



固溶温度对优质 GH4738 合金静态再结晶行为的影响

荣 义^{1,2}, 侯为学^{2,3}, 杜金辉^{1,2,3}, 曲敬龙^{1,2,3}, 王 磊^{2,3}, 张麦仓⁴

(1 钢铁研究总院有限公司高温材料研究所, 北京 100089; 2 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081;

3 四川钢研高纳锻造有限责任公司, 德阳, 618000; 4 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京, 100083)

摘 要:采用光学显微镜、场发射扫描电镜和力学性能测试,研究了不同固溶温度对锻态优质 GH4738 合金再结晶行为的影响。研究表明:锻态优质 GH4738 合金在 1 040 °C 固溶过程中发生完全静态再结晶;当温度低于 1 040 °C 时,晶粒尺寸变化不大,在温度超过 1 050 °C 后晶粒粗化且均匀性较差。一次 γ' 相既有钉扎晶界,阻碍晶界迁移又有增加形变储能促进再结晶的作用,因此,在一次 γ' 相固溶温度(1 040 °C)附近固溶处理可以使优质 GH4 738 合金发生完全静态再结晶,细化晶粒,但是当保温时间过长(>4 h)或固溶温度过高(>1 050 °C)时,大量一次 γ' 相回溶于基体,合金晶粒迅速长大。合金强度随固溶温度升高先增加后下降,合金高温持久寿命受固溶温度影响显著。

关键词:固溶温度; 静态再结晶; 优质 GH4738 合金

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00133 **中图分类号:**TG1. 3+2

Effect of Solution Temperature on Static Recrystallization Behavior of High Quality GH4738 Alloy

Rong Yi^{1,2}, Hou Weixue^{2,3}, Du Jinhui^{1,2,3}, Qu Jinglong^{1,2,3}, Wang Lei^{2,3}, Zhang Maicang⁴

(1 High Temperature Material Research Center, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100089, China;

2 Beijing Cisri-Gaona Materials & Technology Co., Ltd. Beijing 100081, China; 3 Sichuan Cisri-Gaona Forging

Co., Ltd., Deyang 618000, China; 4 School of Materials Science and Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 10008, China)

Abstract: The effects of different solid solution temperature on the recrystallization behavior of as-forged high-quality GH4 738 superalloy were investigated by optical microscopy, field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and mechanical property tests. The results indicate that complete static recrystallization occurs in the as-forged high-quality GH4 738 superalloy during solid solution treatment at 1 040 °C. When the temperature is lower than 1 040 °C, the grain size changes slightly, while grain coarsening and poor uniformity occur when the temperature exceeds 1 050 °C. The primary γ' phase not only pins grain boundaries to hinder grain boundary migration but also increases deformation stored energy to promote recrystallization. Therefore, solution treatment near the primary γ' phase solid solution temperature (1 040 °C) can induce complete static recrystallization and refine grains in high-quality GH4 738 alloy. However, when the holding time is too long (>4 h) or the solid solution temperature is too high (>1 050 °C), a large amount of primary γ' phase redissolves into the matrix, leading to rapid alloy grain growth. The alloy strength first increases and then decreases with the rise of solid solution temperature, and the high-temperature creep life of the alloy is significantly affected by the solid solution temperature.

Key Words: Solid Solution Temperature; Static Recrystallization; High Quality GH4738 Alloy

优质 GH4738 合金作为一种 γ' 相强化的 Ni 基变形高温合金,其在 700~750 °C 下具有良好的力学性能,使其成为国内外先进航空发动机涡轮盘和环形件的优选材料。优质 GH4738 合金是在普通 GH4738 合金的基础上,通过 C、Al、Ti、S 等关键元素合金成分内控优化而成^[1-3]。目前,国内对优质

GH4738 合金的研究集中在热变形及其机理^[4-7];而对热处理的研究则集中在合金组织、性能随温度或时间的变化规律^[8-12],但是固溶热处理对合金的再结晶行为的影响却研究较少。因此,本文从亚固溶和过固溶热处理温度出发,对晶界碳化物和 γ' 相及晶界进行研究,以确定优质 GH4738 合金在固溶过

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3700403)

作者简介: 荣 义(1988—),男,硕士,高级工程师

E-mail: rongyi@cisri-gaona.com.cn;

收稿日期: 2025-05-09

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

程中的再结晶演变行为规律,为控制其最佳合金组织性能提供试验和理论依据。

1 试验材料与方法

试验所用的试样全部取自锻造后未热处理的涡轮盘。其主要化学成分见表1。研究了平均原始晶粒尺寸为40 μm的优质GH4738合金在亚固溶温度和过固溶温度(1 010~1 080 °C)/4 h保温后油淬,再经过845 °C/4 h空冷+760 °C/16 h空冷后,合金晶粒度和γ'相分布。具体试验条件见表2。采用光学金相显微镜和场发射扫描电子显微镜对合金微观组织进行观察。再利用Image-Pro Plus(IPP)等统计软件对合金晶粒尺寸以及γ'相、晶界碳化物进行统计。

