

GH4169 合金直接时效锻造过程的数值模拟

刘 东 罗子健

(西北工业大学材料科学与工程系, 西安, 710072)

NUMERICAL SIMULATION OF DIRECT-AGED FORGING PROCESS OF GH4169 ALLOY

Liu Dong, Luo Zijian

(Dept. of Materials Sci. & Eng., Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

摘 要 直接时效(DA)锻造工艺已成为生产 GH4169 合金涡轮盘锻件的基本方法之一。但实施 DA 锻造工艺时, 锻造过程的各个环节要求严格控制, 而且要有足够吨位的设备。参照在压力机上实施 DA 工艺的终锻过程, 用有限元变形—传热耦合分析方法对直径 520mm 和高度 190mm 的 GH4169 合金坯料在不同情况下的镦粗过程进行了数值模拟。大量计算结果表明, 在压力机上实施 DA 锻造工艺时, 为了获得优质 GH4169 合金涡轮盘锻件, 应合理确定压力机滑块速度, 尽可能改善润滑情况及适当提高模具预热温度。对于 GH4169 合金涡轮盘锻件, 采用等温 DA 锻造工艺可能是最佳的选择。研究结果对于在国内的生产条件下实施 GH4169 合金 DA 锻造工艺具有指导作用。

关键词 GH4169 合金 直接时效工艺 锻造 数值模拟

中图分类号 V261.3, TG316

Abstract The direct-aged (DA) processing has become the basic processing technology to produce GH4169 alloy disk forgings for high-performance aeroengines. During the DA processing, however, it is necessary to strictly control every step of forging process and employ the forging equipment with enough capacity. Referring to the finish forging process of DA processing in forging press, the upsetting processes of GH4169 billet with 520mm diameter and 190mm height under several conditions were simulated by coupled thermomechanical finite element method. The results of numerical simulation indicate that in order to obtain high-quality GH4169 alloy disk forgings, it is necessary to determine the ram velocity reasonably, improve the lubrication condition and raise the dies temperature appropriately. For the GH4169 alloy disk forgings, the isothermal DA forging process may be the best choice. The results of this study may provide a guide for DA processing of GH4169 alloy disk forgings at home.

Key words GH4169 alloy direct-aged processing forging numerical simulation

由于锻造工艺不断改进, 出现了所谓直接时效(DA)锻造工艺, 使 GH4169 合金锻件具有更高的强度和疲劳性能, 因而成为生产这种合金涡轮盘锻件的基本方法之一^[1]。DA 锻造的工艺过程如下: 将圆柱形坯料在 1020℃镦粗成饼坯, 在 980℃以足够的变形程度将饼坯终锻成涡轮盘锻件后, 不经固溶直接进行时效处理。DA 锻造工艺的实质是, 通过在 980℃终锻

后直接时效处理这种高温形变热处理过程提高 GH4169 合金涡轮盘锻件的强度和疲劳性能。

由于 GH4169 合金的变形抗力大以及锻件的组织和性能对坯料的冶金质量和锻造热力参数十分敏感,其锻造工艺不易掌握。并且这种合金的价格相当昂贵,因此,实施 DA 锻造工艺时,锻造过程的各个环节要求严格控制,而且要有足够吨位的锻压设备。

目前,数值模拟方法在制定合理的金属塑性加工工艺和模具设计中的应用日益广泛。这是因为数值模拟可将大量的现场试验工作在计算机上完成,从而大量节约试制费用和缩短试制周期。

根据以上所述,参照在压力机上实施 DA 锻造工艺的终锻过程,用有限元变形-传热耦合分析方法对大尺寸 GH4169 合金坯料在不同情况下的镦粗过程进行了数值模拟,以揭示主要锻造工艺参数对工件内应力-应变状态和温度分布情况以及变形载荷的影响,为在国内生产条件下实施 DA 锻造工艺提供理论依据。

