第 29 卷第 2 期 中国有色金属学报 2019 年 2 月
Volume 29 Number 2 The Chinese Journal of Nonferrous Metals February 2019
DOI：10.19476/j.ysxb.1004.0609.2019.02.06

长时间时效对 GH625 合金析出相和拉伸性能的影响

李亚敏，朱瑞明，刘洪军，贾 智

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室，兰州 730050)

摘 要：采用扫描电镜、透射电镜、X 射线衍射、拉伸实验研究长时时效对 GH625 合金析出相及其拉伸性能的影响，并采用绝热法和 Rietveld 全谱拟合法对合金在 720 ℃长时时效过程中主要析出相的体积分数进行了定量分析，进一步研究了析出相的体积分数与合金拉伸性能的关系。结果表明：GH625 合金在 720 ℃长时间时效过程中存在着 γ 相→γ'相→γ''相→δ 相的转变；随着时效时间的延长，γ''相与 δ 相的体积分数始终在增大，而 γ'相的体积分数则先增加后减少。析出相对 GH625 合金的拉伸性能有较大的影响。γ'相和 γ''相的析出能够提高合金的强度，但大量尺寸过大的 γ''相对合金的塑性不利；大量 δ 相的析出和长大使得合金的强度减小，但屈服强度比有所增加，而合金塑性则大幅降低。

关键词：GH625 合金；析出相；长时时效；定量分析；拉伸性能

文章编号：1004-0609(2019)-02-0262-08 **中图分类号**：TG156.92；O792 **文献标志码**：A

GH625 合金是以铬、钼和铌为主要强化元素的固溶强化型镍基高温合金，在 650 ℃以下具有良好的持久性能、耐腐蚀、抗氧化性能以及良好的力学性能，在航空、航天、核能、石油及化工等领域获得了广泛的应用[1−4]。作为一种固溶强化型高温合金，GH625 合金需要长时间在高温环境下保持其组织的稳定性，但是在中高温长时间使用过程中合金中会析出 γ'相、γ''相和 δ 相，大量 γ''相和 δ 相的析出会削弱合金的力学性能[5−6]。一般情况下，与析出相分布、形貌变化相比，合金析出相体积分数对合金性能的影响更大，因此，非常有必要研究 GH625 合金长期时效过程中析出相的体积分数对其力学性能的影响。

众所周知，合金元素可以利用光谱直读仪等设备方便、准确的测定，但对块状固态合金析出相的定量分析就要困难得多。通过金相图片定量分析合金析出相，虽然简便直观易于操作，但是作为一种间接手段它分析的是试样截面上某点的局部含量，当合金析出相的尺寸较小、分布不均匀或晶界变化明显时，便无法保证其分析结果的准确性；通过相图对合金相含量的理论计算，又无法得到亚稳态相的定量结果；而萃取分析方法过程繁杂、试验周期长，对于萃取结果不符合 Weibull 分布规律的需要重新进行萃取[7]，且该法只能保证萃取过程中所收集到的析出相含量的准确性，对于在萃取过程中引入的杂质和损失的析出相无法检测，另外萃取分析是一种破坏性的检测手段，无法重复试验结果。目前实际物相的定量分析一般都采用 XRD 的 K 值法或参比强度法，但在 GH625 合金中多种物相的衍射峰相互重叠，且析出相的晶格常数会随着组成元素的差异而略有变化，因此，对 GH625 合金中主要析出相的定量分析首先是基于各种物相精确的晶格常数，并对重叠峰进行准确分峰后才能进行定量分析。

在本文中采用绝热定量分析和 Rietveld 全谱拟合定量分析的方法[8−9]对 GH625 合金在高温长时时效过程中析出相的体积分数进行了半定量测算。这两种定量分析方法是基于对 XRD 试验数据进行不同的分析处理得到的，绝热法是 K 值法的简便应用，Rietveld 全谱拟合定量分析则是基于晶体结构计算通过对 XRD 的试验数据进行数学处理而得到，这两种分析方法简单易行、可重复操作，并且采用两种方法获得的实验结果亦能相互验证。为了验证实验方案的可行性，首先通过基于溶质元素在各相间的分配系数，求得了 1×10^3 h 时效态试样中 γ'相的理论值，并与这两种定量分析法的实验结果进行对比，发现 γ'相的理论含量

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51665032)
收稿日期：2017-11-06；**修订日期**：2018-01-24
通信作者：李亚敏，副教授，博士；电话：13993195230；E-mail：leeyamin@163.com

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

与两种方法获得的试验结果相差不超过 2%，表明这两种方法的准确性虽然比萃取结果稍差些，但在表征合金析出相含量的变化趋势时准确性已经足够。

本文采用扫描电镜、X 射线衍射、拉伸实验研究了长时时效对 GH625 合金析出相及其拉伸性能的影响，并采用绝热定量分析和 Rietveld 全谱拟合定量分析的方法对 GH625 合金在 720℃长时时效 1×10^3 h、3×10^3 h 和 5×10^3 h 过程中析出的 γ'相、γ''相和 δ 相的体积分数进行了定量估算，研究析出相的体积分数与合金拉伸性能的关系，旨在为 GH625 合金的工程应用提供参考。