表1 优质GH4738合金化学成分(质量分数)

alloy								%
Cr	Co	Mo	Al	Ti	Ni	Mn	Fe	
19.14	1.34	4.42	1.46	.24	余	0.0050	0.47	

表2 优质GH4738合金的试验条件

alloy								°C
亚固溶温度				过固溶温度				
1 010	1 020	1 030	1 040	1 050	1 060	1 070	1 080	

2 试验结果与分析

2.1 固溶过程中的晶粒尺寸变化规律

实验用合金经不同固溶温度保温4 h后晶粒尺寸变化如图1所示。利用IPP6.0统计的每种温度下合金的平均晶粒尺寸D_{mean}、最大晶粒尺寸D_{max}、最小晶粒尺寸D_{min}、尺寸均方差及总数统计见表3。

通过图1和表3可以看出,温度低于1 040 °C时,晶粒尺寸不随固溶温度而变化。而经过1 040 °C固溶后,由于静态再结晶的作用,部分区域

晶粒细化,如图1(e)中虚线框B区域所示。而有部分区域由于晶粒已经开始长大,如图1中虚线框A区域所示。二者综合的最终结果是平均晶粒尺寸减小,如图1所示。当温度升高到1 050 °C时,平均晶粒尺寸与锻态相当,但此时晶粒尺寸范围变大。晶粒尺寸统计标准差变大,说明不均匀性增加。此处为了增加统计结果的准确性,将1 040 °C和1 050 °C固溶的统计点增至2 500个以上。当温度高于1 050 °C时,晶粒尺寸迅速增大,且其标准差也随之增大。此温度点基体所有一次γ'相全部回熔于基体,晶界失去钉扎而晶粒快速长大。随温度升高,晶界扩散迁移的速度加快,最终合金的晶粒尺寸增大,如图1(g)和(h)所示。

2.2 优质GH4738合金锻态晶粒分析

图2(b)为原始锻态组织图2(a)的局部晶粒及晶界放大图。图2(b)中的1、2、4号分别对图2(a)中的1、2、4号箭头,可以看到1号和2号晶界处明显发生弯曲。说明优质GH4738合金在锻造变形后出现晶界弓出一再结晶形核。即晶界两侧位错密度不同,导致其内部亚晶尺寸不同,亚晶尺寸大且密度稀疏的晶粒,其内一部分亚晶向尺寸小且密度高的晶粒内引入,宏观表现为晶界弓弯^[13-14]。文献报道指出,再结晶核心的形成条件是与周围晶粒的取向差大于15°或晶核尺寸达到1~3 μm^[15-16]。由图2(b)中3~6可知,三叉晶界及孪晶界处存在尺寸在1~3 μm的晶粒,可认为其是动态再结晶核心经锻造后冷却过程中亚动态再结晶长大的结果,并且在锻造后冷却过程中,再结晶核心长大,而后在过固溶热处理过程中,晶粒开始进一步长大。

两种因素促进此现象的发生:

1)锻造变形结束后亚动态再结晶遗留下来的再结晶核心在固溶热处理过程长大,使平均晶粒尺寸减小。

再结晶核心形成之后,核心与周围变形基体

表3 实验用合金经不同固溶温度固溶+双时效处理后晶粒尺寸统计

Table 3 Grain size statistics after solid solution and aging at different temperatures

项目	试验温度/°C							
	锻态	1 010	1 020	1 030	1 040	1 050	1 060	1 080
平均值/μm	37.7	310.3	37.10	41.2	22.0	40.4	86.10	131.5
最大值/μm	140.8	14.7	128.7	154.1	124.1	278.5	405.5	537.0
最小值/μm	2.0	2.1	3.0	2.2	3.1	5.1	10.10	11.0
标准偏差	26.1	25.1	210.6	26.3	18.2	30.2	6.3	88.7
统计数量/个	673	6 104	614	5 102	2 735	4 110	6 106	6 102

