



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118635530 A

(43) 申请公布日 2024. 09. 13

(21) 申请号 202310850786.5

B22F 10/366 (2021.01)

(22) 申请日 2023.07.12

B33Y 10/00 (2015.01)

(71) 申请人 中南大学

B33Y 40/20 (2020.01)

地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

B33Y 70/00 (2020.01)

B33Y 80/00 (2015.01)

G22C 1/04 (2023.01)

(72) 发明人 刘祖铭 周欢 李建 张亚洲  
江道言

(74) 专利代理机构 长沙市融智专利事务所(普通合伙) 43114

专利代理师 蒋太炜

(51) Int. Cl.

B22F 10/64 (2021.01)

G22F 1/10 (2006.01)

B22F 10/28 (2021.01)

G22C 19/05 (2006.01)

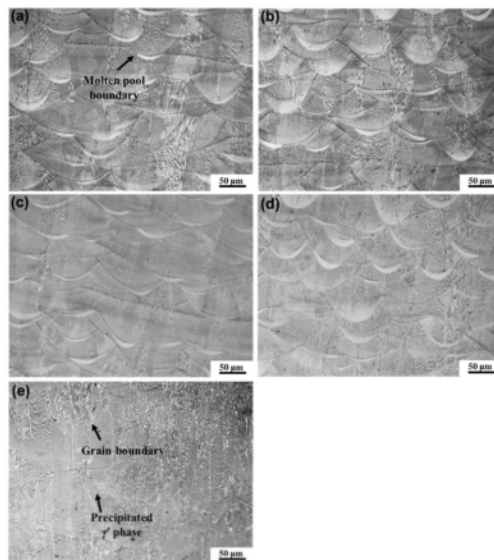
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种增材制造镍基高温合金热处理工艺

(57) 摘要

本发明提供了一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,属于高温合金领域。本发明通过引入适量的Sc配合适当的3D打印参数以及预退火+固溶处理,或预退火+固溶+时效处理,有效解决了热处理开裂问题,得到了抗拉强度大于1500MPa的优质镍基高温合金。本发明首次尝试了利用660~760℃的预退火处理,然后进行1150℃~1170℃固溶处理并控制固溶时间为1~6h,得到了无裂纹且抗拉强度超过了1500MPa、伸长率大于20%的固溶态产品;最后,根据需求选择合适的时效处理可以得到屈服强度和抗拉强度高,且伸长率大于15%的产品。本发明组分设计合理、制备工艺简单可控、可调,所得产品性能优良,热处理过程中以及成品均未出现开裂情况,便于大规模工业化应用。



1. 一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,其特征在于:所述镍基高温合金为含Sc的René104合金,所述含Sc的René104合金是以René104Sc合金粉末为原料通过3D打印制备;所述含Sc的René104合金中Sc的质量百分含量为0.005wt.%~0.01wt.%;

所述3D打印为:

步骤一

以设计成分的René104Sc合金粉末为原料粉末,采用激光粉末床熔融(Laser Powder Bed Fusion,LPBF)工艺打印制得打印态产品;采用LPBF最佳工艺参数成形:激光功率260~265W,曝光时间75~85 $\mu$ s,层厚30~40 $\mu$ m,蛇形扫描策略,相邻层之间的旋转角为67°;

步骤二

以所得打印态产品为处理对象,于660~760℃、优选为690~710℃进行1~5h的预退火处理,优选为2~4h,得到退火态产品;

步骤三

以所得退火态产品为处理对象,在1150℃~1170℃进行1~6h的固溶处理,得到固溶态产品;

或,以所得退火态产品为处理对象,于1150℃~1170℃进行1~6h的固溶处理,得到固溶态产品;对固溶态产品进行时效处理,时效温度为810~820℃,时效时间为2~16h,得到时效态产品。

2. 根据权利要求1所述的一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,其特征在于:所选用René104Sc合金原料粉末的制备方法如下:

按设计组分,配取各原料,将所有原料混合,通过紧耦合氩气雾化系统制备合金粉末,坩埚为石墨坩埚,熔炼温度为1600~1650℃,持续保温10~20min,气压为3~5MPa;使用振动筛分设备筛选出粒径范围为小于100 $\mu$ m,优选为15~74 $\mu$ m的René104Sc合金粉末,作为3D打印用粉末;

作为优选,选用Al-Sc中间合金引入Sc,其他原料可采用单质金属或中间合金。

3. 根据权利要求1所述的一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,其特征在于:所述René104Sc合金原料粉末以质量百分比计,包括下述组成:

Co21.4~21.6wt.%、Cr12.9~13.1wt.%、Mo3.7~3.9wt.%、Ti3.8~4.0wt.%、Al3.3~3.4wt.%、Ta2.2~2.3wt.%、W3.3~3.5wt.%、Nb0.8~1.0wt.%、C0.03~0.06wt.%、Zr0.04~0.06wt.%、B0.02~0.04wt.%、Sc0.006~0.08wt.%、余量为Ni。

4. 根据权利要求3所述的一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,其特征在于:所述René104Sc合金原料粉末以质量百分比计,包括下述组成:

Co21.5 wt.%、Cr13.0 wt.%、Mo3.8 wt.%、Ti3.9 wt.%、Al3.35 wt.%、Ta2.26wt.%、W3.4 wt.%、Nb0.9 wt.%、C0.05 wt.%、Zr0.05 wt.%、B0.03 wt.%、Sc0.007 wt.%、余量为Ni。

