

基于专利数据的熔炼法制备镍基高温合金的技术研究及发展分析

王 妤

(国家知识产权局, 北京 102206)

[摘 要] 本文基于中国专利检索数据库,通过统计采用熔炼法制备镍基高温合金的在华专利申请趋势、申请人的类型及地域分布特点,分析熔炼法各技术分支的研发现状及发展趋势。分析结果表明,单熔法作为基础制备方法,其专利最多,主要从熔炼工艺、熔炼部件两方面来提高熔体的纯净度,近年来采用复合技术手段提高镍基高温合金的纯净度成为主要的研发方向;双联法制备镍基合金呈现产业化的趋势;三联法熔炼在我国也将呈现高速的发展趋势。

[关键词] 熔炼; 镍基高温合金; 单次熔炼; 双联法熔炼; 三联法熔炼; 专利

[中图分类号] TF815 [文献标志码] A [文章编号] 1008-5122(2021)05-0082-07

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.05.018

The Technology Status and Development Analysis Based on the Patent Applications in China about the Nickel Based High Temperature Alloy Produced with Smelting Method

WANG Yu

Abstract: Based on the Chinese Patent Retrieval Database, this paper analyzed the current situation and development trend of the technical branch of smelting method through the statistics data of the patent application trend, applicant type and geographical distribution characteristics of nickel-based superalloy prepared by smelting method in China. The result of the analysis showed that, as basic production method, single smelting method had the most patents, which mainly focused on improving the purity of melt from two aspects namely smelting process and smelting equipment; in recent years, improving the purity of melt via adapting combined technical means become the major research direction; The nickel based high temperature alloy produced with double smelting method has shown a trend of industrialization and triple smelting method will be developed at high speed in China.

Key words: smelting methods; nickel based high temperature alloy; single smelting method; double smelting method; triple smelting method; patents

0 前言

镍元素因具有独特的原子结构和稳定的晶体结构,使得镍基高温合金成为一种性能优异的高温合金。镍基高温合金的工作温度一般为 650~1 000℃,在此温度范围内,镍基高温合金具有较高的强度、良好的抗氧化性能和抗腐蚀性^[1],因此广泛用于制造航空发动机、各类燃气轮机的最热端部,如涡轮部分

[收稿日期] 2021-09-17

[作者简介] 王妤(1977—),女,江西吉安人,硕士,二级调研员,主要从事冶金领域专利审查工作。

[引文格式] 王妤.基于专利数据的熔炼法制备镍基高温合金的技术研究及发展分析[J].有色冶金节能,2021,37(5):82-88.

的工作叶片、导向叶片、涡轮盘、燃烧室等。

镍基高温合金的研究发展方向主要有两个:一是调整镍基高温合金中的合金化元素的种类及含量;二是研究镍基高温合金生产工艺涉及的工艺参数及部件。

熔炼法作为一项基础且重要的镍基高温合金制备工艺,始于高温合金的出现,并随着高温合金性能需求的提高而不断改进。

本文从专利技术的视角,以在华专利申请为基础,对涉及采用熔炼法制备镍基高温合金的专利技术进行统计和分析,介绍熔炼法技术发展现状及发展趋势,以期对相关研究机构或生产企业的研发提供参考。

1 在华专利申请情况

专利统计和分析的数据来自中国专利检索数据库(CNABS),包括自1980年1月1日至2020年12月31日止公开的涉及熔炼法制备镍基高温合金的专利申请。对专利数据进行除杂去噪后,共获得662个专利申请。

1.1 专利申请量趋势

熔炼法制备镍基高温合金在华专利申请量趋势如图1所示。在所检索到的专利中,最早涉及熔炼法制备镍基高温合金的国内在华专利是1985年鞍山钢铁公司申请的超高温耐磨铸造镍基合金^[2]。1985—2006年,国内在华专利申请的总量为50个。在此期间,每年的专利申请量增长缓慢,最高不超过7个。2007年以后,国内在华专利申请量开始出现较大幅度增长,于2014年达到峰值,年申请量达到70个;随后的几年,专利申请量略有降低,但仍维持在年均60个左右的水平,可见我国熔炼法制备镍基高温合金的研发进入相对成熟且稳定的阶段。2020年的专利申请量略少,原因在于2020年申请的部分专利尚未公开,因而未被统计在内。