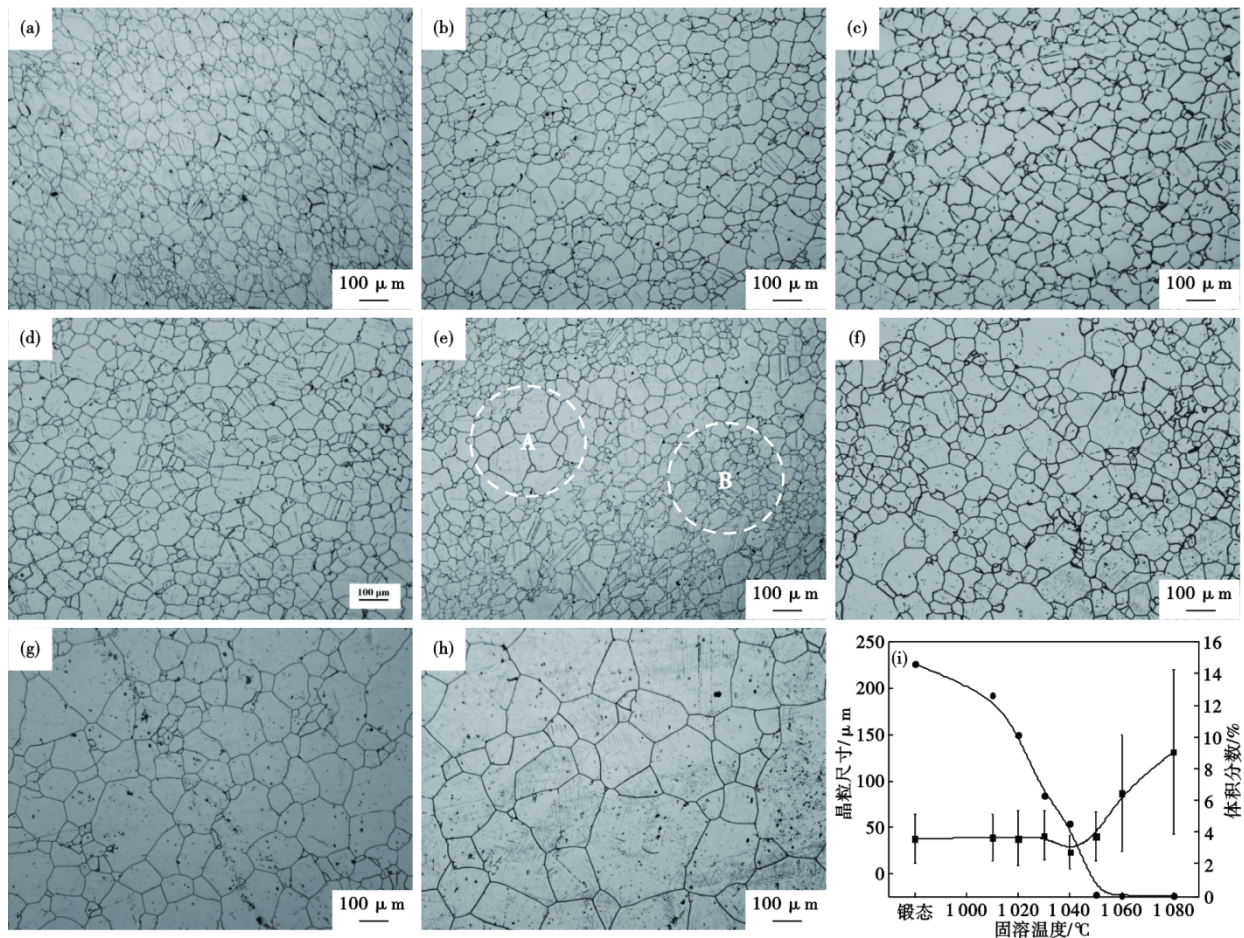


图1 实验用合金经不同固溶温度固溶+双时效处理后晶粒尺寸及γ'相变化:(a)锻态 ,(b)1 010 °C, (c)1 020 °C, (d)1 030 °C, (e)1 040 °C, (f)1 050 °C, (g)1 060 °C, (h)1 080 °C, (i)一次γ'体积分数及晶粒尺寸随固溶温度变化曲线

Fig. 1 Changes in grain size and γ' phase after solid solution and aging at different temperatures : (a) forged, (b) 1 010 °C, (c) 1 020 °C, (d) 1 030 °C, (e) 1 040 °C, (f) 1 050 °C, (g) 1 060 °C, (h) 1 080 °C, (i) primary γ' fraction and grain size with solid solution temperature