5. 根据权利要求1所述的一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,其特征在于:以设计成分的René104Sc合金粉末为原料粉末,采用LPBF工艺打印制得打印态产品;采用LPBF最佳工艺参数成形:激光功率263W,曝光时间80 $\mu$ s,层厚35 $\mu$ m,蛇形扫描策略,相邻层之间的旋转角为67°;其样品特征在于:所得产品的显微组织主要由等轴晶和柱状晶构成。

6. 根据权利要求1所述的一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,其特征在于:

当在温度700℃预退火3h后,合金的屈服强度为994MPa,抗拉强度为1461MPa,伸长率为19.4%;

当在温度800℃预退火3h后,合金的屈服强度为1298MPa,抗拉强度为1405MPa,伸长率为4.7%。

7. 根据权利要求6所述的一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,其特征在于:  
采用700℃、3h退火产物,利用1160℃进行固溶处理;

当固溶时间为1h时,合金的屈服强度为1158MPa,抗拉强度为1533MPa,伸长率为19.2%;

当固溶时间为2h时,合金的屈服强度为1111MPa,抗拉强度为1537MPa,伸长率为21.1%;

当固溶时间为4h时,合金的屈服强度为1176MPa,抗拉强度为1553MPa,伸长率为20.3%;

当固溶时间为6h时,合金的屈服强度为1157MPa,抗拉强度为1525MPa,伸长率为19.1%。

8. 根据权利要求1所述的一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,其特征在于:  
固溶态产品经时效处理,得到时效态产品,时效处理温度为810~820℃,时效时间为2~16h。

9. 根据权利要求8所述的一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,其特征在于:  
当打印态产品依次经预退火处理、固溶处理、时效处理,所得时效态产品的性能依次为:

当时效时间为2h时,合金的屈服强度为1205MPa,抗拉强度为1551MPa,伸长率为15.1%;

当时效时间为4h时,合金的屈服强度为1270MPa,抗拉强度为1614MPa,伸长率为15.3%;

当时效时间为8h时,合金的屈服强度为1220MPa,抗拉强度为1534MPa,伸长率为13.7%;

当时效时间为16h时,合金的屈服强度为1277MPa,抗拉强度为1535MPa,伸长率为11.4%;

上述预退火处理的温度为700℃、时间为3h,固溶处理的温度为1160℃、时间为4h。

## 一种增材制造镍基高温合金热处理工艺

### 技术领域

[0001] 本发明属于高温合金领域,涉及一种增材制造镍基高温合金热处理工艺。

### 背景技术

[0002] 目前,增材制造镍基高温合金常用的热处理工艺通常为固溶+时效处理。Tomus [TOMUS D, TIAN Y, ROMETSCH P A, et al. Influence of post heat treatments on anisotropy of mechanical behaviour and microstructure of Hastelloy-X parts produced by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering:A, 2016, 667: 42-53]通过增材制造制备的Hastelloy X合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为630MPa、700MPa和30%;进行1175°C/2h的固溶处理,或1175°C/2MPa/150h热等静压,或1175°C/2MPa/150h热等静压+1175°C/2h固溶处理后,合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为400-500MPa、700~850MPa和40%~55%。Hu [HU Y, LIN X, LI Y, et al. Influence of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by directed energy deposition[J]. Materials Science and Engineering:A, 2021, 817: 141309]通过增材制造制备的IN625合金,打印态样品的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为568MPa、925MPa和31%;进行固溶处理(ST)、固溶+时效处理(SA)和热等静压处理(HIP)后,样品的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为444MPa、914MPa和38%;741MPa、1056MPa和27%;468MPa、957MPa和52%。Ramakrishnan [RAMAKRISHNAN A, DINDA G P. Direct laser metal deposition of Inconel 738[J]. Materials Science and Engineering:A, 2019, 740-741: 1-13]对增材制造IN738合金进行1120°C/2h/风冷+850°C/24h/空冷热处理后,合金的屈服强度和抗拉强度由打印态的1350MPa、1392MPa降低至1038MPa、1117MPa,伸长率则由1.13%升高至2.76%。本课题组前期开发了一种采用原位热处理的方式提升3D打印镍基高温合金性能的技术,其所得René104合金的屈服强度可达1017MPa、抗拉强度可达1242MPa、伸长率可达11.1%,其所得添加微量稀土Sc的René104镍基高温合金屈服强度可达1145MPa、抗拉强度可达1252MPa [刘祖铭,魏冰,农必重,吕学谦,任亚科,曹宾,艾永康.一种原位热处理提高3D打印镍基高温合金力学性能的方法[P].湖南省:CN112008079B,2020-08-30]。而且,本课题组进一步的研究发现,René104合金采用固溶处理(1160°C/1h)+时效处理(820°C/8h+760°C/8h)后,合金出现了开裂,其屈服强度、抗拉强度和伸长率为1230MPa、1298MPa和2.62% [魏冰. René104高温合金的选区激光熔融成形及开裂抑制研究[D],长沙:中南大学,2022]。

[0003] 中国专利CN202210868929.0公开了一种激光复合增材制造双晶组织镍基高温合金的热处理方法,将激光复合增材制造镍基高温合金依次进行去应力退火、低温固溶处理和时效处理;所述的去应力退火指在450~600°C保温4~8小时并炉冷,所述低温固溶处理指在1000~1030°C保温0.5~2小时并水冷,所述时效处理是指在700~810°C保温8~12小时并水冷。所得镍基高温合金GH4169的抗拉强度为1331MPa,延伸率为27%,断面收缩率为22%。

