢；(b) TC4 钛合金；(c) GH4169 高温合金

表1 材料综合性能对比表

金属材料	密度/(g/cm ³)	短期/长期耐高温性能/℃	低温韧性(-25℃)/J	抗拉强度/MPa	适配部件
316L不锈钢	7.98	900/800	≥60	≥485	双螺旋气道; 输气管道
TC4钛合金	4.51	600/400	≥80	≥860	舱室隔板; 防护罩; 主体
GH4169高温合金	8.24	800/650	≥55	≥1240	焰色反应条载体

注: 性能参数为标准热处理后实测值, 低温韧性^[4]采用夏比V型缺口冲击试验, 抗腐蚀性能通过人造气氛腐蚀试验^[5]及燃气环境浸泡试验综合评估^[3]。

双螺旋多孔气道材料

双螺旋多孔气道选用 316L 不锈钢, 该材料钼含量(质量分数)为 2%~3%, 使抗点蚀能力较普通不锈钢提升 3~5 倍, 在含硫燃气环境中腐蚀速率 ≤0.01 mm/a。采用激光切割 0.8 mm 均匀透气孔, 孔间距 2 mm 呈等边三角形分布, 确保混合气流均匀性(速度偏差 ≤5%); 经 1050℃ 固溶处理(水冷)消除内应力, 800℃ 高温下变形量 ≤0.05 mm, 满足在 900℃ 工作 2 h 表面无氧化。

舱室隔板与防护罩材料

舱室隔板与防护罩采用 TC4 钛合金, 密度 4.51 g/cm³, 为 316L 不锈钢的 57%, 部件减重 30% 以上, 火炬总重控制在 1.75 kg, 抗拉强度 ≥860 MPa。隔板采用 2 mm 厚板材经精密冲压成等腰梯形导流槽, 700℃ 真空退火消除应力; 防护罩采用“SLA 光固化 3D 打印蜡模+精密铸造”, 激光切割扇形结构+数控折弯半球形轮廓, 表面在 20℃、质量分数 15% 硫酸溶液中阳极氧化形成 15 μm 厚金色氧化层, 接触角 ≥110°防结霜。

焰色反应条载体材料

焰色反应条载体选用 GH4169 高温合金, 通过固溶强化与沉淀强化析出 γ' 相, 焰色反应条载体工作温度不超过 800℃, 800℃ 抗拉强度 ≥800 MPa, 氧化 100 h 后生成的氧化皮仅 5 μm^[3]。采用“3D 打印改性石蜡蜡模+硅溶胶型壳精密铸造”, 热传导系数 15 W/(m·K), 3 s 内使反应条达激发温度, 连续燃烧 20 h 无衰减。

金属工艺创新支撑专利技术落地

异种金属焊接工艺

为应对异种金属焊接难题, 采用激光深熔焊技

术(高能量密度、小热输入), 通过工艺试验确定参数: 针对 316L-TC4 异种金属焊接, 采用铜/钕复合中间层过渡, 优化激光功率与焊接速度匹配; 气道-隔板(316L-TC4)用 2000 W 激光功率、3 mm/s 焊接速度、0.6 mm 光斑、99.999%(体积分数)氩气保护(流量 20 L/min), 焊缝强度 ≥310 MPa; 防护罩-主体(TC4-TC4)采用 1800 W 功率、4 mm/s 焊接速度、0.5 mm 光斑, 焊缝强度 ≥840 MPa; 焰色反应条载体-燃烧舱(GH4169-316L)采用镍基合金中间层, 用 2200 W 激光功率、2.5 mm/s 焊接速度、0.7 mm 光斑、99.999%(体积分数)氩气保护(流量 25 L/min), 焊缝强度 ≥470 MPa。

焊接工艺要点包括异种金属焊接前预热至 200℃、焊后石棉保温缓冷(冷却速率 ≤5℃/min), 双重气体保护避免氧化, 经 X 射线探伤、拉力试验、水压试验, 焊缝无缺陷, 合格率 100%, 气密性远超 8 MPa 赛事标准。

复杂结构成型工艺

复杂结构部件采用“SLA 光固化 3D 打印蜡模+失蜡铸造”工艺: 蜡模用 SLA 光固化 3D 打印, 层厚 0.05 mm, 水溶性树脂支撑, 80℃ 温水去支撑, 确保 0.8 mm 透气孔无变形; 蜡模与浇冒口组合后, 型壳制备用 6 层硅溶胶-莫来石粉涂料制壳, 0.8 MPa 蒸汽脱蜡, 在 1050℃ 焙烧 2 h, 真空浇注金属液。该工艺实现一体化成型, 尺寸公差 ≤±0.1 mm, 材料利用率提高 50% 以上。

低温适配处理工艺

低温适配处理采用深冷工艺^[6]。以下数据为内部实验测试结果(夏比 V 型缺口冲击试样尺寸: 10 mm×10 mm×55 mm): 316L 不锈钢经 -80℃ 低温处理(5℃/min 降温, 保温 2 h, 随后以 3℃/min 升温), 经过该处理后残余奥氏体的体积分数从

8%降至2%以下,晶粒细化至3.1 μm, -25℃冲击功从60 J提高至75 J; TC4钛合金在-196℃深冷处理(采用液氮温度,4℃/min降温,保温2 h,随后采用2℃/min升温),深冷处理后残余应力降低,冲击功提升,表面静电喷涂8 μm聚四氟乙烯防霜涂层(接触角≥110°); GH4169高温合金在650℃真空回火(保温1 h,随后采用5℃/min冷却),残余应力从350 MPa降至80 MPa以下,冲击功从55 J提高至65 J。经“-25℃保温2 h+800℃保温1 h”循环测试,部件无脆裂变形,尺寸变形量≤0.05 mm。

