

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024 年 2 月 15 日 (15.02.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/032103 A1

- (51) 国际专利分类号:
C22F 1/10 (2006.01) *G01N 1/28* (2006.01)
C22F 1/02 (2006.01) *G01N 1/44* (2006.01)
B21J 5/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2023/097157
- (22) 国际申请日: 2023 年 5 月 30 日 (30.05.2023)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202210962689.0 2022年8月11日 (11.08.2022) CN
- (71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国江苏省镇江市京口区学府路
301号, Jiangsu 212013 (CN)。

- (72) 发明人: 杨玉艳 (YANG, Yuyan); 中国江苏省南京市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。刘庆涛 (LIU, Qingtao); 中国江苏省南京市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。林伟 (LIN, Wei); 中国江苏省南京市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。周洲 (ZHOU, Zhou); 中国江苏省南京市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。罗锐 (LUO, Rui); 中国江苏省南京市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。程晓农 (CHENG, Xiaonong); 中国江苏省南京市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。
- (74) 代理人: 南京智造力知识产权代理有限公司 (NANJING IPZHI INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国江苏省南京市江宁区芝兰路18号4幢1202室, Jiangsu 211100 (CN)。

(54) Title: PHYSICAL SIMULATION METHOD FOR FORGING PROCESS OF NICKEL-BASED SUPERALLOY

(54) 发明名称: 一种镍基高温合金锻造过程的物理模拟方法

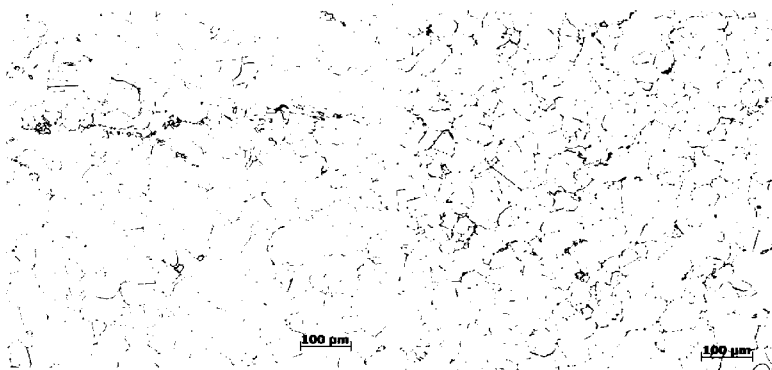


图2

(57) Abstract: The present invention relates to the technical field of metal material processing, and provides a physical simulation method for the forging process of a nickel-based superalloy. In the present invention, a nickel-based superalloy sample is sequentially subjected to heating, heat preservation, and a quenching treatment, so as to obtain a pretreated sample; and the pretreated sample is then sequentially subjected to heating, first heat preservation, cooling, a repeated compression-cooling treatment, second heat preservation, and a quenching treatment to obtain a simulated sample, wherein the number of times of the repeated compression-cooling treatment is 3 or more. In the present invention, the forging process of a nickel-based superalloy is simulated by using a forging simulation mode of multi-pass compression-cooling deformation, which is close to an actual forging process, and has a good simulation effect and high operability; moreover, the operation steps are simple, and the method is applicable to various nickel-based superalloys to be forged by using the same forging method; the structure and the hardness of the obtained simulated sample are slightly different from those of the same portion of a forged part obtained by means of actual forging; therefore, the method can provide effective guidance for the forging machining process of a nickel-based superalloy.

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:
— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明涉及金属材料加工技术领域, 提供了一种镍基高温合金锻造过程的物理模拟方法。本发明将镍基高温合金试样依次进行升温、保温和淬火处理, 得到预处理试样; 然后将预处理试样依次进行升温、第一保温、降温、重复压缩-降温处理、第二保温和淬火处理, 得到模拟试样, 其中重复压缩-降温处理的次数为3次以上。本发明采用多次压缩降温变形的锻造模拟方式对镍基高温合金的锻造过程进行模拟, 贴近锻造过程实际, 模拟效果好, 可操作性高, 并且操作步骤简单, 适用于同种锻造方法的多种镍基高温合金, 所得模拟试样的组织及硬度与实际锻造所得锻件相同部位的差异较小, 可有效指导镍基高温合金的锻造加工过程。

一种镍基高温合金锻造过程的物理模拟方法

技术领域

[0001] 本发明金属材料加工技术领域,尤其涉及一种镍基高温合金锻造过程的物理模拟方法。

背景技术

[0002] 锻造作为一种金属材料的成型方式,为大规格尺寸部件的制造及高端金属结构材料的生产提供了有力的支持,在全球范围内得到大力推广与应用。镍基高温合金GH4169因其具有良好的高温强度、抗氧化性能以及良好的持久性能,被广泛应用于航空航天、石化油田、高端模具等关键部件;而大型轴类件及大尺寸零部件的成型需要满足组织均匀、性能良好的要求,以保证使用寿命。然而,这些大型锻件的锻造工艺的制定及锻造过程物理模拟方法是一大难题,锻造工艺制定不当会导致大型锻件的组织不均匀,不同部位的性能存在一定差异,容易出现无法满足使用条件的问题,对航空航天等大型关键装备的服役产生影响。