[0004] 中国专利CN202110775155.2公开了一种优化增材制造GH3536镍基高温合金力学性能的热处理方法,采用增材制造技术制备GH3536镍基高温合金,将马弗炉升温至1020~1080℃,迅速将所制备的增材制造GH3536镍基高温合金放入马弗炉中进行固溶热处理,并在空气中冷却。所得到的GH3536抗拉强度最高为841MPa。

[0005] 由上述检索结果不难看出,现有技术对增材制造的镍基高温合金进行热处理后,尤其是对René104合金热处理后,所得产品的抗拉强度很难突破1500MPa。同时,更为关键的是很多增材制造镍基高温合金极易在热处理过程或存放过程中发生开裂,特别是对于热开裂敏感型3D打印成形的镍基高温合金,热处理过程或长时间存放过程中样品的开裂问题更为严重。

## 发明内容

[0006] 针对现有技术的不足,本发明结合适当参数的预退火+固溶处理或预退火+固溶+时效处理,同步提升产品的抗拉强度、屈服强度,通过工艺的优化首次得到了抗拉强度大于1500MPa的含Sc的René104合金(René104Sc)。

[0007] 本发明一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,所述镍基高温合金为含Sc的René104合金,所述含Sc的René104合金是以René104Sc合金粉末为原料通过增材制造制备;所述含Sc的René104合金中Sc的质量百分含量为0.005wt.%~0.01wt.%;

[0008] 所述3D打印为:

[0009] 步骤一

[0010] 以设计成分的René104Sc合金粉末为原料粉末,采用激光粉末床熔融(Laser Powder Bed Fusion,LPBF)工艺打印制得打印态产品;采用LPBF最佳工艺参数成形:激光功率260~265W,曝光时间75~85μs,层厚30~40μm,蛇形扫描策略,相邻层之间的旋转角为67°;

[0011] 步骤二

[0012] 以所得打印态产品为处理对象,在660~760℃、优选为690~710℃进行1~5h的预退火处理,优选为2~4h,得到退火态产品;

[0013] 步骤三

[0014] 以所得退火态产品为处理对象,在1150℃~1170℃进行1~6h的固溶处理,得到固溶态产品;

[0015] 或,以所得退火态产品为处理对象,于1150℃~1170℃进行1~6h的固溶处理,得到固溶态产品;对固溶态产品进行时效处理,时效温度为810~820℃,时效时间为2~16h,得到时效态产品。

[0016] 作为优选,所述René104Sc合金原料粉末以质量百分比计,包括下述组成:

[0017] Co21.4~21.6wt.%、Cr12.9~13.1wt.%、Mo3.7~3.9wt.%、Ti3.8~4.0wt.%、Al3.3~3.4wt.%、Ta2.2~2.3wt.%、W3.3~3.5wt.%、Nb0.8~1.0wt.%、C0.03~0.06wt.%、Zr0.04~0.06wt.%、B0.02~0.04wt.%、Sc0.006~0.08wt.%、余量为Ni。

[0018] 作为进一步的优选,所述René104Sc合金原料粉末以质量百分比计,包括下述组成:

[0019] Co21.5 wt.%、Cr13.0 wt.%、Mo3.8 wt.%、Ti3.9 wt.%、Al3.35 wt.%、

Ta2.26wt.%、W3.4 wt.%、Nb0.9 wt.%、C0.05 wt.%、Zr0.05 wt.%、B0.03 wt.%、Sc0.007 wt.%、余量为Ni。

[0020] 本发明一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,打印态产品的屈服强度为930~940MPa,抗拉强度为1280~1285MPa,伸长率为25~25.5%。

[0021] 作为优选,本发明中,打印态产品的相对密度高于99.4%,屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为935MPa、1284MPa和25.2%。

[0022] 本发明所选用René104Sc合金原料粉末的制备方法如下:

[0023] 按设计组分,配取各原料,将所有原料混合,通过紧耦合氩气雾化系统制备合金粉末,坩埚为石墨坩埚,熔炼温度为1600~1650℃,持续保温10~20min,气压为3~5MPa;使用振动筛分设备筛选出粒径范围为小于100μm,优选为15~74μm的René104Sc合金粉末,作为3D打印用粉末。在本发明中,作为优选,打印所用原料粉末粒径是15~74μm,其平均粒径为45~46μm。

[0024] 作为优选,选用Al-Sc中间合金引入Sc,其他原料可采用单质金属或中间合金。

[0025] 作为优选,本发明以设计成分的René104Sc合金粉末为原料粉末,采用LPBF工艺打印制得打印态产品;采用LPBF最佳工艺参数成形:激光功率263W,曝光时间80μs,层厚35μm,蛇形扫描策略,相邻层之间的旋转角为67°;其样品特征在于:所得产品的显微组织主要由等轴晶和柱状晶构成。

[0026] 本发明一种增材制造镍基高温合金热处理工艺:

[0027] 当在温度为500℃预退火3h后,合金的屈服强度为944MPa,抗拉强度为1335MPa,伸长率为23.3%;

[0028] 当在温度为600℃预退火3h后,合金的屈服强度为980MPa,抗拉强度为1333MPa,伸长率为20.8%;

[0029] 当在温度为700℃预退火3h后,合金的屈服强度为994MPa,抗拉强度为1461MPa,伸长率为19.4%;

