

基于 CiteSpace 的钛铝合金研究可视化分析

鲍芳芳^{1,2}, 高威^{1,2}, 冯新^{1,2}, 张爱斌^{1,2},
丁贤飞^{1,2}, 南海^{1,2}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

(2. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: 在高温结构材料中, 钛铝合金材料具有优异的性能, 被视为新型高推比航空发动机与航天推进系统静止件和转动件极具潜力的候选材料。为了解全球钛铝合金研究现状, 基于 CNKI 数据库和 Web of Science 数据库中的钛铝合金研究文献数据, 借助 CiteSpace 软件制作钛铝合金研究可视化知识图谱, 采用定量分析与定性分析相结合的方法, 分别对中英文钛铝合金研究状况予以客观揭示。研究内容包括钛铝合金材料的研究机构、作者、关键词、高被引文献等。研究结果表明: 从事钛铝合金研究的机构以高校和科研院所为主, 国外研究机构合作力度相对较大, 国内研究机构合作力度相对较小; 我国发文引用频次及影响力较国外更高; 钛铝合金相关方向的研究热点以其微观组织、力学性能等为主; 中英文钛铝合金研究相关文献中, 2010~2016 年间的高被引文献数量较多。

关键词: 钛铝合金; 可视化; CiteSpace; CNKI; Web of Science

中图分类号: TG146.2; G203 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)11-0922-08

Visual Analysis of Titanium Aluminum Alloy Research Based on CiteSpace

BAO Fangfang^{1,2}, GAO Wei^{1,2}, FENG Xin^{1,2}, ZHANG Aibin^{1,2},
DING Xianfei^{1,2}, NAN Hai^{1,2}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100095, China)

Abstract: Among high-temperature structural materials, due to the excellent performance, titanium aluminum alloy is regarded as a highly potential candidate for stationary and rotating parts of new type high thrust ratio aeroengine and aerospace propulsion systems. In order to thoroughly understand the global research status of titanium aluminum alloy, this article is written based on the research literature data of titanium aluminum alloy in the CNKI database and Web of Science database, with the help of CiteSpace software to make a visual knowledge map, combining both the quantitative analysis and qualitative analysis. The methods of this study objectively reveal the status of both domestic and foreign researches on titanium aluminum alloy. The contents of this study include the research institutions, authors, keywords, as well as the highly cited documents of different literatures. The results show that the research institutions are mainly universities and scientific research institutes. Large ratio of studies are performed with the cooperation between foreign research institutions, while Chinese research institutions' cooperation study only take small ratio. Frequency and influence of Chinese authors' literature citations are relatively high. The research mainly focus on microstructure, mechanical properties, etc. There is a large number of high cited references in the research of titanium aluminum alloy in Chinese and foreign languages from 2010 to 2016.

Key words: titanium aluminum alloy; visual; CiteSpace; CNKI; Web of Science

收稿日期: 2020-07-31 修回日期: 2020-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51671026)

第一作者: 鲍芳芳, 女, 1984 年生, 博士

通讯作者: 丁贤飞, 男, 1980 年生, 高级工程师, 硕士生导师,

Email: xianfeimail@gmail.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202007043

1 前言

在高温结构材料中, 钛铝合金密度低、耐热性能好、比强度高、比刚度高, 具有良好的抗高温蠕变性能和抗氧化能力, 是综合性能最好的轻质高温合金^[1], 被视为新型高推比航空发动机与航天推进系统静止件和转动件

构演变中扮演着重要角色。图 1 中出现频次 10 次以上的机构包括：中南大学粉末冶金国家重点实验室(频次 61、中心性 0.04)、哈尔滨工业大学材料科学与工程学院(频次 60、中心性 0.05)、西北工业大学凝固技术国家重点实验室(频次 50、中心性 0)、哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室(频次 41、中心性 0)、中国科学院金属研究所(频次 38、中心性 0)、中南大学材料科学与工程学院(频次 33、中心性 0.02)、北京科技大学新金属材料国家重点实验室(频次 29、中心性 0.05)、南京航空航天大学材料科学与技术学院(频次 27、中心性 0)、钢铁研究总院高温材料研究所(频次 24、中心性 0)、西北有色金属研究院(频次 20、中心性 0.01)等。合作共现图揭示出：我国钛铝合金研究机构集中在高校和专业研究院所，机构之间合作力度不大。

