

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.007

Cu-Sn-Ti-In 钎料真空钎焊 CBN 界面微结构与力学性能分析

肖皓中, 刘锐, 马哲, 赵昱博

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 利用 Cu-Sn-Ti-In 活性合金钎料, 将 CBN 磨料钎焊至 1045 钢基体上, 对钎焊接头的界面反应、力学性能进行分析研究。结果表明: Cu-Sn-Ti-In 合金钎料对 CBN 磨料表现出良好的润湿性, 活性元素 Ti 扩散到结合界面并形成 Ti-B 和 Ti-N 反应生成物, 使得 CBN 磨料与改性合金钎料之间形成化学冶金结合。相比于普通 Cu 基合金钎料, 利用 Cu-Sn-Ti-In 合金钎料钎焊 CBN 磨料的力学性能更优。焊后 CBN 磨料底部受残余压应力, 顶部受残余拉应力, 且最大残余应力值小于 150 MPa。

关键词: 钎焊; CBN; 界面微结构; 残余应力

中图分类号: TG454 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)04-0043-05

Interfacial Microstructure and Mechanical Properties Analysis on Vacuum-brazed CBN with Cu-Sn-Ti-In Filler Alloy

XIAO Haozhong, LIU Rui, MA Zhe, ZHAO Yubo

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: CBN abrasives were brazed onto 1045 steel substrates using the active Cu-Sn-Ti-In filler alloy. The bonding interface reactions, mechanical properties of the brazed joint were studied. The results show that the Cu-Sn-Ti-In filler alloy exhibits good wettability to CBN abrasives, and the active Ti element diffuses to the joint interface and forms TiN and TiB₂ compounds, making the chemical metallurgical combination between CBN abrasives and the modified filler alloy. Compared with common Cu-based alloy, the CBN brazed with the Cu-Sn-Ti-In alloy shows better mechanical properties. The bottom of brazed CBN abrasive is subjected to the residual compressive stress and its top to the residual tensile stress, and the residual stress of brazed CBN is less than 150 MPa.

Keywords: brazing; CBN; interface microstructure; residual stress

0 引言

立方氮化硼(CBN)是继金刚石之后由人类制造的第2种超硬磨料,具有高硬度、强耐热性、良好的化学稳定性等优势,被广泛应用于难加工材料尤其是黑色金属的加工领域中^[1-2]。其中,钎焊 CBN 工具由于磨料-钎料-基体之间形成化学冶金结合,其使用寿命和加工效率远高于传统电镀、烧结 CBN 工具,因而在机械加工中得到越来越多的应用^[3-6]。目前,使用 Cu-Sn-Ti 合金和 Ag-Cu-Ti 活性合金钎料在真空炉内制作钎焊工具是工业生产中应用最广泛、最成熟的方法^[7-8]。但是,钎焊高温对工具磨料带来的严重热损伤和残余应力,不仅会破坏磨料的力学性能,而且会使钎焊界面处出现微裂纹,影响钎焊接头的力学强

度^[9-12]。针对高温钎焊缺陷,研究人员开展了大量工作,在钎料中添加改善颗粒以减小高温钎焊缺陷,改善钎料的润湿行为,提高磨料力学性能。例如,利用 Ti 基化合物颗粒控制钎料润湿行为,提升钎焊接头剪切强度;利用稀土元素细化结合层显微组织,提高结合层显微硬度;利用 WC 颗粒降低钎料对磨料热腐蚀效应,降低焊后磨料热损伤^[13-15]。但是,针对高温焊后 CBN 磨料内部产生的高残余应力而导致钎焊界面处形成微裂纹^[16]的问题,解决效果却不佳。

铟(In)是一种稀有金属,易熔且对陶瓷材料展现出良好的浸润性,具有良好的物化性能,以半导体化合物、焊料、合金材料等形式广泛应用于电子计算机、光电、航空航天、高温超导等领域^[17-19]。在合金材料中加入 In 可以降低材料的

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(22KJB460003)