[0030] 当在温度为800℃预退火3h后,合金的屈服强度为1298MPa,抗拉强度为1405MPa,伸长率为4.7%。

[0031] 当退火工艺为700℃/3h时,合金的显微硬度为499HV<sub>0.3</sub>。在500℃、600℃和800℃预退火时,合金的显微硬度分别为426HV<sub>0.3</sub>和457HV<sub>0.3</sub>和495HV<sub>0.3</sub>。

[0032] 技术开发过程中还发现,合金的显微组织随着预退火温度的增加而不断变化;预退火温度越高,合金的熔池边界和胞状组织越不明显。当预退火温度为800℃时,合金的熔池边界和胞状组织完全消失。

[0033] 结合显微组织分析,优化后的LPBF制备的René104Sc合金的预退火工艺为700℃/2~4h,显微硬度为499HV<sub>0.3</sub>,屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为994MPa、1461MPa和19.4%的产品。

[0034] 本发明一种增材制造镍基高温合金热处理工艺,采用700℃/3h退火,退火态产物,在1160℃进行固溶处理;

[0035] 当固溶时间为1h时,合金的屈服强度为1158MPa,抗拉强度为1533MPa,伸长率为19.2%;

[0036] 当固溶时间为2h时,合金的屈服强度为1111MPa,抗拉强度为1537MPa,伸长率为

21.1%；

[0037] 当固溶时间为4h时，合金的屈服强度为1176MPa，抗拉强度为1553MPa，伸长率为20.3%；

[0038] 当固溶时间为6h时，合金的屈服强度为1157MPa，抗拉强度为1525MPa，伸长率为19.1%。

[0039] 作为优选，当固溶时间为4h时，合金的屈服强度、抗拉强度分别为1176MPa、1553MPa，而伸长率为20.3%。

[0040] 本发明所得产品为固溶态时，相比于打印态，产品的抗拉强度首次突破了1500MPa；且伸长率的下降幅度较小。

[0041] 本发明一种增材制造镍基高温合金热处理工艺，固溶态产品经时效处理，得到时效态产品，时效处理的温度为810~820℃，时效的时间为2~32h。

[0042] 本发明一种增材制造镍基高温合金的热处理方法，当打印态产品依次经预退火处理、固溶处理、时效处理，所得时效态产品的性能依次为：

[0043] 当时效时间为2h时，合金的屈服强度为1205MPa，抗拉强度为1551MPa，伸长率为15.1%；

[0044] 当时效时间为4h时，合金的屈服强度为1270MPa，抗拉强度为1614MPa，伸长率为15.3%；

[0045] 当时效时间为8h时，合金的屈服强度为1220MPa，抗拉强度为1534MPa，伸长率为13.7%；

[0046] 当时效时间为16h时，合金的屈服强度为1277MPa，抗拉强度为1535MPa，伸长率为11.4%。

[0047] 在探索过程中，发明人还发现：当时效时间为32h时，合金的屈服强度为1158MPa，抗拉强度为1403MPa，伸长率为10.3%。

[0048] 上述预退火处理的温度为700℃、时间为3h，固溶处理的温度为1160℃、时间为4h。

[0049] 优选后，本发明采用680~720℃预退火处理态的René104Sc合金存在少量第二相，780~820℃退火处理态的René104Sc合金中析出大量第二相，且均匀弥散地分布于合金中。本发明采用这样的预退火条件处理时，样品未见开裂。

[0050] 本发明中，经预退火处理后，继续进行固溶处理时，合金中均未出现开裂现象。

[0051] 本发明中，经预退火处理、固溶处理后，继续进行时效处理时，产品中均未出现开裂现象。

[0052] 本发明中，采用时效处理时，可以增加产品的屈服强度。

[0053] 本发明首次开发出了一种具有高强度、高延伸率的René104Sc合金，本发明所设计和制备的René104Sc合金，其延伸率大于10%且屈服强度大于等于1100MPa、抗拉强度大于等于1500MPa。

[0054] 原理和优势

[0055] 1. 本发明一种增材制造镍基高温合金热处理工艺，首次提出采用较高温度预退火工艺对打印态样品进行热处理。采用所设计的预退火工艺处理后，样品的小角度晶界降低至77.84%~69.58%，有效地调控了合金的显微组织，合金样品无热处理开裂现象；

[0056] 2. 本发明采用适当参数的预退火、固溶处理、时效处理相结合的热处理工艺，成功

解决了3D打印高Al、Ti镍基高温合金热处理开裂问题,大幅度提升合金的力学性能,屈服强度大于1100MPa,抗拉强度大于1500MPa。

[0057] 3.本发明组分设计合理、制备工艺简单可控、可调,所得产品性能优良,热处理过程中以及成品均未出现开裂情况,便于大规模工业化应用。

### 附图说明

[0058] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其它的附图。其中:

[0059] 图1为本发明实施例1中LPBF成形René104Sc合金预退火样品XZ面金相显微组织:(a)打印态;(b)500°C/3h;(c)600°C/3h;(d)700°C/3h;(e)800°C/3h;

[0060] 图2为本发明实施例1的室温力学性能:(a)显微硬度(HV<sub>0.3</sub>);(b)工程应力-应变曲线;

[0061] 图3为实施例2和对比例2的金相显微组织图:(a)700°C/3h+1160°C/1h;(b)700°C/3h+1160°C/2h;(c)700°C/3h+1160°C/4h;(d)700°C/3h+1160°C/6h;(e)1160°C/4h

[0062] 图4为实施例2和对比例2的力学性能:(a)显微硬度(HV<sub>0.3</sub>);(b)工程应力-应变曲线;