[0003] 目前,大型锻件锻造过程的物理模拟常用的方法是单道次变形、等温变形、降温单道次变形等物理模拟方法。单道次变形物理模拟针对大型锻件的锻造过程模拟只有一次变形,无法模拟多次变形对材料的组织产生的影响,对锻造工艺的制定的帮助较小;等温变形物理模拟只针对锻造过程时间极短,锻造速度极快的情况下进行模拟,高温合金在空气中的热量散失较快,变形过程中零件与锻造锤头的接触也会使材料发生温度变化,等温变形仅存在于小型锻造过程中,无法对大型锻件锻造过程中降温对材料组织产生的影响进行模拟,对锻造过程的模拟也不贴合实际;降温单道次变形物理模拟是一种新型的锻造模拟方法,此方法考虑到材料在锻造过程中的降温问题。但是,仅考虑单道次内的降温仍然很容易出现模拟结果与实际锻造结果存在差异的问题。

[0004] 因此,上述模拟方法均无法对锻造过程进行准确模拟,模拟结果与实际锻造结果差异较大,无法有效指导镍基高温合金的锻造加工,亟需提供一种更加贴近实际锻造过程的模拟方法。

发明内容

[0005] 有鉴于此,本发明提供了一种镍基高温合金锻造过程的物理模拟方法。本发明提供的物理模拟方法贴近锻造的实际过程,模拟效果好,可操作性高,可有效指导镍基高温合金的锻造加工。

[0006] 为了实现上述发明目的,本发明提供以下技术方案:

[0007] 一种镍基高温合金锻造过程的物理模拟方法,包括以下步骤:

[0008] (1) 将镍基高温合金试样依次进行升温、保温和淬火处理,得到预处理试样;

[0009] (2) 将所述预处理试样依次进行升温、第一保温、降温、重复压缩-降温处理、第二保温和淬火处理,得到模拟试样;

[0010] 所述步骤(1)中保温的温度为1020~1080℃,保温时间为30~200min;

[0011] 所述步骤(2)中第一保温的温度为1020~1050℃,保温时间为60~300s;第二保温

的温度为950~1050℃,保温时间为60~300s;

[0012] 所述重复压缩-降温处理的重复次数为3次以上,每次压缩-降温处理包括依次进行的压缩和降温,每次压缩的工程变形量为10~30%,每次降温的幅度为10~30℃,降温完成后进行下一次压缩,直至最后一次降温结束。

[0013] 优选的,所述镍基高温合金为镍基高温合金GH4169、Inconel 625或Inconel 718。

[0014] 优选的,所述镍基高温合金试样为圆柱形试样,所述圆柱形试样的直径为6~10mm,长度为10~20mm。

[0015] 优选的,所述步骤(1)中升温的速率为8~10℃/min。

[0016] 优选的,所述步骤(1)中淬火处理的淬火介质为水,淬火速率为50~100℃/s。

[0017] 优选的,所述步骤(2)中升温的速率为8~10℃/s。

[0018] 优选的,所述重复压缩-降温处理的次数为3~5次。

[0019] 优选的,所述重复压缩-降温处理中压缩的温度为950~1050℃,且每次压缩的温度依次降低,压缩的压力为1000~2000kgf,每次压缩的时间为2~10s,所述压缩-降温处理中每次降温的时间为5~30s。

[0020] 优选的,所述步骤(2)中淬火处理的方式为真空气淬,淬火处理的时间为20~40s,淬火结束的温度为100~200℃。

[0021] 本发明还提供了上述方案所述物理模拟方法得到的模拟试样。

[0022] 本发明提供了一种镍基高温合金锻造过程的物理模拟方法,包括以下步骤:(1)将镍基高温合金试样依次进行升温、保温和淬火处理,得到预处理试样;(2)将所述预处理试样依次进行升温、第一保温、降温、重复压缩-降温处理、第二保温和淬火处理,得到模拟试样;所述步骤(1)中保温的温度为1020~1080℃,保温时间为30~200min;所述步骤(2)中第一保温的温度为1020~1050℃,保温时间为60~300s;第二保温的温度为950~1050℃,保温时间为60~300s;所述重复压缩-降温处理的重复次数为3次以上,每次压缩-降温处理包括依次进行的压缩和降温,每次压缩的工程变形量为10~30%,每次降温的幅度为10~30℃,降温完成后进行下一次压缩,直至最后一次降温结束。本发明采用多道次压缩降温变形的锻造模拟方式对镍基高温合金的锻造过程进行模拟,并控制模拟过程中的压缩道次及降温程度,既能够保证还原锻件多次锻造的情况,同时考虑到了锻造过程中材料的降温情况会对组织产生影响的问题;本发明采用多道次压缩模拟的方式还原锻造过程中的锤头对坯料的多次变形过程,采用降温变形模拟的方式实现了材料在变形过程中的温度变化导致材料组织不均匀的过程模拟;本发明的模拟方法操作简单,贴近锻造过程实际,模拟效果好,可操作性高,适用于同种锻造方法的多种镍基高温合金,所得模拟试样的组织及硬度与实际锻造所得锻件相同部位得差异较小;在本发明的实际应用过程中,可以根据本发明模拟得到的结果,确定镍基高温合金大型锻造时的实际锻造工艺,包括确定温度区间(始锻和终锻温度)、锻造的变形量等,从而可有效指导镍基高温合金的锻造加工过程。实施例结果表明,采用本发明提供的锻造模拟方法得到的模拟试样,其组织与实际锻造结果接近,相同部位的晶粒度差别小于1级,硬度差别小于25HBW。