1 数值模拟方法和 GH4169 合金的本构关系

GH4169 合金锻造过程中,工件、模具和周围介质之间存在热交换,而且这种合金是一种典型的粘塑性材料。因此,采用有限元变形-传热耦合分析方法进行数值模拟^[1]。

GH4169 合金在锻造过程中的动态特性对锻造热力参数十分敏感,因此,对这种合金的锻造过程进行数值模拟能否取得有意义的结果,很大程度上取决于所采用的本构关系,即流动应力与应变速率、变形温度和变形程度的关系。在进行数值模拟时,采用根据在 Thermecmaster-Z 型热加工模拟试验机上等温恒应变速率压缩试验结果所建立的本构关系^[3]

$$\dot{R} = D_0 + D_1 \ln Z + D_2 (\ln Z)^2 + D_3 (\ln Z)^3 \quad (1)$$

式中: \dot{R} 为流动应力; $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ 为 Zener-Hollomon 参数; $\dot{\epsilon}$ 为等效应变速率; Q 为激活能; R 为气体常数; T 为变形温度; D_0, D_1, D_2, D_3 分别为等效应变的函数。

误差分析表明,根据上述本构关系计算所得流动应力值与试验数据的偏差一般小于 7%。

2 计算内容,单元划分和有关参数的选取

参照压力机上 DA 工艺的终锻过程,用有限元变形-传热耦合分析方法对 GH4169 合金坯料在下列情况下的镦粗过程进行数值模拟:

情况 1 坯料尺寸: 直径 520mm, 高度 190mm; 模具尺寸: 直径 1000mm, 高度 300mm; 滑块速度 $v = 9.5 \text{ mm/s}$; 工件与模具接触面上的摩擦因子 $m = 0.2$; 始锻温度 980°C ; 模具预热温度 300°C ; 环境温度 20°C 。为了叙述方便,这种情况以后称为 DA 终锻过程。

情况 2 锻造过程中工件、模具和环境温度都维持在 980°C , $v = 0.19 \text{ mm/s}$ 。这种情况以后称为等温 DA 终锻过程。

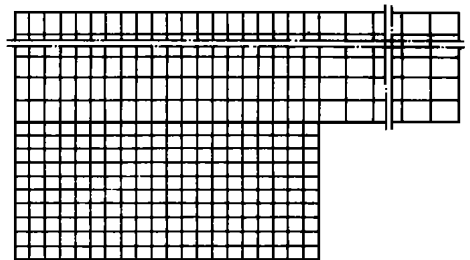


图1 单元划分情况

情况 3 m 值提高到 0.4, 其余参数同 DA 终锻过程。为了避免重复叙述, 介绍其余情况时, 只说明改变的参数。

情况 4 滑块速度 v 降至 0.95mm/s。

情况 5 始锻温度提高到 1000℃。

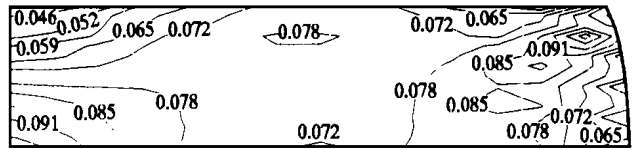
情况 6 模具预热温度提高到 400℃。

采用四边形四节点等参元进行有限元变形—传热耦合分析。单元划分情况示于图 1。有限元计算所需的热物理参数从文献[4~8]选取。

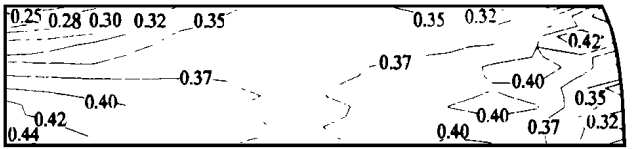
3 结果与分析

3.1 DA 终锻过程

高度压缩率 E 为 30% 时工件内等效应变速率和等效应变的分布情况示于图 2。从图中可以看出, 虽然工件心部和子午面对角线附件区域的等效应变速率较大, 但总的看来, DA 终锻过程中工件内难变形区域和小变形区域较小, 等效应变速率的分布比较均匀(图 2(a))。工件内等效应变的分布情况与等效应变速率的分布情况类似(图 2(b))。