而最早涉及熔炼法制备镍基高温合金的国外在华专利申请是1986年美国联合工艺公司申请的一种可焊接的铸造镍基超级合金^[3]。1986—2020年,国外在华专利申请总量为28个,申请量最高的一年出现在2010年,申请量为7个,而其他年份的专利申请量最高为2个。该技术领域国外在华专利申请总量较少,一方面体现国外申请人在该领域并没有十分重视在华的专利申请布局;另一方面,这应该与镍基高温合金主要用于发动机等相关部件所涉及

战略性应用领域相关。

1.2 申请人地域分布和申请人类型

熔炼法制备镍基高温合金在华专利申请人的地域分布(图2)主要集中在江苏、北京和辽宁。这三个地区的申请总量约占全部在华申请总量的50%。其中,北京和辽宁的申请人比较集中(表1)。北京的申请人主要集中在钢铁研究总院、北京航空航天大学、北京科技大学以及北京钢研高纳科技股份有限公司。上述4个申请人的申请量占北京专利申请总量的50%以上。辽宁的申请人主要集中在中国科学院金属研究所、大连理工大学。上述两个申请人的专利申请量占辽宁专利申请总量的60%以上。而江苏的申请量虽然最高,但是申请人相对比较分散,申请量最大的申请人为南京理工大学,其申请量为10个。除此以外,其他专利申请人主要分散于各金属制品或材料公司,研发主题和研发方向也相对比较分散。

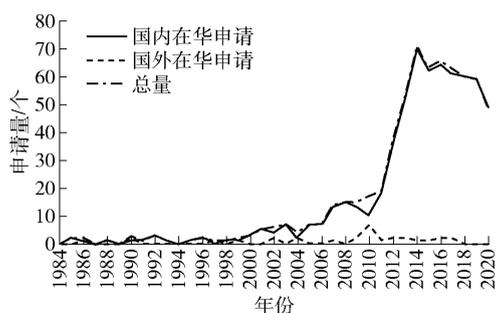


图1 在华专利申请趋势

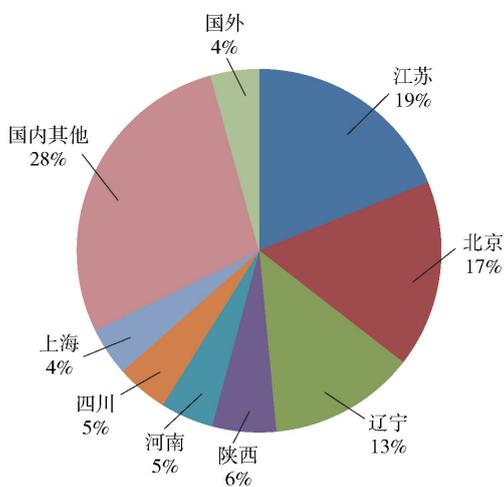


图2 在华专利申请人地域分布

此外,表1数据显示,国内在华专利申请人主要集中在高校以及研究机构,由此表明高校和研究机构在熔炼法制备镍基高温合金方面的研究比较活跃,同时也是研究的主力。另外,申请量前10名的

机构中存在 3 个企业申请人。值得鼓励的是,自 2012 年以来,越来越多的生产企业参与熔炼法制备镍基高温合金的研究,比如四川六合锻造股份有限公司、太原钢铁(集团)有限公司以及北京钢研高纳科技股份有限公司。此外,江苏的许多金属制品或材料公司也在熔炼法制备镍基高温合金的研究方面表现出较高的活跃度。这也表明,该领域的研究开始出现产业化的趋势。

国外熔炼法制备镍基高温合金在华专利申请人的地域分布(图 3)主要集中在美国和日本,这两个国家的申请总量占全部国外在华专利申请量的 76% 以上。其中美国的申请人主要集中在通用电气公司和联合工艺公司,这二者的申请量占美国在华专利申请量的 66% 以上。日本的申请人则相对比较分散,株式会社东芝、三菱日立电力系统株式会社、住友金属工业株式会社、公立大学法人大阪府立大学均有涉及。国外在华专利申请并非集中在高校以及研究机构,而是生产企业,这也表明国外该领域已实现产业化,相对成熟。

表 1 熔炼法制备镍基高温合金国内在华主要
专利申请人排名

排名	申请人	申请量/个
1	中国科学院金属研究所	40
2	钢铁研究总院	25
3	四川六合锻造股份有限公司	23
4	西安热工研究院有限公司	15
5	北京科技大学	14
6	大连理工大学	13
7	太原钢铁(集团)有限公司	12
8	西北工业大学	11
9	南京理工大学	10
10	北京航空航天大学	9
11	北京钢研高纳科技股份有限公司	9

