DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.03.004

GH4720Li 高温合金热加工工艺研究

田喜明[1],史蒲英[2],李　坤[2],孙小平[2,3],王凯旋[2],景建发[2,4]
(1. 海军装备部,陕西 西安 710021;2. 西部超导材料科技股份有限公司 陕西省航空材料工程实验室,陕西 西安 710018;3. 西北工业大学材料学院,陕西 西安 710072; 4.中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘　要:从热力学角度,分析了 GH4720Li 合金中各个相的析出规律。依据热处理试验结果,确定了合适的加工温度范围;依据轧制过程数值模拟结果,获得了可行的轧制道次变形量匹配。结果表明,热加工温度不应超过 1 160 ℃;在 1 140 ℃加热条件下,单次轧制加工变形量不超过 30%;试验棒材的晶粒度为 8~9 级,其力学性能满足标准要求。

关键词:GH4720Li 合金;轧制;棒材;工艺
中图分类号: TG335; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)03-0176-04

Study on Hot Working Technology of GH4720Li Superalloy

TIAN Ximing[1], SHI Puying[2], LI Kun[2], SUN Xiaoping[2,3], WANG Kaixuan[2], JING Jianfa[2,4]
(1. Naval Equipment Department, Xi'an 710021, China; 2. Shaanxi Aviation Materials Engineering Laboratory, Western Superconducting Materials Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 4. School of Resource Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The precipitation law of each phase in GH4720Li alloy was analyzed from the thermodynamic point of view. According to the heat treatment test results, the appropriate processing temperature range was determined. According to the numerical simulation results of rolling process, the feasible deformation matching of rolling passes was obtained. The results show that the hot working temperature should not exceed 1 160 ℃. Under the heating condition of 1 140 ℃, the single rolling deformation is less than 30%. The grain size of the sample is 8~9 grade, and its mechanical properties meet the standard requirements.

Key words: GH4720Li alloy; rolling deformation; bar; processing

GH4720Li 是一种镍基时效强化型高温合金,主要用于服役温度不超过 730 ℃的燃气涡轮发动机用关键转动部件,如涡轮盘、涡轮叶片等[1-3]。GH4720Li 合金中加入了大量的强化元素 (如 Al、Ti、Mo、W 等),强化元素的总量达 11.5%左右,其中,γ'强化相形成元素 Al+Ti 含量高达 7.5%。合金强化元素的加入使得该合金的 γ'相含量在 40%左右,固溶强化元素使合金具有优良的高温性能。随着合金化程度的提高,合金的高温强度提高,但成分均匀性控制难度增大;强化相 γ'数量增加,且 γ'相的全溶温度上升,动态再结晶温度上升,合金的热加工温度范围越来越窄,热变形抗力急剧增大,热加工塑性降低[4-5]。GH4720Li 属于难变形高温合金,处于变形方式生产与不可变形方式生产的临界点[6-7]。确定合理的热加工温度及加工方式是 GH4720Li 均质细晶小规格棒材研制的技术难点。阚志[8]成功研制了 GH4720Li 合金大尺寸棒材,并对其相变规律进行了分析,万志鹏[9]等对合金的软化机制进行了研究,但关于小尺寸棒材的热加工研究鲜有报道。

本文采用 Factsage 软件分析了 GH4720Li 合金中各种相的析出规律,结合热处理试验确定了合适的热加工温度,通过轧制变形数值模拟确定了加工变形量,最终通过试验验证了其合理性。

1　试验材料与方法

实验材料为 GH4720Li 合金 ϕ53 mm 圆棒,冶炼方式为:真空感应 (VIM)+保护气氛电渣熔炼(ESR)+真空自耗(VAR)的三联冶炼,化学成分见表1。

利用 Factsage 软件计算 GH4720Li 合金的相变温度,采用 Deform 软件数值模拟 GH4720Li 热加工变形过程,采用横列式轧机对 ϕ53 mm 棒材进行轧制试验,测试分析了轧制后棒坯的表面质量、低倍组织、显微组织及力学性能。金相试样制备采用标准金

收稿日期:2021-01-20
作者简介:田喜明(1977—),陕西西安人,硕士,工程师.主要从事航空发动机装备及材料方面的工作.
电话:029-86514520,Email:2164288795@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 GH4720Li合金化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of GH4720Li superalloy

