

# 基于 CiteSpace 的高温结构材料用 Laves 相合金的 文献计量和可视化<sup>①</sup>

肖璇<sup>1</sup>, 金毛毛<sup>1</sup>, 秦文洲<sup>1</sup>, 邓莉萍<sup>2</sup>, 姚敬<sup>2</sup>

(1.南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063; 2.南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:**首次利用 CiteSpace 文献计量分析软件对 Web of Science 中 2003—2023 年高温结构材料用 Laves 相研究文献的关键词、文献共被引、作者和期刊共被引进行了定量和可视化网络图谱分析。关键词聚类时间线图反映了检索区间内 Laves 相研究的基本发展状况,揭示两大热点前沿主题分别是 Laves 相增强的多相高熵合金的室温脆性改善或强度-塑性协同提升问题,以及 Laves 相析出物对 600~650 °C 蠕变服役条件下 P92、12Cr 和 G115 等新型耐热合金钢组织与性能的影响。关键词聚类时间线图与文献、作者共被引网络图具备一致性,共同反映 Laves 相研究的活跃性。未来,应关注可视化图谱挖掘的高质量成果产出的关键作者和期刊。

**关键词:** Laves 相; 金属间化合物; 文献综述; 文献计量; 可视化网络; 高温结构材料; CiteSpace; AB<sub>2</sub>

中图分类号: TG113.25; TG132.3

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.029

文章编号: 0253-6099(2025)01-0153-07

## CiteSpace-Based Bibliometrics and Visualization of Laves Phases for High Temperature Applications

XIAO Xuan<sup>1</sup>, JIN Maomao<sup>1</sup>, QIN Wenzhou<sup>1</sup>, DENG Liping<sup>2</sup>, YAO Jing<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautic Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China; 2. School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

**Abstract:** CiteSpace, as a bibliometric analysis tool, was firstly used to quantitatively analyze and visualize keyword clusters, co-citation relationships and burst terms for scientific literature on Laves phase used for high-temperature materials in the Web of Science from 2003 to 2023. A timeline chart of keyword clustering reflects the fundamental development status of Laves phase research in the search interval, revealing two hot topics in frontier research: one is improvement of room temperature brittleness or synergistic improvement of strength and plasticity of multi-phase high-entropy alloys reinforced by Laves phases, another is the effect of Laves phase precipitates on the microstructure and properties of heat-resistant alloy steels (P92, 12Cr and G115) at 600–650 °C, at which creep occurs. The timeline chart of keyword clustering is consistent with the chart of relationship between literature and author in citation networks, both reflecting the activity of Laves phase research. In the future, those key authors and publications with high-quality achievement mined by the visualized patterns and trend should be paid more attention.

**Key words:** Laves phase; intermetallic compound; literature review; bibliometrics; network visualization; high-temperature material; CiteSpace; AB<sub>2</sub>

20 世纪早期,奥地利矿物与晶体学家 Fritz Laves 首次描述并解释了复杂立方 MgCu<sub>2</sub> 与复杂六方 MgZn<sub>2</sub> 和 MgNi<sub>2</sub> 的某些金属间化合物具备晶体结构相似性和紧密关系<sup>[1]</sup>。随后,著名金属学家 Gustav Schulze 提出

将化学式为 AB<sub>2</sub> 的这类特殊金属间化合物命名为“Laves 相”<sup>[2-3]</sup>。近年来,Laves 相因低密度、良好热稳定性和高温蠕变抗力以及优异的储氢性能等备受关 注<sup>[4-6]</sup>。特别是在航空航天、火电核电等领域的高温结

① 收稿日期: 2024-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(52161021);南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室开放课题(EG202201333)

作者简介: 肖璇(1979—),男,湖北随州人,博士,副教授,主要从事先进高温结构材料的强韧化和难变形材料的成形理论及工艺优化工作。  
E-mail: 70102@nchu.edu.cn

构材料应用场合,Laves 相金属间化合物有望替代镍基高温合金,成为有应用潜力的新型超高温应用候选结构材料之一。

Laves 相合金的制备、性能优化以及实用化等方面仍面临诸多挑战和待解决的问题<sup>[7-9]</sup>。目前有关 Laves 相研究的全面性综述较为匮乏,研究成果发表时间也相对较早,并且更偏向于定性归纳与主观总结。本文基于文献计量学角度开展 Laves 相研究文献的知识图谱可视化研究,快速准确定位本领域的开创性和标志性论文,识别对 Laves 相研究发展至关重要的成果,明确主流主题和研究前沿的演变,以挖掘揭示 Laves 相的研究现状和发展趋势,为未来 Laves 相金属间化合物的研究提供参考和决策指导。

## 1 数据来源与研究方法

CiteSpace 是一个在文献信息分析领域有独特影响力的数据分析和可视化应用软件<sup>[10]</sup>,与该软件最匹配的数据来自 Web of Science (WoS) 数据库<sup>[11]</sup>。本研究的数据来源于 WoS 核心合集数据库 (Web of Science Core Collection),该合集提供全面的引文网络,涵盖所收录出版物的被引用参考文献并完整索引所有作者及其机构信息。检索主题设定为“Laves phase”,时间跨度为 2003—2023 年,文献类型包括“Article”“Proceeding Paper”和“Review”,检索截止日期为 2023 年 6 月 28 日,经初步筛选,共得 4 832 篇文献。鉴于本研究关注 Laves 相作为高温结构材料的应用,排除无关文献后最终筛选出有效数据文献共 2 080 篇。