3.3 作者合作

作者合作共现图(图 2)中的每位学者均从不同角度对钛铝合金进行了深入思考与研究，并对后续研究产生了重要影响。图 2 各节点中圆圈越大，表明作者文章的被引用频次越高、影响力越大，其中，被引频次较为突出的作者有：钢铁研究总院的张继、中南大学的刘咏、哈尔滨工大的陈玉勇、北京科技大学的林均品、钢铁研究总院的朱春雷和哈尔滨工业大学的傅恒志，这些作者的论文引用频次均在 20 次以上。从图 2 可以看出，这些作者的合作情况整体呈现出既有分散又有连接的状态，反映出我国钛铝合金研究领域已形成若干小规模合作群，其中，中心性最高值为 0.01，中心性值为 0.01 的作者有：张继(频次 52)、刘咏(频次 34)和朱春雷(频次 22)。

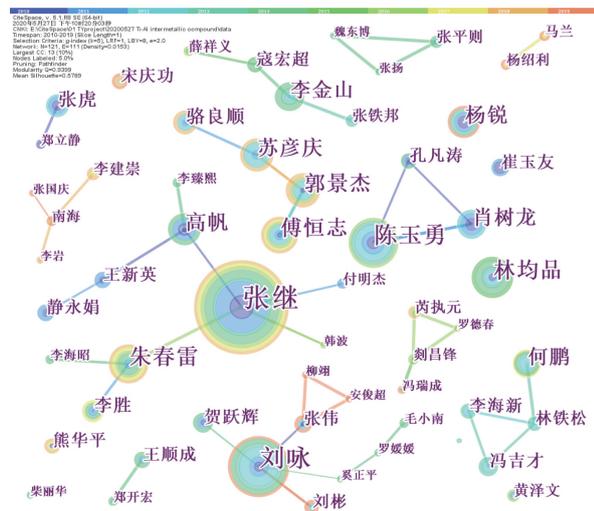


图 2 CNKI 数据库中钛铝合金研究作者合作共现图

Fig. 2 Author cooperation co-occurrence map of titanium aluminum alloy in CNKI database

3.4 关键词

关键词共现图能够揭示出该领域研究热点及其发展脉络，如果某一时期钛铝合金领域的某一关键词出现频次高，意味着该关键词是该时期、钛铝合金领域的研究热点。图 3 给出了钛铝合金领域的关键词共现图，图中圆圈越大表明该关键词在文献中出现频次越高，圆圈旁字体越大表明该关键词中心性越强，圆圈间连线越粗表明两者之间相关性越强。通过关键词的频率、中心性及相互之间的联系，可以直观地看出在某一时期内研究者所共同关注的热点。连线纵横交错，说明关键词之间联系非常紧密，可能经常选择性地被研究者放在同一个模型中进行观察。中心度较高的关键词在共现网络结构中处于中心位置，是当前学术研究者比较关心的问题，在研究方向的扩展中有重要作用，预示着未来的发展趋势。具体来看，钛铝合金合金材料的研究点主要包括：TiAl 合金(频次 196、中心性 0.09)、力学性能(频次 149、中心性 0)、显微组织(频次 86、中心性 0.27)、钛合金(频次 95、中心性 0.13)、微观组织(频次 86、中心性 0.27)、TiAl 基合金(频次 83、中心性 0.31)、金属间化合物(频次 66、中心性 0.31)、热处理(频次 64、中心性 0.2)、晶粒细化(频次 33、中心性 0.2)、高温氧化(频次 31、中心性 0.19)等方面。在这些关键词节点中，TiAl 合金的节点最大，引用频次最高。