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
含量	0.01	<0.05	<0.005	<0.004	<0.000 5	16.66	<0.01
元素	Mo	Ti	Ag	Al	As	B	Bi
含量	3.08	5.04	<0.000 5	2.51	<0.000 5	0.013	<0.000 01
元素	Ca	Co	Fe	Pb	Sb	Se	Sn
含量	<0.000 5	14.84	0.18	<0.000 5	<0.000 25	<0.000 05	<0.000 5
元素	Te	Tl	W	Zr	N	O	Ni
含量	<0.000 5	<0.000 05	1.27	0.039	/	/	余(Bal.)

相制样方法，化学腐蚀液为:5 g $CuCl_2$+100 mL C_2H_5OH+100 mL HCl,腐蚀时间为 10 s,采用 Leica MPS 30 金相显微镜观察显微组织。

2　结果与讨论

2.1　热力学相变分析

采用 Factsage 软件对 GH4720Li 各析出相进行模拟计算,结果如图 1。可以看出,理论上 GH4720Li 合金棒材析出含量近 50%，其中 γ' 相在 1 160 ℃可全部溶解,γ' 相在 GH4720Li 合金中主要富集于晶界,起钉扎作用。当温度超过 650 ℃热处理后有害的 μ 相可全部溶解，此时合金中主要物相包括 σ 相、γ' 相和 γ 相,合适的热加工温度不应超过 1 160 ℃,即 γ' 相全溶温度以下。

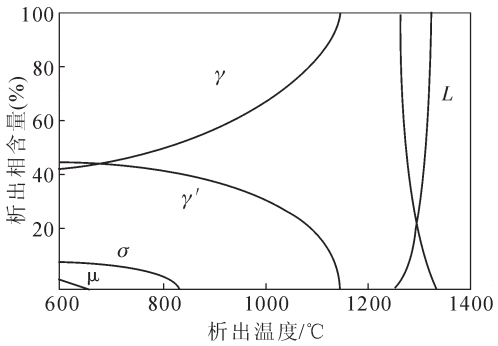


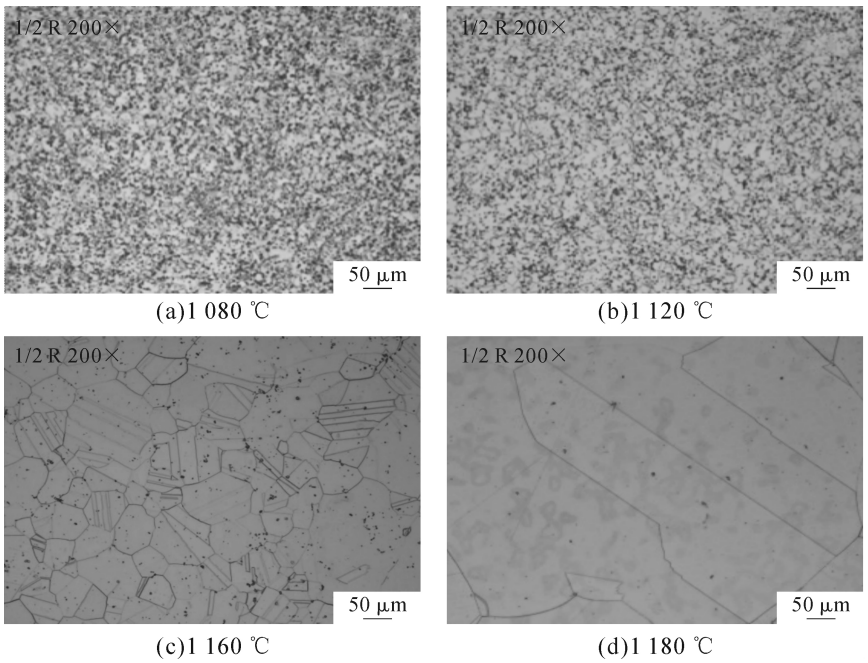
图 1 GH4720Li 合金相图
Fig.1 Phase diagram of GH4720Li superalloy

2.2　热处理温度对组织及硬度的影响

ϕ53 mm 棒材在不同温度（1 080、1 120、1 160 和 1 180 ℃)保温 60 min 热处理后空冷,棒材横截面 1/2 R 处的显微组织如图 2。

