

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.05.12

高温共晶点坩埚耐用性研究

孟苏^{1,2}, 胡艳青^{1,2}, 任佳¹, 高祎¹, 崔海佟¹

(1.航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2.中国航空研究院, 北京 100012)

摘要: 高温共晶点坩埚因采用石墨材料制作, 结构强度较低, 在复现试验后易发生破裂, 造成高温共晶点的损坏。坩埚耐用性问题已成为制约高温共晶点加入下一代温标的主要障碍之一。为了解决上述问题, 本文依据 ANSYS 对坩埚受力情况进行分析, 明确了坩埚主要受力点的理论位置, 之后结合多种高温共晶点的实际破裂情况, 分析了不同种类共晶点坩埚破裂的原因, 并有针对性地提出了两种高温共晶点坩埚改进方案: 改进型 Hybrid 结构和导流盖结构。最后使用改进结构的坩埚灌注了新的高温共晶点/包晶点, 复现试验后未出现损坏问题, 初步验证了方案的有效性。

关键词: 高温共晶点; 坩埚; 受力分析; 耐用性; 温度计量

中图分类号: TB942 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)05-0083-08

Research on the durability of high temperature eutectic point crucible

MENG Su^{1,2}, HU Yanqing^{1,2}, REN Jia¹, GAO Yi¹, CUI Haitong¹

(1.Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2.Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China)

Abstract: The high-temperature eutectic point (HTEP) crucible is made of graphite material with low structural strength, so it is prone to fracture after reproducing test, causing HTEP crucible damage. Durability of crucibles has become one of the main obstacles for HTEP to enter the next generation of temperature scale. In order to solve this problem, in this article, the stress situation of the crucible is analyzed based on ANSYS, and the theoretical positions of the main stress points of the crucible are clarified. Then, combined with the actual fracture situation of various HTEPs, the reasons for the fracture of different types of eutectic point crucibles are analyzed. Two improvement plans for HTEP crucibles are proposed: improved Hybrid structure and flow-guide-cover structure. Finally, some new high-temperature eutectic/peritectic points are made by using an improved structure crucible, and no damage issues are found after reproducing test, which has preliminarily verified the effectiveness of the improvement.

Key words: high temperature eutectic point; crucible; stress analysis; durability; temperature metrology

0 引言

现行 ITS-90 温标在银点(961.78℃)以上温区没有规定参考固定点^[1], 需要依据普朗克定律进行外推, 导致量传不确定度随温度升高而增大。随

着科学技术的发展, 高温量传的需求日益增多, 因此, 国际温度咨询委员会(CCT)鼓励世界各国计量机构开展高温共晶点技术研究, 具体包括 Co-C, Pt-C, Re-C 等, 以期在下一代温标中加入上述系列共晶点, 将外推改为线性内插, 减小高温段温

收稿日期: 2023-08-18; 修回日期: 2023-10-11

引用格式: 孟苏, 胡艳青, 任佳, 等. 高温共晶点坩埚耐用性研究[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 83-90.

Citation: MENG S, HU Y Q, REN J, et al. Research on the durability of high temperature eutectic point crucible[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 83-90.



度的量传不确定度，弥补ITS-90温标在高温段的先天不足^[2]。

近年来，世界主要国家计量院或计量机构(中国NIM^[3-5]、日本NMIJ^[6-7]、英国NPL^[8-9]、俄罗斯VNIIOFI^[10-12]、德国PTB^[13-14]等)均报道了开展高温共晶点相关研究和国际比对工作进展情况，高温共晶点坩埚耐用性是各国计量院普遍遇到的问题。

北京长城计量测试技术研究所已开展了Co-C(1 324 °C)^[15-16]，Pt-C(1 738 °C)，Re-C(2 474 °C)高温共晶点的研制，并对ZrC-C(2 882 °C)^[17]，HfC-C(3 185 °C)高温包晶点进行了研究^[18]。在上述研究中，通过对典型共晶点/包晶点坩埚进行ANSYS受力分析，并结合实际研究经验，发现坩埚破裂主要集中在三个部位：坩埚黑体腔、坩埚顶端(坩埚盖与坩埚主体连接处)、坩埚侧壁，需要有针对性的进行结构设计优化。本文结合国内外相关研究机构的有益经验，以Hybrid结构为基础提出坩埚改进方案，并进行有效性验证。