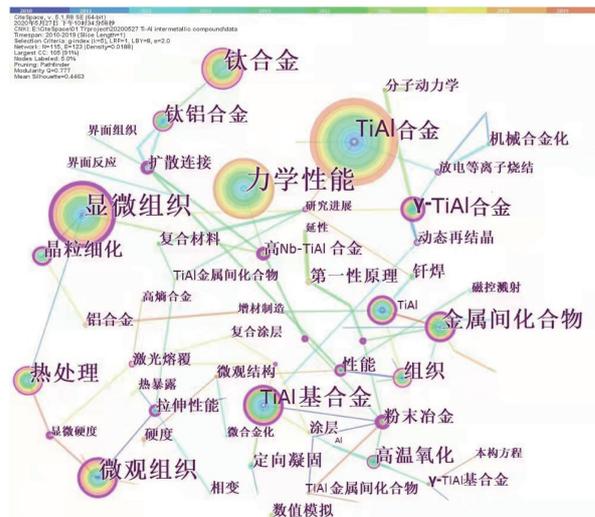


图 3 CNKI 数据库钛铝合金研究关键词共现图

Fig. 3 Keywords co-occurrence map of titanium aluminum alloy in CNKI database

3.5 高被引文献

高被引文献即引用频次较高的文献，此类文献的作者影响力较大、文献中的发现可能是该研究领域的“关键转折点”。表 1 列出了钛铝合金研究领域在 CNKI 数据库中至本文作者检索之日总引用次数排名前 10 的高被引文

献, 可以看出: 被引频次较高的文献均发表于 2010 年及之后, 表明在 2010 年及之后我国钛铝合金材料领域研究质量明显提升, 具体文献主题包括钛铝合金材料的研究进展、制备技术及应用情况。其中, 排名第一位的为 2010 年林均品等^[16]发表的《轻质 γ -TiAl 金属间化合物的研究进展》, 被引用 126 次, 介绍了 γ -TiAl 基金属间化合物的发展过程、成分-组织-性能-制备关系、产业化及应用, 指出北京科技大学发展的高 Nb-TiAl 金属间化合物为国内外 TiAl 基金属间化合物发展的重点方向。排名

第二位的为 2010 年张建伟等^[17]发表的《Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 基合金的研究与应用》, 被引用 122 次, 介绍了钢铁研究总院 Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 合金的研究与应用进展, 包括系统的合金化和组织结构的设计、建立具有自主知识产权的高韧性合金体系、建立合金制备加工工艺技术等。排名第三位的为 2015 年杨锐^[18]发表的《钛铝金属间化合物的进展与挑战》, 被引用 118 次, 介绍了钛铝金属间化合物的 4 个阶段研发历程、6 个方面主要进展和 5 个未来挑战。

表 1 CNKI 数据库钛铝合金研究高被引文献

Table 1 Highly cited literature of titanium aluminum alloy in CNKI database

题名	通讯作者	通讯作者单位	时间	被引次数
轻质 γ -TiAl 金属间化合物的研究进展 ^[16]	林均品	北京科技大学	2010	126
Ti ₃ Al 和 Ti ₂ AlNb 基合金的研究与应用 ^[17]	张建伟	钢铁研究总院	2010	122
钛铝金属间化合物的进展与挑战 ^[18]	杨锐	中国科学院金属研究所	2015	118
TiAl 基金属间化合物的研究现状与发展趋势 ^[19]	李金山	西北工业大学	2010	94
TiAl 金属间化合物工程实用化研究与进展 ^[20]	张继	钢铁研究总院	2010	66
新型 β - γ TiAl 合金的研究进展 ^[21]	陈玉勇	哈尔滨工业大学	2012	62
激光原位合成 TiN/Ti ₃ Al 基复合涂层 ^[22]	张晓伟	昆明理工大学	2011	62
TiAl 基合金高温氧化及防护的研究进展 ^[23]	彭小敏	中南大学	2010	60
TiAl 金属间化合物制备技术的研究进展 ^[24]	陈玉勇	哈尔滨工业大学	2014	59
TiAl 合金的制备及应用现状 ^[25]	刘娣	西安西工大超晶科技发展有限公司	2014	57