附图说明

[0023] 图1为物理模拟试样组织观察面示意图;

- [0024] 图2为实施例1所得模拟试样(左)与实际锻造试样(右)相同部位的组织对比图;
- [0025] 图3为实施例2所得模拟试样(左)与实际锻造试样(右)相同部位的组织对比图;
- [0026] 图4为实施例3所得模拟试样(左)与实际锻造试样(右)相同部位的组织对比图;
- [0027] 图5为实施例4所得模拟试样(左)与实际锻造试样(右)相同部位的组织对比图。

具体实施方式

[0028] 本发明提供了一种镍基高温合金锻造过程的物理模拟方法,包括以下步骤:

[0029] (1) 将镍基高温合金试样依次进行升温、保温和淬火处理,得到预处理试样;

[0030] (2) 将所述预处理试样依次进行升温、第一保温、降温、重复压缩-降温处理、第二保温和淬火处理,得到模拟试样;

[0031] 所述步骤(1)中保温的温度为1020~1080℃,保温时间为30~200min;

[0032] 所述步骤(2)中第一保温的温度为1020~1050℃,保温时间为60~300s;第二保温的温度为950~1050℃,保温时间为60~300s;

[0033] 所述重复压缩-降温处理的重复次数为3次以上,每次压缩-降温处理包括依次进行的压缩和降温,每次压缩的工程变形量为10~30%,每次降温的幅度为10~30℃,降温完成后进行下一次压缩,直至最后一次降温结束。

[0034] 本发明将镍基高温合金试样依次进行升温、保温和淬火处理,得到预处理试样。在本发明中,所述镍基高温合金优选为镍基高温合金GH4169、Inconel 625或Inconel 718;所述镍基高温合金试样优选为圆柱形试样,所述圆柱形试样的直径优选为6~10mm,更优选为8mm,长度优选为10~20mm,更优选为12~15mm。在本发明中,当所述镍基高温合金的原始尺寸不满足上述条件时,本发明优选对所述镍基高温合金进行加工,本发明对所述加工的方式没有特殊的限定,能够得到上述尺寸的试样即可,在本发明的具体实施例中,优选使用线切割机床对所述镍基高温合金进行加工。本发明通过控制锻造模拟试样的尺寸,便于进行后续组织观察。

[0035] 在本发明中,所述步骤(1)中的升温速率优选为8~10℃/min;所述升温的起始温度为室温,终点温度为步骤(1)中保温的温度;所述步骤(1)保温的温度为1020~1080℃,优选为1020~1040℃,保温时间为30~200min,优选为50~150min;所述步骤(1)中升温 and 保温过程均优选在电阻加热热处理炉中进行;保温完成后进行淬火处理(记为第一淬火);所述第一淬火的淬火介质优选为水,淬火速率优选为50~100℃/s,淬火的终点温度优选为50~100℃。本发明通过升温、保温和第一淬火对镍基高温合金试样进行预处理,可以调控原始试样的晶粒度,使所得预处理试样中的晶粒度基本一致,同时使材料内部的应力去除,提高材料的一致性,避免残余应力对材料的组织产生影响,进一步提高锻造模拟的准确度和一致性。在本发明的具体实施例中,优选将镍基高温合金试样放置在电阻加热热处理炉的测温电偶附近,并且使用温度保持较好的热处理炉,可以使材料晶粒度更加一致。

[0036] 得到预处理试样后,本发明将所述预处理试样依次进行升温、第一保温、降温、重复压缩-降温处理、第二保温和淬火处理,得到模拟试样。在本发明中,所述步骤(2)中升温的速率优选为8~10℃/s,更优选为9~10℃/s,升温的起始温度为室温,终点温度为第一保温的温度;所述第一保温的温度为1020~1050℃,优选为1030~1040℃,所述第一保温的保温时间为60~300s,优选为100~250s;第一保温结束后进行降温,具体是降温至第一次压