1 高温共晶点坩埚结构

高温共晶点坩埚采用纯度在5N(99.999%)以上的石墨材料制成，由坩埚盖、石墨垫片、坩埚主体、石墨衬套等组成。为了便于后期开展国际比对工作，世界各国计量机构采用的坩埚结构尺寸大多类似。典型坩埚结构如图1所示，坩埚结构具体参数如表1所示，内部结构剖面示意图如图2所示。

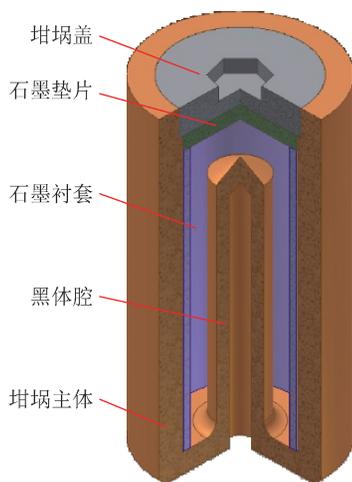


图1 典型坩埚结构

Fig.1 Typical crucible structure

表1 典型坩埚结构尺寸

Tab.1 Typical crucible structure dimensions

项目	尺寸/mm
坩埚外径	24
黑体腔开口	3
坩埚长度	45
石墨衬套壁厚	1
石墨衬套内径	14
黑体腔深度	32
黑体腔壁厚	2
垫片厚度	1

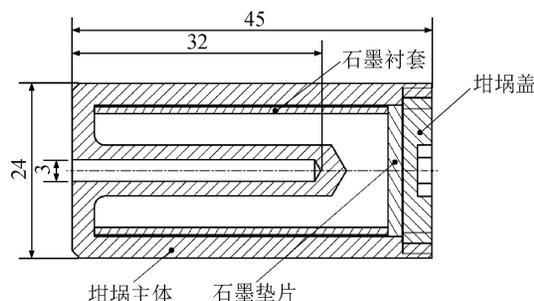


图2 典型坩埚内部结构剖面图

Fig.2 Internal structure sectional view of a typical crucible

2 基于ANSYS的坩埚受力分析

为了明确前述坩埚结构中的受力集中位置，本文利用ANSYS对共晶点相变时坩埚受力情况进行了分析，分析过程以Co-C高温共晶点为例。

Co-C共晶点为Co和C的混合，Co金属占整体质量的97.4%，且Co金属的热膨胀系数大于石墨，因此在进行受力分析时按保守估计原则，选择纯金属Co近似替代。表2为金属Co的主要物性参数，表3为制作坩埚的石墨材料主要物性参数。

首先对金属Co的热焓进行计算。

Co的焓曲线可以分为固体温度(T_s)以下、固体温度(T_s)至液体温度(T_l)之间、液体温度以上(T_l)三个部分。焓值计算示意图如图3所示。

焓值计算方程为

$$T < \text{固体温度}(T_s) \text{时,} \\ H = \rho C_s (T - T_0) \quad (1)$$

$$T = \text{固体温度}(T_s) \text{时,} \\ H_s = \rho C_s (T_s - T_0) \quad (2)$$

表2 金属Co主要物性参数

Tab.2 Main physical parameters of metal Co

密度/ (g·cm ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热膨胀系数/ K ⁻¹	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
8.9	414	13.8 × 10 ⁻⁶	69.04