第一作者简介: 肖皓中(1990—),男,江苏徐州人,讲师,博士,研究方向为钎焊超硬磨料工具制造技术、高效精密加工技术, jhzxiao@163.com。

熔点,同时,In 也可以增强 Ti 元素的活性,从而提高钎焊接头的结合强度^[20-21]。因此,本研究利用 Cu-Sn-Ti-In 活性合金钎料,在真空炉中将 CBN 磨料钎焊至 1045 钢基体上,对焊后钎焊界面的微观形貌、润湿现象、反应机制、残余应力以及 CBN 磨料的力学性能进行分析,为高性能钎焊 CBN 工具的制备提供工艺和实验基础。

1 试验

1.1 材料和方法

选用粒径范围在 325~400 μm 的 CBN 单晶颗粒为磨料,选用 120 目粒径的 Cu-Sn-Ti-In 合金粉末为活性钎料,其质量分数如表 1 所示,选用 1045 钢为钎焊基体。

表 1 改性 Cu 基合金钎料质量分数 单位: %

成分	质量分数
铜 (Cu)	64.5
锡 (Sn)	18.5
铟 (In)	12.0
钛 (Ti)	5.0

钎焊前,将 CBN 磨料进行超声清洗并自然风干,去除其表面油污。1045 钢基体先进行表面喷砂除锈,再进行超声清洗去除油污。在钢基体表面均匀铺撒一层改性钎料,钎料层厚度在 300 μm 左右。接着将 CBN 磨料均匀布置在钎料层上方得到待钎焊试样。最后将待钎焊试样放入真空炉中,在真空度值小于 5.0×10^{-2} Pa、钎焊温度为 930 $^{\circ}\text{C}$ 、保温时间为 15 min、升温速率为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的工艺条件下进行钎焊试验,得到钎焊接头试样。

1.2 表征方法

采用配备能谱仪 (EDS) 的扫描电子显微镜 (SEM, Jsm-6360LV) 观察与分析钎焊接头试样的显微组织和元素分布特性。利用 X 射线衍射仪 (XRD, XD-3A) 检测界面反应的物相组成。钎焊 CBN 的残余应力通过红外光谱的反射吸收峰与特征峰偏移进行表征,利用 FTIR 光谱仪 (IFS66V) 沿 CBN 的中心轴从顶部到底部测量红外吸收光谱 (图 1),每隔 80 μm 布置一个测量点。

通过静态抗压强度测试仪 (DLY-92) 和超硬磨料冲击韧性测量仪 (CM-II) 分别测量经深腐蚀后的钎焊 CBN 磨料的静压强度和冲击韧性,用以表征焊后磨料的力学性能。

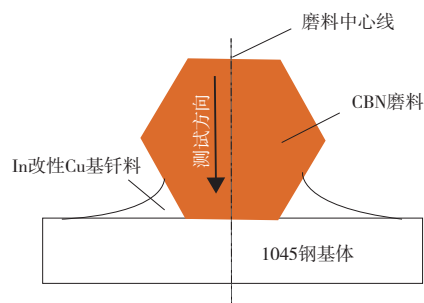


图 1 钎焊 CBN 红外吸收光谱测量方向

2 结果与讨论

2.1 钎焊接头微观形貌与反应生成物特征

钎焊 CBN 接头微观形貌如图 2 所示,改性 Cu 基合金钎料对磨料表现出良好的爬升和浸润性,从而形成山丘状形貌。CBN 磨料具备理想的出露高度,并保持完整晶型。图 3 为钎焊 CBN 磨料接头 SEM 显微照片,可以看出:CBN 磨料紧嵌在改性钎料层中,结合界面处没有明显的裂纹或孔洞,表明磨料与钎料之间存在理想的润湿反应。