4 基于 CiteSpace 对 Web of Science 钛铝合金研究的可视化分析

4.1 文献来源

在 Web of Science 收录的数据库期刊中, 刊登钛铝合金的主要有: *Intermetallics*, *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*, *Journal of Alloys and Compounds*, *Acta Materialia*, *Materials*, *Materials & Design*, *Surface and Coatings Technology*, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *Rare Metal Materials and Engineering* 等。基金来源主要有: 中国国家自然科学基金(National natural science foundation of China)、中国国家基础研究计划(National basic research program of China)、中央大学基础研究经费(Fundamental research funds for the central universities)、中国博士后科学基金(China postdoctoral science foundation)、德国研究基金会(German research foundation DFG)、中国国家高技术研究发展计划(National high technology research and development program of China)等。

4.2 国家合作

国家合作共现图直观显示了钛铝合金研究国家及其之间的合作情况, 如图 4, 其中, 频次为 10 以上的国家包括: 中国(频次 687、中心性 0.07)、德国(频次 120、中心性 0.14)、美国(频次 69、中心性 0.07)、奥地利(频次 66、中心性 0.31)、俄罗斯(频次 63、中心性 0.07)、法国(频次 45、中心性 0.21)、日本(频次 44、中心性 0.02)、英国(频次 41、中心性 0.41)、印度(频次 30、中心性 0.07)、波兰(频次 27、中心性 0.14)、澳大利亚(频次 25、中心性 0.79)、意大利(频次 23、中心性 0.63)、韩国(频次 22、中心性 0)、捷克(频次 21、中心性 0.16)、伊朗(频次 20、中心性 0)、西班牙(频次 19、中心性 0)、加拿大(频次 19、中心性 0.24)、斯洛伐克(频次 14、中心性 0.1)、瑞士(频次 14、中心性 0.95)、乌克兰(频次 13、中心性 0)、瑞典(频次 13、中心性 0.38)。统计数据表明, 在钛铝合金研究的主要国家中, 中国频次最高但是缺乏与他国的合作力度, 国外研究合作力度相对大、其频次总和(704)比中国(687)略高。

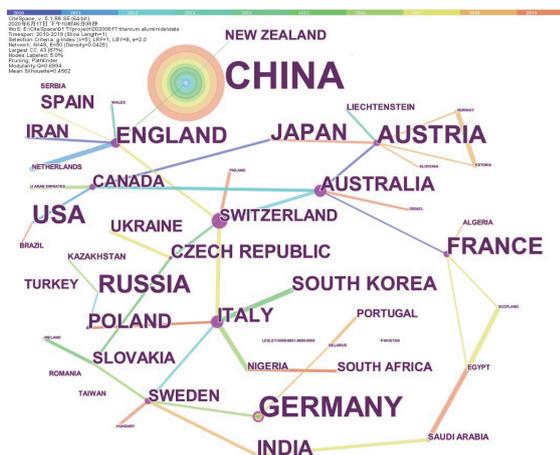


图 4 Web of Science 数据库钛铝合金研究国家合作共现图

Fig. 4 Country cooperation co-occurrence map of titanium aluminum alloy research in Web of Science database

4.3 机构合作

研究机构合作共现图直观显示了钛铝合金研究机构及其之间的合作情况,如图 5。图中,频次 10 次以上的研究机构包括:哈尔滨工业大学(频次 166,中心性 0.15)、西北工业大学(频次 82,中心性 0.35)、北京科技大学(频次 78,中心性 0.36)、中国科学院(频次 53,中心性 0.28)、奥地利里奥本大学(频次 47,中心性 0.39)、中南大学(频次 45,中心性 0.17)、德国亥姆霍兹研究所(频次 36,中心性 0.37)、北京航空航天大学(频次 23,中心性 0.09)、俄罗斯科学院(频次 23,中心性 0.02)、北京航空材料研究院(频次 21,中心性 0.11)、南京航空航天大学(频次 14,中心性 0)、英国伯明翰大学(频次 13,中心性 0.05)、重庆大学(频次 11,