缩的温度,所述降温的速率优选为 $0.5\sim 5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

[0037] 在本发明中,所述重复压缩-降温处理的重复次数为3次以上,优选为3~5次;每次压缩-降温处理包括依次进行的压缩和降温,每次压缩的工程变形量为 $10\sim 30\%$,优选为 $15\sim 35\%$,每次降温的幅度为 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$,优选为 20°C ,降温完成后进行下一次压缩(即降温的终点温度即为下一次压缩的温度),直至最后一次降温结束。在本发明中,所述重复压缩-降温处理中压缩的温度优选为 $950\sim 1050^{\circ}\text{C}$,且每次压缩的温度依次降低(相邻两次压缩的温度降低幅度即为降温的幅度),压缩的压力优选为 $1000\sim 2000\text{kgf}$,更优选为 $1500\sim 2000\text{kgf}$,本发明通过在锻造模拟压缩时施加固定的压力,可以使材料更好的变形。在本发明中,所述重复压缩-降温处理中每次压缩的时间优选为 $2\sim 10\text{s}$,更优选为 $3\sim 8\text{s}$;所述压缩-降温处理中每次降温的时间为 $5\sim 30\text{s}$,降温速率优选为 $0.5\sim 5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

[0038] 以压缩-降温处理的次数为三次为例说明本发明的重复过程:依次进行第一次压缩、第一次降温、第二次压缩、第二次降温、第三次压缩和第三次降温,以第一次压缩的温度为 1040°C 、每次降温的幅度为 20°C 为例,则第一次、第二次和第三次压缩的温度分别为 1040°C 、 1020°C 和 1000°C ,第三次压缩完成后,再降温至 980°C ,即完成三次压缩-降温处理。

[0039] 重复压缩-降温处理完成后,将所得试样进行第二保温,在本发明中,所述第二保温的温度为 $950\sim 1050^{\circ}\text{C}$,优选为 $950\sim 1020^{\circ}\text{C}$,所述第二保温的保温时间为 $60\sim 300\text{s}$,优选为 $100\sim 300\text{s}$,更优选为 $200\sim 300\text{s}$ 。本发明通过控制锻造模拟过程中的参数,可以进一步提高模拟的结果准确性和一致性,从而进一步提高锻造模拟质量。

[0040] 在本发明的具体实施例中,所述步骤(2)中的升温、第一保温、降温、重复压缩-降温处理、第二保温均优选在Gleeble-3500热模拟机中进行,具体为将预处理试样放置在Gleeble-3500热模拟机的左压头和右压头之间,保持预处理试样和与压头之间轴向对中,通过移动主动模端,使镍基高温合金和压头接触,通过Gleeble-3500热模拟机依次进行升温、第一保温、降温、重复压缩-降温处理和第二保温,重复压缩-降温处理完成后,具体是直接控制Gleeble-3500热模拟机升温至第二保温的温度进行保温,升温的速率优选为 $8\sim 12^{\circ}\text{C}/\text{s}$,更优选为 $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。本发明对所述Gleeble-3500热模拟机的具体来源没有特殊的限定,采用本领域技术人员熟知的市售产品即可。本发明通过采用Gleeble模拟机进行的锻造模拟,能够更加精准的控制工艺参数,从而获得所需的模拟过程。本发明对每次压缩完成后卸压的方式没有特殊的限定,通过操作Gleeble-3500热模拟机进行卸压即可。

[0041] 第二保温完成后,本发明将所得试样进行淬火处理(记为第二淬火处理),所述第二淬火处理的方式优选为真空气淬,所述第二淬火处理的时间优选为 $20\sim 40\text{s}$,优选为 30s ,淬火结束的温度优选为 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$,更优选为 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。本发明通过控制淬火的参数,能够进一步降低材料在冷却过程中的析出相析出及材料晶粒再结晶情况,还原高温时材料的物理状态;本发明对所述真空气淬的具体操作没有特殊的限定,采用本领域技术熟知的真空气淬的工艺即可。

[0042] 本发明还提供了上述方案所述物理模拟方法得到的模拟试样;本发明得到的模拟试样组织及硬度与锻造的锻件相同部位结果差异较小,可有效指导镍基高温合金的锻造加工过程,在实际应用过程中,可以根据本发明的模拟结果确定镍基高温合金在大型锻造过程中的锻造工艺,包括实际锻造的温度区间(始锻和终锻温度)及锻造的变形量等,从而有效指导镍基高温合金的锻造加工。

[0043] 下面将结合本发明中的实施例,对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述。显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0044] 下列实施例中使用的镍基高温合金试样均为圆柱形试样,直径为10mm,长度为15mm。

[0045] 下列实施例中,对制备得到的试样组织进行测试,试样解剖观察方式如图1所示,将模拟试样进行机加工,得到组织晶粒度测试用样品,测试按照《GBT6394-2017金属平均晶粒度测定方法》进行,测试试样的晶粒度。

[0046] 实施例1

[0047] 将镍基高温合金GH4169试样放置在热处理炉中依次进行升温 and 保温,升温的速率为10℃/min,升温至1040℃保温60min,保温结束后,将试样取出并立即进行水淬,得到预处理试样。