1　实验

1.1　实验原理

绝热法适用于粉末和块状试样，要求试样中无非晶物质和未鉴定相，待测试样中不加内标物质，分别测定每一相最强峰的衍射积分强度，根据式(1)进行定量分析。

$$w_j=\frac{I_j}{K_i^j\sum_{i=1}^{N}\frac{I_j}{K_i^j}} \tag{1}$$

式中：w_j 为合金中 j 相的含量(质量分数)；I_j 为 j 相产生的衍射线强度；K_i^j 为衍射强度的比值系数(本文与 $I_{\alpha\text{-}Al_2O_3}$ 相比)。

标度因子反映了衍射线的强度随物相在混合物中所占的比例(体积或质量)、其散射力及其物相的吸收力的变化。全谱拟合定量分析法是根据标度因子与参考强度比间的关系为基础而推导出物相的相对含量与标度因子间的关系，如式(2)所示[9]：

$$w_j'=\frac{m_j}{\sum_p m_p}=\frac{S_jZ_jM_jV_{ju}}{\sum_p S_pZ_pM_pV_{pu}} \tag{2}$$

式中：S 是标度因子；Z 是晶胞内化学式数；M 是化学式的相对分子质量；V 是物相在样品中的晶胞体积；m 是物相在样品中的质量；w_j' 是物相在样品中含量(质量分数)。

根据式(2)，对于一定的物相，Z、M、V 是一定的，只要得到各相的标度因子 S，就可计算出各相的质量分数。而各相的标度因子 S 是通过全谱拟合得到的。本文采用 Jade 软件所提供的全谱拟合定量分析模块(WPF refinement)进行处理，从而估算各物相的实际含量。

1.2　实验方法

本次试验采用的 GH625 合金取自真空感应熔炼(VIM)加电渣重熔(ESR)双联工艺冶炼的铸锭，经均匀化后热锻成型圆柱坯并进行退火处理。合金成分如表 1 所示。沿着柱坯径向取样，长期时效实验在 SX−G18123 型节能箱式电炉中进行，在 720 ℃下分别时效 1×10^3 h、3×10^3 h 和 5×10^3 h，空冷。依据 GB/T 228−2002 的规定制备拉伸试样，规格尺寸如图 1 所示。在 WDW−100D 型电子万能试验机上进行常温拉伸试验，在原始标距 L_0 的范围内加装标距长度为 25 mm 的引伸计，拉伸速率 0.02 mm/min。力学性能取 3 个试样平均值。

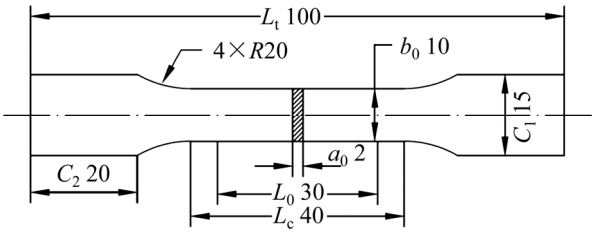

图 1　拉伸试样示意图

Fig. 1　Schematic diagram of tensile test specimen (Unit: mm)

表 1　GH625 合金主要化学成分含量

Table 1　Main chemical composition of GH625 alloy (mass fraction, %)

C	Cr	Mo	Nb+Ta	Fe
0.294	21.6	8.90	3.672	0.506
Si	Al	Ti	Co	Ni
0.0175	0.283	0.299	0.0254	Bal

采用 Quanta200 型扫描电镜对时效态和锻后退火态试样的显微组织进行观察，灯丝电压 10 kV；物相表征采用 D/max−2400 型 X 射线衍射仪，测试条件为 Cu K_α 射线，管电压 40 kV，管电流 150 mA，步长 0.02，扫描速度 7 (°)/min，光斑尺寸 2 mm×10 mm，扫描方式为连续扫描。

2　结果与分析

2.1　GH625 合金微观形貌

GH625 合金锻后退火态和高温长时时效态试样的二次电子形貌相如图 2 所示。从图 2(a)可以看出，GH625 合金锻后退火态的组织为单相奥氏体，合金晶内有孪晶组织；从图 2(b)~(d)可以看出，高温长时时