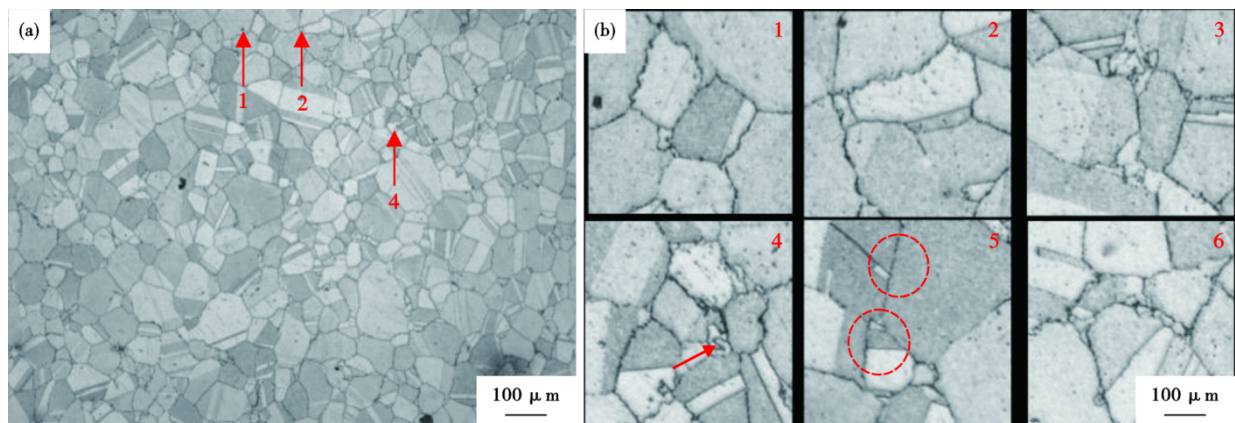


图2 优质GH4738合金晶粒形貌:(a)锻态晶粒, (b)局部组织

Fig. 2 Grain morphology of high quality GH4738 alloy : (a) forged grain, (b) local organization

的界面能差提供其长大的动力,晶界是朝着背离曲率中心向畸变区域推进,最后长大到等轴晶。而从图2 (b)中可以看到,各晶核为三角形或楔形,

所以,尚未达到晶核长大的稳态,在高温保温过程中,此部分晶核会继续长大,进入周围仍有畸变的大尺寸晶粒,成为等轴晶后,晶粒会自发长大,而此

过程长大的驱动力为界面能,由于再结晶核心长大后,仍有部分晶面为凹平面,而晶粒长大有促使其凹面变平作用,最终合金中大小晶粒尺寸匹配,起到一定的细化作用。如图3中箭头所示,为经过1040℃固溶处理,保温6h后,部分晶核长大,长入原始大晶粒尺寸内部,导致平均晶粒尺寸变小。

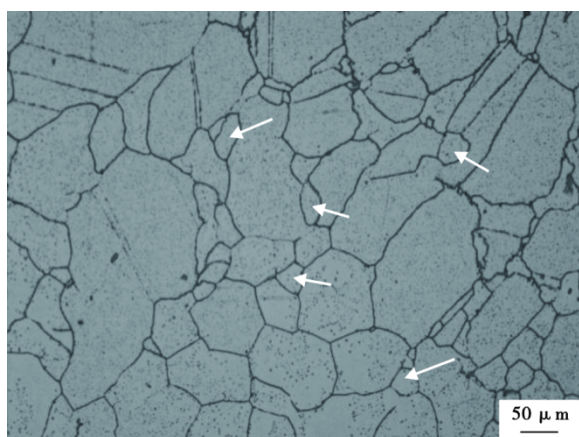


图3 再结晶核心长大导致晶粒细化

Fig. 3 Grain refinement due to recrystallization core growth

2) 锻造变形过程中动态再结晶不完全,固溶热处理过程中,合金发生静态再结晶,使晶粒细化。

由于变形量、变形温度、变形速率、原始晶粒尺寸、第二相粒子的存在、晶粒取向、退火保温时间等因素,动态再结晶进行的程度和温度会有差异。当动态再结晶条件不充足或者第二相粒子的钉扎作用强烈时,会出现动态再结晶不完全的现象。

2.3 优质GH4738合金固溶过程中的再结晶行为分析

图4为锻造后由于未完全动态再结晶而拉长的

晶粒轮廓图4(a)及其放大图4(b)的 γ' 相形貌,虚线勾勒出了再结晶与未再结晶晶粒间的晶界轮廓。从图4(b)中箭头所指可以明显看到除了细小的二次 γ' 相外,再结晶与未再结晶晶粒晶界处还存在大量不规则形状的一次 γ' 相。而且发现,再结晶晶粒(1)内与未再结晶晶粒(2)内一次 γ' 相存在明显密度差异,这是由于锻造变形后晶粒内部变形量不均匀,导致 γ' 相长大情况不同所造成的。

镍基高温合金的面心立方结构使其具有较低的层错能,因而在静态回复过程中消耗的形变储存能较少。形变储存能主要消耗于再结晶过程。而当局部变形量不足时,个别晶粒储存能无法在一定的锻造温度下完成动态再结晶,因而原始未再结晶的拉长的晶粒内储存了大量的位错及大部分形变储存能,图5(a)中虚线框内晶粒即图4(b)中2号区域所示的晶粒便是如此。锻造冷却后再固溶保温时,合金所处的状态如下:①基体中所有的尺寸较小的二次 γ' 相已经全部溶解,只有晶内和晶界尺寸较大的一次 γ' 相;②已经再结晶的合金晶内位错较少,只有在晶界附近存在位错聚集;③未再结晶晶粒内完成回复过程,亚晶形成,大部分形变储存能未释放。④初期由于大量一次 γ' 相钉扎,晶界无法迁移,晶粒尺寸不变。