[0048] 将预处理试样放置在Gleeble-3500热模拟机的左压头和右压头之间,保持镍基高温合金GH4169和与压头之间轴向对中,通过移动主动模端,使镍基高温合金和压头接触。将试样安装好后进行升温,升温速率为9℃/s,升温至1050℃保温30s,然后降温至1040℃进行第一次压缩,第一次压缩完成后降温10s,每次降温速率为2℃/s,然后进行下一次压缩和降温,共进行5次压缩和降温,每次压缩的压力为2000kgf,每次压缩的工程变形量为15%,每次降温的速率和时间一致,第2次~第5次压缩的温度依次为1020℃、1000℃、980℃和960℃,第五次压缩后降温至940℃;然后升温至1000℃保温200s;保温结束后进行真空气淬,淬火时间为30s,淬火结束的温度为100℃,得到模拟试样。

[0049] 经过观察,模拟试样的组织与实际锻造试件(始锻温度为1040℃,终锻温度为960℃,锻造每次变形量为15%,经过五次变形后回炉保温10min)的组织接近,相同部位的晶粒度差别小于1级,硬度差别为18HBW。

[0050] 图2为实施例1所得模拟试样(左)与实际锻造试样(右)相同部位的组织对比图,其中模拟试样的晶粒度为5.5级,实际锻造试样的晶粒度为6级。

[0051] 实施例2

[0052] 将镍基高温合金GH4169试样放置在热处理炉中依次进行升温 and 保温,升温的速率为10℃/min,升温至1020℃保温120min,保温结束后,将试样取出并立即进行水淬,得到预处理试样。

[0053] 将预处理试样放置在Gleeble-3500热模拟机的左压头和右压头之间,保持镍基高温合金GH4169和与压头之间轴向对中,通过移动主动模端,使镍基高温合金和压头接触。将试样安装好后进行升温,升温速率为10℃/s,升温至1030℃保温60s,然后降温至1020℃进行第一次压缩,第一次压缩完成后降温20s,每次降温速率为1℃/s,然后进行下一次压缩和降温,共进行3次压缩和降温,每次压缩的压力为1500kgf,每次压缩的工程变形量为18%,每次降温的速率和时间一致,第2次、第3次压缩的温度依次为1000℃、980℃,第3次压缩后降温至960℃;然后升温至980℃保温250s;保温结束后进行真空气淬,淬火时间为30s,淬火结束的温度为120℃,得到模拟试样。

[0054] 经过观察,模拟试样的组织与实际锻造试件(始锻温度为1020℃,终锻温度为980

℃,锻造每次变形量为18%,经过三次变形后回炉保温10min)的组织接近,相同部位的晶粒度差别小于1级,硬度差别为14HBW。

[0055] 图3为实施例2所得模拟试样(左)与实际锻造试样(右)相同部位的组织对比图,其中模拟试样的晶粒度为6.5级,实际锻造试样的晶粒度为7级。

[0056] 实施例3

[0057] 将镍基高温合金替换为Inconel 625,其余条件与实施例1相同。

[0058] 经过观察,模拟试样的组织与实际锻造试件(和实施例1中实际锻造试件的锻造条件相同)的组织接近,相同部位的晶粒度差别小于1级,硬度差别为22HBW。

[0059] 图4为实施例3所得模拟试样(左)与实际锻造试样(右)相同部位的组织对比图,其中模拟试样的晶粒度为5级,实际锻造试样的晶粒度为5.5级。

[0060] 实施例4

[0061] 将镍基高温合金替换为Inconel 718,其余条件与实施例2相同。

[0062] 经过观察,模拟试样的组织与实际锻造试件(和实施例2中实际锻造试件的锻造条件相同)的组织接近,相同部位的晶粒度差别小于1级,硬度差别为16HBW。

[0063] 图5为实施例4所得模拟试样(左)与实际锻造试样(右)相同部位的组织对比图,其中模拟试样的晶粒度为6级,实际锻造试样的晶粒度为6.5级。

[0064] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

1. 一种镍基高温合金锻造过程的物理模拟方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1) 将镍基高温合金试样依次进行升温、保温和淬火处理,得到预处理试样;

(2) 将所述预处理试样依次进行升温、第一保温、降温、重复压缩-降温处理、第二保温和淬火处理,得到模拟试样;

所述步骤(1)中保温的温度为1020~1080℃,保温时间为30~200min;

所述步骤(2)中第一保温的温度为1020~1050℃,保温时间为60~300s;第二保温的温度为950~1050℃,保温时间为60~300s;

所述重复压缩-降温处理的重复次数为3次以上,每次压缩-降温处理包括依次进行的压缩和降温,每次压缩的工程变形量为10~30%,每次降温的幅度为10~30℃,降温完成后进行下一次压缩,直至最后一次降温结束。