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

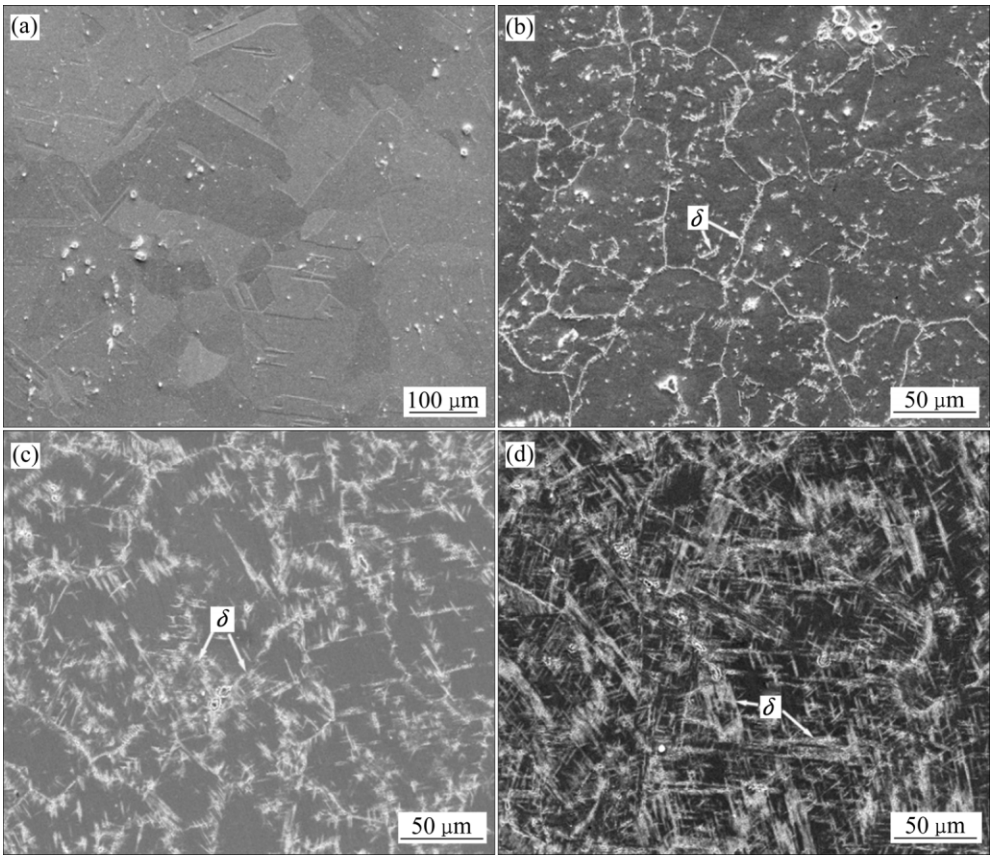

图 2 GH625 合金的二次电子形貌像

Fig. 2 Secondary electrons images of GH625 alloy: (a) As-annealed after forging; (b) Thermal aging for 1×10^3 h at 993 K; (c) Thermal aging for 3×10^3 h at 993 K; (d) Thermal aging for 5×10^3 h at 993 K

效过程中沿合金晶界析出了短棒状或针状的 δ 相，且随着时效时间的延长，δ 相数量由少到多，时效 5000 h 后，晶内也析出了大量的 δ 相。δ 相的 DO_a 晶体结构与基体相的 FCC 结构差别较大，因而 δ 相优先在晶界析出，自晶内析出的 δ 相与晶体不共格[10]，因而，δ 相在晶内的形核一般需要较大的结构起伏，优先在晶内颗粒物或与基体不共格的孪晶面等处析出。

GH625 合金晶内析出相 TEM 像如图 3 所示。图 3(b)~(d)所示为 γ''相时效 1×10^3 h、3×10^3 h 和 5×10^3 h 后的形貌变化。从图 3 可以看出，锻后退火态合金中无明显的 γ''相，1×10^3 h 时效后，大量呈碟片状的 γ''相以一定的生长方向从晶内析出；3×10^3 h 时效后，γ''相长大；5×10^3 h 时效后，大多数的 γ''相转变为 δ 相(见图 3(d))，晶内剩余 γ''相的尺寸进一步变大。

2.2 时效态合金析出相的 XRD 分析

GH625 合金的 XRD 谱如图 4 所示。从图 4 可以看出，实验所采用的 GH625 合金中没有非晶相；锻后退火态合金在 2θ 为 29° 附近还存在一个衍射峰，这是 γ 相在符合面心消光定律的(011)晶面处的衍射峰，长时时效后此衍射峰消失。由于 GH625 合金析出相的结构与基体相高度共格，所以析出相的衍射峰与基体相重叠，此时需要结合图 2 和图 3 的形貌分析才能对 XRD 谱做出准确的判断。由于 γ 相与 γ'相在空间 3 个方向上的晶格常数都极为接近，γ''相与 γ 相和 γ'相在两个方向上的晶格常数很接近，在另一个方向上具有近似两倍的关系[11]，这三种物相的晶体结构也紧密相关，具有 $L1_2$ 型晶体结构的 γ'相是以 γ 相面心立方为基的超结构，而具有 DO_{22} 结构的 γ''相是在 γ'相 $L1_2$ 型晶体结构上衍生出的长周期结构，$L1_2$ 结构的每一个(001)面经 1/2 ⟨110⟩ 位移便得到 DO_{22} 结构[11]。同时具有 DO_a 结构的 δ 相的最强衍射峰 2θ 也集中在 43° 附近，因此，在图 4 中，γ 相、γ'相、γ''相和 δ 相的最强衍射峰都堆叠在了一起。镍基合金的晶格常数与固溶元素的关系如式(3)、(4)所示：