一方面,当固溶温度较低或者固溶处理保温时间不长时,合金基体中仍有大量一次 γ' 相存在。一次 γ' 相在锻造过程中阻碍位错滑移,增加了形变储存能继而增加了合金的位错密度,能够促进再结晶发生。尤其当一次 γ' 相局部分布不均匀且较分散时,这些一次 γ' 相周围有较大的取向差,更有利于再结晶形核;另一方面,由于大量一次 γ' 相的钉扎

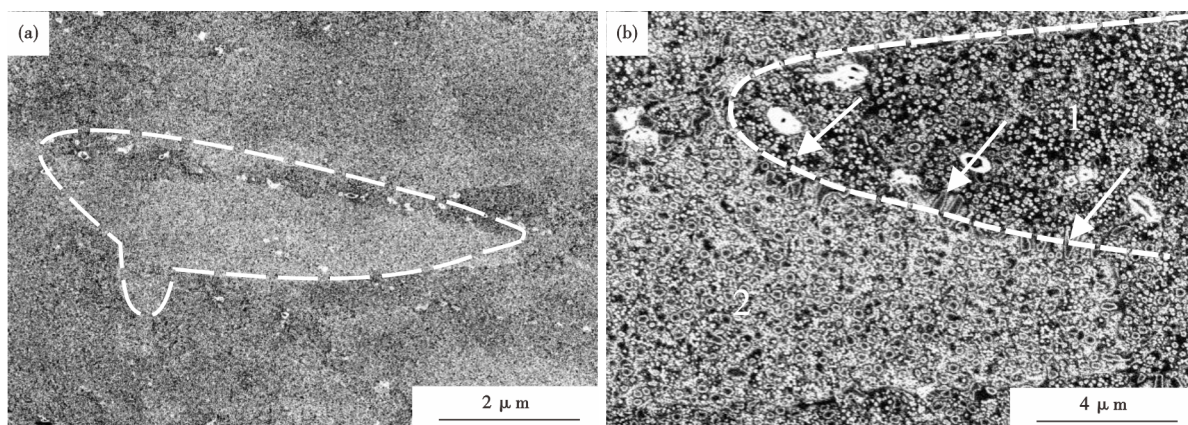


图4 变形拉长晶粒晶界附近 γ' 相形貌:(a)晶粒轮廓,(b) γ' 相

Fig. 4 Morphology of γ' phase near grain boundary of deformed elongated grain : (a) grain profile, (b) γ' phase

可以阻碍亚晶的合并及粗化,或者是阻碍晶界迁移,因此,又阻碍再结晶。只有固溶温度较高或者保温时间较长,大部分一次 γ' 相溶解后,才能使得静态再结晶和晶粒尺寸长大顺利进行^[17]。两个过程相互影响,导致优质GH4738合金静态再结晶过程较为复杂。也正是由于大量一次 γ' 相的钉扎作用,使得静态再结晶温度提高。加之,晶粒尺寸长大的温度也几乎是一次 γ' 相全溶温度。所以,在优质GH4738合金静态再结晶温度附近,温度略高,合金迅速发生再结晶,晶粒尺寸快速长大。

图5(a)为锻态合金EBSD扫描的界面图,其中,用细线标出的均为晶内小角度界面($<15^\circ$),可以看到A和B两个未再结晶的晶粒内部靠近晶界部分含有大量 2° 左右的界面,说明未再结晶的组织中含有大量的位错等亚结构,而再结晶晶粒C与未再结晶晶粒A、B接触的晶界位置位错较少,说明再结晶过程完成后,位错等缺陷被消除。

图5(b)为1030℃固溶处理保温4h的晶粒组织。在部分三叉晶界处观察到再结晶核心存在。从图6(a)可以看出,经过1030℃固溶处理保温4h后,虽然晶内一次 γ' 相含量和尺寸减小,但由于固溶温度相对 γ' 相完全溶解温度低,晶界处仍有大量一次 γ' 相钉扎,如1号箭头所示,此时由于晶界一次 γ' 相尺寸较大,且较密集,因此,对晶界迁移的阻碍作用大于促进再结晶作用,只有少量像2号箭头所指的部分才具有再结晶条件。但2号箭头晶界处又要同时满足有足够的位错缠结胞壁等亚结构,再结晶才能进行。因此,在1030℃保温时,合金几乎不发生静态再结晶。同时,由于一次 γ' 相的钉扎作用,晶粒无法长大。

图5(c)(d)及图6(b)(c)分别为1040℃固溶处理保温的晶粒组织及一次 γ' 相形貌。从图5(c)(d)可以明显看出,固溶时间从1h到4h,基体中再结晶晶核数量增多。当1040℃保温4h,出现了原始晶界项链状形核现象,且晶界弓弯变得更加明显。从图6(b)也可以看出,1040℃固溶处理保温,晶界一次 γ' 相尺寸明显减小,且回溶更多,但仍有一部分能够保持很好的钉扎作用,如图6(b)中1号箭头所示。而2号箭头所示位置,若晶内原始变形积累足够的形变能,加之失去一次 γ' 相钉扎,很容易成为再结晶形核的地方。而若此处为非变形组织晶界,则在持续的保温过程中,晶界可能继续迁移,从而晶粒尺寸长大,如图1(e)中虚线框