2 在华专利申请主要技术分支及研究现状分析

熔炼法制备镍基高温合金的熔炼方式大体可以分为三种,即单次熔炼、双联法熔炼以及三联法熔炼。国内外高温合金的熔炼设备主要有电弧炉、感应炉、真空感应炉、真空自耗炉、电渣炉、电子束炉和等离子电弧炉等。真空感应熔炼(VIM)、电渣重熔(ESR)以及真空自耗重熔(VIR)这三种工艺是熔炼法制备镍基高温合金的主要工艺,它们或单独采用,或二者结合使用构成双联法,或三者结合使用构成

三联法。本文的分析正是基于以上三种熔炼方法进行。

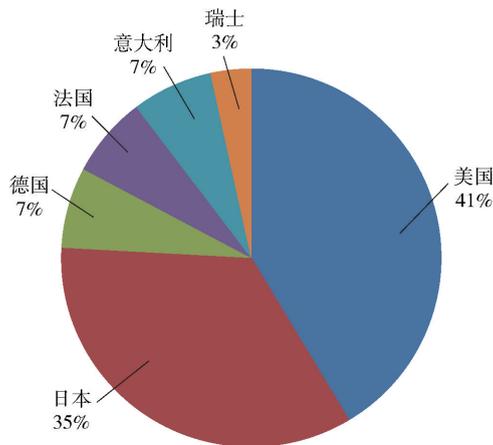


图 3 国外在华专利申请人地域分布

上述三种熔炼方法制备镍基高温合金在华专利申请趋势如图 4 所示。单熔法是制备镍基高温合金的基础方法,因此涉及单次熔炼法制备镍基高温合金的专利申请较其他两种熔炼法多。双联法制备镍基高温合金的专利申请在 2006 年以前较少;随着下游应用对镍基高温合金均匀性、洁净度以及性能要求的提高,2007 年以后,研究机构、生产企业对双联法制备镍基高温合金的研究表现出更多关注。而采用三联法制备镍基高温合金的研发相对滞后,在 2012 年以前,国内申请人没有过多关注;2012 年以后,三联法开始有逐步的研究,并于近年来取得一定的进展,目前年最高申请量不超过 5 个。

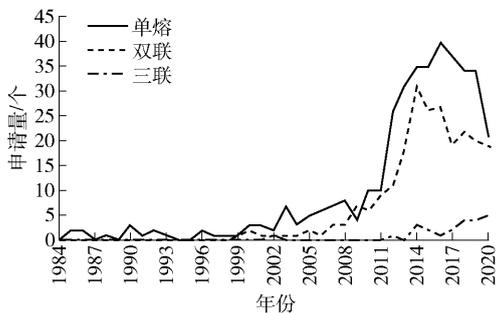


图 4 三种熔炼法在华专利申请量趋势

三种熔炼法制备镍基高温合金在华主要专利申请人排名见表 2。由表 2 可以看出,熔炼法制备镍基高温合金的国内申请人相对比较集中,研发方向也比较明确。中国科学院金属研究所的研发方向主要集中在单熔法以及双联法,钢铁研究总院的研发方向主要集中在双联法以及三联法,而国内生产企业四川六合锻造股份有限公司则主要针对双联法制

备进行了研究。

表2 三种熔炼法制备镍基高温合金在华主要专利申请人排名

熔炼法	排名	申请人	申请量/个
单熔法	1	中国科学院金属研究所	27
	2	北京航空航天大学	9
	2	西北工业大学	9
双联法	1	四川六合锻造股份有限公司	21
	2	中国科学院金属研究所	12
	3	钢铁研究总院	11
三联法	1	钢铁研究总院	11
	2	北京钢研高纳科技股份有限公司	6
	3	江苏理工学院	3

2.1 单熔法

截至2020年12月31日,在涉及熔炼法制备镍基高温合金的专利中,单熔法的专利申请量共372个,占专利申请总量的56%。由于单熔法是镍基高温合金的基础制备方法,同时也是构成双联法以及三联法的关键工艺之一,其研发得到了研究机构(尤其是科研院所)的重视,因此单次熔炼法的专利申请人主要集中在科研院校。20世纪90年代初,涉及单熔法的专利主要采用中频高温冶炼工艺制备镍基高温合金^[4]。而在20世纪90年代中后期以后,基本都是采用真空感应熔炼工艺来制备更高性能需求的高温镍基合金。

