

# 终锻温度对 GH4738 高温合金热变形行为的影响

江河<sup>1,2</sup>, 李姚军<sup>2</sup>, 刘其源<sup>2</sup>, 董建新<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 无锡派克新材料科技股份有限公司, 江苏 无锡 214161)

**摘要:** 采用非持续加热方式设计非等温热模拟压缩实验, 模拟不同终锻温度条件下 GH4738 高温合金的热变形行为, 并结合组织观察分析终锻温度对 GH4738 合金组织均匀性以及后续热处理过程组织遗传性的影响规律。研究表明, 在相同始锻温度条件下, 终锻温度过低会抑制 GH4738 合金热变形过程中动态再结晶的发生, 从组织上表现为再结晶程度较低, 从流变曲线上表现为变形抗力明显升高; 并且由于终锻温度过低所导致的不充分再结晶组织, 在后续热处理过程中易发展为混晶组织, 从而影响合金的组织均匀性。为保证锻件组织均匀性, 在制备过程中应合理控制终锻温度。

**关键词:** 镍基变形高温合金; GH4738; 终锻温度; 热变形; 组织

中图分类号: TG146.1<sup>+</sup>5; TG316

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)07-2552-05

GH4738 合金是一种  $\gamma'$ 相沉淀强化的镍基变形高温合金, 国际相近合金牌号为 Waspaloy。该合金在 760~870 °C 之间具有较高的屈服强度、抗疲劳裂纹扩展性能、耐蚀性能, 因此在航空航天、石油化工等领域有广泛应用, 适用于制造涡轮盘、叶片、环形件、螺栓紧固件等<sup>[1-5]</sup>。

高温合金因合金化程度较高, 热加工过程中的组织控制较为复杂, 并且对工艺参数极为敏感<sup>[6]</sup>。针对 GH4738 合金的热变形行为各国也展开了一系列的研究。GH4738 合金的热加工区间在 982~1162 °C 之间, 且锻造后的组织对变形温度敏感。Donachie 等<sup>[7]</sup>在 20 世纪 70 年代就曾指出, 锻造温度过高会使 GH4738 合金中一次 MC 碳化物溶解, 并在 1080 °C 左右再次在晶界析出薄膜状碳化物 MC, 从而使合金的塑性降低。洪成淼<sup>[8]</sup>通过大量实验和组织分析提出 GH4738 合金最佳热加工控制温度的模型, 最佳热加工控制温度  $T_{OHW}$  (optimal hot working) 可表示为  $T_{OHW}=T_{\gamma}+n(T_{MC}-T_{\gamma})$ , 其中  $T_{\gamma}$  和  $T_{MC}$  分别为  $\gamma'$  相和 MC 碳化物的回溶温度, 受合金成分影响。

有限元模拟为 GH4738 合金热变形过程工艺参数设计和组织控制提供了良好的参考。Shen 等<sup>[9]</sup>通过等温热模拟压缩实验构建了 Waspaloy 合金的再结晶组织演化模型, 并耦合有限元软件进行热变形过程的组织预测, 为利用有限元模拟进行该合金的热变形工艺设计奠定了良好的基础。李林翰等<sup>[10]</sup>对 GH4738 合金

涡轮盘从锻前预热到模锻完成整个锻造过程进行了集成化的有限元模拟, 并进行工艺优化, 在此基础上成功锻造出直径 1450 mm 的 GH4738 合金涡轮盘。

GH4738 合金锻件在实际锻造过程中, 最终产品组织和质量与工艺参数直接相关<sup>[11, 12]</sup>, 其中终锻温度是重要工艺参数之一。Bailey 等<sup>[13]</sup>开展了相同始锻温度、不同终锻温度下 Waspaloy 合金性能的比对研究, 结果表明, 终锻温度对合金的室温抗拉强度有明显影响, 对塑性稍有影响。在 GH4738 环锻件的制备过程中, 也发现终锻温度和锻后冷却速度会影响环锻件的组织均匀性<sup>[14]</sup>。在 GH4133 合金终锻温度对组织性能的影响研究中也有相似结果<sup>[15]</sup>。