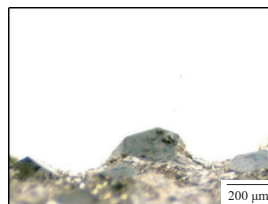


图 2 钎焊 CBN 接头微观形貌

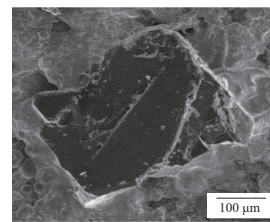


图 3 钎焊 CBN 接头 SEM 显微照片

为了探究改性钎料钎焊 CBN 接头物相组成及元素分布特性,对钎焊接头进行垂直切割与打磨抛光,再观察处理后的钎焊界面微观结构,如图 4 所示。可以看出:CBN 磨料-改性钎料-1045 钢基体三者紧密结合,无裂纹、孔洞等钎焊缺陷,说明改性钎料熔化充分并对磨料、钢基体均有良好的浸润。将改性钎料与钢基体、CBN 磨料之间的结合界面区域分别标记为 I、II,沿着图 4 中箭头的方向对钎焊界面进行 EDS 线扫描,结果如图 5 所示。可以发现:I 区中出现 Fe、Ti 元素的偏聚,II 区中出现 B、N、Ti 元素的偏聚与相互扩散。Ti 元素从熔融的改性钎料中扩散到结合界面处并与其他元素发生反应,在 I 区形成 Fe-Ti 金属间化合物,并在 II 区形成 Ti-B、Ti-N 化合物。界面反应生成物保证了钎焊界面的润湿性,改性钎料经过熔融、浸润、凝固后,为磨料和钢基体提供牢

固的结合力。

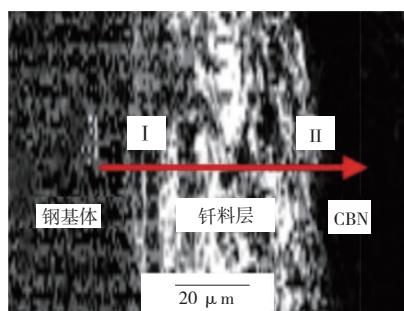


图4 钎焊界面微观结构

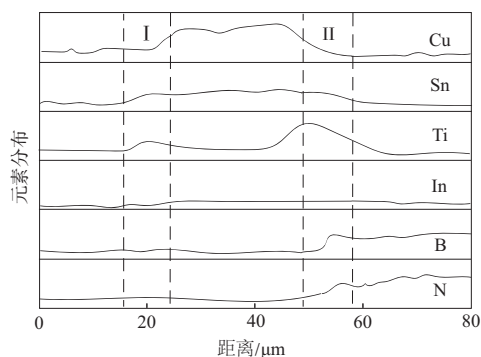


图5 钎焊界面元素分布图

为了进一步探究 Cu-Sn-Ti-In 钎料钎焊 CBN 界面反应生成物的组分,对钎焊界面进行 X 射线衍射分析,其结果如图 6 所示。可以发现:钎焊界面 XRD 图谱中存在 In 衍射峰,表明钎料层中存在游离的 In 元素。除了 CBN 峰以外,图谱中还出现了 TiN、TiB₂ 的衍射峰,这表明 CBN 与 Cu-Sn-Ti-In 钎料之间发生扩散冶金反应。

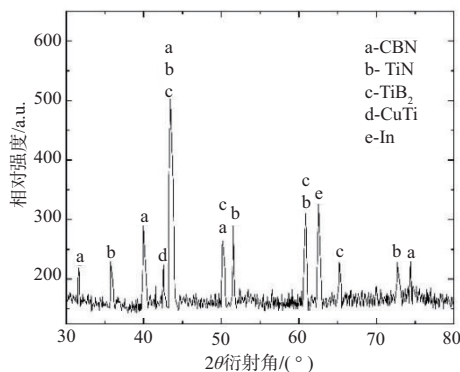
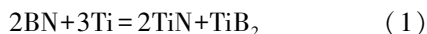


图6 钎焊界面 XRD 图谱

钎焊温度为 930 ℃ 时,生成 TiN 和 TiB₂ 的吉布斯自由能均为负,因此两者在钎焊过程中均能自发地形成,其反应式如下:



上述的研究表明,In 元素能够降低钎焊界面表面能,促进合金钎料在 Ti 元素与 CBN 磨料之间的反应。钎焊过程中,液相钎料的含量影响晶粒边界形貌,决定磨料被完全润湿或不完全润湿。随着温度的升高,液相钎料含量不断增加,晶粒边界开始从不完全润湿转变向完全润湿,在 930 ℃ 的钎焊温度下,钎焊合金完全熔化。