表3 石墨材料主要物性参数

Tab.3 Main physical parameters of graphite materials

参数名称	密度/ (g·cm ⁻³)	杨氏模量/ GPa	泊松比	热膨胀系数/ K ⁻¹
数值	1.82	13.2	0.2	5.0 × 10 ⁻⁶

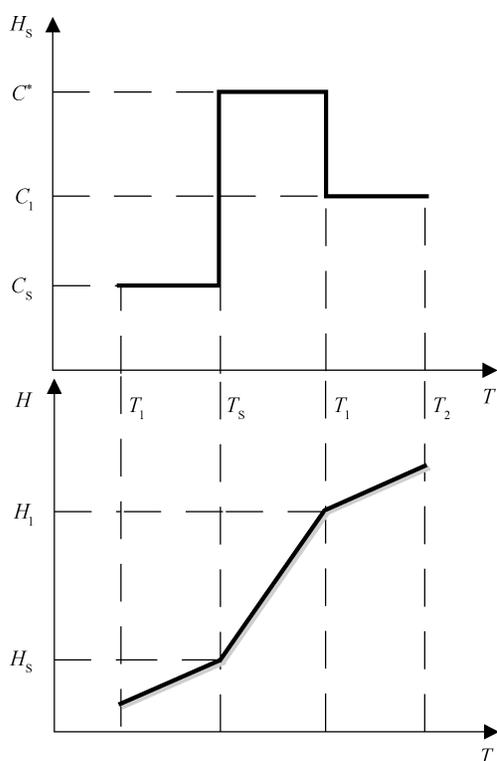


图3 焓值计算示意图

Fig.3 Schematic diagram for enthalpy calculation

固体温度(T_s) < T < 液体温度(T_l)时,

$$H = H_s + \rho C^* (T - T_s) \quad (3)$$

$$C^* = C_{avg} + \frac{L}{T_l - T_s} \quad (4)$$

$$C_{avg} = \frac{(C_s + C_l)}{2} \quad (5)$$

$T =$ 液体温度(T_l)时,

$$H_l = H_s + \rho C^* (T_l - T_s) \quad (6)$$

$T >$ 液体温度(T_l)时,

$$H = H_l + \rho C_l (T - T_l) \quad (7)$$

式中： ρ 为密度， C_s 为固体比热容， C_l 为流体比热容， L 为物质的潜热。对于Co-C共晶点，其名义相变温度为1324℃，取 $T_s = 1304$ ℃， $T_l = 1344$ ℃， T_s 、 T_l 为复现试验时的上下平台温度。 T_0 为基础参考温度，本文取0℃。

将金属Co的参数代入公式(6)和公式(7)中，得到具体焓值。利用ANSYS进行仿真，得到如图4所示结果(图4中左侧分布表为材料的线应变)。

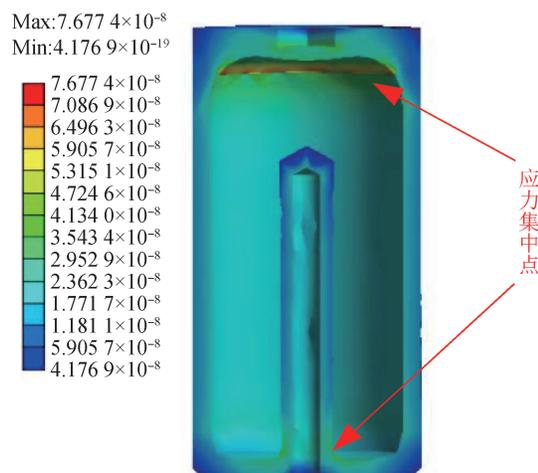


图4 坩埚内部受力分析结果

Fig.4 Internal force analysis results of the crucible

由图4可知，坩埚内部存在应力集中点，当热应力超过石墨坩埚的抗拉强度极限时，上述应力集中点将导致坩埚顶端破裂或黑体腔折断。

3 坩埚破裂问题描述与原因分析

3.1 坩埚破裂问题描述

本文制作了数个高温共晶点/包晶点，包括Co-C、Pt-C，Re-C，ZrC-C。具体数量及破裂情况如表4所示，表4中所列共晶点均采用未经任何优化改进的典型坩埚结构(如图1所示)。