单熔法主要从熔炼工艺、熔炼部件两方面来提高熔体的纯净度,从而提高镍基高温合金的性能。

2.1.1 熔炼工艺改进

在上述两方面中,在华相关专利中更多的是通过改进熔炼工艺来提高熔融镍基合金的纯净度。最初是通过向熔液中添加组分来提高熔体的纯净度,例如早期通过添加CaO粉末和稀土元素Y控制镍基铸造高温合金中硫和氧含量^[5];后续采用碳作为还原剂并分步添加以充分减少合金中的氧含量,提高合金的纯净度^[6];近年来发展到采用硼、硅、纯钙线以及添加铝块、金属锰等强还原剂进行脱氧脱硫净化^[7-9]。后来通过工艺参数调整来提高熔体的纯净度,例如提高熔炼的真空度^[10],在慢速熔化期通过小功率送电使坩锅内金属炉料充分排气^[11],通过底吹氩气提高脱气效率以降低熔液中的气体^[12]等;通过优化原料的熔炼顺序,提高合金的持久性能和室温拉伸性能^[13];通过在熔炼过程中施加1.5~5 Hz的低频电磁场^[14],在高温、强度基本不降低的情况

下使合金热蠕变性提高18%~25%等。

2.1.2 熔炼设备/部件改进

通过改进设备或部件来提高镍基合金的纯净度也是在华相关专利主要研发的技术路线之一。中国科学院金属研究所于2000年申请了采用高纯度的抗水CaO耐火材料作为熔炼坩埚材料,以确保超纯净熔炼工艺的实现^[15],并于2012年对熔炼的坩埚材料作进一步的改进,采用MgO-Al₂O₃耐火材料,最终获得了氧、硫含量均不大于10 mg/kg的高纯净度^[16]。此后国内其他申请人也尝试采用电子束精炼与冷源杆相结合的方法,使夹杂富集于冷源杆上,以实现熔融金属洁净度的提高^[17],或采用陶瓷过滤器提高洁净度等。

2.1.3 复合技术

近年来,采用复合技术手段提高镍基高温合金的纯净度成为主要的研发方向,例如采用尖晶石坩埚结合真空感应熔炼工艺^[18],使合金中的氧、氮含量均降至8 mg/kg以下;提高真空度,采用阶梯式升温加热,并结合低频250~350 Hz电磁波对熔体搅拌,使返回料杂质挥发彻底^[19];或是在真空负压中脱气后,进一步采用陶瓷过滤器过滤使氧含量降低至7.5 mg/kg左右,氮含量降低至6.8 mg/kg左右^[20];此外还可以通过调整原料的添加顺序,降低熔体的精炼温度,进行加强搅拌以及使用高真空度系统,使高温合金的氮含量显著降低^[21]。

该领域的专利研发方向不再局限于基于原有设备或原有工艺的改进,而是扩展至优化其他辅助设备或辅助工艺,以改善镍基合金的纯净度;研发趋势从单一工艺参数向复合多个工艺参数、从单一工艺向综合设备和添加物料发展。多学科交叉融合的复合研发将成为该领域专利的主要发展趋势。

2.2 双联法熔炼

随着对镍基高温合金均匀性、洁净度要求的提高,2007年以后,研究机构、生产企业对双熔法制备镍基高温合金表现出了更多关注。由表2可以看出,生产企业主要采用双联法制备镍基高温合金,比如四川六合锻造股份有限公司以及太原钢铁(集团)有限公司。此外,研究机构中的中国科学院金属研究所和钢铁研究总院也对双联法也进行了较多的研究。

四川六合锻造股份有限公司在双联法制备镍基高温合金方面的专利申请主要集中在2013—2018年,其中研发的高峰期在2016年,共申请了12个专

利。该公司在采用真空感应熔炼结合自耗电电极重熔的双联法基础上,开发出 Ni-Cr-Co 系和 Ni-Cr-Mo 系等镍基高温合金,并在上述两种高温合金的基础上,进一步添加合金化元素以及稀土元素,从而提高高温合金的抗氧化性等。而太原钢铁(集团)有限公司则主要采用真空感应熔炼结合电渣重熔的双联法制备镍基高温合金。