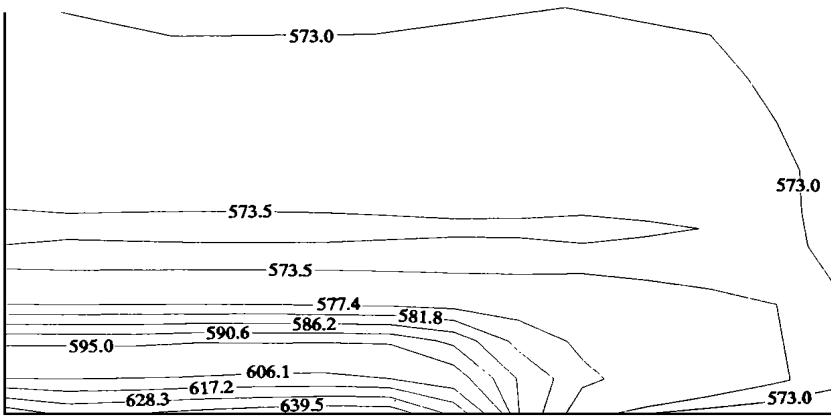
(a)



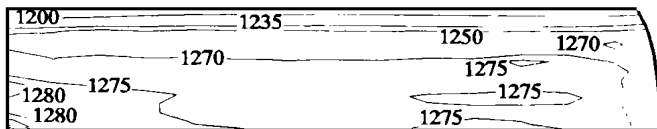
(b)

图 2 DA 终锻过程中工件内等效应变速率和等效应变的分布情况($E = 30\%$)
(a) 等效应变速率; (b) 等效应变

图 3 所示为 DA 终锻过程中模具



(a)



(b)

图 3 DA 终锻过程中模具和工件内温度分布情况($E = 30\%$)

(a) 模具; (b) 工件

和工件内温度分布情况。由于模具内没有内热源,模具内温度分布很快达到稳定状态。高度压缩率为 30% 时,除与工件接触面邻近部位,模具温度基本维持在 300℃ 左右(图 3(a))。从图 3(b) 可以看出,高度压缩率为 30% 时,由于变形热效应,工件内温度超过 1000℃ 的部分约占工件高度的 50% 左右,工件内最大温差可达 259℃。值得指出,如用图 3(b) 所示自由锻坯料加工 GH4169 合金涡轮盘,坯料内温度低于 930℃ 的部位可在机械加工过程中去除,因而可保证 GH4169 合金涡轮盘的组织 and 性能达到 DA 工艺的要求。

3.2 工艺参数对工件内应变和温度分布的影响

当润滑不良, m 值增大到 0.4 的情况下,工件内等效应变和温度的分布情况示于图 4。从图可以看出,工件与模具接触面润滑情况恶化,使工件端面质点沿径向流动所受阻力增大,导致变形集中在子午面对角线附近,工件内等效应变和温度分布的不均匀性增大(图 4(a),图 2(b),图 4(b),图 3(b))。因此,为获得组织性能均匀一致的 GH4169 合金涡轮盘锻件,应注意改善工件与模具接触面上的润滑情况。

压力机滑块速度降至 0.95mm/s 时,工件内等效应变和温度的分布情况示于图 5,降低压力机滑块速度,使工件内等效应变分布的不均匀性有所增大(图 5(a),图 2(b))。同时,降低压力机滑块速度使变形过程持续增长,变形热效应显著下降,导致工件内温度分布的不均匀性增大(图 5(b),图 3(b))。因此,在压力机上采用 DA 工艺生产 GH4169 合金涡轮盘锻件时,压力机滑块速度不宜过低。