利用 CiteSpace 6.2.R4 文献计量软件进行知识图谱的可视化构建。首先,将 2 080 条研究数据以纯文本格式导入软件。然后,按照年度进行时间切片,并以标题、摘要、作者和关键词为术语来源,选择了 Keyword (关键词)、Reference (被引文献)、Cited Author (被引作者)和 Cited Journal (被引期刊)等节点类型。在关键词聚类时间线图 and 文献、作者及期刊共被引网络的构建过程中,使用 Pathfinder (探路者剪切)算法对关键词聚类时间线图进行修剪,以突出重要的学术路径。为了构建作者与期刊之间的共被引网络,选用 Minimum Spanning Tree (最小生成树剪切)算法处理网络,进而揭示领域内的核心结构。同时,采用 Cluster View-Static (集群视图-静态)和 Show Merged Network (显示合并的网络)等模式参数进行可视化绘制。最后,通过调整控制面板的各项阈值,使得图谱内容更加清晰有序,并获得了相应的 Laves 相研究可视化分析结果与最新研究动态。

## 2 关键词演化与趋势分析

关键词聚类是基于词条共现分析,利用对数似然比算法 (LLR) 分析结构特征、关键节点和集群之间的关联度,以发现对应研究领域的热点主题<sup>[12]</sup>。图 1 是 2003—2023 年研究 Laves 相文献的关键词聚类时间线图,它将聚类包含的关键词按照时间顺序展开,反映了该聚类在检索区间内的发展成果和演变过程。图中包含了 660 个节点和 1 142 条连线,最上方时间标签表示下方关键词在此数据集中首次出现的时间。左上方显示的网络集群模块值 (Modularity  $Q$ ) 为 0.768 9 ( $>0.3$ ),说明划分的聚类结构是合理的;轮廓值 (Silhouette  $S$ ) 为 0.895 2 ( $>0.7$ ),表明所构建的聚类网络具有较高的均质性,因此聚类结果可靠且效率高<sup>[13]</sup>。需要注意的是,图中还显示了跨集群之间存在一些连线,表明不同集群之间存在实质性的相互作用和研究热点的集中现象。

从图 1 还可以看出,由集群规模从大到小筛选出依序排布的 8 个聚类分别是:#0 g115 steel (G115 钢),#1 electronic structure (电子结构),#2 inconel 718 alloy (inconel 718 合金),#3 mechanical properties (力学性能),#4 creep behavior (蠕变行为),#5 elastic properties (弹性性能),#6 high entropy alloys (高熵合金)和#7 laves phase (Laves 相)。其中分别位于聚类#1、#2和#3左侧的较大节点关键词 electronic structure (电子结构)、precipitation (析出物)和 mechanical properties (力学性能)是除了主题词“Laves phase”之外在时间线左端 2003—2004 年首次出现的重要关键词。这些早期阶段的高频关键词不仅为 Laves 相研究提供了关键线索,而且与材料科学研究的基本范式相契合。需要注意的是,时间线图还反映了 2010—2013 年是另一个高频关键词涌现的时间段,整合实际含义相同的关键词后发现这一时间段有三个高频关键词,分别是 microstructure evolution (微观组织演变)、high entropy alloys (高熵合金)和 solid solution (固溶体)。

上述两个时期的典型关键词相互交叉和推进,为 Laves 相研究的热点主题提供了清晰的视角。具有独特的结构和物理性质的 Laves 相金属间化合物有 3 种结构类型,即密排六方的 C14 型 (也称为  $MgZn_2$  型六方晶系)、密排立方的 C15 型 ( $MgCu_2$  型立方晶系)和双密排六方的 C36 型 ( $MgNi_2$  型六方晶系)<sup>[5]</sup>。高温结构应用 Laves 相合金的力学性能、热稳定性和相变行为受电子结构直接影响。充分理解电子态密度、能带结构等关键信息对合金性能微观调控和优化至关重要,可为

合金的设计和应⤵用提供重要的指导和基础<sup>[14-17]</sup>。此外,在聚类#0 和#2 呈现了 Laves 相析出物对新型耐热合金钢和镍基高温合金的应用开发也具有重要意义。它们在制备过程中或长期高温服役产生的 Laves 相析出物不仅产生强化效应,Laves 相的过量析出或晶粒长大可

能严重降低合金的高温性能,甚至导致热时效致脆,从而过早失效。因此,重新评估并深入研究析出物的形成机制、演变规律以及对材料性能的影响,有助于改进合金的高温强度、蠕变持久性、抗氧化和抗腐蚀性能,进而指导合金的设计、制备工艺和性能优化<sup>[18-22]</sup>。