材料性能测试与验证

构建高保真极端环境模拟平台,测试项目与结果如下。低温稳定性:在-25℃、湿度60%无风环

境下,连续燃烧20 h,火焰高30~35 cm(圆形成度0.85),金属部件无脆裂,燃气泄漏量0.008 L/h(据亚冬会组委会技术要求,泄漏量标准≤0.1 L/h),焰色均匀(色坐标 $x=0.18, y=0.22$, x 、 y 分别代表红色及绿色分量)。抗风能力:在-10℃、风速5~15 m/s下,5 m/s时火焰高28~32 cm(偏移量≤2 cm),10 m/s时高25~28 cm(形态完整),15 m/s时高20~25 cm(轻微偏移持续燃烧)。耐久性:在10℃、湿度50%下连续燃烧4 h,火焰无衰减,表面氧化皮厚度2 μm。机械冲击1.5 m跌落水泥地,正/侧/底各3次,外壳无破损,核心部件无变形,点燃后性能与跌落前一致。

与同类赛事火炬对比(表2),亚冬会“澎湃”火炬以全金属体系展现出了优势。

表2 同类赛事火炬性能对比表

赛事火炬	核心材料体系	低温适应/℃	净重/kg	抗风能力/级	核心优势
亚冬会“澎湃”	316L+TC4+GH4169(全金属)	-25	1.75	10	极端低温适应力强,全金属体系抗风
十五运会“绽放”	铝合金(主体)+不锈钢(顶部耐高温区)	-10	1.6	8	轻量化设计突出
北京冬奥会“飞扬”	碳纤维复合材料(外壳主体)	-20	1.8	9	环保、隔热性能优异

金属材料创新应用的行业价值

本研究系统地建立了“功能需求-材料选型-工艺适配-性能验证”完整技术体系,据此为后续赛事火炬研发提供可复用方案:如2026年亚洲沙滩运动会火炬即可以借用“双螺旋气道+钛合金防护罩”设计,以解决湿热环境使用问题。尤为重要的是,所涉技术易于推广到极端环境装备领域:智能传感器借用了耐高低温金属及精密加工工艺,由此开发出-50~150℃工作范围的温度传感器,户外炊具用TC4钛合金替代不锈钢,减重30%同时耐蚀性大大提高,航空发动机参考GH4169高温合金应用及异种金属焊接技术,对涡轮叶片连接结构做了最优设计,极地科考设备直接复用深冷处理技术以提高-60℃环境下金属部件的韧性。与此同时,文中提出的“3D打印蜡模+失蜡铸造”工艺解决了复杂结构成型问题,“激光深熔焊”积累了异种金属焊接参数库,“深冷处理”又补充完善了极端环境性能优化方法,从而推动了制造业复杂结构、异种材料连接技术的进步。

结论与展望

本研究构建了“性能-材料-场景”选型体系,据此匹配3种主要金属,并将激光深熔焊、3D打印复合工艺、深冷处理多种手段集成起来,有效解决了复杂结构成型、异种金属焊接、极端环境适配诸种难题。实验结果十分可靠:火炬在-25℃无风条件下连续燃烧20 h,在-10℃、10级风下火焰形态完整、燃烧稳定,净重1.75 kg,各项指标均优于赛事标准。由此形成了大型赛事火炬材料与工艺的创新方案。

本研究所建立的极端环境材料选型与工艺优化方法,不仅服务于赛事火炬,更可延伸至日常民生领域。例如,北方严寒地区户外燃气设备的耐低温材料选择、高海拔地区风力发电叶片的抗风蚀设计、乃至极地科考装备的可靠性保障,均可借鉴本研究的“性能-材料-场景”匹配体系。金属材料的极限探索,正悄然守护着人类在极端环境下的每一次“燃烧”。

未来将探索TiAl基轻质高温合金、金属-陶瓷

复合材料进一步减重提质；引入人工智能（AI）优化激光焊接参数，探索金属粉末床熔融 3D 打印直接制造部件；把相关技术推广到航空航天发动机部件、极地科考设备结构、深海探测耐压部件等诸多领域。

参考文献

- [1] 张俊海, 张娇. 科技与人文交融视域下的课程思政实践路径研究. 北京科技大学学报(社会科学版), 2026, 42(2): 66
- [2] 北京科技大学. 一种多重保障火炬持续燃烧系统: 中国专利, 112161263. 2021-01-01
- [3] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册: 第2卷 变形高温合金铸造高温合金. 北京: 中国标准出版社, 2002
- [4] 国家市场监督管理总局. GB/T229—2020 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法. 北京: 中国标准出版社, 2020
- [5] 国家市场监督管理总局. GB/T10125—2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验. 北京: 中国标准出版社, 2021
- [6] 纪志军, 李桂荣, 叶宇融, 等. 深冷处理钛合金的研究进展. 航空制造技术, 2022, 65(11): 70

基金项目: 亚洲冬季运动会组织委员会项目“2025 年第九届亚冬会火炬外观设计”资助项目 (SK-2025-0105)。

作者简介: 张俊海 (1983—), 男, 浙江宁波人, 北京科技大学讲师。2009 年毕业于北京科技大学设计艺术学专业, 主要研究方向: 智能硬件及互联网创新产品设计研发、公共空间装饰艺术、人机工程学、数字孪生系统设计等。2025 年第九届亚洲冬季运动会“澎湃”火炬设计师。通信地址: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学; E-mail: zhangjh@ustb.edu.cn。