图 6 与图 7 分别表示始锻温度为 1000℃ 和模具预热温度为 400℃ 这两种情况下工件内等效应变和温度的分布情况。将始锻温度提高到 1000℃,对工件内等效应变和温度分布没有明显影响,但工件内不少部位的温度在 1020℃ 以上,可能导致 GH4169 合金涡轮盘的组织 and 性能达不到 DA 工艺的要求(图 6(a),图 2(b),图 6(b),图 3(b))。将模具预热温度提高至 400℃,除使工件与模具接触面上的温度稍有升高外,对工件内各处等效应变和温度分布几乎没有影响(图 7(a),图 2(b),图 7(b),图 3(b))。

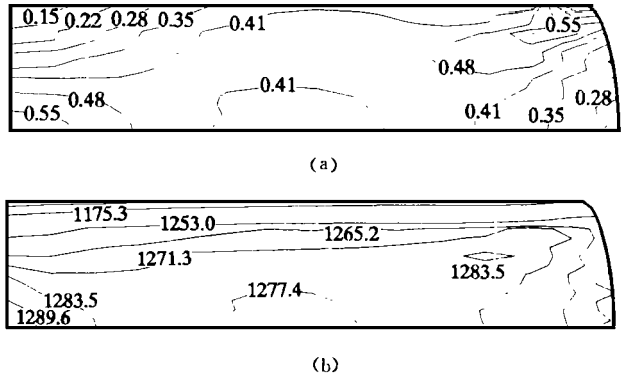


图 4 $m = 0.4$ 时工件内等效应变和温度的分布情况 ($\epsilon = 30\%$)

(a) 等效应变; (b) 温度

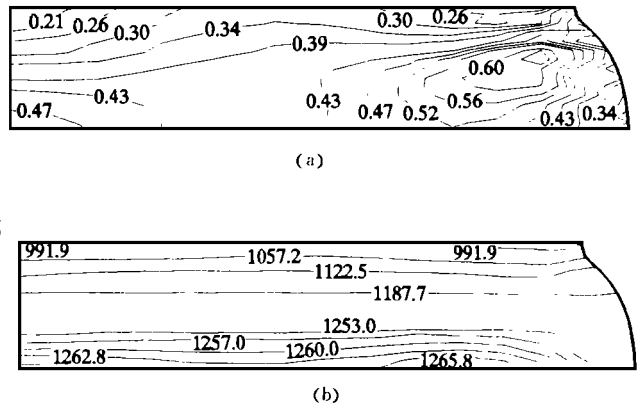
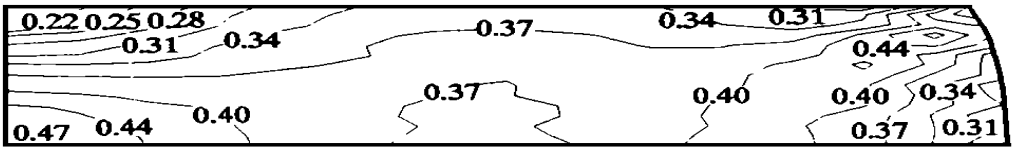
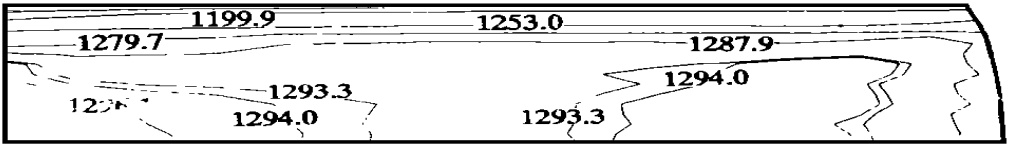


图 5 $v = 0.95 \text{ mm/s}$ 时工件内等效应变和温度的分布情况 ($E = 30\%$)