从图 2 看出,当热处理温度低于 1 160 ℃,热处理对棒材的组织没有影响,棒材晶粒度在 8~9 级,并且随着温度升高强化相 γ' 含量降低,加热温度超过 1 160 ℃,γ' 相全部溶解。1 160 ℃热处理后的晶粒度为 6 级;1 180 ℃时晶粒度为 0 级,热处理温度越高,晶粒度长大的趋势越明显,且 1 160 ℃和 1 180 ℃热处理组织中 γ' 相全部回溶于 Ni 基体中。不同热处理条件下棒材的硬度如图 3。

从图 3 看出,随着热处理温度升高,材料硬度增大,当热处理温度超过 1 160 ℃时,材料硬度迅速增



(a)1 080 ℃　(b)1 120 ℃
(c)1 160 ℃　(d)1 180 ℃
图 2 不同热处理温度下的棒材光学显微组织
Fig.2 OM microstructure of GH4720Li superalloy at different heat treatment temperature

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

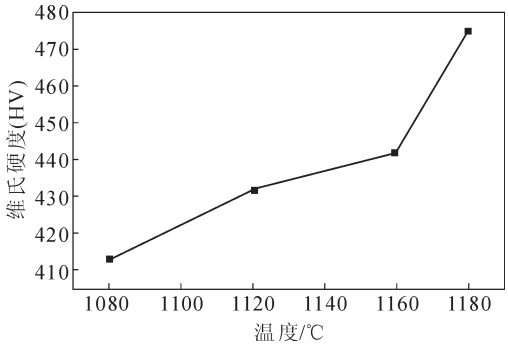


图 3 不同温度热处理后棒材维氏硬度的结果对比
Fig.3 Vickers hardness of GH4720Li superalloy at different temperature heat treatment

大。因此，GH4720Li 热加工应选择低于 1 160 ℃的条件进行。

2.3 轧制过程数值模拟及试验验证结果

选择 1 140 ℃为 GH4720Li 合金的轧制加热温度，采用 DEFORM-3D 软件计算了不同轧制道次、变形量等热加工参数条件下的应变场等，如图 4 所示。对比分析棒坯的低倍组织晶粒度分布试验结果(结果见图 5)，获得了轧制成 ϕ28mm 棒材的合适工艺：采用 4 道次轧制，每道次变形量依次为 18%、28%、26%和 11%，四道次孔型参数变化是○53→扁 65→◇50.6→扁 58→○33。

从图 4 和图 5 可以看出，在不同变形量条件下棒坯的晶粒度在 8~9 级，变形量低于 30%时棒坯开裂不明显且对组织的影响不大。

另外，试制棒材经 1 100 ℃×4 h，OC +650 ℃×24 h，AC+760 ℃×16 h，AC 热处理后的力学性能检测结果见表 2，棒材室温拉伸、高温拉伸和高温持久结果均可满足标准要求。