A中所示。图6(c)为在三叉晶界处再结晶形核并处于逐渐长大的过程中的一个晶粒。接下来的过程即晶粒长大的过程,但可以看到图6(c)中1号箭头所指的两个晶界均被一次 γ' 相钉扎,晶界无法迁移。而图6(c)中2号箭头处由于没有一次 γ' 相钉扎,晶界已经迁移并沿箭头方向凸出了一段。这完好揭示了再结晶之后晶粒长大的过程。由于此时晶粒形状为近似三角形,且晶界边缘部分凹向晶粒中心,为实现有效长大,使晶界达到平直化。若继续保温,一次 γ' 相将逐渐溶解,1号和2号箭头处晶界迁移,3号相对平直的晶界也会少量迁移,使晶粒尺寸继续粗化。也正是因为1040℃温度接近一次 γ' 相完全溶解温度,同时,又有适当的晶界一次 γ' 相密度,有利于静态再结晶形核而又不会过分阻碍位错及亚晶迁移,合金在界面处静态再结晶程度高。再结晶完成后,微小再结晶晶粒包围并长入原始晶界等界面,使合金晶粒尺寸细化。但合金在保温4h状态下,一次 γ' 相远未达到该温度下的平衡状态,因此,在再结晶晶粒尺寸细化的同时,仍保留有原始的形变硬化,且时效后大量细小尺寸的二次 γ' 相析出而强化晶内,最终合金有较高的强度,如图7所示。

图5(e)(f)及图6(d)分别为优质GH4738合金在1050℃固溶处理保温的晶粒组织及基体 γ' 相形貌。图5(e)为1050℃保温1h的组织,可以发现此时大部分晶界处都有静态再结晶晶粒出现。并且已经长大到一定程度。图5(e)右上角图还可以看到晶粒外围的项链状再结晶现象以及孪晶界形核长大的现象。此时平均晶粒尺寸仅有17.10 μm 。相比图5(c)所示,1040℃固溶1h后的平均晶粒尺寸30.2 μm 。其晶粒度差1~2级。这表明在1050℃保温1h合金迅速发生静态再结晶,且晶粒已经开始长大。图6(d)为1050℃保温4h基体 γ' 相形貌。右上角为保温1h的 γ' 相形貌。表明1050℃保温1h之后,基体中大部分晶界及晶内的一次 γ' 相均已溶解,此时已经大部分发生了静态再结晶。晶粒组织细化。而由于失去钉扎作用,在随后的保温过程中合金晶粒迅速长大。最终如图5(f)所示。平均晶粒尺寸达到40.4 μm 。但由于经过1050℃固溶后,合金静态再结晶完成,基体中积累的形变储存能释放完毕。即形变硬化效果消除。合金处于软化状态。再加之合金虽然平均晶粒尺寸较小,但大于原始锻态的晶粒尺寸的晶粒数目较多,如此

混晶的组织使得强度较1040℃有很大程度下降,如图7所示。

图7为不同固溶温度下保温4h后合金拉伸及持久性能随固溶温度变化曲线图。如图7(a)所示,当固溶温度从1020℃升温至1040℃时,合金强度上升;当固溶温度从1040℃到1050℃,强度迅速下降。这是因为在1040℃,合金内大部分发生了静态再结晶,晶粒明显细化,在变形过程中大量晶界对位错的阻碍作用增强,合金强度较高,而1050℃时,合金静态再结晶完全,且晶粒已经开始长大,最大尺寸晶粒已经远超过原始平均晶粒尺寸,加之再结晶之后锻造积累的形变硬化效果被消除,导致合金强度的下降。

如图7(b)所示,合金持久寿命随固溶温度的升

高先增加后降低,最后趋于平稳,其拐点为1030℃。固溶温度1000~1030℃时,随着固溶温度升高,晶粒尺寸明显增加,晶界数量减小,持久寿命增加;1030℃及更高温度的固溶处理,合金发生了静态再结晶,合金晶界处出现了细小的静态再结晶晶粒,形成大小尺寸分布不均匀的晶粒,大小尺寸晶粒之间形变不协调导致合金持久寿命降低。另外,固溶温度超过1030℃时,晶界处大量的一次 γ' 相发生溶解,造成晶界的强度降低,进而引起持久寿命降低。