(a) 等效应变; (b) 温度



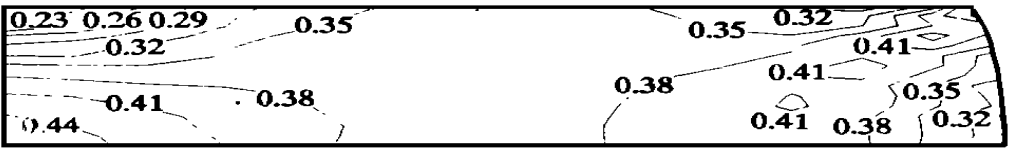
(a)



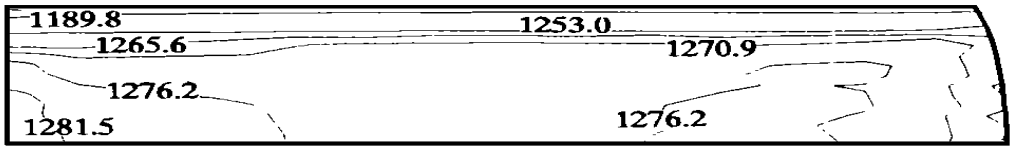
(b)

图 6 始锻温度为 1000℃时工件内等效应变和温度的分布情况(E= 30%)

(a) 等效应变; (b) 温度



(a)

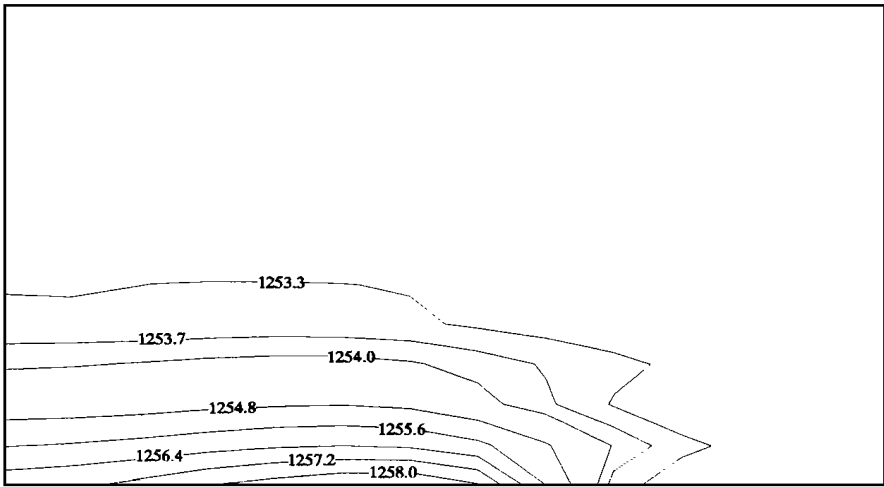


(b)

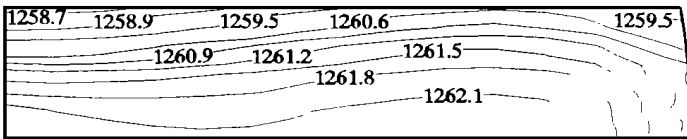
图 7 模具预热温度为 400℃时工件内等效应变和温度的分布情况(E= 30%)(a)等效应变; (b)温度
温度最高可达 985℃, 因而需要采用特殊的模具材料, 如钼基合金。