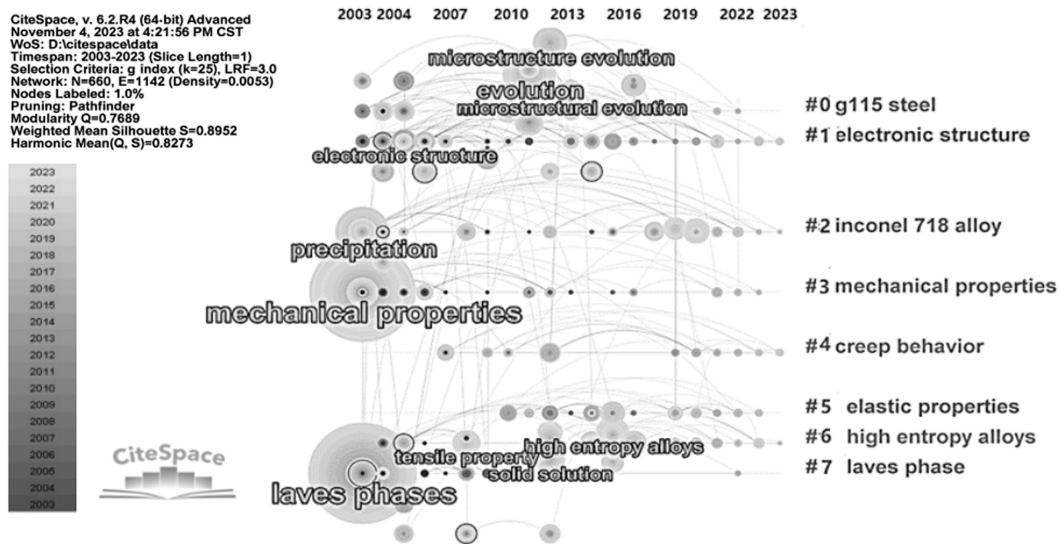


图 1 2003—2023 年研究 Laves 相文献的关键词聚类时间线图

Fig. 1 A timeline chart of keyword clustering of Laves phase literature from 2003 to 2023

### 3 共被引网络可视化分析

#### 3.1 文献共被引可视化分析

当两篇文献同时被第三篇文献引用时,这两篇文献之间就存在共被引关系。文献的被引频次反映了该文献在学术领域的认可程度和网络地位<sup>[23]</sup>。将检索获取的 2 080 条 WoS 数据导入 CiteSpace 中,节点类型设为 Reference(被引文献),控制图谱可视化的筛选阈值 Threshold 为 20,表示图谱显示的标签节点的共被引频次不小于 20,由此得到图 2 所示的 Laves 相研究文献共被引的可视化网络图谱。从图 2 可以看出,高被引文献主要分布于 2013—2021 年。图中每一个圆形节点表示一篇文献,节点灰度表示年份,节点大小表示文献的总被引次数,节点越大则文献被引次数越多,表明文献的研究结论得到学界的普遍关注和认可。共被引网络中节点大小和位置决定了该文献在本知识域的地位。带有深色外环圈的部分节点表示文献的中心性,也就是该文献在整体知识结构中占据重要位置,也可以看作 Laves 相研究领域具有重要意义的研究成果。

图 2 的文献共被引图谱大致可分为两个区域,在同一区域内的节点连线越密集,说明各自区域所代表的文献研究主题关系越密切甚至倾向于一致。右上角的区域以节点最大且突出的 Miracle D B 和 Senkov O N 等

为代表,反映了对高熵合金或难熔高熵合金中析出高温强化 Laves 相的研究现状<sup>[24-25]</sup>。在多相高熵合金中普遍析出的 Laves 相会导致合金耐高温能力显著提高,同时在常温下塑性或延展性急剧降低。这一区域的共被引文献关注于如何深入理解和有效控制 Laves 相在合金中的形成机制、相转变、相稳定性和力学行为,以实现高熵合金性能的优化和应用拓展<sup>[26-27]</sup>。在固溶强化效应减弱的高温条件下,析出强化是一种关键的强化机制。通过设计多相结构和热机械过程,可以显著提高难熔高熵合金的高温强度,从而沉淀出精细的、热稳定的第二相颗粒。通过调控 Laves 相的形貌、尺寸和分布,可以优化高熵合金的强度、韧性和塑性等力学性能,Laves 相合金或 Laves 相增强的多相或双相高熵合金的室温脆性改善或强度-塑性协同提升问题是极活跃的研究前沿和发展趋势之一<sup>[1,25]</sup>。例如,双相或共晶高熵合金  $\text{CoCrFeNiNb}_x$  或  $\text{AlCoCrFeNiNb}_x$  ( $x = 0 \sim 0.8$ ),随着 Nb 含量逐渐增加,合金微观组织由单一 FCC 固溶体向 FCC+Laves 相两相转变,Laves 相为 C14 结构的  $\text{NbM}_2$  ( $M = \text{Co}, \text{Cr}, \text{Fe}, \text{Ni}$ ),而不是常见的  $\text{Fe}_2\text{Nb}$ 。 $\text{CoCrFeNiNb}_{0.5}$  合金,压缩断裂强度和应变分别可达 2 300 MPa 和 23.6% 以上。所设计的合金表现出优异的室温强度与塑性匹配的综合力学性能<sup>[28-29]</sup>。