3 结论

1) 锻态优质GH4738合金在1040℃固溶处理过程中发生完全静态再结晶;当温度低于1040℃时,晶粒尺寸变化大,在温度超过1050℃后晶粒粗

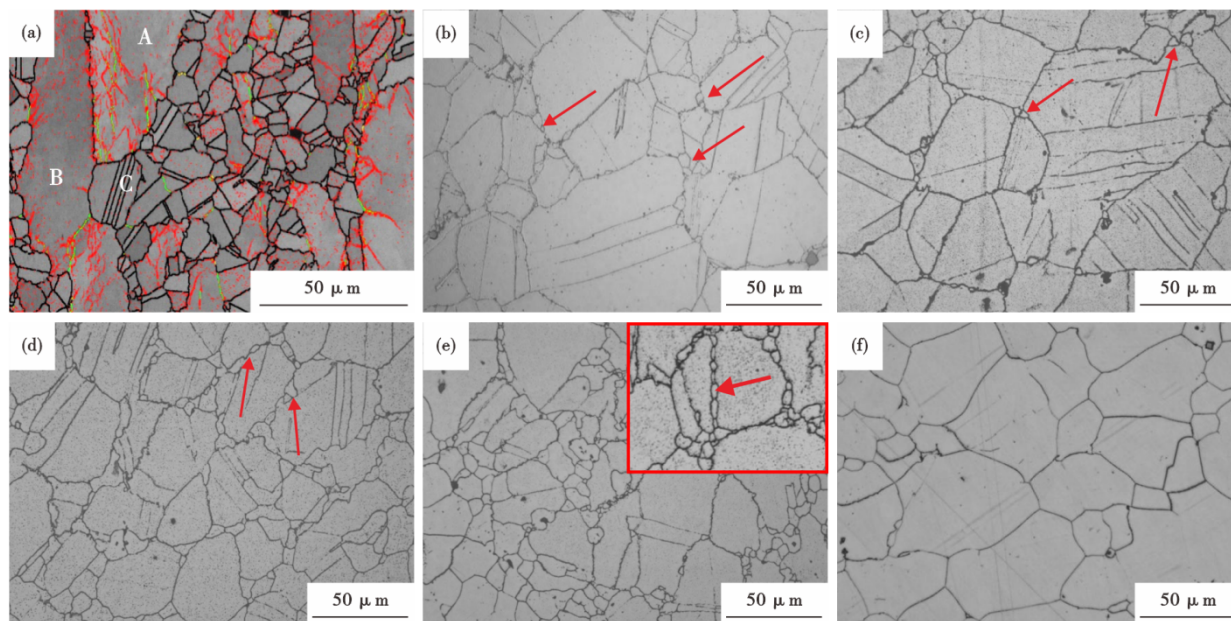


图5 实验用合金不同固溶保温条件下晶粒组织:(a)锻态,(b)1030℃/4h,(c)1040℃/1h,(d)1040℃/4h,(e)1050℃/1h,(f)1050℃/4h

Fig. 5 Grain of experimental alloy at different solid solution temperatures : (a) forged, (b) 1030℃/4 h, (c) 1040℃/1 h, (d) 1040℃/4 h, (e) 1050℃/1 h, (f) 1050℃/4 h

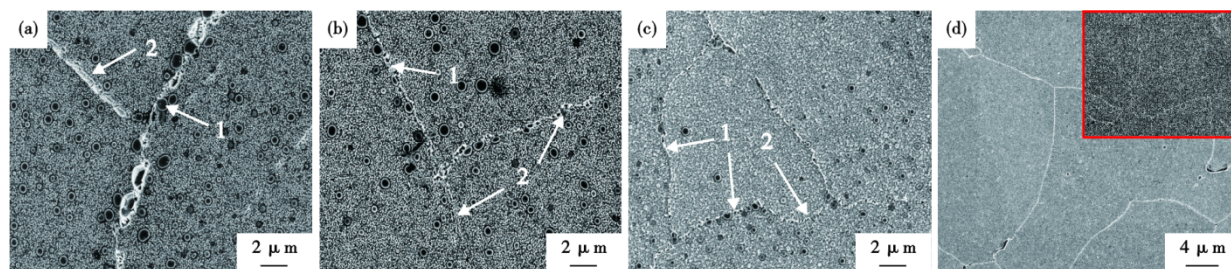


图6 实验用合金在不同温度固溶时晶界一次 γ' 相:(a)1030℃/4h,(b)1040℃/1h,(c)1040℃/4h,(d)1050℃/4h

Fig. 6 Primary γ' phase at grain boundary of experimental alloy at different solid solution temperatures : (a) 1030℃/4 h, (b) 1040℃/1 h, (c) 1040℃/4 h, (d) 1050℃/4 h