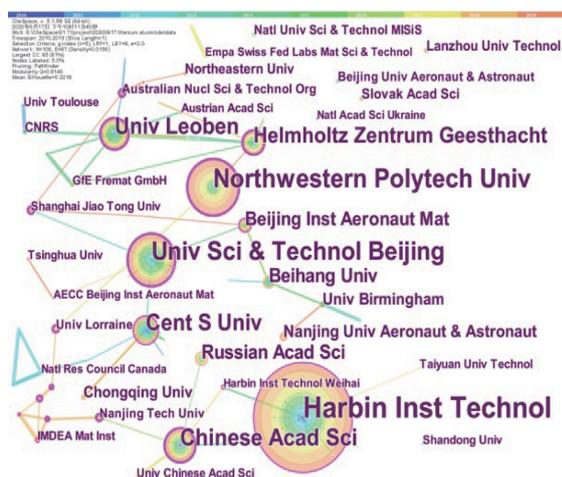


图 5 Web of Science 数据库钛铝合金研究机构合作共现图

Fig. 5 Institution cooperation co-occurrence map of titanium aluminum alloy in Web of Science database

中心性 0)。此外,通过研究机构的中心性数据可以发现,研究机构之间的合作并不多,其中,合作较多的为奥地利里奥本大学和德国亥姆霍兹研究所,其他机构间的合作明显较少,反映出全球大部分专家学者还处于独立研究状态,这不利于钛铝合金研究科研效率与效果的提升。

4.4 作者合作

研究作者合作共现图(图 6)表明,钛铝合金研究领域相关论文中被引用频次最高的作者为 Clemens H,排名在其之后的几位作者被引用的频次相差并不大,详见图 6。截止本文作者检索之日,在 Web of Science 数据库中,钛铝合金领域总被引频次排名前 10 位的作者有:里奥本大学的 Clemens H(频次 50、中心性 0)、西北工业大学和哈尔滨工业大学的傅恒志(频次 45、中心性 0)、哈尔滨工业大学的陈瑞润(频次 43、中心性 0)、西北工业大学的李金山(频次 43、中心性 0)、北京科技大学的林均品(频次 43、中心性 0.02)、哈尔滨工业大学的郭景杰(频次 42、中心性 0)、哈尔滨工业大学的丁宏升(频次 41、中心性 0)、蒙塔纳大学里奥本分校的 Mayer S(频次 38、中心性 0)、西北工业大学的寇宏超(频次 36、中心性 0)、哈尔滨工大学的陈玉勇(频次 33、中心性 0.02)。此外,作者合作中心性最高值为 0.02,中心性为 0.02 的作者有林均品、陈玉勇、孔凡涛、肖树龙和张来启,反映出钛铝合金研究作者尚未在全球各国之间形成紧密联系,总被引频次排名前 10 位作者间的合作主要为中国作者之间的合作,即钛铝合金研究领域作者合作呈现出既有分散又有聚集状态的特点。

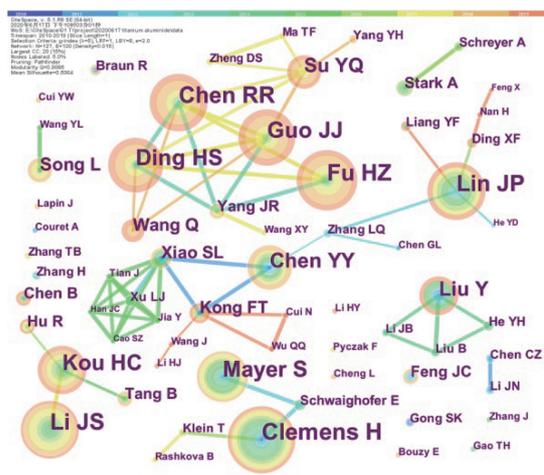


图 6 Web of Science 数据库钛铝合金研究作者合作共现图

Fig. 6 Author cooperation co-occurrence map of titanium aluminum alloy in Web of Science database