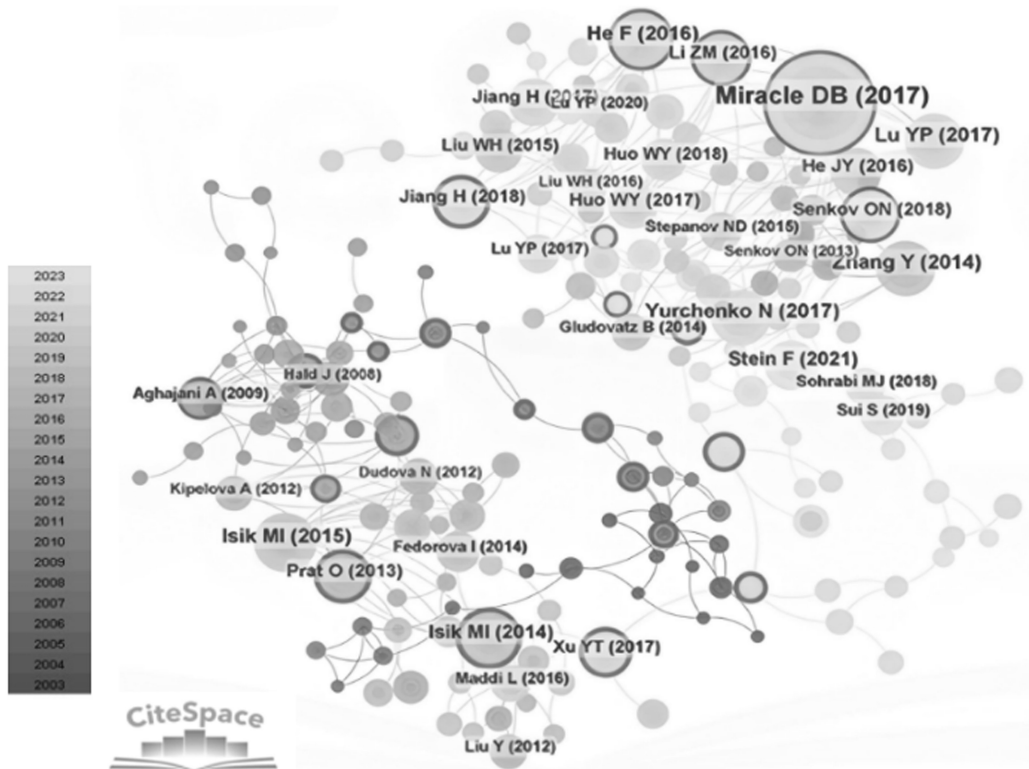


图2 Laves相研究文献共被引的可视化网络图谱

Fig.2 Network visualization of co-citation in scientific literature of Laves phase

具有复杂多相结构的有序固溶体和/或金属间化合物相存在于很多高熵合金中,高混合熵并不是控制相形成的唯一因素。在以 FCC 或 BCC 为主导的多相高熵合金中,常见的强化相是复杂有序相 B2、 $\sigma$ 、C14 型或 C15 型 Laves 相、L21 相等,在多组元条件下这些强化相的形成机制各有特殊性。在组元中包含 Cr、Nb、Ti、Co、Fe 等元素时容易产生 Laves 相增强相<sup>[1,25]</sup>。目前基于 Hume-Rothery 规则和热力学参数的唯象判据以及机器学习普遍集中于高熵合金中固溶体相形成的预测上,而对合金中广泛生成的各种类型金属间化合物的相形成判据的研究却很少。文献[30-31]熔铸制备了由 Al 和 IV~VI 族元素组成的  $\text{AlCr}_x\text{NbTiV}$  和  $\text{Al}_x\text{CrNbTiVZr}$  ( $x=0\sim 1.5$ ) 高熵合金,经  $1200\text{ }^\circ\text{C} + 24\text{ h}$  均匀化处理后获得 BCC + Laves 相双相组织,其中  $\text{AlCrNbTiV}$  和  $\text{AlCr}_{1.5}\text{NbTiV}$  分别析出体积分数为 13% 和 35% 的 C14 型富 Cr 和 Nb 的 Laves 相颗粒存在于体心立方基体中。相组成实验结果验证了由原子尺寸失配度 ( $>5.0\%$ ) 和 Allen 电负性差 ( $>7.0\%$ ) 参数预测高熵合金中 Laves 相形成门槛值的正确性,但这一判据并不能预测合金中其他有序金属间相的形成。在低密度耐高温难熔高熵合金中广泛添加一定浓度的 Cr 元

素有利于 Laves 相形成,而 Al 的合金化可能会促进析出 Laves 相由 C14 型向 C15 型转变。另外,在大规模工业生产铸锭高熵合金的要求下,含 Laves 相的共晶或多相高熵合金能够改善多组元混合引起的成分不均匀性,并且提高熔体的流动性和可铸性<sup>[32-33]</sup>。

图2中左下角区域以节点较大的 Isik M I 和 Prat O 等为代表,主要研究 Laves 相析出物对  $600\sim 650\text{ }^\circ\text{C}$  的蠕变服役条件下 P92、12Cr 和 G115 等新型耐热合金钢组织与性能的影响。这些耐热钢广泛应用于火力、核电等能源动力场合的关键部件,必须在  $600\sim 650\text{ }^\circ\text{C}$  承受机械载荷的蠕变服役条件下运行<sup>[18,34-35]</sup>。如何控制长期高温服役产生的 Laves 相析出物和提高高温蠕变性能是重要的热点主题之一。质量分数 9%~12%Cr 马氏体耐热钢在奥氏体化和回火热处理的初始相组成中并没有 Laves 相,但在高温热暴露或高温蠕变条件下会在紧邻典型晶界碳化物  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  (M 主要是 Cr,也会富 Mo 和 Fe) 的位置形核长大为短棒状纳米级 Laves 相颗粒,Isik 等人利用原子探针层析成像技术证实了在 Laves 相成核之前,微量 Si 和 Mo 首先偏析于晶界进而改变 Laves 相形成的热力学和动力学条件,有利于耐热钢在  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  碳化物旁边析出提升高温承载能力的