对于 γ 相，

$$a=3.567+0.156\varphi'_{Ti}+0.372(\varphi'_{Nb}+\varphi'_{Ta})+0.248(\varphi'_{Mo}+\varphi'_{w}) \tag{3}$$

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

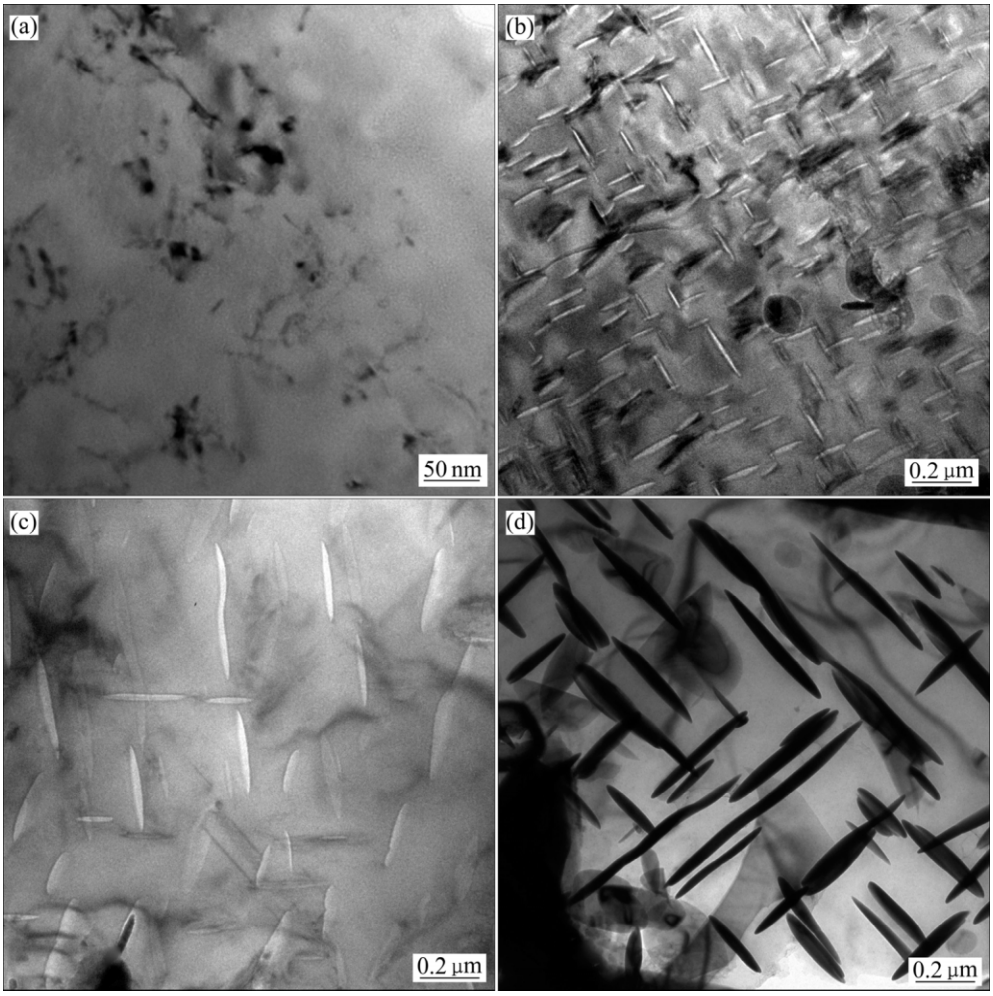

图 3　GH625 合金晶内 γ''相的 TEM 像

Fig. 3　TEM images of intragranular γ' phase and γ'' phase of GH625 alloy: (a) As-annealed after forging; (b) Thermal aging for 1×10^3 h at 993 K; (c) Thermal aging for 3×10^3 h at 993 K; (d) Thermal aging for 5×10^3 h at 993 K

对于 γ'相,

$$a=3.524+0.13\varphi_{Cr}+0.024\varphi_{Co}+0.421(\varphi_{Mo}+\varphi_{w})+0.183\varphi_{Al}+0.36\varphi_{Ti} \quad (4)$$