[0063] 图5为实施例3的金相显微组织图:(a)2h;(b)4h;(c)8h;(d)16h;(e)32h;

[0064] 图6为实施例3的力学性能:(a)显微硬度(HV<sub>0.3</sub>);(b)工程应力-应变曲线;

[0065] 图7为对比例1的金相显微组织图。

### 具体实施方式

[0066] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合说明书实施例对本发明的具体实施方式做详细的说明。

[0067] 在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明,但是本发明还可以采用其他不同于在此描述的其它方式来实施,本领域技术人员可以在不违背本发明内涵的情况下做类似推广,因此本发明不受下面公开的具体实施例的限制。

[0068] 其次,此处所称的“一个实施例”或“实施例”是指可包含于本发明至少一个实现方式中的特定特征、结构或特性。在本说明书中不同地方出现的“在一个实施例中”并非均指同一个实施例,也不是单独的或选择性的与其他实施例互相排斥的实施例。

[0069] 实施例1

[0070] (1)将所有原料混合,通过紧耦合氩气雾化系统制备René104Sc合金粉末,坩埚为石墨坩埚,熔炼温度为1600~1650°C,持续保温10~20min,气压为3~5MPa;使用振动筛分设备筛选出粒径为15~74μm的René104Sc合金粉末进行3D打印,控制层厚为35μm,激光功率为263W,曝光时间为80μs,层间旋转角度为67°,3D打印时采用蛇形扫描策略;

[0071] 所制备René104Sc合金粉末以质量百分比计,包括下述组成:

[0072] Co21.5 wt.%、Cr13.0 wt.%、Mo3.8 wt.%、Ti3.9 wt.%、Al3.35 wt.%、Ta2.26wt.%、W3.4 wt.%、Nb0.9 wt.%、C0.05 wt.%、Zr0.05 wt.%、B0.03 wt.%、

Sc0.007 wt.%、余量为Ni；

[0073] (2) 将制备的打印态样品真空封管,进行500~800℃预退火处理,以7.5℃/min的速率升温,保温3h,随后随炉冷却至室温。

[0074] 当在温度为500℃预退火3h后,合金的屈服强度为944MPa,抗拉强度为1335MPa,伸长率为23.3%；

[0075] 当在温度为600℃预退火3h后,合金的屈服强度为980MPa,抗拉强度为1333MPa,伸长率为20.8%；

[0076] 当在温度为700℃预退火3h后,合金的屈服强度为994MPa,抗拉强度为1461MPa,伸长率为19.4%；

[0077] 当在温度为800℃预退火3h后,合金的屈服强度为1298MPa,抗拉强度为1405MPa,伸长率为4.7%。

[0078] 当预退火工艺为700℃/3h时,合金的显微硬度为499HV<sub>0.3</sub>。在500℃、600℃和800℃预退火3h时,合金的显微硬度分别为426HV<sub>0.3</sub>和457HV<sub>0.3</sub>和495HV<sub>0.3</sub>。

[0079] 图1结果表明,打印态及退火态样品没有观察到裂纹。

[0080] 图2结果显示,退火态样品的室温力学性能得到提高,其中800℃退火样品发生脆断,伸长率仅为4.7%。

[0081] 实施例2

[0082] (1) 将所有原料混合,通过紧耦合氩气雾化系统制备René104Sc合金粉末,坩埚为石墨坩埚,熔炼温度为1600~1650℃,持续保温10~20min,气压为3~5MPa;使用振动筛分设备筛选出粒径为15~74μm的René104Sc合金粉末进行3D打印,控制层厚为35μm,激光功率为263W,曝光时间为80μs,层间旋转角度为67°,3D打印时采用蛇形扫描策略；

[0083] 所制备René104Sc合金粉末以质量百分比计,包括下述组成：

[0084] Co21.5 wt.%、Cr13.0 wt.%、Mo3.8 wt.%、Ti3.9 wt.%、Al3.35 wt.%、Ta2.26wt.%、W3.4 wt.%、Nb0.9 wt.%、C0.05 wt.%、Zr0.05 wt.%、B0.03 wt.%、Sc0.007 wt.%、余量为Ni；

[0085] (2) 将制备的打印态样品真空封管,进行700℃预退火处理,以7.5℃/min的速率升温,保温3h,随后随炉冷却至室温；

[0086] (3) 待热处理炉升温至1160℃后,将真空封装好的退火态样品放入炉内,保温不同时间(1h、2h、4h和6h)后取出,随后空冷至室温。

[0087] 当固溶处理1h后,合金的屈服强度为1158MPa,抗拉强度为1533MPa,伸长率为19.2%；

[0088] 当固溶处理2h后,合金的屈服强度为1111MPa,抗拉强度为1537MPa,伸长率为21.1%；

[0089] 当固溶处理4h后,合金的屈服强度为1176MPa,抗拉强度为1553MPa,伸长率为20.3%；

[0090] 当固溶处理6h后,合金的屈服强度为1157MPa,抗拉强度为1525MPa,伸长率为19.1%。

[0091] 当固溶处理工艺为1160℃/4h时,合金的显微硬度为443HV<sub>0.3</sub>；在固溶1h、2h和6h时,合金的显微硬度分别为469HV<sub>0.3</sub>、465HV<sub>0.3</sub>和485HV<sub>0.3</sub>。