4.5 关键词

关键词共现图通过对钛铝合金研究文献中作者提供

的关键词的分析，揭示出 2010~2019 年钛铝合金研究热点，详见图 7，主要包括：微观组织(频次 555、中心性 0.7)、力学性能(频次 379、中心性 0.5)、钛铝合金(频次 269、中心性 0.83)、行为(频次 248、中心性 0.03)、合金(频次 168、中心性 0.61)、变形(频次 140、中心性 0.35)、钛铝合金(频次 140、中心性 0.41)、相变(频次 125、中心性 0.03)、钛合金(频次 116、中心性 0.26)、演变(频次 110、中心性 0)等。

4.6 高被引文献

表 2 列出了 Web of Science 数据库钛铝合金研究被引频次前 10 的文献，可以看出除 Bewlay 等^[26]的 *TiAl Alloys in Commercial Aircraft Engines* 一文发表于 2016 年之外，其余被引频次高的文献都发表于 2010~2014 年，这些文献介绍了钛铝合金的增材制造、铸造和热处理、高 Nb 钛铝合金、粉末冶金等方面的研究成果，具有较高参考价值。其中，排名第 1 位的为 2010 年 Murr 等^[27]发表的 *Characterization of Titanium Aluminide Alloy Components Fabricated by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting* 一文，被引频次 210 次，反映出该文献在全球具有高

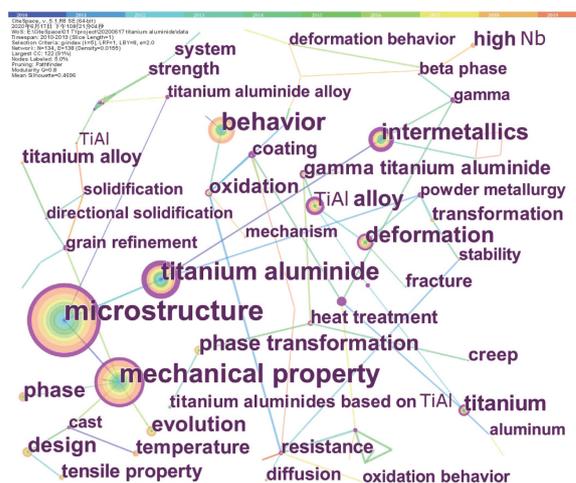


图 7 Web of Science 数据库钛铝合金研究关键词共线图
Fig. 7 Keywords cooperation co-occurrence map of titanium aluminum alloy in web of science database

价值和影响力，该文献证明了采用电子束熔融沉积(electron beam melting, EBM)制造的 Ti-6Al-4V 组件在近净成型和复杂钛铝产品中的潜力。

表 2 Web of Science 数据库钛铝合金研究高被引文献

Table 2 Highly cited literature of titanium aluminum alloy in Web of Science database

Title	First author	Institution	Time	Cited times
Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting ^[27]	Murr L E	University of Texas	2010	210
Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase γ -TiAl based alloy ^[28]	Schwaighofer E	University of Leoben	2014	167
Effect of Nb on oxidation behavior of high Nb containing TiAl alloys ^[29]	Lin J P	University Science & Technology of Beijing	2011	144
Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process ^[30]	Chen Shuhai	University Science & Technology of Beijing	2011	120
TiAl alloys in commercial aircraft engines ^[26]	Bewlay B P	Gen Elect	2016	106
Development of TiAl alloys with excellent mechanical properties and oxidation resistance ^[31]	Kim S W	Korea Institute of Materials Science	2014	96
Deformation and dynamic recrystallization behavior of a high Nb containing TiAl alloy ^[32]	Cheng L	Northwestern Polytech University	2013	88
Effect of carbon addition on solidification behavior, phase evolution and creep properties of an intermetallic β -stabilized γ -TiAl based alloy ^[33]	Schwaighofer E	University of Leoben	2014	81
Microstructure evolution and mechanical properties of a novel beta γ -TiAl alloy ^[34]	Niu H Z	Harbin Institute of Technology	2012	79
Microstructure development and hardness of a power metallurgical multi phase γ -TiAl based alloy ^[35]	Schloffer M	University of Leoben	2012	78