在采用双联法制备镍基高温合金的专利申请中,除了常用的成分调整外,更多的研发侧重于重熔工艺及后续热处理工艺的研究,比如电渣重熔中渣系的优化^[22-23],电渣重熔的平均熔炼速度的优化^[24],在真空自耗重熔过程中采用氦气^[25]或氩气熔炼。

随着双联法制备的镍基高温合金应用范围的扩大,为了适应各种产品性能需求,近年来对重熔后铸坯的冷却、热处理以及成型工艺的研发开展得越来越多。比如,采用分段式凝固冷却控制技术、调整控制铸件冷却过程中不同阶段的冷却速度、采用二级分级固溶处理与三级分级时效处理的复合热处理技术、梯度控速锻造工艺或采用多道次小变形量高温加工技术以获得镍基高温合金良好的加工成型能力^[26-29]。

此外,生产企业的双联法专利申请量的占比较单次熔炼和三联法熔炼高,说明采用双联法制备镍基高温合金已经逐步实现产业化。

2.3 三联法熔炼

由图 4 可知,三联法熔炼镍基高温合金的研发热度较单熔法以及双联法低很多。自 2002 年出现三联法熔炼镍基高温合金,时隔 10 年之后才有国内申请人提出采用三联法制备镍基高温合金的专利申请。此后,采用三联法制备镍基高温合金的专利申请逐年增加。随着下游应用对镍基高温合金性能要求的提高,可以预见的是三联法的专利申请量仍将持续增长。

在华专利申请中,最早涉及三联法制备镍基高温合金的国外专利申请是美国 ATI 资产公司于 2002 年申请的一种大直径镍基合金铸块的制造方法^[30]。该申请采用真空感应熔炼、电渣重熔以及真空电弧重熔的三联法,并通过控制各阶段熔炼及熔炼后热处理的工艺参数,消除了铸造大尺寸镍基合金容易引起的偏析缺陷,可以制备直径最高达 1 016 mm、重量大于 9 772 kg 的 VAR 铸块。该方法适于制备 718 或 706 镍基高温合金。该专利申请于 2008 年

获得授权,目前专利权仍处于有效的法律状态,申请人保持了专利权的长期稳定有效。西南大学于 2012 年采用三联法熔炼以及液态模锻制备获得芯孔直径 ≥ 330 mm 的近终截面环坯^[31]。该专利适于制备 GH4033 的合金,于 2015 年获得授权,于 2019 年授权失效。此外,北京钢研高纳科技股份有限公司和抚顺特殊钢股份有限公司作为共同申请人于 2019 年在三联法的基础上进行多次真空自耗重熔,制备直径在 800 mm 以上、最大直径为 1 050 mm 的 706 或 718 合金^[32-33]。

综上所述可以看出,虽然我国三联法发展较晚,但发展速度较快。目前我国已经能制备较大规格的大尺寸镍基合金,但是相较而言,我国在三联法的基础上采用了多次真空自耗重熔,存在工艺流程较为复杂的问题。

此外,在国内,三联法申请人主要集中在钢铁研究总院、北京钢研高纳科技股份有限公司,表明二者在该领域的研发比较活跃。钢铁研究总院的专利申请主要是涉及长期服役温度为 700℃ 以上的超临界汽轮机转子用耐热合金^[34-37],且已获得专利权。而北京钢研高纳科技股份有限公司则致力于研发大规模轮盘锻件镍基高温合金^[38-39]。此外,近年来北京钢研高纳科技股份有限公司与钢铁研究总院作为共同申请人对大规模轮盘锻件的镍基高温合金进行了研发^[40]。

采用三联法制备镍基高温合金的专利权人多为高校或科研院所,表明该技术分支尚处于研究阶段。此外,三联法熔炼制备镍基高温合金的专利申请人出现生产企业与科研机构共同申请的趋势,生产企业依托科研机构进行联合研发,有助于研发成果的产业化,三联法熔炼产业化未来可期。

2.4 其他非传统熔炼工艺及设备

除了采用传统的真空感应熔炼、电渣重熔以及真空自耗重熔炉熔炼制备镍基高温合金外,涉及熔炼法制备镍基高温合金的专利申请还对熔炼设备及熔炼方式进行了有益的尝试。

意大利的诺沃皮尼奥内控股有限公司提出了自由焰熔法、感应熔解法、基于电阻加热基材的熔解法、附聚型钨电极之间的电弧灯熔解法等^[41]。大连理工大学采用电子束真空重熔技术对镍基高温合金进行熔炼以除去杂质元素原子,以及采用电子束层覆熔炼技术和层覆式诱导凝固的方式在对合金进行诱导除杂的同时实现连续精炼以降低铸锭宏观偏