通过以上讨论可以看出, 工艺参数与组织的关联性在 GH4738 合金锻件组织控制中极为重要, 虽然 GH4738 合金热变形过程中组织演变规律和机理已有一系列的研究<sup>[16, 17]</sup>, 但终锻温度对 GH4738 合金组织的影响尚无系统性报道。为此, 本研究通过非持续加热进行热模拟压缩实验, 研究终锻温度对 GH4738 合金热变形组织的影响, 以及在后续热处理过程中的遗传性, 以期在实际生产中的组织控制提供实验依据和理论参考。

## 1 实验

实验用 GH4738 合金为真空感应熔炼加真空自耗双联工艺冶炼, 铸锭均匀化开坯后经多火轧制成棒材,

收稿日期: 2020-08-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51701011); 中央高校基本科研业务费 (FRF-TP-19-038A2); 无锡市产业前瞻与关键技术研发项目

作者简介: 江河, 女, 1988 年生, 博士, 讲师, 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083, 电话: 010-62332884, E-mail: jianghe17@sina.cn

合金成分(质量分数, %)为: C 0.049, Cr 18.69, Co 13.42, Mo 4.72, Ti 2.98, Al 1.31, Fe 0.04, Zr 0.08, Ni 余量。

热模拟压缩实验采用  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的圆柱形试样, 在 Gleeble-1500 热模拟压缩试验机上进行。试样以  $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$  的速度加热至变形温度(始锻温度)并保温 10 s, 然后将热模拟试验机断电, 从而停止加热及保温, 并开始压缩变形, 实验流程如图 1 所示。始锻温度分别为 1040、1080、1120 和 1160  $^\circ\text{C}$ , 应变速率为 0.1 和  $1 \text{ s}^{-1}$ , 变形量为 15%、30% 和 50%。变形过程中通过传感器记录应力-应变数据, 采用温度热敏仪记录压缩结束时的温度作为终锻温度, 从而更加贴近实际热加工过程中材料经历的状态。

热压缩完成后立即采用水冷, 保留变形组织。将变形后的样品沿轴线剖开, 其中一半进行组织形貌观察, 另一半进行热处理: 1050  $^\circ\text{C}/4 \text{ h}/\text{空冷}+845 \text{ }^\circ\text{C}/4 \text{ h}/\text{空冷}+760 \text{ }^\circ\text{C}/16 \text{ h}/\text{空冷}$ , 用于分析热变形组织在热处理过程中的遗传性。

为对样品进行金相组织观察, 样品经过手工打磨、抛光后, 采用 3 g  $\text{KMnO}_4+10 \text{ mL H}_2\text{SO}_4+90 \text{ mL H}_2\text{O}$  的混合溶液煮沸 8 min 进行侵蚀, 然后用草酸溶液进行超声波清洗。扫描电镜组织观察样品抛光后, 采用 20%  $\text{H}_2\text{SO}_4+80\%$  甲醇混合溶液进行电解抛光, 之后采用 150 mL  $\text{H}_3\text{PO}_4+10 \text{ mL H}_2\text{SO}_4+5 \text{ g CrO}_3$  混合溶液进行电解侵蚀。

## 2 结果与讨论

### 2.1 终锻温度对流变曲线的影响

图 2 是相同始锻温度、不同终锻温度条件下 GH4738 合金的应力-应变曲线。从图中可以看出, 随着始锻温度的升高, 合金的变形抗力降低。终锻温度变化对 GH4738 合金变形抗力的影响显著。与始锻温度相比, 当样品终锻温降不明显时, 流变曲线呈现出

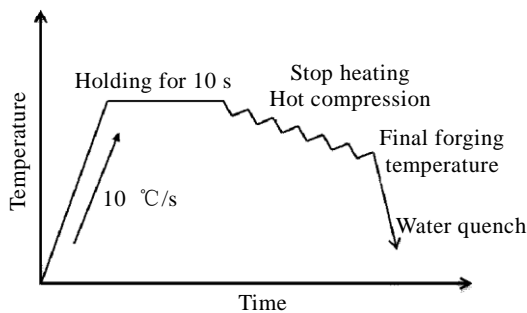


图 1 热模拟压缩实验流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulated hot compression test process