Laves 相颗粒<sup>[35]</sup>。文献[36]认为 Laves 相颗粒易出现在  $M_{23}C_6$  碳化物旁是由于吞噬生长机制,即 Laves 相倾向于直接吞噬相邻的  $M_{23}C_6$  相,且优先沿  $M_{23}C_6$  与基体界面开始,然后逐渐扩展到  $M_{23}C_6$  的中心。从图 2 左下角区域的大节点和高中心性的高被引文献可以发现,为了解决长期高温服役产生的 Laves 相的过量析出或晶粒长大严重降低新型耐热合金钢的高温性能(蠕变或热时效致脆失效)的问题,首先发现 Laves 相倾向形成于  $M_{23}C_6$  附近,然后分析探寻导致这一现象的原因是 Mo、Si 和 P 在晶界的微量偏析促使 Laves 相颗粒在碳化物旁边形成,进一步深入研究 Laves 相颗粒倾向在  $M_{23}C_6$  碳化物附近析出的生长机制,共同构成了对这一问题的探究脉络<sup>[35-39]</sup>。这两个区域的划

分也反映了文献共被引可视化结果与图 1 的关键词聚类时间线结果是一致的。

### 3.2 作者与期刊共被引可视化分析

作者共被引分析不仅能够揭示某一领域高被引作者的分布情况,还可以识别有影响力的作者。而期刊共被引分析则能够展示研究领域关键知识来源的分布及互动状况<sup>[40]</sup>。图 3 和图 4 分别为由 CiteSpace 绘制的 2003—2023 年 Laves 相相关文献作者和发表期刊的共被引网络,其中作者共被引网络中共有 896 个节点、1 917 条连线,每个节点代表一位作者,两位作者之间的连线表示共被引关系。期刊共被引网络包括 851 个节点和 2 924 条连线,相对较大的节点标识的是引文计数大于 200 的期刊,节点越大,期刊越重要。

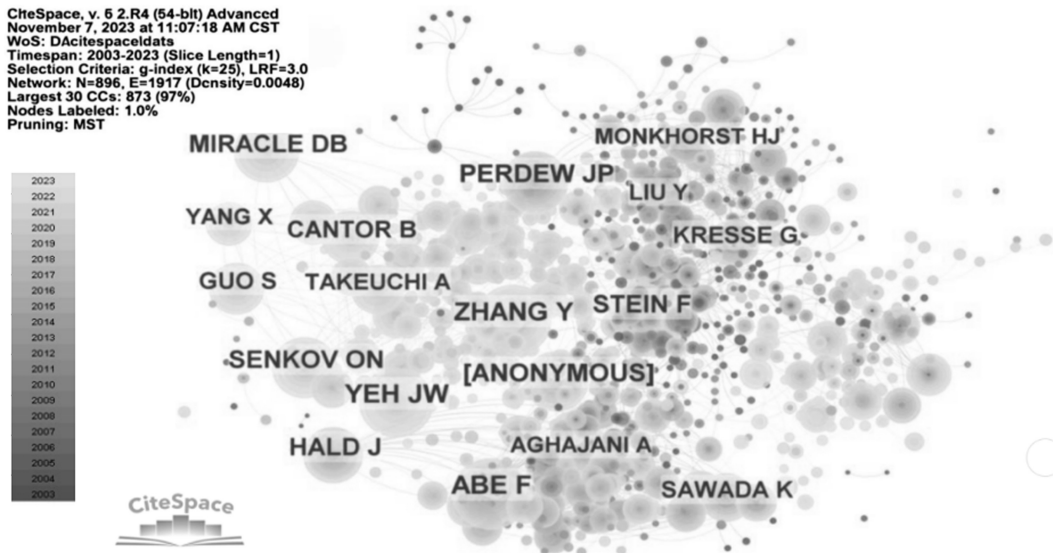


图 3 2003—2023 年 Laves 相研究的作者共被引可视化网络图谱

Fig. 3 Network visualization of author co-citation in the field of Laves phase research from 2003 to 2023

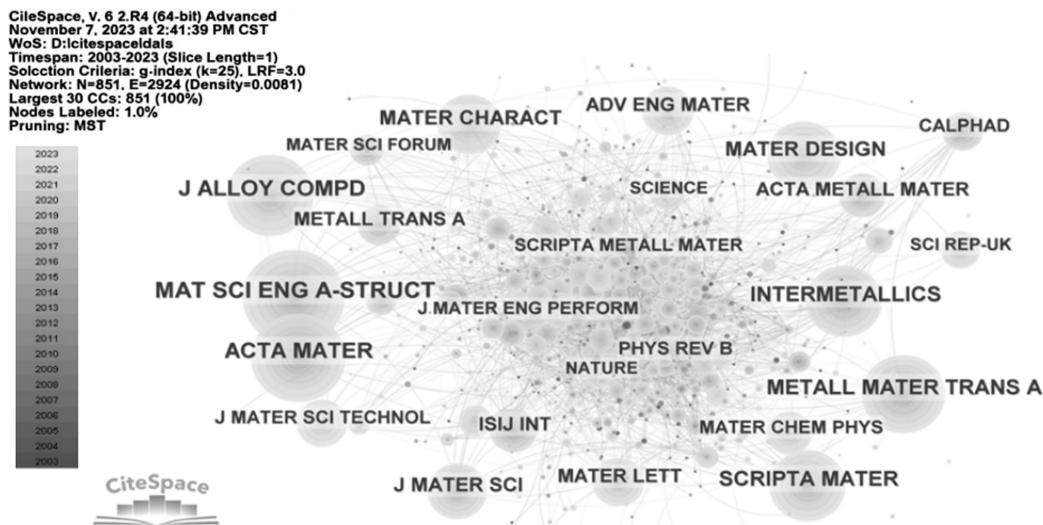


图 4 2003—2023 年 Laves 相研究的期刊共被引可视化网络图谱

Fig. 4 Network visualization of journal co-citations in the field of Laves phase research from 2003 to 2023