式中：φ_x 与 φ'_x(x 代表金属)为金属元素在 γ 相和 γ'相中的摩尔分数。考虑可能的各相晶胞常数对衍射角的影响，选取带有晶格结构的 γ 相、γ'相、γ''相和 δ 相的物相卡片用于精修，结合实际的 SE 形貌图谱，利用 Jade 软件所提供的全谱拟合定量分析模块(WPF Refinement)，对各时效态的衍射峰进行全谱分峰拟合处理，由于锻后退火态合金中主要为 γ 相，γ'相含量很少，因此，不做分峰处理。针对各析出相最强衍射峰(见图 4(a)中虚线部分)进行分峰处理后的放大部分如图 4(b)~(d)所示。采用绝热定量分析法和 Rietveld 全谱拟合定量分析法对各主要析出相的体积分数进行定量估算，其结果如图 5 所示。两种方法对 γ 相与 γ'相体积分数的计算相差不大。针对时效 1×10^3 h 的试样，根据成分元素在合金中主要析出相中的分配系数，扣除碳化物和氮化物的影响，计算得出的 γ'相的体积分数为 21%，这与绝热定量分析法和 Rietveld 全谱拟合定量分析法获得的 19%非常接近，误差为 2%。分别采用这两种定量分析方法获得的 γ''相与 δ 相的体积分数虽有差别，但结果相差小于 5%，并且两种方法获得的实验结果在表述时效过程中析出相体积分数的变化趋势上是一致的。从图 5 可以看到，随着时效时间的延长，γ 相与 γ'相的体积分数呈递减趋势，而 γ''相与 δ 相的体积分数却是逐步增加的，其中 δ 相的体积分数比 γ''相的增加地更快，这与合金形貌分析的结果也是一致的。