2. 根据权利要求1所述的物理模拟方法,其特征在于,所述镍基高温合金为镍基高温合金GH4169、Inconel 625或Inconel 718。

3. 根据权利要求1或2所述的物理模拟方法,其特征在于,所述镍基高温合金试样为圆柱形试样,所述圆柱形试样的直径为6~10mm,长度为10~20mm。

4. 根据权利要求1所述的物理模拟方法,其特征在于,所述步骤(1)中升温的速率为8~10℃/min。

5. 根据权利要求1所述的物理模拟方法,其特征在于,所述步骤(1)中淬火处理的淬火介质为水,淬火速率为50~100℃/s。

6. 根据权利要求1所述的物理模拟方法,其特征在于,所述步骤(2)中升温的速率为8~10℃/s。

7. 根据权利要求1所述的物理模拟方法,其特征在于,所述重复压缩-降温处理的次数为3~5次。

8. 根据权利要求1或7所述的物理模拟方法,其特征在于,所述重复压缩-降温处理中压缩的温度为950~1050℃,且每次压缩的温度依次降低,压缩的压力为1000~2000kgf,每次压缩的时间为2~10s,所述压缩-降温处理中每次降温的时间为5~30s。

9. 根据权利要求1所述的物理模拟方法,其特征在于,所述步骤(2)中淬火处理的方式为真空气淬,淬火处理的时间为20~40s,淬火结束的温度为100~200℃。

10. 权利要求1~9任意一项所述物理模拟方法得到的模拟试样。

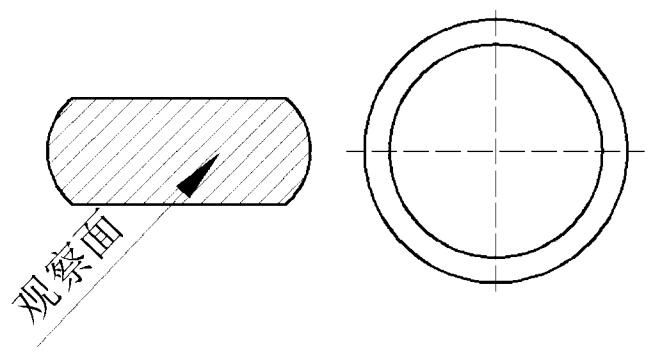


图1

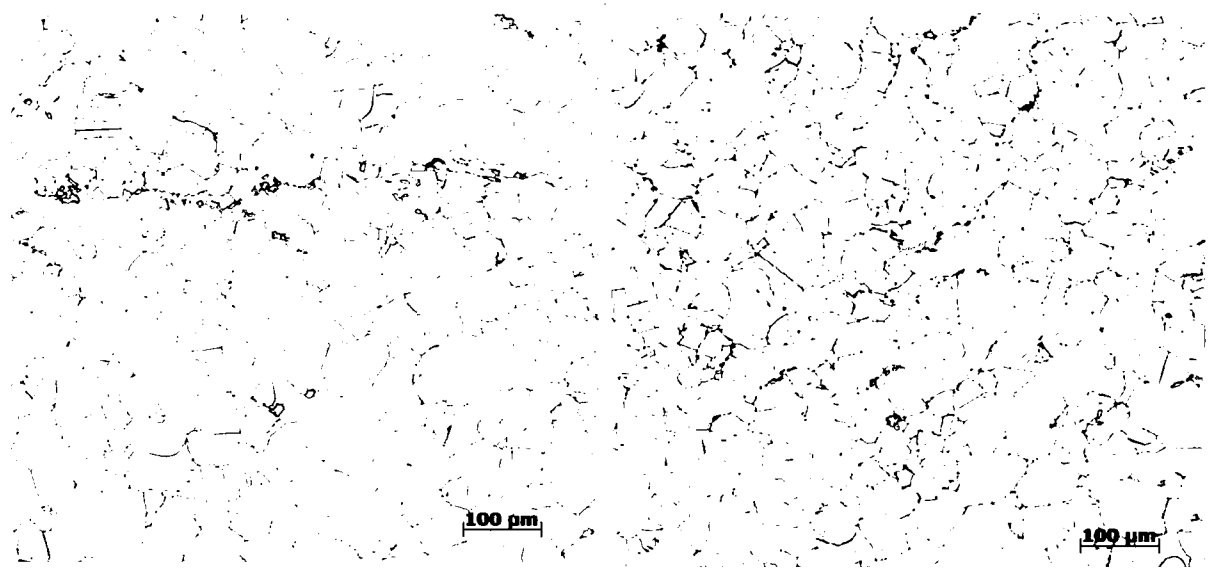


图2

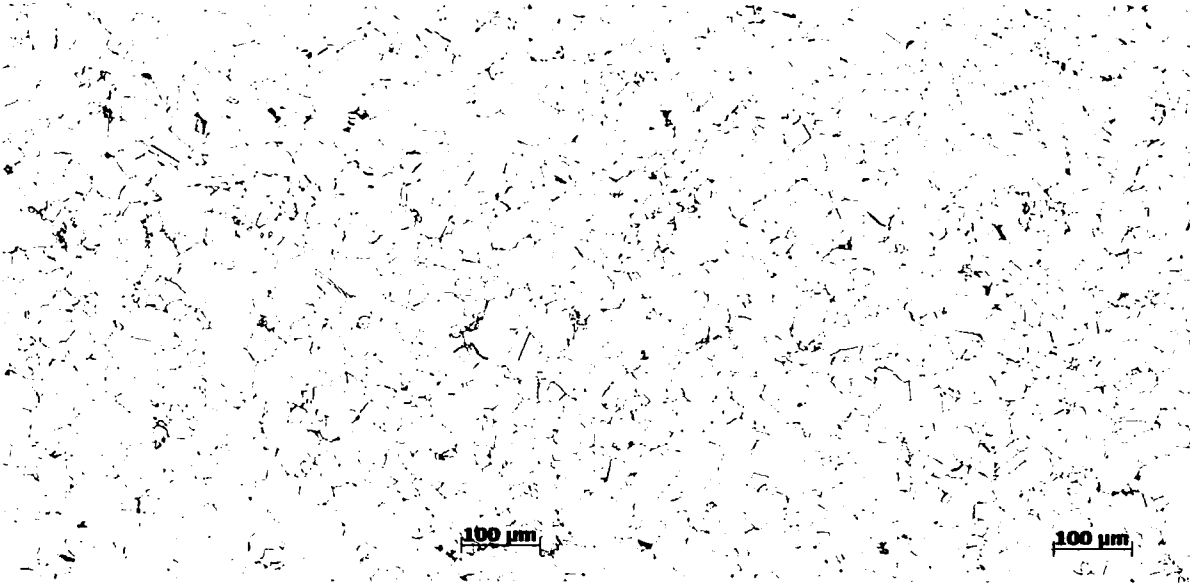


图3

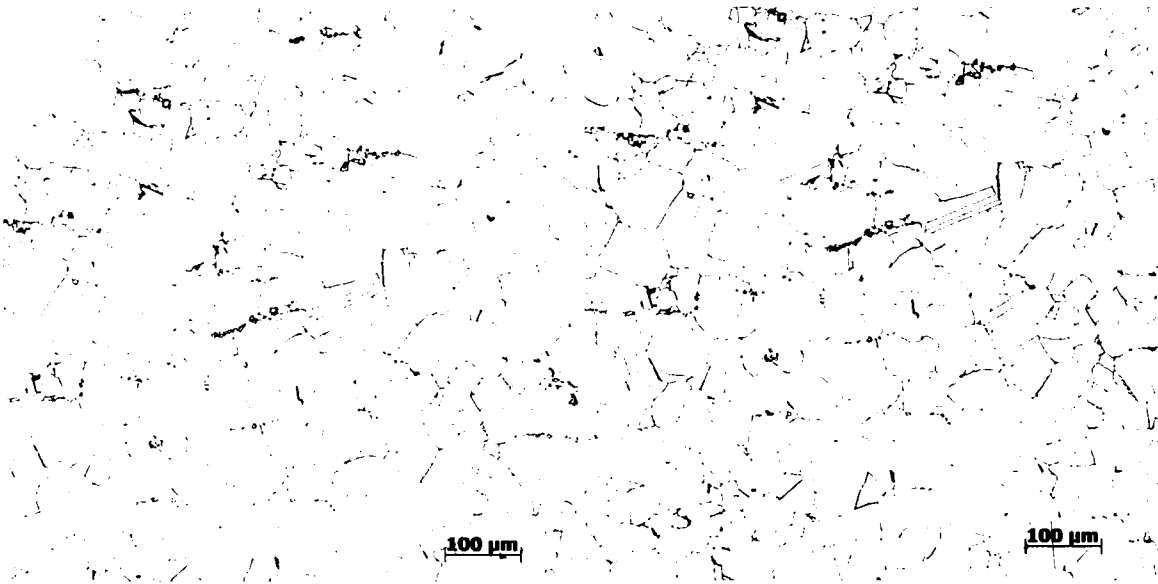


图4

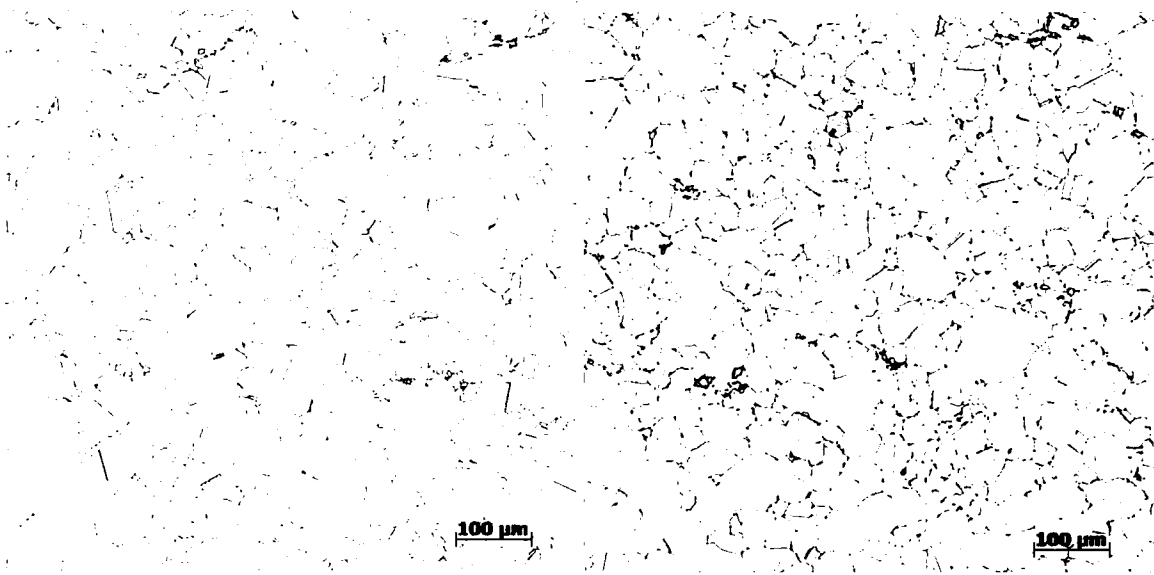


图5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/097157

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C22F 1/10(2006.01)i; C22F 1/02(2006.01)i; B21J 5/00(2006.01)i; G01N 1/28(2006.01)i; G01N 1/44(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: C22F 1/-, B21J 5/-, G01N 1/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

SIPOABS, DWPI, CNTXT, CNKI, Elsevier, Wiley Online Library: 镍基高温合金, 锻造, 模拟, 压缩, 淬火, 重复, 循环, nickel based superalloy, forg+, simulat+, compress+, quench+, cycl+, repeat+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 115323298 A (JIANGSU UNIVERSITY) 11 November 2022 (2022-11-11) claims 1-10	1-10
A	CN 104732012 A (NORTHWESTERN POLYTECHNIC UNIVERSITY) 24 June 2015 (2015-06-24) entire document	1-10