需要特别说明的是，共晶点坩埚的破裂情况基本出现在复现试验后(试验过程中坩埚以水平姿态放置)，灌注试验后(试验过程中坩埚以竖直姿态放置)并未出现坩埚破裂的情况。

由表4可知，各类高温共晶点/包晶点的破裂位置主要集中在坩埚顶端、黑体腔、坩埚侧壁三个位置，其中Co-C共晶点的破裂问题较为突出。破裂现象如图5~8所示。

表4 本文制作的共晶点/包晶点数量及破裂情况
Tab.4 The number and fracture situation of eutectic/peritectic points produced in this article

共/包晶点种类	数量	破裂数量	破裂位置
Co-C	5	4	黑体腔/坩埚顶端
Pt-C	2	0	/
Re-C	4	1	坩埚顶端
ZrC-C	2	1	坩埚侧壁

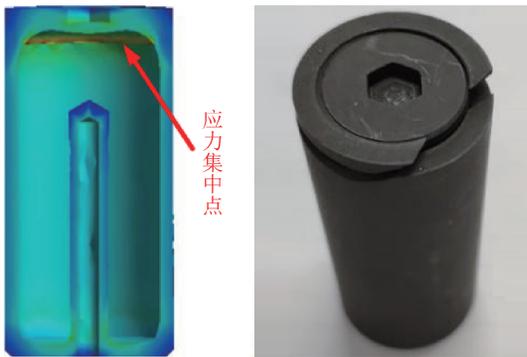


图5 Co-C/Re-C共晶点坩埚顶端破裂
Fig.5 Crucible top breaking of Co-C/Re-C eutectic point

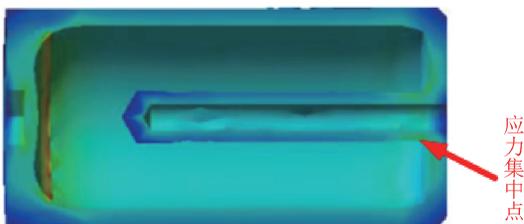


图6 Co-C共晶点坩埚黑体腔折断
Fig.6 Blackbody cavity breaking of Co-C eutectic point

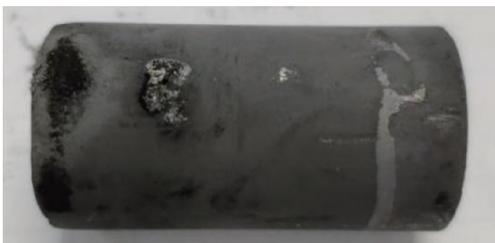


图7 ZrC-C包晶点坩埚侧壁破裂表面
Fig.7 Surface of sidewall breaking crucible of ZrC-C peritectic point



图8 ZrC-C包晶点坩埚侧壁破裂内部情况
Fig.8 Internal situation of sidewall breaking crucible of ZrC-C peritectic point

3.2 各种坩埚破裂原因分析

据实际试验结果可知不同类型共晶点的破裂情况不同, 各种共晶点/包晶点破裂原因分析如下:

1) Co-C共晶点

在本文开展的系列共晶点中, Co的膨胀系数是最大的, 其膨胀系数是Re的2倍, Pt的1.33倍, 膨胀系数大应是Co-C的破裂概率极高的原因之一。Co-C共晶点的破裂问题包括坩埚盖破裂(如图5所示)、黑体腔折断(如图6所示)。

观察破裂的Co-C共晶点坩埚, 可以发现如图5和图6所示坩埚的金属平面基本保持了灌注后的状态, 并没有因坩埚水平复现后产生流动问题。这表明Co-C共晶点在熔融态条件下的流动性很差, Co-C共晶体没有出现高流动性现象, 而是整体膨胀收缩, 如图9所示。