析^[42-43]。北京科技大学提出了感应熔炼+真空磁悬浮熔炼双联熔炼工艺(VIM+VMLM),其中由于磁悬浮产生足够大的洛伦兹力可以使非金属夹杂物上浮,真空磁悬浮熔炼可实现镍基高温合金母合金的纯净化熔炼^[44]。

采用非传统的熔炼设备及工艺的申请人主要集中在高校,表明这些技术尚处于研究阶段,未实现产业化。此外,随着对镍基高温合金纯净度要求的提高,这种非接触式的熔炼方式仍有广阔的发展空间。

3 结束语

在熔炼法中,单熔法作为基础方法,仍将得到科研院校的重视。随着下游应用对镍基高温合金性能要求的提高,作为以市场为导向的专利申请,生产企业采用双联法的专利申请显著增加,表明双联法制备镍基合金呈现产业化的趋势。此外,随着镍基高温合金大尺寸以及高纯净化的发展,三联法熔炼在我国也将呈现高速发展趋势。

[参考文献]

- [1] 刘劲松,蒲玉兴.航空工程材料.长沙:湖南大学出版社,2015:151.
- [2] 鞍山钢铁公司,辽宁省鞍山机械制造公司.超高温耐磨铸造镍基合金:85100649[P].1986-07-30.
- [3] 联合工艺公司.可焊接的铸造镍基超级合金:86107041[P].1987-07-15.
- [4] 中国科学院兰州化学物理研究所.含硫高温自润滑镍基合金:93119001.0[P].1995-04-19.
- [5] 中国航空工业集团公司北京航空材料研究院.一种铸造高温合金真空感应冶炼脱S和O的方法:201310183187.9[P].2013-09-04.
- [6] 南京理工大学,江苏省(丹阳)高性能合金材料研究院,南京鼎正新材料科技有限公司,等.一种熔炼过程中分步多形式加碳冶炼镍基高温合金的方法:201410251278.6[P].2014-09-17.
- [7] 苏州艾盾合金材料有限公司.一种耐磨耐氢氟酸腐蚀的镍基合金材料及其制备方法:201710031040.6[P].2017-03-29.
- [8] 中国科学院金属研究所.一种采用纯钙线的高纯镍或高温合金冶炼方法:201610631062.1[P].2018-02-13.
- [9] 上海屹禾合金材料科技有限公司.具有锻打高成材率的镍基合金及其冶炼工艺:201610614065.4[P].2016-11-09.
- [10] 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司.一种采用K438合金返回料制备K438合金的制备方法:201310564335.1[P].2014-02-05.
- [11] 山东瑞泰新材料科技有限公司.高温合金的真空冶炼工艺:201610192681.5[P].2016-06-01.
- [12] 山西太钢不锈钢股份有限公司.一种真空感应炉冶炼镍基高温合金的方法:201210219172.9[P].2012-10-10.
- [13] 东北大学.一种Ni-Cr基金属及其制备方法:201910473191.6[P].2019-08-02.
- [14] 大连汇金泰高科技有限责任公司.提高镍基超合金高温强度及热加工塑性的微合金化方法:200410021387.5[P].2005-01-05.
- [15] 中国科学院金属研究所.高温合金真空感应熔炼超纯净脱硫技术:00134346.7[P].2002-07-24.
- [16] 中国科学院金属研究所.一种大吨位低成本生产Inconel690合金的超纯净熔炼方法:201210574407.2[P].2013-04-03.
- [17] 大连理工大学.一种镍基高温合金的制备方法:201410236319.4[P].2014-08-13.
- [18] 中国科学院金属研究所.镍基高温合金的纯净化冶炼工艺:201510395609.8[P].2017-01-11.
- [19] 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司.一种采用K438合金返回料制备K438合金的制备方法:201310564335.1[P].2014-02-05.
- [20] 山东瑞泰新材料科技有限公司.镍基高温合金的真空冶炼方法:201610191941.7[P].2016-05-25.
- [21] 西部超导材料科技股份有限公司.一种镍基高温合金真空感应熔炼方法:201611243501.8[P].2017-05-10.
- [22] 中国科学院金属研究所.一种工业化生产1吨1-690合金电渣重熔锭的工艺方法:201210574320.9[P].2013-04-17.
- [23] 江苏星火特钢有限公司,东北大学.一种电渣重熔镍基高温合金空心钢锭用渣系及其制备方法:201611243779.5[P].2017-06-06.
- [24] 住友金属工业株式会社.原子能用高强度Ni基金属管及其制造方法:200980115856.0[P].2011-04-13.
- [25] 西部超导材料科技股份有限公司.一种小规格镍基高温合金FGH4097铸锭的冶炼工艺:201611243502[P].2017-05-10.
- [26] 中国科学院金属研究所.一种MCrAlY离子镀阴极材料及其铸件的制备方法:201310582570.1[P].2014-02-05.
- [27] 江苏鑫信润科技有限公司.刷式密封用高性能镍基高温合金刷丝材料:201611259247.0[P].2017-05-31.
- [28] 中国航发北京航空材料研究院.一种降低GH4169合金大尺寸盘锻件内部残余应力的方法:201910789217.8