2.3　主要析出相的体积分数与合金拉伸性能的关系

GH625 合金的高温性能与其高温强化相的含量密切相关，强化相的体积分数与稳定性决定了 GH625

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

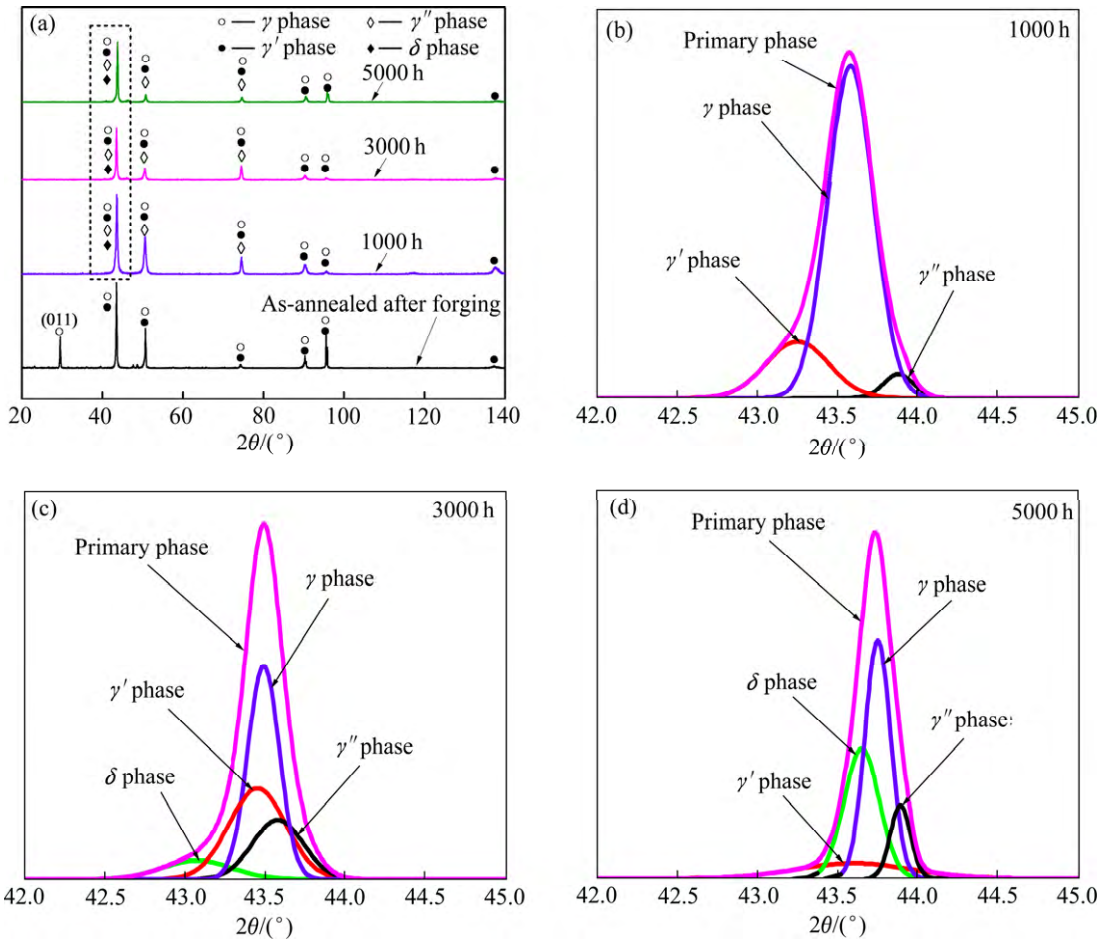

图 4 GH625 合金的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of GH625 alloy

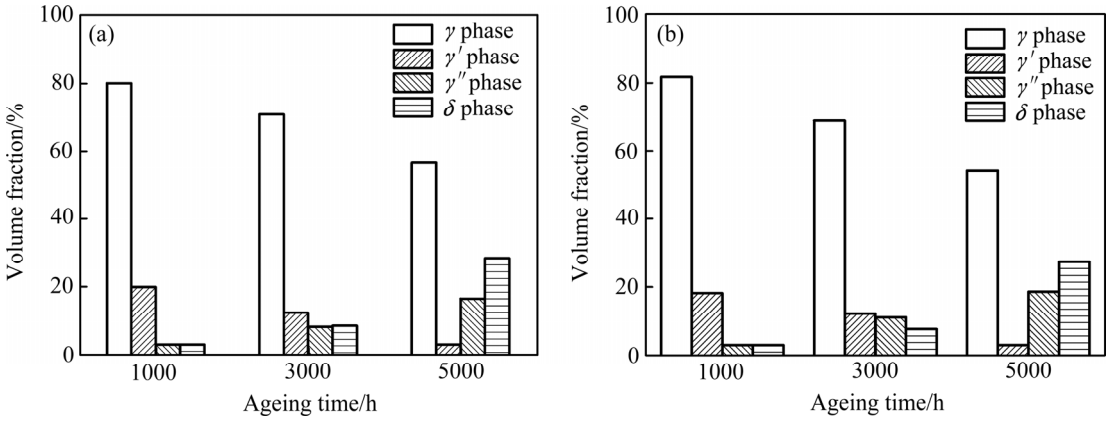

图 5 主要析出相含量与时效时间的关系

Fig. 5 Relationship of main precipitated phases content and aging time: (a) Analyzed by heat insulation method; (b) Analyzed by Rietveld fitting method

合金的高温性能。从上述试验结果可以看出，在 720 ℃高温时效过程中，随着时效时间的延长，合金中存在着 γ 相→γ′相→γ″相→δ 相的转变。由于在此转变过程中各析出相所要跨越的势垒是依次升高的[10]，因而各析出相在基体相中也是按照次序先后析出的，析出相的转变对合金的拉伸性能产生了很大的影响。

取 Rietveld 全谱拟合定量分析法和绝热法所得到的 γ′相、γ″相和 δ 相的体积分数的平均值，做合金的拉伸性能与时效时间的关系如图 6 所示。表 2 所列为析出相含量与时效时间的关系。在 GH625 合金的拉伸

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

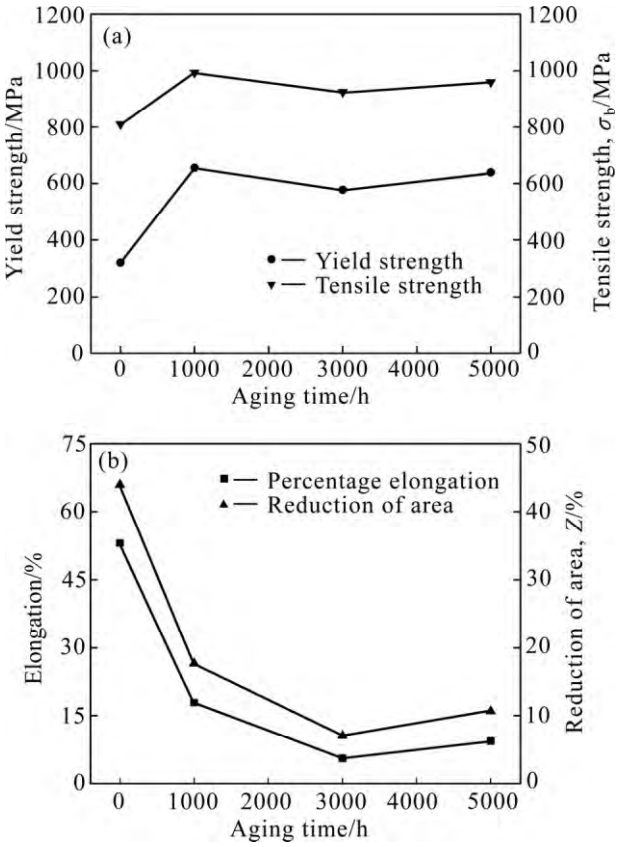

图 6　GH625 合金的拉伸性能与时效时间的关系

Fig. 6　Relationship between tensile properties of GH625 alloy and aging time

表 2　析出相含量与时效时间的关系

Table 2　Relationship between volume fraction of main precipitated phases and aging time

Aging time/h	Volume fraction/%			
	γ	γ'	γ''	δ
0	100	0	0	0
1000	71	19	≤5	≤5
3000	69	12	10	9
5000	50	≤5	17	28