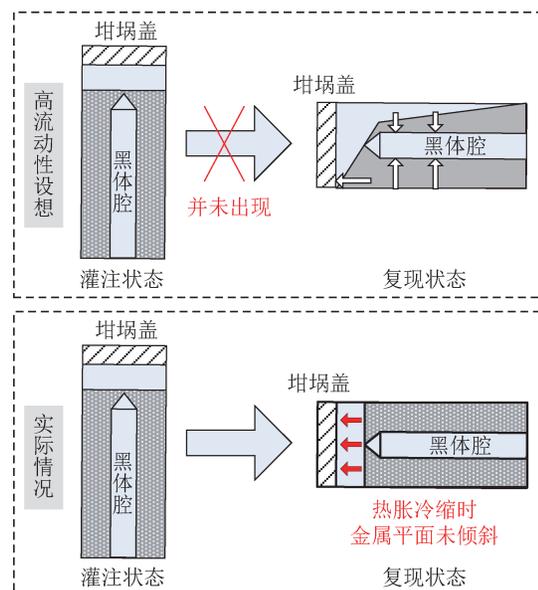


图9 Co-C共晶体熔融状态下流动性示意图
Fig.9 Fluidity of Co-C eutectic in molten state

在进行图5所示Co-C共晶点坩埚灌注时,为了避免金属熔化后“胀裂”坩埚顶端的问题,已预留了10%左右的膨胀空间,但复现后该坩埚顶端仍然破裂,说明该坩埚的预留空间不足。之后灌注了图6所示的Co-C共晶点,预留了20%左右的空间。复现后,坩埚顶端未破裂,但因预留空间过大,导致黑体腔周围共晶体熔化时产生了较大浮力差,折断了黑体腔。

综上所述,单纯依靠增大预留空间来解决Co-C共晶点坩埚破裂问题较为困难,必须考虑改进坩埚结构。

2) Pt-C和Re-C共晶点

前文已述,金属Co的膨胀系数最大,金属Pt和金属Re的膨胀系数较小。在系列共晶点复现试验中,发现仅Re-C共晶点出现了顶破坩埚盖的情况,并未出现黑体腔破裂或坩埚侧壁破裂的问题。

Re-C坩埚破裂后,灌注了新的Re-C共晶点坩埚,严格控制了添加的混合粉末的质量,保证预留了10%的膨胀空间。复现试验后未出现破裂,如图10所示。由此可见,保持10%的预留空间,初步解决了Re-C共晶点坩埚的破裂问题。其具体解决效果仍需要后续多次复现试验后验证。

此外,由图10可知,经多次水平姿态复现后,金属平面并没有出现倾斜,可见Re-C共晶体在熔融态条件下的流动性也较差。结合Co-C共晶点坩埚黑体腔破裂经验,认为竖直姿态灌注后,尽量

确保金属平面在坩埚内的水平度,以减小复现时黑体腔周围出现的浮力差,避免折断黑体腔。

3) ZrC-C包晶点

共晶点和包晶点的显著区别在于:包晶点混合粉末中碳的含量大大超过共晶点中的含量。例如共晶点中碳含量最多的Co-C共晶点,其碳的质量分数仅为2.6%,而ZrC-C包晶点中碳的质量分数则达到了20%。

经试验发现,ZrC-C包晶点未出现黑体腔破裂和坩埚盖位置破裂的现象,却出现了如图7所示的坩埚侧壁破裂现象。为了进一步观察坩埚侧壁破裂内部情况,将坩埚沿中心对称轴剖开,如图8所示。可见黑体腔,坩埚盖均未破裂。但存在两个问题:①灌注效果不理想,坩埚内存在较大空洞;②经初步分析,坩埚侧壁的破裂应是高温包晶体“烧穿”坩埚壁导致的泄露。

目前,对于ZrC-C包晶体坩埚壁破裂的问题并不能很好的解释。考虑可能的原因有:①在混合粉末中添加的C粉质量不够,导致金属“吃壁”严重,最终突破坩埚壁产生泄露;②由于ZrC-C名义相变温度高达2882℃,复现试验最高温度需要达到2902℃,在灌注时有氩气或其他气体不慎进入坩埚内,导致气体被“封存”在坩埚内部。复现时气体被加热到极高温,在气体受热膨胀的“挤压”下,ZrC-C包晶体“穿透”了坩埚侧壁。