开始阶段应力急剧上升, 之后应力值逐渐趋于稳定的特征, 表明热变形过程中发生了动态再结晶<sup>[18]</sup>。变形初期由于位错萌生和增殖, 流变曲线呈现出加工硬化的特征<sup>[19]</sup>, 并且在高温合金等低层错能合金中位错的交滑移和攀移较为困难, 因此应力值增加较为迅速<sup>[20]</sup>。当位错密度累积到一定程度以后发生动态再结晶带来软化作用, 使流变曲线逐渐进入稳态<sup>[21]</sup>。但在出现明显终锻温降的情况下, 流变曲线呈现出持续上升的趋势, 从图 2a 中可以看出, 当终锻温度比始锻温度降低 152  $^\circ\text{C}$  时, 终锻的变形抗力增加约 200 MPa。随着始锻温度的升高, 终锻温降所引起的变形抗力增加现象更为明显。这主要是因为变形是一个热激活过程, 随着温度的降低, 原子的平均动能降低, 晶体滑移的临界切应力升高, 导致位错运动和晶体滑移的阻力升高<sup>[22]</sup>。在热加工过程中若温控措施不当, 使合金发生了明显的温降将导致变形抗力增加, 增加热变形的难度。

### 2.2 终锻温度对热变形组织的影响

高温合金在热变形过程中会发生动态再结晶, 而热变形的组织控制是高温合金研究的关注点, 终锻温度对热变形后合金的晶粒尺寸、组织均匀性、析出相分布等均有重要影响, 从而影响合金的力学性能<sup>[23]</sup>。

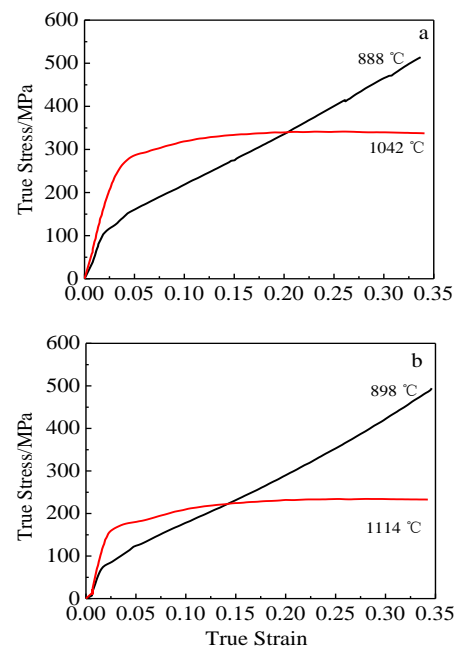


图 2 始锻温度为 1040、1120  $^\circ\text{C}$  时终锻温度对 GH4738 合金流变曲线的影响

Fig.2 Effect of final forging temperature on flow curves of GH4738 superalloy with initial forging temperature of 1040  $^\circ\text{C}$  (a) and 1120  $^\circ\text{C}$  (b)

图 3 是 GH4738 合金始锻温度为 1080 °C 条件下随着变形量的增加终锻温度逐渐降低, 不同终锻温度条件下合金的组织变化情况。从图中可以看出, 当真应变为 0.163 时, 样品已经发生了明显的温降, 终锻温度为 988 °C, 原始晶界上有细小的再结晶晶粒, 发生了一定程度的再结晶。在等温热模拟压缩实验过程中, 随着变形量的增加再结晶程度会继续增加, 但是在本研究的非等温热模拟压缩实验中, 当真应变达到 0.356 时, 终锻温度降至 903 °C, 原始晶界附近有细小的再结晶晶粒, 再结晶程度并未明显增加。当变形量增加至 0.693 时, 终锻温度降至 777 °C, 再结晶程度仍旧较低。通过比对可以看出, 由于变形过程中发生了明显的温降, 终锻温度过低, 即使在较大的变形

量下合金的再结晶程度依旧较低, 无法通过热变形起到改善组织的作用。

图 4 是始锻温度为 1040 °C 变形量为 30% 时不同终锻温度的组织对比。从图中可以看出, 终锻温度较低时原始晶粒只发生了压缩变形, 并未观察到再结晶晶粒, 即在热变形过程中无明显的软化机制, 从而使热压缩过程的流变曲线应力值持续增加, 与图 2a 的现象一致。对于终锻温度为 1042 °C 的样品, 温度比始锻温度上升 2 °C, 热变形后的组织在被拉长的原始晶界上分布着细小的再结晶晶粒, 呈现出项链组织, 属于典型的动态再结晶组织形貌。在热压缩过程中发生了明显的动态软化<sup>[18]</sup>, 因此流变曲线应力值平稳, 与图 2a 中所观察到的流变曲线特征相符。