A	CN 107937850 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 20 April 2018 (2018-04-20) entire document	1-10
A	CN 110551955 A (AECC BEIJING INSTITUTE OF AERONAUTICAL MATERIALS) 10 December 2019 (2019-12-10) entire document	1-10
A	CN 114160796 A (SHENZHEN WEDGE CENTRAL SOUTH RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) 11 March 2022 (2022-03-11) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“D” document cited by the applicant in the international application

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

04 September 2023

Date of mailing of the international search report

15 September 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/097157

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	HE, Guoai et al. "Analysis of Forging Cracks during Hot Compression of Powder Metallurgy Nickel-Based Superalloy on Simulation and Experiment" <i>Advanced Engineering Materials</i> , Vol. 18, No. 10, 04 October 2016 (2016-10-04), pp. 1823-1832 ISSN: 1438-1656, entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2023/097157

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	115323298	A	11 November 2022	CN 115323298 B	03 March 2023
CN	104732012	A	24 June 2015	CN 104732012 B	14 August 2018
CN	107937850	A	20 April 2018	CN 107937850 B	21 June 2019
CN	110551955	A	10 December 2019	CN 110551955 B	22 September 2020
CN	114160796	A	11 March 2022	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2023/097157

A. 主题的分类

C22F 1/10(2006.01)i; C22F 1/02(2006.01)i; B21J 5/00(2006.01)i; G01N 1/28(2006.01)i; G01N 1/44(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: C22F 1/-, B21J 5/-, G01N 1/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

SIPOABS, DWPI, CNTXT, CNKI, Elsevier, Wiley Online Library: 镍基高温合金, 锻造, 模拟, 压缩, 淬火, 重复, 循环, nickel based superalloy, forg+, simulat+, compress+, quench+, cycl+, repeat+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 115323298 A (江苏大学) 2022年11月11日 (2022 - 11 - 11) 权利要求1-10	1-10
A	CN 104732012 A (西北工业大学) 2015年6月24日 (2015 - 06 - 24) 全文	1-10
A	CN 107937850 A (中南大学) 2018年4月20日 (2018 - 04 - 20) 全文	1-10
A	CN 110551955 A (中国航发北京航空材料研究院) 2019年12月10日 (2019 - 12 - 10) 全文	1-10
A	CN 114160796 A (深圳市万泽中南研究院有限公司) 2022年3月11日 (2022 - 03 - 11) 全文	1-10

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2023年9月4日

国际检索报告邮寄日期

2023年9月15日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

杨颖

电话号码 (+86) 010-62084851

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	Guoai He 等. "Analysis of Forging Cracks during Hot Compression of Powder Metallurgy Nickel-Based Superalloy on Simulation and Experiment" Advanced Engineering Materials, 第18卷，第10期，2016年10月4日 (2016 - 10 - 04)，第1823-1832页 ISSN: 1438-1656, 全文	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2023/097157

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	115323298	A	2022年11月11日	CN 115323298 B	2023年3月3日
CN	104732012	A	2015年6月24日	CN 104732012 B	2018年8月14日
CN	107937850	A	2018年4月20日	CN 107937850 B	2019年6月21日
CN	110551955	A	2019年12月10日	CN 110551955 B	2020年9月22日
CN	114160796	A	2022年3月11日	无	