4 高温共晶点坩埚耐用性改进措施

根据前文所述基于ANSYS的坩埚受力分析结论和对高温共晶点坩埚耐用性情况的规律总结,本文列举了以下两种改进措施:改进型Hybrid结构和导流盖结构。其中,Hybrid结构是目前各国计量院广泛应用的解决方案,在一定程度上能够延长坩埚耐用性。导流盖结构是在Hybrid结构的基础上,通过增加一个辅助部件——导流盖,实现对熔融状态下的共晶体进行导流,进而保证坩埚整体结构的完整。

4.1 改进型Hybrid结构

Hybrid结构是目前应用最为广泛的一种坩埚内部结构,其典型结构示意图如图11所示^[2]。

Hybrid结构坩埚与典型坩埚内部结构(如图2



图10 Re-C共晶点复现后金属平面状态
Fig.10 Metal plane state after reproduction of Re-C eutectic point

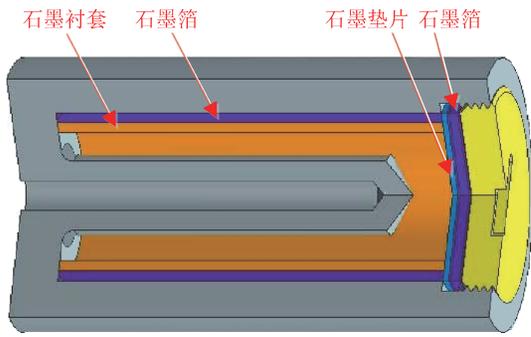


图11 典型Hybrid结构

Fig.11 Typical Hybrid structure

所示)不同之处在于:在石墨衬套与坩埚主体之间、石墨垫片与坩埚盖之间均放置了石墨箔。在这种结构中,石墨箔可以起到延展均匀温场范围的作用,有助于得到更长的相变平台^[3]。

本文在研制与ZrC-C包晶点类似的HfC-C高温包晶点(3 185 ℃)时,采用了改进型Hybrid结构坩埚,改进思路主要包括以下两点:①使用多层柔性C/C材料更换了石墨箔,即在石墨衬套与坩埚主体之间放置了2层C/C材料(单层厚度0.38 mm),在石墨垫片与坩埚盖之间放置了1层C/C材料(单层厚度0.5 mm);②将典型坩埚结构中的“内陷式”坩埚盖改为“外扣式”结构,增大了坩埚主体螺纹根部的强度。坩埚实物如图12所示。



图12 采用外扣式坩埚盖和Hybrid结构的HfC-C包晶点坩埚
Fig.12 HfC-C peritectic point crucible with external buckle crucible cover and Hybrid structure

本文使用上述坩埚结构制作了2个HfC-C包晶点(名义相变温度3 185 ℃),经过多次复现试验后,坩埚状态良好,未出现与ZrC-C包晶点类似的

坩埚侧壁破裂泄露问题,也未出现坩埚盖破裂、黑体腔折断等现象,可见改进型Hybrid结构能够对坩埚起到一定保护作用。未来将在破裂风险更高的Co-C共晶点上验证该结构的作用。

4.2 导流盖结构

针对高破裂风险的共晶点(Co-C共晶点),本文设计了带导流盖的高温共晶点坩埚结构,其设计思想为:外形与CCT规定的坩埚外形保持一致,略缩短了坩埚内部衬套,并设计了与之匹配安装的导流盖。导流盖锥顶角角度与黑体腔锥顶角基本保持一致。当进行高温共晶点灌注时,坩埚是竖直姿态,故在重力的作用下共晶体基本均匀分布在黑体腔周围。进行复现试验时,需将坩埚水平放置,共晶体熔化后变为熔融态,虽然流动性很差,但在外力引导的前提下,实际仍具有一定流动性。在导流盖的引导作用下,熔融态共晶体可向上端空隙处膨胀或流动,减小了作用在坩埚盖上的推力,对坩埚主体与坩埚盖连接的位置起到了保护作用。同时,由于熔融态共晶体被引导至上端空隙,减小了作用于黑体腔上下端的浮力差,对黑体腔也起到了保护作用。

导流盖内锥直径与衬套内径完全一致,根据预留的膨胀裕量计算内锥的高度。同时,在导流盖外侧设计一凹槽,宽度与衬套厚度一致,使衬套可以插入凹槽中,在坩埚内形成一个与黑体腔外形相似的空间。坩埚结构示意图如图13所示。