从图3和图4可以看出,密集的网络节点反映了Laves相相关研究在检索区间内相当活跃。图3按照作者节点大小进行排序,共引频次相对较高的分别是ABE F(频次300)、YEH J W(275)、ZHANG Y(270)、PERDEW J P(222)、STEIN F(217)、HALD J(198)、SENKOV O N(197)、MIRACLE D B(189)和CANTOR B(162),这些作者主要是高熵合金和耐热合金领域有影响力的作者,例如YEH J W和CANTOR B是高熵合金的开创者,也表明Laves相研究与这些领域有密切联系的知识结构。特别的是,在图2和图3中共同出现ZHANG Y、STEIN F、SENKOV O N和MIRACLE D B这4位作者,说明他们不仅有数量丰富的论文,在论文中还包含相对更高质量的研究成果。表1是高频次共被引期刊,按照期刊节点大小进行排序,共被引频次达到500次以上的9种期刊高质量和高影响力期刊是Laves相研究领域的重要信息源,促进了该领域的学术交流和知识传播。

表1 高频次共被引期刊

Table 1 Top nine journals by co-citation frequency

| 序号 | 共被引频次 | 期刊                   | 影响因子 |
|----|-------|----------------------|------|
| 1  | 1 620 | MAT SCI ENG A-STRUCT | 6.4  |
| 2  | 1 313 | ACTA MATER           | 9.4  |
| 3  | 1 173 | J ALLOY COMPD        | 6.2  |
| 4  | 1 046 | METALL MATER TRANS A | 2.8  |
| 5  | 947   | INTERMETALLICS       | 4.4  |
| 6  | 899   | SCRIPTA MATER        | 6.0  |
| 7  | 710   | MATER CHARACT        | 4.7  |
| 8  | 698   | MATER DESING         | 8.4  |
| 9  | 567   | J MATER SCI          | 4.5  |

## 4 结论

不同于已有的Laves相叙述性综述,本文首次利用CiteSpace文献计量分析软件对Web of Science中2003—2023年高温结构材料用Laves相金属间化合物相关研究文献的关键词、文献共被引、作者和期刊共被引进行了可视化回顾和分析。由关键词时间线图解析获悉关键词聚集涌现的2个重要时间段分别是早期的2003—2004年和中期的2010—2013年。这2个阶段的高频关键词与8个聚类的可视化结果共同构建了Laves相相关研究的知识框架,揭示2003—2023年Laves相研究的两大热点主题和新兴前沿。具体而言,这包括Laves相析出强化的多相高熵合金的室温脆性改善或强度-塑性综合性能提升问题,以及Laves相析出物对600~650℃蠕变服役条件下P92、12Cr和

G115等新型耐热合金钢组织与性能的影响。这两者反映了重新评估Laves相析出物形成机制、演变规律以及对高温结构材料性能影响的重要性,有助于指导合金的设计、制备工艺和性能优化。

文献共被引、作者和期刊共被引的可视化网络图谱与关键词图谱显示较高的一致性,密集的网络节点反映了Laves相相关研究相当活跃。共被引频次高的作者同时也是上述两个热点方向具有影响力的研究者。以ZHANG Y、STEIN F、SENKOV O N和MIRACLE D B为代表的作者以及MAT SCI ENG A-STRUCT、ACTA MATER等为代表的期刊备受学界关注与认可,构成了国际上Laves相研究知识基础与结构的重要来源。今后意向从事Laves相研究的学者应更多关注这些能够产出更高质量研究成果的作者和期刊。

## 参考文献(References):

- [1] STEIN F, LEINEWEBER A. Laves phases: A review of their functional and structural applications and an improved fundamental understanding of stability and properties[J]. *Journal of Materials Science*, 2021,56(9):5321-5427.
- [2] PAUFLER P, GUSTAV E. R. Schulze's pioneering work on Laves phases[J]. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 2006, 221(5/6/7):311-318.
- [3] PAUFLER P. Early work on Laves phases in East Germany[J]. *Intermetallics*, 2011,19(4):599-612.
- [4] BEI H, PHARR G M, GEORGE E P. A review of directionally solidified intermetallic composites for high-temperature structural applications [J]. *Journal of Materials Science*, 2004,39:3975-3984.
- [5] KUMAR K S, HAZZLEDINE P M. Polytropic transformations in Laves phases[J]. *Intermetallics*, 2004,12:763-770.
- [6] CHEN S, SUN Y, DUAN Y H, et al. Phase stability, structural and elastic properties of C15-type Laves transition-metal compounds MCo<sub>2</sub> from first-principles calculations [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015,630:202-208.
- [7] BRADY M P, LIU C T, ZHU J H, et al. Effects of Fe additions on the mechanical properties and oxidation behavior of Cr<sub>2</sub>Ta Laves phase reinforced Cr[J]. *Scripta Materialia*, 2005,52:815-819.
- [8] YAO J, LU S, XIAO X, et al. Effect of molybdenum on the microstructure and oxidation behavior of hot-pressed TaCr<sub>2</sub> alloys[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2019,61:249-255.
- [9] 姚敬,鲁世强,肖璇,等. 机械合金化+热压制备Laves相TaCr<sub>2</sub>合金的物相演变及热力学分析[J]. *矿冶工程*, 2018,38(2):110-113.  
YAO Jing, LU Shiqiang, XIAO Xuan, et al. Phase evolution and thermodynamic analysis of laves phase TaCr<sub>2</sub> alloy prepared by mechanical alloying followed by hot pressing[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2018,38(2):110-113.
- [10] CHEN C, SONG M. Visualizing a field of research: A methodology of systematic scientometric reviews[J]. *PLoS One*, 2019,14(10):