图中上屈服点与下屈服点的差值极小，约为 1 MPa，屈服强度为条件屈服强度。无论是屈服强度还是抗拉强度，1×10^3 h、3×10^3 h 和 5×10^3 h 时效态试样都较锻态试样有较大程度的提高，但伸长率和断面收缩率随着时效时间的延长总体呈下降趋势。1×10^3 h 时效态试样同时具备较高强度和较大的伸长率，这主要是因为合金中主要强化析出相以 γ'相和 γ''相为主，γ'相与基体具有良好的共格特性，保证了在析出大量 γ'相强化合金时不会对合金的塑性产生较大的影响[12]。同时，较大尺寸的 γ''相与基体的错配度有所增加，也会导致共格应力变大从而加强强化效果[13−15]；另一方面，此时基体中 δ 相的含量少、尺寸小，且主要集中在晶界处，此时的 δ 相反而能够强化晶界提高合金强度，并降低缺口敏感性[16]。因此，虽然 1×10^3 h 时效态试样的伸长率(17.84%)较锻态的伸长率(53%)有较大程度的下降，但仍然较高。3×10^3 h 时效态试样的屈服强度有了明显的降低，同时，抗拉强度、伸长率与断面收缩率也有不同程度的减少。这是由于时效 3×10^3 h 后，晶内 γ'相数量减少，且晶内已有 δ 相析出，但析出并不太充分，对合金强度的贡献不大。而晶界处 δ 相的持续长大消耗了较多的 γ''相，导致强度减小，同时，γ''相尺寸进一步长大，过大的尺寸和孪晶界的减少都导致合金强化效果的减弱；3×10^3 h 时效态试样自晶内析出后各析出相的分布不均匀，使得拉伸时应力分布不均匀，也不利于合金强度。这些因素综合作用的结果导致 3×10^3 h 时效态试样的拉伸强度降低。5×10^3 h 时效态试样强度又有所提高，塑性则继续降低, 最主要的因素是 δ 相的充分析出和长大。由于 δ 相自身硬而脆的特点，大量析出和长大的 δ 相必然使合金强度有较大的提高，晶界处 δ 相的充分长大则进一步阻碍了位错运动形成塞积, 导致应力集中, 最终使 δ 相两侧出现裂纹的几率大大提高。另外，合金塑性也进一步降低，屈强比的增加说明合金的强度储备开始减小，合金有变脆变硬的趋势；同时，γ'相含量进一步减少, γ''相则随时效时间的延长不断长大, 与基体的错配度不断增加，共格关系不断减弱，这也使得合金的塑性大幅度降低。

3　结论

1) 采用绝热法和 Rietveld 全谱拟合法对 GH625 合金在 720 ℃长时时效过程中 γ'相、γ''相和 δ 相的体积分数进行了定量估算，采用两种方法获得实验结果在表述时效过程中主要析出相体积分数的变化趋势上是一致的。两种方法对 γ'相体积分数的计算结果非常接近, 而对 γ''相与 δ 相体积分数的计算结果稍有差别, 但计算结果相差小于 5%。

2) GH625 合金在 720 ℃长时时效过程中, 随着时效时间的延长，合金中存在着 γ 相→γ'相→γ''相→δ 相的转变，γ''相与 δ 相的体积分数始终在增大；时效 5×10^3 h 时，γ''相的体积分数为 17%，δ 相的则达到了 28%；而 γ'相的体积分数在时效 1×10^3 h 时达到了 19%，随后随着时效时间的延长大幅减少。

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

3) 析出相对 GH625 合金的拉伸性能有较大的影响。γ'相和 γ''相的析出能够提高合金的强度，但大量尺寸过大的 γ''相对合金的塑性不利；δ 相对合金塑性的影响巨大，当 δ 相的含量超过 5%时，合金的塑性大幅降低，大量 δ 相的析出和长大使得合金的强度有所降低但屈强比却有所增加。

REFERENCES

[1] 吾志岗，李德富. GH625 镍基合金的高温压缩变形行为及组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7): 1321−1327.
WU Zhi-gang, LI De-fu. Hot compression deformation behaviors and microstructure evolution of GH625 Ni-based alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20 (7): 1321−1327.

[2] 周海涛，刘志超，温盛发，李伟东. GH625 合金的动态再结晶行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(11): 1917−1922.
ZHOU Hai-tao, LIU Zhi-chao, WEN Sheng-fa, LI Wei-dong. Dynamic recrystallization behavior of GH625 superalloy during hot deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(11): 1917−1922.

[3] 王浩宇，董建新，张麦仓，郑 磊，姚志浩，章清泉. 浇注温度对 GH625 合金铸态显微组织的影响[J]. 工程科学学报, 2015, 37(11): 1469−1476.
WANG Hao-yu, DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, ZHENG Lei, YAO Zhi-hao, ZHANG Qing-quan. Effect of casting temperature on the microstructure of as-cast GH625 alloy[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(11): 1469−1476.

[4] 赵宇新. GH625 合金的冷变形及其对力学性能的影响[J]. 材料工程, 2000, 14(9): 36−37.
ZHAO Yu-xin. Cold deformation behaviors of GH625 alloy and their effects on the mechanical properties[J]. Journal of Materials Engineering, 2000, 14(9): 36−37.

[5] RAJANI ZAREIE H R, AILBARI MOUSAVI S A A. The effect of explosive welding parameters on metallurgical and mechanical interfacial features of Inconel 625/plain carbon steel bimetal plate[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 556: 454−464.