[0092] 图3a-d表明,“预退火+固溶处理”样品中没有观察到裂纹。

[0093] 图4结果表明,“预退火+固溶处理”样品的力学性能优于直接固溶处理样品。

[0094] 实施例3

[0095] (1) 将所有原料混合,通过紧耦合氩气雾化系统制备René104Sc合金粉末,坩埚为石墨坩埚,熔炼温度为1600~1650℃,持续保温10~20min,气压为3~5MPa;使用振动筛分设备筛选出粒径为15-74μm的René104Sc合金粉末进行3D打印,控制层厚为35μm,激光功率为263W,曝光时间为80μs,层间旋转角度为67°,3D打印时采用蛇形扫描策略;

[0096] 所制备René104Sc合金粉末以质量百分比计,包括下述组成:

[0097] Co21.5 wt.%、Cr13.0 wt.%、Mo3.8 wt.%、Ti3.9 wt.%、Al3.35 wt.%、Ta2.26wt.%、W3.4 wt.%、Nb0.9 wt.%、C0.05 wt.%、Zr0.05 wt.%、B0.03 wt.%、Sc0.007 wt.%、余量为Ni;

[0098] (2) 将制备的打印态样品真空封管,进行700℃预退火处理,以7.5℃/min的速率升温,保温3h,随后随炉冷却至室温;

[0099] (3) 待热处理炉升温至1160℃后,将真空封装好的退火态样品放入炉内,保温4h后取出,随后空冷至室温;

[0100] (4) 待马弗炉升温至815℃后,将真空封装好的“预退火+固溶”态样品放入炉内,保温不同时间(2h、4h、8h、16h和32h)后取出,随后空冷至室温。

[0101] 当时效处理2h后,合金的屈服强度为1205MPa,抗拉强度为1551MPa,伸长率为15.1%;

[0102] 当时效处理4h后,合金的屈服强度为1270MPa,抗拉强度为1614MPa,伸长率为15.3%;

[0103] 当时效处理8h后,合金的屈服强度为1220MPa,抗拉强度为1534MPa,伸长率为13.7%;

[0104] 当时效处理16h后,合金的屈服强度为1277MPa,抗拉强度为1535MPa,伸长率为11.4%。

[0105] 当时效处理32h后,合金的屈服强度为1158MPa,抗拉强度为1403MPa,伸长率为10.3%。

[0106] 当时效处理工艺为815℃/4h时,合金的显微硬度为521HV<sub>0.3</sub>;在2h、8h、16h、32h、时,合金的显微硬度分别为515HV<sub>0.3</sub>、512HV<sub>0.3</sub>、508HV<sub>0.3</sub>和500HV<sub>0.3</sub>。

[0107] 图5结果表明,“预退火+固溶+时效处理”样品中没有观察到裂纹。

[0108] 图6结果表明,“预退火+固溶+时效处理”样品的力学性能均较传统热处理更优。

[0109] 对比例1

[0110] (1) 将所有原料混合,通过紧耦合氩气雾化系统制备René104Sc合金粉末,坩埚为石墨坩埚,熔炼温度为1600~1650℃,持续保温10~20min,气压为3~5MPa;使用振动筛分设备筛选出粒径为15~74μm的René104Sc合金粉末进行3D打印,控制层厚为35μm,激光功率为263W,曝光时间为80μs,层间旋转角度为67°,3D打印时采用蛇形扫描策略;

[0111] 所制备René104Sc合金粉末以质量百分比计,包括下述组成:

[0112] Co21.5 wt.%、Cr13.0 wt.%、Mo3.8 wt.%、Ti3.9 wt.%、Al3.35 wt.%、Ta2.26wt.%、W3.4 wt.%、Nb0.9 wt.%、C0.05 wt.%、Zr0.05 wt.%、B0.03 wt.%、

Sc0.007 wt.%、余量为Ni；

[0113] (2)将制备的打印态样品真空封管,进行450℃的退火处理,以7.5℃/min的速率升温,保温3h,随后随炉冷却至室温；

[0114] (3)图7结果表明,样品中观察到少量裂纹,裂纹长度为150μm。

[0115] 对比例2

[0116] (1)将所有原料混合,通过紧耦合氩气雾化系统制备René104Sc合金粉末,坩埚为石墨坩埚,熔炼温度为1600~1650℃,持续保温10~20min,气压为3~5MPa;使用振动筛分设备筛选出粒径为15~74μm的René104Sc合金粉末进行3D打印,控制层厚为35μm,激光功率为263W,曝光时间为80μs,层间旋转角度为67°,3D打印时采用蛇形扫描策略；

[0117] 所制备René104Sc合金粉末以质量百分比计,包括下述组成：

[0118] Co21.5 wt.%、Cr13.0 wt.%、Mo3.8 wt.%、Ti3.9 wt.%、Al3.35 wt.%、Ta2.26wt.%、W3.4 wt.%、Nb0.9 wt.%、C0.05 wt.%、Zr0.05 wt.%、B0.03 wt.%、Sc0.007 wt.%、余量为Ni；