- e0223994.
- [11] CHEN C. Science mapping: A systematic review of the literature[J]. *Journal of Data and Information Science*, 2017,2(2):1-40.
- [12] CHEN D F, WUY F, LI H Y, et al. Visual mapping analysis of literature on Chinese and western medicine for spastic cerebral palsy based on CiteSpace bibliometric method[J]. *Chin Herb Med*, 2021, 52:4318-4326.
- [13] CHEN C. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3):359-377.
- [14] PONSONI J B, ARANDA V, DA SILVA N T, et al. Design of multicomponent alloys with C14 Laves phase structure for hydrogen storage assisted by computational thermodynamic[J]. *Acta Materialia*, 2022,240:118317.
- [15] YUAN S, NONG J, GUO Q, et al. Atomic insights into the preferential dissolution of Laves phase of 9% Cr heat resistant steels in the strong alkaline solution[J]. *Corrosion Science*, 2024,227:111791.
- [16] LI P, CHEN J, HUANG L, et al. First-principles study of structural, mechanical, electronic properties and Debye temperature of Nb-Co<sub>2</sub> Laves phases under pressure[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2024,676:415683.
- [17] WEI S S, XIAO X, ZHOU K, et al. First-principles investigations of phase stability and elastic properties of Laves phase TaCr<sub>2</sub> by ruthenium alloying [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2023,42(1):20220319.
- [18] KLEIN S, NABIRAN N, WEBER S, et al. Influence of formation and coarsening of the Laves phase on the mechanical properties of heat-resistant ferritic steels[J]. *Steel Research International*, 2014, 85(5):851-862.
- [19] 尚晨光. P92/G115 钢在近服役环境下的蠕变、氧化及其交互行为与机制[D]. 北京:北京科技大学, 2023.  
SHANG Chenguang. Creep, oxidation and creep-oxidation interaction behavior and mechanism of P92/G115 steel in near-service environment[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [20] 张开铭, 鲁世强, 江丰建聪, 等. Laves 相 NbCr<sub>2</sub>/Nb 两相合金的应变补偿物理本构关系研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(8):2835-2843.  
ZHANG Kaiming, LU Shiqiang, JIANG Fengjiancong, et al. Strain-compensated physical constitutive relation of Laves phase NbCr<sub>2</sub>Nb dual-phase alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(8):2835-2843.
- [21] ANTONSSON T, FREDRIKSSON H. The effect of cooling rate on the solidification of inconel 718 [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2005,36:85-96.
- [22] 李亚敏, 赵旺, 张瑶瑶, 等. Cu 掺杂对 Inconel 718 合金 Laves 相稳定性的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2023,41(1):39-44.  
LI Yamin, ZHAO Wang, ZHANG Yaoyao, et al. Stability of Laves phase with Cu doping in inconel 718 alloy[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2023,41(1):39-44.
- [23] 金丽娜. 基于复杂网络的文献关联关系模型的建立与分析[D]. 北京:北京化工大学, 2013.  
JIN Lina. Establishment and analysis of the literature relationship model based on complex network[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [24] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts[J]. *Acta Materialia*, 2017,122:448-511.
- [25] SENKOV O N, MIRACLE D B, CHAPUT K J, et al. Development and exploration of refractory high entropy alloys: A review[J]. *Journal of Materials Research*, 2018,33:1-37.
- [26] HUO W, ZHOU H, FANG F, et al. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiZr<sub>x</sub> eutectic high-entropy alloys[J]. *Materials & Design*, 2017,134:226-233.
- [27] HUO W, ZHOU H, FANG F, et al. Microstructure and properties of novel CoCrFeNiTa<sub>x</sub> eutectic high-entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018,735:897-904.
- [28] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. *Progress in Materials Science*, 2014, 61:1-93.
- [29] HE F, WANG Z, CHENG P, et al. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb<sub>x</sub> [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015,656:284-289.
- [30] YURCHENKO N, STEPANOV N, SALISHCHEV G. Laves-phase formation criterion for high-entropy alloys[J]. *Materials Science and Technology*, 2017,33(1):17-22.
- [31] STEPANOV N D, YURCHENKO N Y, SKIBIN D V, et al. Structure and mechanical properties of the AlCr<sub>x</sub>NbTiV ( $x=0, 0.5, 1, 1.5$ ) high entropy alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 652:266-280.
- [32] LU Y, GAO X, JIANG L, et al. Directly cast bulk eutectic and near-eutectic high entropy alloys with balanced strength and ductility in a wide temperature range[J]. *Acta Materialia*, 2017,124:143-150.
- [33] JIANG H, HAN K M, GAO X X, et al. A new strategy to design eutectic high-entropy alloys using simple mixture method[J]. *Materials & Design*, 2018,142:101-105.
- [34] 李季, 唐丽英, 周荣灿, 等. T92 钢中 Laves 相在内压蠕变过程中析出特征和电化学响应行为研究[J]. *热力发电*, 2023,52(8):96-103.  
LI Ji, TANG Liying, ZHOU Rongcan, et al. Investigation on the precipitation characteristics and electrochemical responsibility of Laves phase during internal pressure creep test of T92[J]. *Thermal Power Generation*, 2023,52(8):96-103.
- [35] ISIK M I, KOSTKA A, YARDLEY V A, et al. The nucleation of Mo-rich Laves phase particles adjacent to M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> micrograin boundary carbides in 12% Cr tempered martensite ferritic steels[J]. *Acta Materialia*, 2015,90:94-104.
- [36] XU Y, NIE Y, WANG M, et al. The effect of microstructure evolution on the mechanical properties of martensite ferritic steel during long-term aging[J]. *Acta Materialia*, 2017,131:110-122.