[6] GU Yu-li, TAO Chun-hu, WEI Zhen-wei, LIU Chang-kui. Microstructural evolution and mechanical properties of TIG welded superalloy GH625[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(1): 100−106.

[7] 马红旭，李友国. 硅钢中析出物的尺寸分布以及体积分数的测定[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(3): 328−330.
MA Hong-xu, LI You-guo. Measurement of size distribution and volume fraction of precipitates in silicon steel[J]. Materials Science and Engineering, 2002, 20(3): 328−330.

[8] 权淑丽，王 炜. X 射线衍射法测定热轧带钢氧化皮中相的含量[J]. 物理测试, 2015, 33(2): 22−25.
QUAN Shu-li, WANG Wei. Determination of content of phase of hot-rolled strip oxide scale by X-ray diffraction[J]. Physics Examination and Testing, 2015, 33(2): 22−25.

[9] 甘延玲，金头男，聂光临，崔素萍，郭 军. 全谱拟合定量分析方法及其影响因素的研究[J]. 分析科学学报, 2016, 32(1): 89−94.
GAN Yan-ling, JIN Tou-nan, NIE Guang-lin, CUI Su-ping, GUO Jun. Study on the effecting factors of quantitative analysis by Rietveld method[J]. Journal of Analytical Science, 2016, 32(1): 89−94.

[10] 凌 斌，钟炳文，杨玉荣，梁学锋，沈 飚. GH169 合金的相变研究[J]. 航空材料学报, 1994, 14(4): 1−7.
LING Bin, ZHONG Bing-wen, YANG Yu-rong, LIANG Xue-feng, SHEN Biao. On the phase transformation in superalloy GH169[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1994, 14(4): 1−7.

[11] SUAVE L M, CORMIER J, VILLECHAISE P, SOULA A, HERVIER Z, BERTHEAV D, LAIGO J. Microstructural evolutions during thermal aging of alloy 625: Impact of temperature and forming process[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(7): 2963−2982.

[12] 陈 篪，丁树深，王岫文. 镍基高温合金中位错与 γ'相的交互作用[J]. 金属学报, 1965, 8(2): 232−236.
CHEN Chi, TING Shu-shen, WANG Hsiu-wen. A study of the interaction of dislocations with γ'-precipitates in nickel-base high temperature alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1965, 8(2): 232−236.

[13] MATHEW M D, MURTY K L, RAO K B S, MANNAN S L. Evaluation of mechanical properties of aged alloy 625 nickel base superalloy using nondestructive ball indentation technique[C]// Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Amsterdam: North-Holl and Publishing Co., 1999: 285−292.

[14] RENHOF L, GUDER S, WERNER E. Hardness and phase analysis of IN 718 deformed at high strain rate[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2004, 379(4): 619−621.

[15] 胡壮麒，彭 平，刘 轶，金 涛，孙晓峰，管恒荣. 镍基合金中 γ'相界面的强化设计[J]. 金属学报, 2002, 38(11): 1121−1126.
HU Zhuang-qi, PENG Ping, LIU Yi, JIN Tao, SUN Xiao-feng, GUAN Heng-rong. Design of γ' phase Interface strengthening of nickel-base superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(11): 1121−1126.

[16] SUNDARARAMAN M, MUKHOPADHYAY P, BANERJEE S. Some aspects of the precipitation of metastable intermetallic phase in Inconel718[J]. Metall Trans A, 1992, 23(7): 2015−2028.

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

Effect of long-time aging on precipitated phase and tensile properties of GH625 alloy

LI Ya-min, ZHU Rui-ming, LIU Hong-jun, JIA Zhi

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The effect of long-time aging on the precipitated phase and tensile properties of GH625 alloy was investigated by scanning electron microscopy(SEM), transmission electron microscopy(TEM), X-ray diffractiometry and tensile tests. Using heat insulation method and Rietveld full spectrum fitting method, the volume fractions of the main precipitated phases of GH625 alloy during thermal aging were quantitatively analyzed. The relationship between volume fraction of precipitated phases and tensile properties was further analyzed. The results show that the γ phase in the microstructure of GH625 alloy transforms into γ' phase, γ'' phase and δ phase in sequence during long-time aging at 720 ℃.With aging time prolonging, the volume fractions of γ'' phase and δ phase increase, and the volume fraction of the γ' phase increases firstly and then decreases. The tensile properties of GH625 alloy are significantly affected by the precipitated phases. The γ' phase and γ'' phase can improve the strength of the alloy, but the γ'' phase with large size is not good to the plasticity of the alloy. The precipitation and growth of the large amount of δ phase decrease the strength of the alloy, but increase the yield ratio, while the plasticity of the alloy decreases greatly.

Key words: GH625 alloy; precipitated phase; long-time aging; quantitative analysis; tensile properties

Foundation item: Project(51665032) supported by the National Natural Science Foundation of China
Received date: 2017-11-06; **Accepted date:** 2018-01-24
Corresponding author: LI Ya-min; Tel: +86-13993195230; E-mail: leeyamin@163.com

(编辑　李艳红)

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