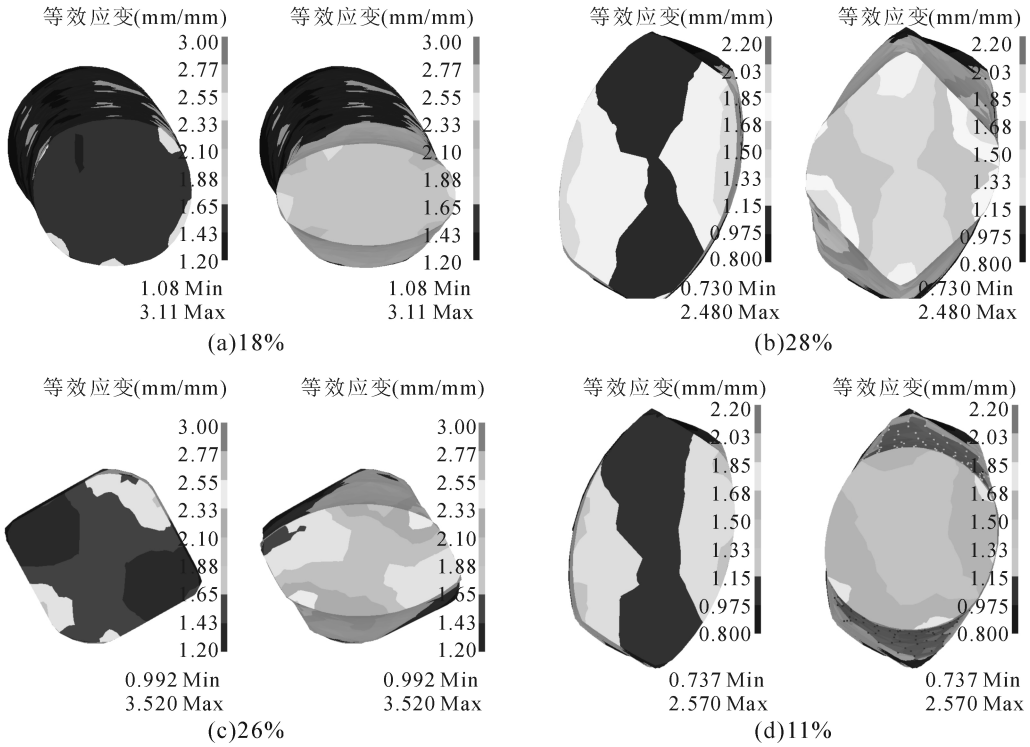


图 4 GH4720Li 合金不同道次轧制的应变场模拟
Fig.4 Strain field simulation of GH4720Li superalloy at different rolling passes

表2 GH4720Li合金棒材力学性能
Tab.2 Mechanical properties of GH4720Li superalloy

拉伸性能						持久性能			
试样编号	t/℃	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A(%)	Z(%)	t/℃	σ/MPa	τ/h	δ(%)
1# 位置	室温	1 570	1 125	22.6	24.3	680	830	191.40	6.84
2# 位置		1 599	1 154	22.1	28.0			199.00	5.68
1# 位置	650	1 400	1 085	18.9	20.8	730	530	184.20	27.40
2# 位置		1 418	1 095	24.6	21.9			172.15	32.20