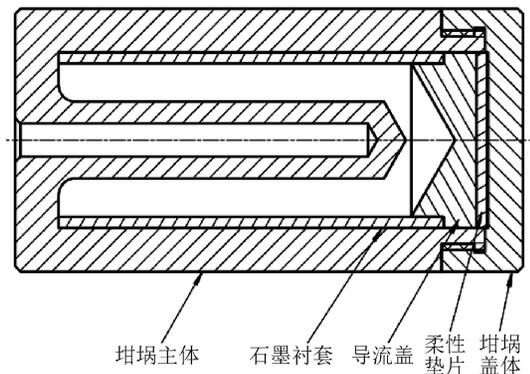


图13 带导流盖的共晶点坩埚
Fig.13 Eutectic point crucible with flow guide cover

此外,在本设计中,将坩埚盖内侧螺纹根部作为整体结构强度最低位置,导流盖可以起到将金属膨胀力集中到坩埚盖中心位置的作用,通过

“牺牲”坩埚盖以保全坩埚主体的结构完整性，每次复现试验后更换廉价的坩埚盖即可，是一种针对高破裂风险共晶点(如 Co-C 共晶点)的低成本变通方法。

采用带导流盖的坩埚结构灌注了 2 个 Co-C 共晶点坩埚，开展了多次复现试验对坩埚耐用性进行了验证。结果表明，虽然坩埚盖在复现试验后偶发根部破裂，但坩埚主体结构保持完整，黑体腔未出现折断问题，金属也未从坩埚盖处泄露，坩埚整体完好无损，只需更换新坩埚盖即可，可见本设计实现了通过“牺牲”坩埚盖以保全坩埚主体的设计目标，是一种成本可控的破裂问题解决方案。

综上所述，如表 5 所示为本文提出的两种坩埚改进结构与传统坩埚结构的耐用性对比分析，可见两种坩埚改进结构的有效性得到了初步验证。

表 5 坩埚耐用性对比分析

Tab.5 Comparative analysis of crucible durability

坩埚结构	传统坩埚破裂情况(总数/破裂数量)	改进后坩埚破裂情况(总数/破裂数量)	采用的改进坩埚结构种类
共晶点(Co-C)	5/4	2/0	导流盖结构
包晶点(ZrC-C、HfC-C)	2/1	2/0	改进型 Hybrid 结构

5 结论

本文对高温共晶点坩埚耐用性问题进行了研究，首先对典型坩埚结构进行了 ANSYS 受力分析，明确了坩埚内部的理论受力点，结合多种共晶点坩埚的实际破裂情况对不同种类共晶点坩埚破裂原因进行了分析。最后，本文列出了两种改善坩埚耐用性的方案：改进型 Hybrid 结构和导流盖结构，并分别采用 HfC-C 包晶点和 Co-C 共晶点进行了验证，得到了较为理想的效果，初步证明了方案的有效性。