2.2 钎焊 CBN 磨料力学性能分析

钎焊后 CBN 接头热损伤情况可以通过磨料力学性能和残余应力表征。对原始 CBN、普通 Cu 基钎料钎焊 CBN (No.1)、Cu-Sn-Ti-In 钎料钎焊 CBN (No.2) 的静压强度和冲击韧性进行测量与统计,结果如图 7 所示。两种钎料钎焊 CBN 的力学性能均比原始 CBN 要低,在高温钎焊下磨料出现不同程度的热损伤。然而,采用 Cu-Sn-Ti-In 钎料钎焊 CBN 磨料的力学性能优于普通 Cu 基钎料钎焊 CBN 磨料。其中,静压强度高出约 15.6%,冲击韧性高出约 11.1%。钎焊过程中,长时间高温会使磨料晶体受到较大的热损伤,出现微裂纹、微小缺陷,导致焊后磨料的静压强度和冲击韧性均出现下降。In 元素能够提升 Ti 的活性,提高钎料的润湿性,其钎焊温度低于普通 Cu 基钎料的钎焊温度(960 ℃~970 ℃),因此磨料的热损伤相应减小。

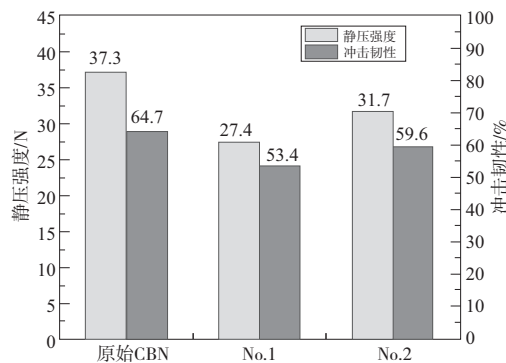


图7 CBN 力学性能

磨料的失效特性,包括磨料破碎率和脱落率,是评价钎焊接头强度的重要指标。对普通 Cu 基合金、Cu-Sn-Ti-In 合金钎焊 CBN 进行磨料磨损对比试验,每隔 10 min 记录 1 次 CBN 的破碎率和脱落率,试验总时长为 30 min,试验结果分别如图 8、图 9 所示。结果表明:随着磨削加工时间的增加,Cu-Sn-Ti-In 合金钎料钎焊 CBN 的破碎率和脱落率均低于普通 Cu 基合金钎焊 CBN。当磨削时间为 30 min 时,Cu-Sn-Ti-In 合金钎料钎焊

CBN 的破碎率和脱落率相较于普通 Cu 基合金钎焊 CBN,分别降低了 48.6% 和 20.5%,总体磨料失效率降低了 69.1%。焊后磨料失效特性的降低与磨料力学性能的提升和残余应力的下降保持一致,采用 Cu-Sn-Ti-In 合金钎料钎焊 CBN 接头的力学性能更优。