3.3 变形载荷和平均单位压力

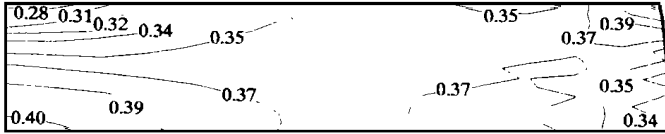
各种情况下变形载荷和平均单位压力随高度压缩率变化的情况示于图 9。从图 9 中可以看出, 对于 DA 终锻过程, 高度压缩率达到 30% 时, 变形载荷和平均单位压力分别达到 90MN 和 300MPa, 工件与模具接触面上润滑情况恶化使变形载荷和平均单位压力显著增大。降低压力机滑块速度, 在高度压缩率大约达到 20% 之前, 变形载荷和平均单位压力比 DA 终锻过程有所下降。但高度压缩率达到 30% 时, 由于变形过程持续时间较长和变形热效应显著降低, 使变形载荷和平均单位压力反而超过 DA 终锻过程。提高始锻温度和模具预热温度能使变形载荷和平均单位压力有不同程度的下降, 但效果并不明显。等温 DA 终锻过程中平均单位压力在 110~120MPa 范围内变动, 因此, 35MN 的压力机就基本上能满足生产大型 GH4169 合金涡轮盘锻件的要求。



(a)



(b)



(c)

图8 等温 DA 终锻过程中工件内等效应变和温度及模具温度分布情况 (E=30%)

(a) 模具温度; (b) 工件温度; (c) 等效应变

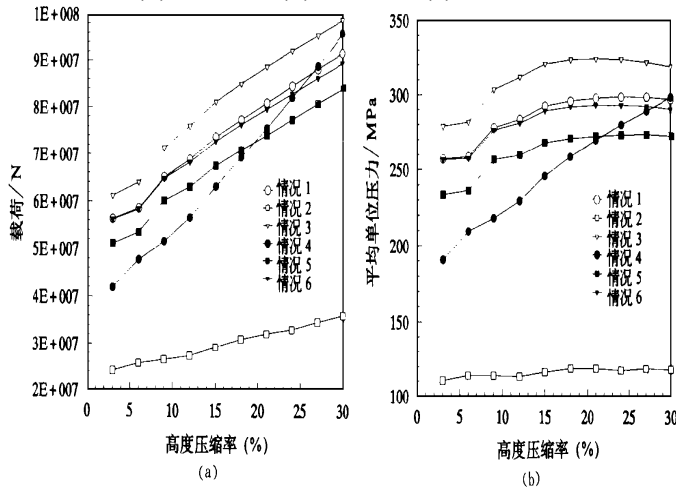


图9 变形载荷和平均单位压力随高度压缩率的变化曲线

(a) 变形载荷; (b) 平均单位压力

4 结 论

(1) 为了获得优质 GH4169 合金涡轮盘锻件, 在压力机上实施 DA 锻造工艺时, 应合理确定压力机滑块速度, 尽量改善工件与模具接触面上润滑情况和适当提高模具预热温度。

(2) 等温 DA 终锻过程中, 工件内等效应变和温度分布都十分均匀, 因而锻件的质量容易控制。此外, 与 DA 终锻过程相比, 等温 DA 终锻过程所需设备的吨位小得多。因此, 对于大型 GH4169 合金涡轮盘锻件, 等温 DA 锻造工艺是值得考虑采用的生产方法。

参 考 文 献

- 1 Jain S C, Bardes B P. Trends in aerospace forgings in the 1990s. JOM, 1994, (5): 49~53
- 2 Kobayashi S, Oh S I, Altan T. Metal forming and the finite element method. Oxford University Press, 1989
- 3 刘东, 罗子健. 以 Zener-Hollomon 参数表示的 GH169 合金本构关系. 塑性工程学报, 1995, 2(1): 15~21
- 4 高温合金手册编写组. 高温合金手册. 遵化: 遵化印刷厂, 1982
- 5 Aerospace structure metals handbook. Publication, 1983
- 6 ASM metals reference book. 2nd. edition, OH44073: Metals Park, 1983
- 7 Holman J P. Heat Transfer. 4th edition, McGraw-Hill Book Co, 1976
- 8 Semiatin S L, Collings E W, Wood V E, et al. Determination of the interface heat transfer coefficient for non-isothermal bulk-forming process. ASME J. of Engineering for Industry, 1987, 109(2): 49~57