- [P]. 2019-12-10.
- [29] 中国华能集团有限公司,西安热工研究院有限公司. 一种镍基高钨多晶高温合金的制备工艺;202010383725.9 [P]. 2020-07-14.
- [30] ATI资产公司. 大直径镍基合金铸块的制造方法; 02808611.2 [P]. 2004-06-09.
- [31] 西南大学. 镍基高温合金异截面大型环件液态模锻轧制复合成形方法;201210200496.8 [P]. 2012-09-26.
- [32] 北京钢研高纳科技股份有限公司,抚顺特殊钢股份有限公司. 一种高铌高温合金大尺寸铸锭的冶炼工艺及高铌高温合金大尺寸铸锭; 201910803960.4 [P]. 2020-11-03.
- [33] 北京钢研高纳科技股份有限公司,抚顺特殊钢股份有限公司. 一种大尺寸高铌高温 706 合金铸锭及其冶炼工艺;201910803959.1 [P]. 2020-11-03.
- [34] 钢铁研究总院. 一种 700 °C 超超临界汽轮机转子用耐热合金及其制备方法; 201510634617.3 [P]. 2015-12-02.
- [35] 钢铁研究总院. 一种含锆镍基高温合金及制备方法; 201511020081.2 [P]. 2016-04-20.
- [36] 钢铁研究总院. 超超临界汽轮机转子用高强高韧耐热合金及其制备方法;201710271511.0 [P]. 2017-07-07.
- [37] 钢铁研究总院. 一种高钴镍基高温合金及其制备方法;201810457993.3 [P]. 2018-07-24.
- [38] 北京钢研高纳科技股份有限公司. 一种高温使用的镍基变形高温合金轮盘锻件的制备方法; 202010137240.1 [P]. 2020-06-05.
- [39] 北京钢研高纳科技股份有限公司. 一种难变形镍基高温合金 GH4151 合金的三联冶炼工艺; 202010371257.3 [P]. 2020-08-11.
- [40] 北京钢研高纳科技股份有限公司,钢铁研究总院. 一种高铝含量的镍基变形高温合金及制备方法; 202010137241.6 [P]. 2020-05-22.
- [41] 诺沃皮尼奥内有限公司. 镍基超级合金,由上述超级合金制成的机械构件,包括上述构件的涡轮机工件及相关方法;201010504219.7 [P]. 2011-05-25.
- [42] 大连理工大学. 一种提高镍基高温合金纯净度的方法; 201310719750.X [P]. 2014-04-02.
- [43] 大连理工大学. 一种电子束层覆诱导凝固技术高纯化制备镍基高温合金的方法; 201710570742.1 [P]. 2017-11-24.
- [44] 北京科技大学. 一种镍基高温合金母合金净化熔炼方法;201810338616.8 [P]. 2018-09-18.

期刊投稿系统和微信公众号上线通知

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况,本刊已开通“腾云”期刊全流程采编系统,网址为 <https://yjnn.cbpt.cnki.net/>。

同时,2021年1月1日起,期刊杂志部正式开通“恩菲期刊”微信公众号,着力打造全天候的媒体服务平台,定期更新期刊动态;分享写作、投稿技巧;及时为读者、作者、审稿专家、编委带来新鲜、生动、有价值的信息资讯。欢迎扫码关注!