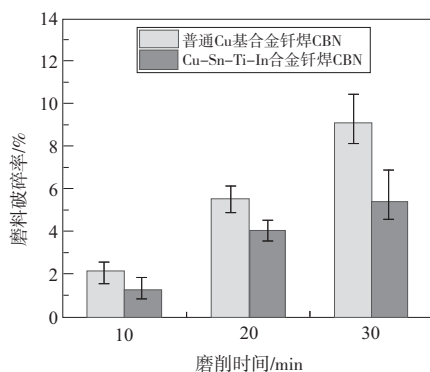


图 8 磨削试验后钎焊 CBN 磨料破碎率

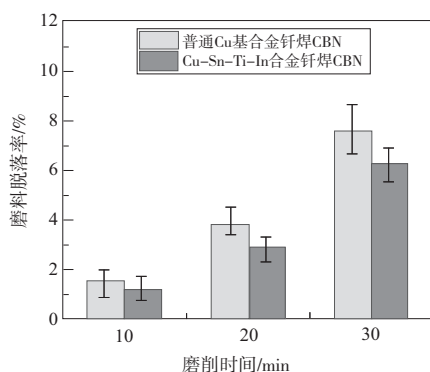


图 9 磨削试验后钎焊 CBN 磨料脱落率

2.3 钎焊 CBN 磨料残余应力分析

钎焊 CBN 磨料的红外吸收光谱检测结果如图 10 所示,在波值为 $1\,055\text{ cm}^{-1}$ 处出现的检测峰为 CBN 磨料无内应力时的特征吸收峰。根据之前的研究,由于晶体的内应力效应,检测峰的波值通常偏离特征峰波值,两者之差为峰值偏移量 ($\Delta\omega$),当晶体的吸收谱峰向波数增加的方向移动时,晶体受到压应力的作用,反之受到拉应力作用。从图谱中可以看出,CBN 磨料的底部承受压应力,而顶部则承受拉应力。钎焊 CBN 磨料的残余应力 σ 与其红外特征峰峰值偏移量 $\Delta\omega$ 有以下关系

$$\sigma = \Delta\omega / p \quad (2)$$

式中 p 的值为 $-4.5 \times 10^{-3}\text{ cm}^{-1}/\text{MPa}$ 。因此,钎焊 CBN 的残余应力可通过红外吸收光谱图计算获得,结果如图 11 所示。可以发现,最大的压应力

和拉应力分别出现在钎焊 CBN 磨料的底部和顶部。这是因为钎焊过程中,最大残余应力一般发生在硬脆材料的边缘。而最大压应力和最大拉应力均小于 150 MPa ,钎焊接头未产生显著的热损伤。

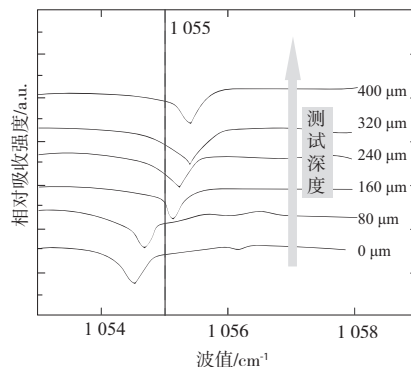


图 10 红外吸收光谱检测结果图

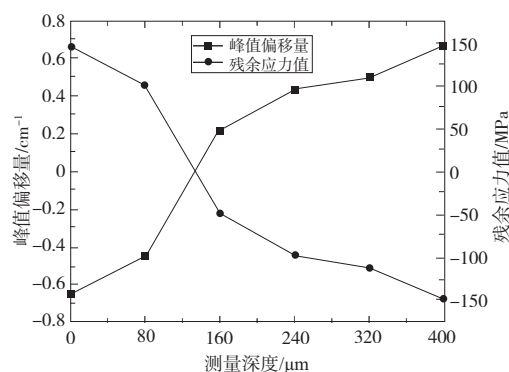


图 11 钎焊 CBN 残余应力

CBN 磨料、合金钎料、钢基体三者之间热膨胀系数差异过大是导致界面残余应力产生的主要原因。残余应力过大会使磨料以及钎焊接头表面产生微裂纹,降低接头的结合强度,而 In 元素通过促进元素间的扩散结合,有效缓解了界面残余应力的扩展。

3 结语

采用 Cu-Sn-Ti-In 合金钎料钎焊 CBN 磨料可降低焊后 CBN 的热损伤,提升钎焊接头的结合强度,根据研究结果,得到以下结论。

1) In 对 Ti 元素的活性有促进作用,可在低于普通 Cu 基钎料的钎焊温度条件下得到牢固的钎焊接头。

2) CBN、Cu-Sn-Ti-In 钎料、钢基体三者之间形成化学冶金结合,在钎焊界面处生成 Ti-B 与 Ti-N 化合物,焊后 CBN 磨料出露理想,并保持良

好的棱角。

3) Cu-Sn-Ti-In 合金钎料钎焊 CBN 热损伤减轻,其力学性能优于普通 Cu 基钎料钎焊的 CBN 磨料。同时,焊后磨料的底部受残余压应力,顶部受残余拉应力,并且最大残余应力均未超过 150 MPa,钎焊接头未产生显著热损伤。

参考文献:

- [1] WANG X W, SONG J H, XIAO H, et al. Wear behavior and material removal mechanism during ultrasonic vibration-assisted grinding γ -TiAl materials using a single CBN grain [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 137 (3): 1581-1598.
- [2] XIAO H Z, WANG S Y, FENG Y, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of CBN brazed in a continuous tunnel furnace with low-temperature Sn-Cu-Ti filler alloy [J]. Diamond and Related Materials, 2024, 148: 111465.
- [3] CAI K D, ZHANG M X, ZHAO B, et al. Wear characteristics of single-layer cBN abrasive tools using ultrasonic vibration-assisted induction brazing techniques [J]. Ceramics International, 2023, 49 (18): 29792-29799.
- [4] ZHAO J S, ZHAO B, DING W F, et al. Grinding characteristics of MoS₂-coated brazed CBN grinding wheels in dry grinding of titanium alloy [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(1): 109.
- [5] 蔡开达,赵彪,吴帮福,等. CBN 超硬磨粒工具的超声振动辅助钎焊结合界面微观组织和力学性能 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(5): 568-578.
- [6] 朱烨均,丁文锋. 单层钎焊多晶 CBN 超硬砂轮研制与自锐机理研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 304.
- [7] SIMHAN D R, GHOSH A. Active brazing of cBN micro-particles with AISI 1045 steel using ceramic reinforced Ag-based fillers [J]. Diamond and Related Materials, 2023, 136: 110056.
- [8] 李奇林,王西超,丁凯,等. 基于响应曲面法的成型 CBN 砂轮高频感应钎焊温度均匀性研究 [J]. 航空动力学报, 2022, 37(9): 1915-1922.
- [9] 刘思幸,张泽辰,刘明森,等. Ni-Cr-B-Si 真空和氩气中钎焊金刚石界面特性及热损伤机理 [J]. 表面技术, 2025, 54(3): 202-209, 219.
- [10] 王加威,董海,王明,等. 聚晶金刚石刀具高频感应钎焊热损伤研究 [J]. 工具技术, 2024, 58(5): 42-46.
- [11] WANG S Y, XIAO H Z, XIAO B. Interfacial microstructure and thermal damage of brazed diamond joints with Ni-Cr + Cu/C composite filler alloy [J]. Diamond and Related Materials, 2025, 152: 111993.
- [12] XIAO A, ZHANG J, PANG X T, et al. Interface bonding characteristics and thermal damage behavior of brazed diamond with Nb-added NiCr filler alloys [J]. Diamond and Related Materials, 2024, 146: 111165.
- [13] 徐东,金天,王朋波,等. Gd 改性 Ni-Cr 钎料钎焊金刚石组织和性能研究 [J]. 材料导报, 2024, 38(19): 181-185.
- [14] LIU C, WANG L Y, WEI H, et al. Effect of rare earth elements scandium on Sn-0.7Cu brazing metal: first-principles calculation [J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 52: 104960.
- [15] JIN T, ZHANG C X, ZHONG S J, et al. Comparative study on induction brazing of diamond with rare earth Nd-doped crystalline and amorphous Ni-based filler alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 1084-1093.
- [16] 陈冰,郭烨,邓朝晖. 超硬磨粒可控排布砂轮研究进展 [J]. 中国机械工程, 2023, 34(9): 1019-1034.
- [17] LI Z Y, LIU H, TANG D D, et al. Development of a highly stable indium-tin alloy cathode system for enhanced selective separation of europium/dysprosium fission products in molten chloride [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 359: 130812.
- [18] 王甜甜,王凯,李辉. 铜钢镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池研究进展 [J]. 稀有金属, 2024, 48(10): 1475-1501.
- [19] 陈晓萍,黄士,郭千千,等. 镓钢共晶-自组装单分子层的功能性分子结研究进展 [J]. 高等学校化学学报, 2025, 46(2): 22-36.
- [20] SUI R, LIN Q L. Significant improvement in wettability of molten tin and indium on calcium fluoride surface by titanium metalization [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 715: 136643.
- [21] CUI B, LIU Z W, DU Q B, et al. Exploring the role of indium on the microstructure evolution and interface bonding behavior of brazing diamond abrasive with modified Cu-Sn-Ti [J]. Diamond and Related Materials, 2023, 136: 110068.

收稿日期: 2023-12-29