5 结 论

采用 CiteSpace 软件对钛铝合金研究进行可视化分析, 基于 CNKI 数据库和 Web of Science 数据库分别对中外文钛铝合金研究进行分析, 可以快速找出钛铝合金研究领域的机构、作者、关键词及其合作情况等信息。通过数据采集及分类分析, 得出以下结论:

(1) 钛铝合金研究机构方面, 国内的研究机构出现频次最高, 但是缺乏与他国的合作力度, 国外各机构之间合作力度相对更大。在我国, 钛铝合金研究机构集中在高校和科研院所, 机构之间合作力度也不大。

(2) 对钛铝合金研究领域的高被引文献的作者进行分析, 结果表明, 全球各国作者之间尚未形成紧密合作关系, 我国作者之间已形成若干小规模合作群。另外, 我国研究作者的文献引用频次和影响力总体较国外更高。

(3) 钛铝合金研究关键词方面, 国内外钛铝合金研究关键词较为一致, 主要包括: 微观组织、力学性能、热处理、行为、合金、变形等。

(4) 尽管对中外文文献检索时间段和检索模式设置不尽相同, 但是高被引文献的时间及内容显示, 国内外围绕钛铝合金材料的研究中, 高被引文献发表主要集中在 2010~2016 年间。

参考文献 References

- [1] KIM Y W. JOM[J], 1994, 46(7): 30-39.
- [2] DING X F, ZHANG L W, HE J P, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2019, 809: 1-5.
- [3] DING X F, ZHANG L F, HE J P, *et al.* Computational Materials Science[J], 2019, 158: 333-339.
- [4] 冯新, 丁贤飞, 李潇楠, 等. 焊接技术[J], 2019, 48(5): 36-39+7.
FENG X, DING X F, LI X N, *et al.* Welding Technology[J], 2019, 48(5): 36-39+7.
- [5] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化(第二版)[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016: 1-3.
LI J, CHEN C M. CiteSpace: Text Mining and Visualization in Scientific Literature (Second Edition)[M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2016: 1-3.
- [6] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. 科学学研究[J], 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, *et al.* Studies in Science of Science [J], 2015, 33(2): 242-253.
- [7] 侯剑华, 胡志刚. 现代情报[J], 2013, 33(4): 99-103.
HOU J H, HU Z G. Journal of Modern Information[J], 2013, 33(4): 99-103.
- [8] 李淑丽. 信息可视化工具的比较研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2006.
- [9] 陈丽萍, 蔡亮, 李光华, 等. 材料导报[J], 2019, 33(9): 1505-1511.
CHEN L P, CAI L, LI G H, *et al.* Materials Review[J], 2019, 33(9): 1505-1511.
- [10] 程豪, 张峥. 技术与创新管理[J], 2019, 40(3): 313-319.
CHENG H, ZHANG Z. Technology and Innovation Management[J], 2019, 40(3): 313-319.
- [11] 王灿友, 苏秦. 情报杂志[J], 2015, 34(9): 72-77+71.
WANG C Y, SU Q. Journal of Information [J], 2015, 34(9): 72-77+71.
- [12] 徐晓璇, 刘磊. 情报探索[J], 2015(6): 1-5.
XU X X, LIU L. Information Research[J], 2015(6): 1-5.
- [13] 王春雪, 吕淑然, 索晓. 消防科学与技术[J], 2016, 35(5): 660-663.
WANG C X, LV S R, SUO X. Fire Science and Technology [J], 2016, 35(5): 660-663.
- [14] 唐蓓, 李正龙, 李洪伟. 科技管理研究[J], 2013, 33(3): 192-196+218.
TANG B, LI Z L, LI H W. Science and Technology Management Research[J], 2013, 33(3): 192-196+218.
- [15] 邢悦, 许婧, 郝思嘉, 等. 科技创新导报[J], 2019, 16(2): 84-87.
XING Y, XU J, HAO S J, *et al.* Science and Technology Innovation Herald[J], 2019, 16(2): 84-87.
- [16] 林均品, 张来启, 宋西平, 等. 中国材料进展[J], 2010, 29(2): 1-8.
LIN J P, ZHANG L Q, SONG X P, *et al.* Rare Metals Letters[J], 2010, 29(2): 1-8.
- [17] 张建伟, 李世琼, 梁晓波, 等. 中国有色金属学报[J], 2010, 20(S1): 336-341.
ZHANG J W, LI S Q, LIANG X B, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2010, 20(S1): 336-341.
- [18] 杨锐. 金属学报[J], 2015, 51(2): 129-147.
YANG R. Acta Metallurgica Sinica[J], 2015, 51(2): 129-147.
- [19] 李金山, 张铁邦, 常辉, 等. 中国材料进展[J], 2010, 29(3): 1-5.
LI J S, ZHANG T B, CHANG H, *et al.* Rare Metals Letters [J], 2010, 29(3): 1-5.
- [20] 张继, 仲增镛. 中国材料进展[J], 2010, 29(2): 9-13.
ZHANG J, ZHONG Z Y. Rare Metals Letters [J], 2010, 29(2): 9-13.
- [21] 陈玉勇, 张树志, 孔凡涛, 等. 稀有金属[J], 2012, 36(1): 154-160.
CHEN Y Y, ZHANG S Z, KONG F T, *et al.* Chinese Journal of Rare Metals[J], 2012, 36(1): 154-160.
- [22] 张晓伟, 刘洪喜, 蒋业华, 等. 金属学报[J], 2011, 47(8): 1086-1093.