[0119] (2)将制备的打印态样品真空封管,待热处理炉升温至1160℃后,将真空封装好的打印态样品放入炉内,保温4h后取出,随后空冷至室温。

[0120] 图3(e)结果表明,直接固溶处理样品中出现了大尺寸裂纹。

[0121] 图4结果表明,直接固溶处理样品的力学性能明显低于“预退火+固溶处理”样品。

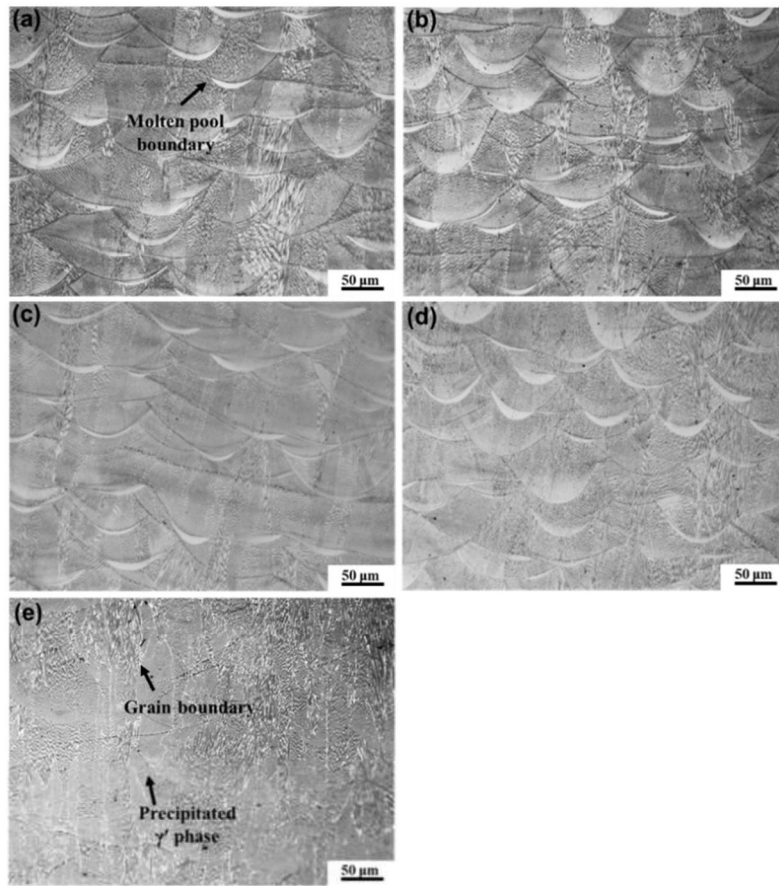


图1

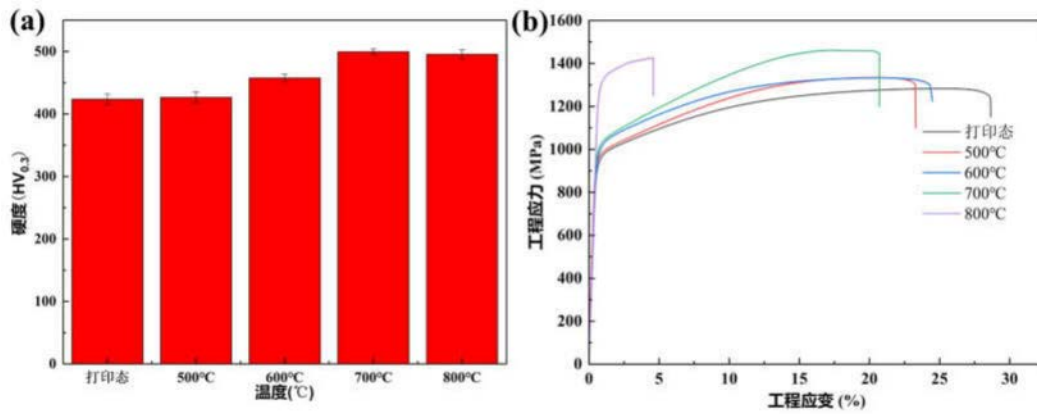