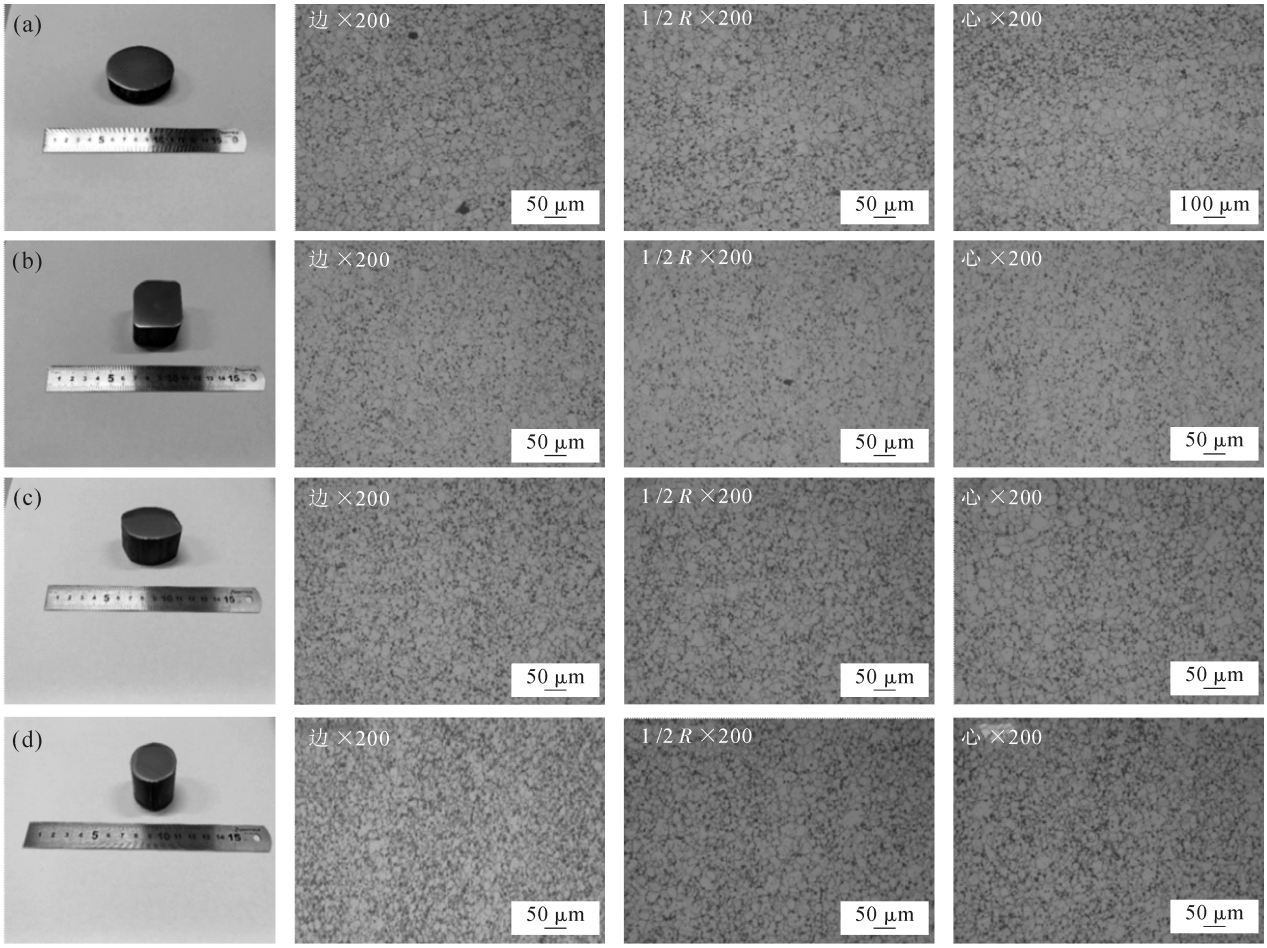
3 结论

(1)GH4720Li 合金热加工温度不能高于 1160 ℃。

(2)GH4720Li 合金在热加工过程中单次加工变形量不应超过 30%。

(3)试制棒材晶粒度为 8~9 级，力学性能可满足

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)18%；(b)28%；(c)26%；(d)11%

图 5 GH4720Li 合金棒坯轧制时各道次轧制的显微组织

Fig.5 Microstructure of GH4720Li superalloy at different rolling passes

相关标准要求。

参考文献：

[1] 马腾飞，李宇力，周宣，等. 粗晶 GH4720Li 合金热变形行为与动态再结晶特点. 稀有金属材料与工程. 2020，49(1):201-208.

[2] MONAJATI H, JAHAZI M, BAHRAMI R, et al. The influence of heat treatment conditions on γ′ characteristics in Udimet® 720. Materials Science and Engineering: A. 2004;373(1-2):286-293.

[3] BI Z, QU J, DU J, et al. Thermal Plasticity of Hard-Deformed Superalloy GH4720Li and a Method of Fracture Prediction for Cogging. Procedia Engineering. 2012;27:923-31.

[4] 李凯，东赟鹏，郝红军，等. 热变形工艺对 GH720Li 合金棒材颗粒状未再结晶组织演变行为的影响. 热加工工艺，2019，48(5)：60-62.

[5] 阚志，杜林秀，胡军，等. GH4720Li 合金双道次热压缩变形过程的组织演变. 热加工工艺，2017，46(2):67-73.

[6] QU J L, BI Z N, DU J H, et al. Hot Deformation Behavior of Nickel-Based Superalloy GH4720Li. Journal of Iron and Steel Research International. 2011，18(10):59-65.

[7] 曲敬龙，杜金辉，王敏庆，等. GH4720Li 合金细晶棒材制备的热加工工艺研究. 材料工程. 2013(2),74-78.

[8] 阚志，杜林秀，胡军. GH4720Li 合金热变形行为和相变. 稀有金属材料与工程，2016, 45(2):363-368.

[9] 万志鹏，王涛，孙宇，等. GH4720Li 合金热变形过程动态软化机制. 金属学报，2019, 55(2):213-222.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1 铸铁件均衡凝固与有限补缩；2 铸铁件冒口补缩设计及应用；3 压边浇冒口系统；4 浇注系统大孔出流理论与设计；5 铸件均衡凝固工艺；6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7 浇注系统当冒口补缩设计方法；8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net