本研究方案实现了高温共晶点坩埚耐用性的提升，初步解决了高温共晶点坩埚的破裂问题，对未来开展高温共晶点长期比对奠定了基础。

参考文献

- [1] CELSIUS. International temperature scale of 1990 [J]. *Ibid*, 1990, 27(1):3-10.
- [2] 董伟. 金属碳共晶及包晶高温固定点研究[D]. 北京: 清华大学, 2012
DONG W. Research on metal carbon eutectic and peritectic high temperature fixed point [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [3] 原遵东, 王铁军, 卢小丰, 等. 基于高温共晶点的开尔文原级实现[J]. 科技成果管理与研究, 2019(6): 63-65.
YUAN Z D, WANG T J, LU X F, et al. Kelvin primitive implementation based on high temperature eutectic points [J]. *Management and Research on Scientific & Technical Achievements*, 2019(6): 63-65. (in Chinese)
- [4] 卢小丰, 张婷婷, 董伟, 等. Pd-C 和 Ru-C 固定点的热力学和 ITS-90 温度测量[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(5): 50-54.
LU X F, ZHANG T T, DONG W, et al. Temperature measurement of Pd-C and Ru-C cells at NIM[J]. *Metrology Science and Technology*, 2021, 65(5): 50-54. (in Chinese)
- [5] 卢小丰, 原遵东, 董伟, 等. 应用高温固定点校准精密光电高温计[J]. 计量学报, 2017, 38(5): 584-588.
LU X F, YUAN Z D, DONG W, et al. Calibrating pyrometers with high temperature fixed points[J]. *ACTA Metrology Sinica*, 2017, 38(5):584-588. (in Chinese)
- [6] SASAKI M, NUMAJIRI H. Calibration of thermocouples at high temperature on Co-C eutectic point using a small-type cell[J]. *Transactions on Fundamentals & Materials*, 2016, 136(12): 772-777.
- [7] HOLMSTEN M, OGURA H, KLASON P, et al. Development and evaluation of a Co-C eutectic-point cell for thermocouple calibration[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(8):1888-1894.
- [8] PANT U, MEENA H, GUPTA G, et al. Development and realization of Fe-C and Co-C eutectic fixed - point blackbodies for radiation thermometry at CSIR-NPL [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2020, 41 (7) : 101-114.
- [9] PANT U, MEENA H, GUPTA G, et al. Development and long-term stability assessment of Co-C eutectic fixed point for thermocouple thermometry [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2019, 40(8): 80-93.

- [10] KHLEVNOY B B, GRIGORYEVA I, ANHALT K, et al. Development of large-area high-temperature fixed-point blackbodies for photometry and radiometry [J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): S43-S51.
- [11] LOWE D H, TODD A D W, VAN D B R, et al. The equilibrium liquidus temperatures of rhenium-carbon, platinum-carbon and cobalt-carbon eutectic alloys [J]. *Metrologia*, 2017, 54(3): 390-398.
- [12] WAEHMER M, ANHALT K, HOLLANDT J, et al. Thermodynamic temperature of high-temperature fixed points traceable to blackbody radiation and synchrotron radiation [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38(10): 144-158.
- [13] TODD A D W, ANHALT K, BLOEMBERGEN P, et al. On the uncertainties in the realization of the kelvin based on thermodynamic temperatures of high-temperature fixed-point cells [J]. *Metrologia*, 2021, 58(3): 35007-1-35007-8.
- [14] YAMADA Y, ANHALT K, BATTUELLO M, et al. Evaluation and selection of high-temperature fixed-point cells for thermodynamic temperature assignment [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(8): 1834-1847.
- [15] 孟苏, 蔡静, 董磊. Co-C共晶点研制及评价[J]. *计量学报*, 2019, 40(1): 8-12.
MENG S, CAI J, DONG L. The development and evaluation of the Co-C eutectic point [J]. *ACTA Metrology Sinica*, 2019, 40(1): 8-12. (in Chinese)
- [16] 刘裕盛, 吕国义, 杨新圆. 温度边界对Co-C高温共晶点复现的影响[J]. *计量学报*, 2015, 36(6A): 8-11.
LIU Y S, LYU G Y, YANG X Y. Effect of temperature boundary on reproducibility for Co-C high temperature eutectic point [J]. *ACTA Metrology Sinica*, 2015, 36(6A): 8-11. (in Chinese)
- [17] 孟苏, 刘旭东, 蔡静, 等. ZrC-C包晶固定点研制及评价[J]. *计量学报*, 2022, 43(1): 35-39.
MENG S, LIU X D, CAI J, et al. The development and evaluation of the ZrC-C peritectic point [J]. *ACTA Metrology Sinica*, 2022, 43(1): 35-39. (in Chinese)
- [18] 孟苏, 刘旭东, 蔡静, 等. 高温共晶点灌注方法研究[J]. *计测技术*, 2020, 40(5): 48-52.
MENG S, LIU X D, CAI J, et al. Research on the filling method of high temperature eutectic point [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2020, 40(5): 48-52. (in Chinese)

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 孟苏 (1991—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为热学计量技术、高温共晶点、温度标准等。