图2

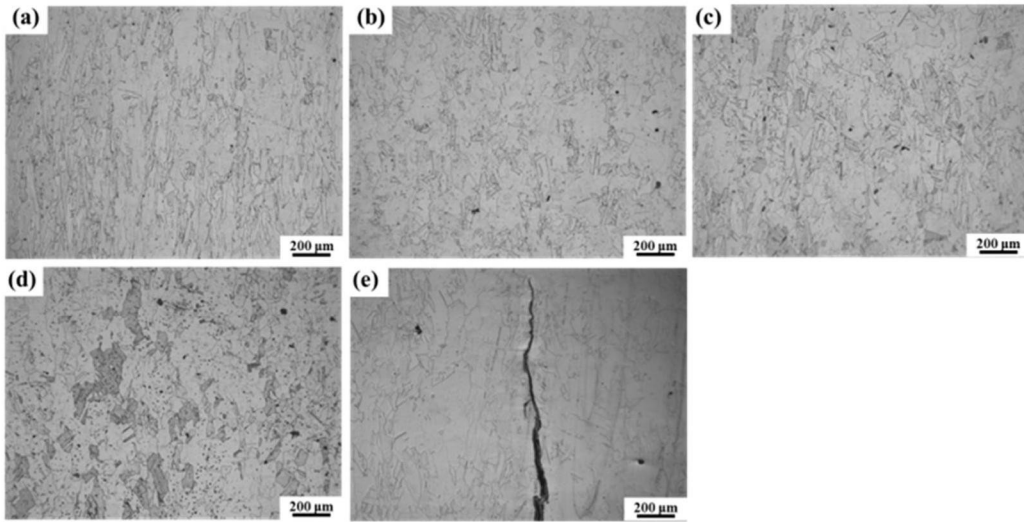


图3

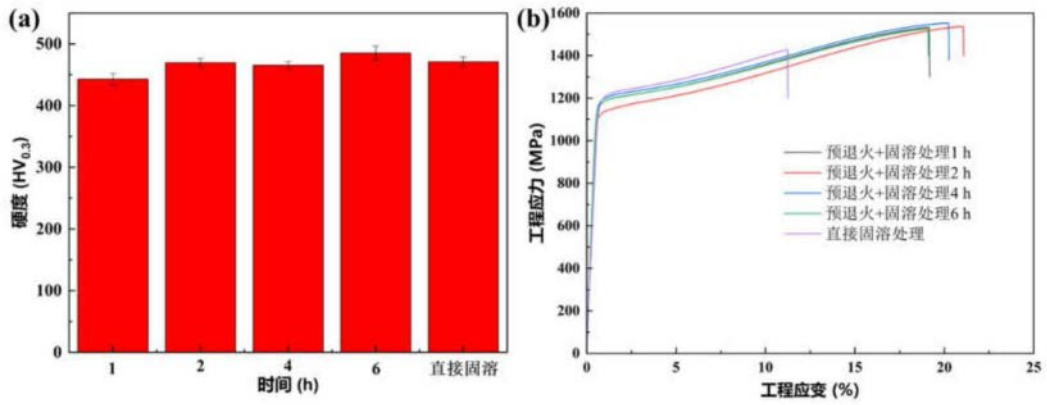


图4

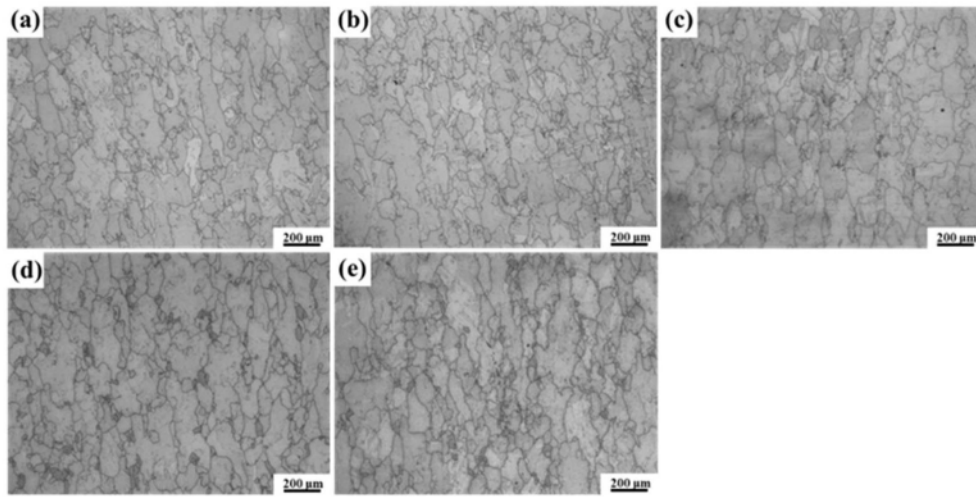


图5

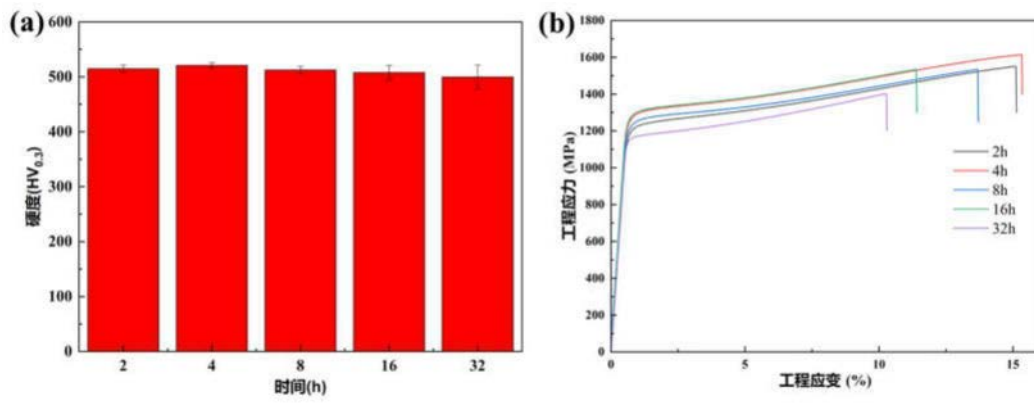


图6

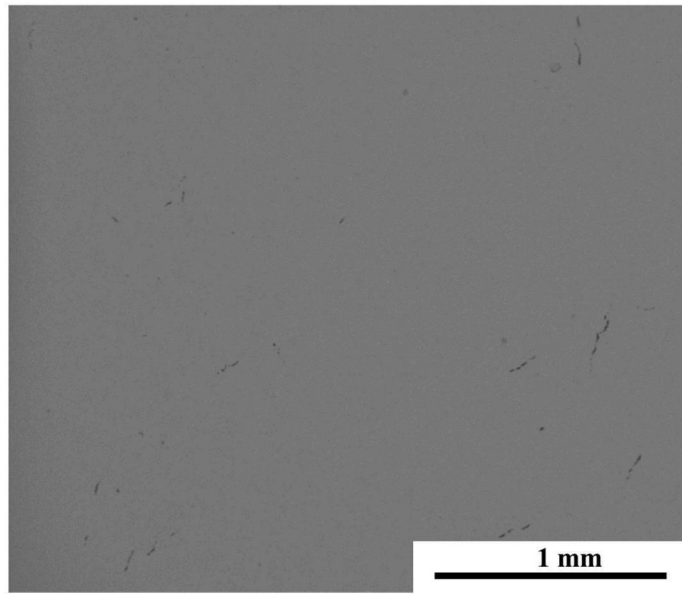


图7