- ZHANG X W, LIU H X, JIANG Y H, *et al.* *Acta Metallurgica Sinica* [J], 2011, 47(8): 1086-1093.
- [23] 彭小敏, 夏长清, 王志辉, 等. 中国有色金属学报[J], 2010, 20(6): 1116-1130.
- PENG X M, XIA C Q, WANG Z H, *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*[J], 2010, 20(6): 1116-1130.
- [24] 陈玉勇, 苏勇君, 孔凡涛. 稀有金属材料与工程[J], 2014, 43(3): 757-762.
- CHEN Y Y, SU Y J, KONG F T. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2014, 43(3): 757-762.
- [25] 刘娣, 张利军, 米磊, 等. 钛工业进展[J], 2014, 31(4): 11-15.
- LIU D, ZHANG L J, MI L, *et al.* *Titanium Industry Progress* [J], 2014, 31(4): 11-15.
- [26] BEWLAY B P, NAG S, SUZUKI A, *et al.* *High Temperature Technology*[J], 2016, 33(4/5): 549-559.
- [27] MURR L E, GAYTAN S M, CEYLAN A, *et al.* *Acta Materialia*[J], 2010, 58(5): 1887-1894.
- [28] SCHWAIGHOFER E, CLEMENS H, MAYER S, *et al.* *Intermetallics* [J], 2014, 44: 128-140.
- [29] LIN J P, ZHAO L L, LI G Y, *et al.* *Intermetallics*[J], 2011, 19(2): 131-136.
- [30] CHEN S H, LI L, CHEN Y, *et al.* *Journal of Alloys & Compounds* [J], 2011, 509(3): 891-898.
- [31] KIM S W, HONG J K, NA Y S, *et al.* *Materials & Design*[J], 2014, (54): 814-819.
- [32] CHENG L, CHANG H, TANG B, *et al.* *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2013, 552: 363-369.
- [33] SCHWAIGHOFER E, RASHKOVA B, CLEMENS H, *et al.* *Intermetallics*[J], 2014, 46: 173-184.
- [34] NIU H Z, CHEN Y Y, L XIAO, *et al.* *Intermetallics*[J], 2012, 31: 225-231.
- [35] SCHLOFFER M, IQBAL F, GABRISCH H, *et al.* *Intermetallics*[J], 2012, 22: 231-240.

(编辑 张雨明)