- on the microstructure of nickel aluminum bronze (NAB)[J]. *Additive Manufacturing*, 2022,56:102859.
- [2] 许诺,王立昕,高瑜,等. 铝青铜合金的研究与发展[J]. *铸造工程*, 2021,45(2):11-15.  
XU Nuo, WANG Lixin, GAO Yu, et al. The research and development of aluminum bronze alloy[J]. *Foundry Engineering*, 2021,45(2):11-15.
- [3] 薛臣. 铝青铜(QAl10-4-4)连杆衬套的热处理工艺及性能研究[D]. 太原:中北大学, 2019.  
XUE Chen. Study on heat treatment process and properties of aluminum bronze (QAl10-4-4) connecting rod bushing[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [4] 郭贺冉,冯再新,殷傲,等. 固溶时效温度对锻后 QAl10-4-4 铝青铜组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020,45(6):63-66.  
GUO Heran, FENG Zaixin, YIN Ao, et al. Effects of solution and aging temperature on microstructure and properties of QAl10-4-4 aluminum bronze after forging[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020,45(6):63-66.
- [5] XU G, CHEN B, ZHANG D, et al. Effect of heating treatment on microstructure and properties of QAl10-4-4 aluminum bronze alloy[C]//3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME). 2020:481-485.
- [6] 应俊龙,巢昂轩,李智勇. 热处理工艺对离心铸造 QAl10-4-4 铝青铜组织及性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2021,41(12):1568-1571.  
YING Junlong, CHAO Bingxuan, LI Zhiyong. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of QAl10-4-4 aluminum bronze[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2021,41(12):1568-1571.
- [7] 路俊攀. 加工铜及铜合金金相图谱[M]. 长沙:中南大学出版社, 2010.  
LU Junpan. Photographical spectrum for worked copper and copper alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2010.
- [8] MA S, YANG X B, FU L M, et al. Achieving high strength-ductility synergy in nickel aluminum bronze alloy via a quenching-aging-tempering heat treatment[J]. *Materials Letters*, 2023,333:133661.
- [9] MA S, YE C, YANG X, et al. Microstructure evolution during the heavy warm rolling of a nickel aluminum bronze[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023,883:145458.
- [10] 马倩,刘光磊,张令喻,等. 固溶时效深冷处理对 ZQAl10-3-1.5 合金摩擦磨损性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2018,39(2):32-37.  
MA Qian, LIU Guanglei, ZHANG Lingyu, et al. Effects of solid solution and aging and cryogenic treatment on friction and wear properties of ZQAl10-3-1.5 alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2018,39(2):32-37.
- [11] 田荣璋,王祝堂. 铜合金及其加工手册[M]. 长沙:中南大学出版社, 2006.  
TIAN Rongzhang, WANG Zhutang. Processing handbook of the copper alloy[M]. Changsha: Central South University Press, 2006.
- [12] 金云学,都春燕,王磊. 镍铝青铜组织在热处理过程中的演变规律[J]. *特种铸造及有色合金*, 2014,34(9):1004-1008.  
JIN Yunxue, DU Chunyan, WANG Lei. Microstructural evolution of nickel aluminum bronze during heat treatment process[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2014,34(9):1004-1008.
- 引用本文:**刘莹雪,刘鹏程,胡克福,等. 热处理对 QAl11-6-6 合金挤压棒组织与硬度的影响[J]. *矿冶工程*, 2025,45(1):160-165.  
LIU Yingxue, LIU Pengcheng, HU Kefu, et al. Effect of heat treatment on microstructure and hardness of QAl11-6-6 alloy extruded rod[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(1):160-165.

(上接第 159 页)

- [37] YOSHIZAWA M, IGARASHIM M, MORIGUCHIK K, et al. Effect of precipitation long-term creep deformation properties of P92 and P122 type advanced ferritic steels for USC power plants[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009,510-511:162-168.
- [38] FEDOROVA I, BELYAKOV A, KOZLOV P, et al. Laves-phase precipitates in a low-carbon 9% Cr martensitic steel during aging and creep at 923 K[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014,615:153-163.
- [39] NABIRAN N, KLEIN S, WEBER S, et al. Evolution of the Laves phase in ferritic heat-resistant steels during long-term annealing and its influence on the high-temperature strength[J]. *Metallurgical & Materials Transactions: A*, 2015,46:102-114.
- [40] HU C P, HU J M, GAO Y, et al. A journal co-citation analysis of library and information science in China[J]. *Scientometrics*, 2011,86(3):657-670.
- 引用本文:**肖璇,金毛毛,秦文洲,等. 基于 CiteSpace 的高温结构材料用 Laves 相合金的文献计量和可视化[J]. *矿冶工程*, 2025,45(1):153-159.  
XIAO Xuan, JIN Maomao, QIN Wenzhou, et al. CiteSpace-based bibliometrics and visualization of Laves phases for high temperature applications[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(1):153-159.