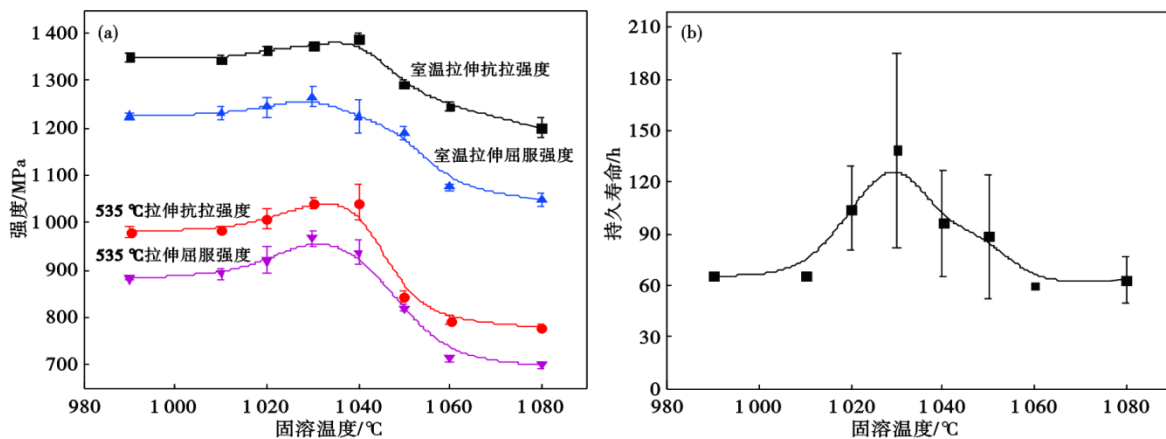


图7 固溶温度对优质GH4738合金拉伸强度及持久性能的影响:(a)拉伸强度,(b)持久寿命

Fig. 7 The effect of solid solution temperature on the tensile strength and creep life properties of high quality GH4738 : (a) tensile strength, (b) creep life

化且均匀性较差。

2) 由于一次 γ' 相既有钉扎晶界, 阻碍晶界迁移又有增加形变储存能促进再结晶的作用, 因此, 在一次 γ' 相固溶温度 (1040 °C) 附近固溶处理可以使优质 GH4738 合金发生静态再结晶, 晶粒细

化, 但是当保温时间过长 (>4 h) 或固溶温度过高 (>1050 °C), 由于大量一次 γ' 相回溶于基体, 合金晶粒迅速长大。

3) 合金强度随固溶温度升高先增加后下降, 合金高温持久寿命受固溶温度影响显著。

参考文献

- [1] 马亚芬, 李育升, 张麦仓, 等. 大尺寸优质GH4738合金铸锭的元素偏析规律及均匀化工艺[J]. 材料热处理学报, 20, 44(6): 81-89.
- [2] Xu H, Yang S F, Wang E H, et al. Competitive oxidation behavior of Ni-based superalloy GH4738 at extreme temperature[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(1): 138-145.
- [3] 崔天亮, 侯为学, 杨成斌, 等. GH4738合金的研究进展[J]. 中国冶金, 2025, 35(3): 16-33+11.
- [4] 荣义, 张麦仓, 杨成斌, 等. 优质GH738合金热变形过程中的再结晶机制[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(6): 530-538.
- [5] 王姝璐, 田庆旭, 曲敬龙, 等. GH4738大规格棒材初始晶粒分布对微粗晶粒组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(12): 4016-4029.
- [6] 牛文龙, 郭晶, 马思文, 等. 新型优质GH738合金的亚动态再结晶动力学模型[J]. 稀有金属材料与工程, 20, 51(1): 183-189.
- [7] 王姝璐, 田庆旭, 曲敬龙, 等. 高返回比GH4738合金的热变形行为及微观组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(3): 903-917.
- [8] 荣义, 成磊, 唐超, 等. 固溶冷却介质对优质GH738合金组织及力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(11): 74-78.
- [9] 李钢, 荣义, 杨成斌, 等. 稳定化处理对优质GH738合金组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(7): 65-71.
- [10] 吴玉博, 杨成斌, 侯为学, 等. 时效处理对优质GH738合金组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(12): 13-18.
- [11] 杨成斌, 李振团, 曲敬龙, 等. 长期时效对GH4738合金组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(9): 160-168.
- [12] 陈伟, 周江波, 岑凯强, 等. 固溶温度对GH4738晶粒组织与硬度的影响[J]. 特钢技术, 20, 29(1): 22-24.
- [13] Lifshitz I M, Slyozov V V. The kinetics of precipitation from supersaturated solid solutions[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1961, 19(1-2): 35-50.
- [14] Wendt H, Haasen P. Nucleation and growth of γ' -precipitates in Ni-14 at. % Al[J]. Acta Metallurgica, 198, 31(10): 1649-1659.
- [15] 宋维锡. 金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
- [16] 黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 59.
- [17] 秦鹤勇, 李振团, 赵光普, 等. 固溶温度对GH4742合金力学性能及 γ' 相的影响[J]. 材料研究学报, 20, 37(7): 502-510.