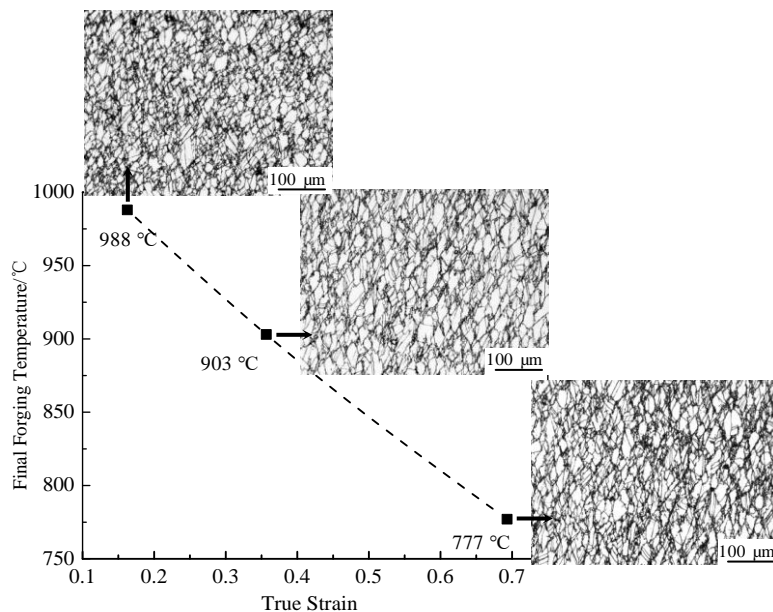


图 3 GH4738 合金始锻温度为 1080 °C 时不同终锻温度和变形量下的组织变化

Fig.3 Microstructure evolution of GH4738 superalloy with initial forging temperature of 1080 °C and different final forging temperatures and deformation degrees

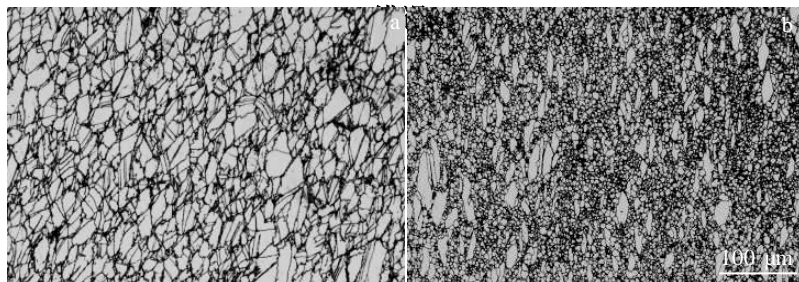


图 4 GH4738 合金始锻温度为 1040 °C 和变形量为 30% 时不同终锻温度的组织对比

Fig.4 Microstructure comparison of GH4738 superalloy with initial forging temperature of 1040 °C-compression reduction of 30% at different final forging temperatures: (a) 888 °C and (b) 1042 °C

### 2.3 终锻温度对热处理态微观组织的影响

为进一步探究终锻温度对后续热处理态组织的影响,对始锻温度为 1160 °C,不同终锻温度变形后的样品进行热处理,热处理制度为 1050 °C/4 h/空冷+845 °C/4 h/空冷+760 °C/16 h/空冷,热处理前后的组织对比如图 5 所示。从图中可以看出,存在明显温降的样品热变形后动态再结晶程度很低,可以观察到弓弯的原始晶界,在原始晶界上有少量细小的再结晶晶粒 (dynamic recrystallization grains, DRX grains),如图 5a<sub>1</sub> 和 5b<sub>1</sub> 所示;而温降较小的热变形态样品再结晶程度较高,如图 5c<sub>1</sub> 所示。样品经过热处理之后原始的再

结晶态组织发生了明显的晶粒长大,晶粒形态为等轴晶。终锻温度较低的(1042 和 930 °C)样品,呈现出明显的混晶组织。而终锻温度较高的(1147 °C)样品热处理后呈现出较为均匀的等轴晶组织。通过对比可以看出,终锻温度过低所导致的再结晶不充分现象会对后续热处理态组织产生影响,不利于获得良好的热处理态组织。因此,在 GH4738 合金锻件制备过程中需严格控制终锻温度,终锻温度过低会影响锻造过程动态再结晶的发生发展,并会遗传到后续的热处理过程中,带来混晶。

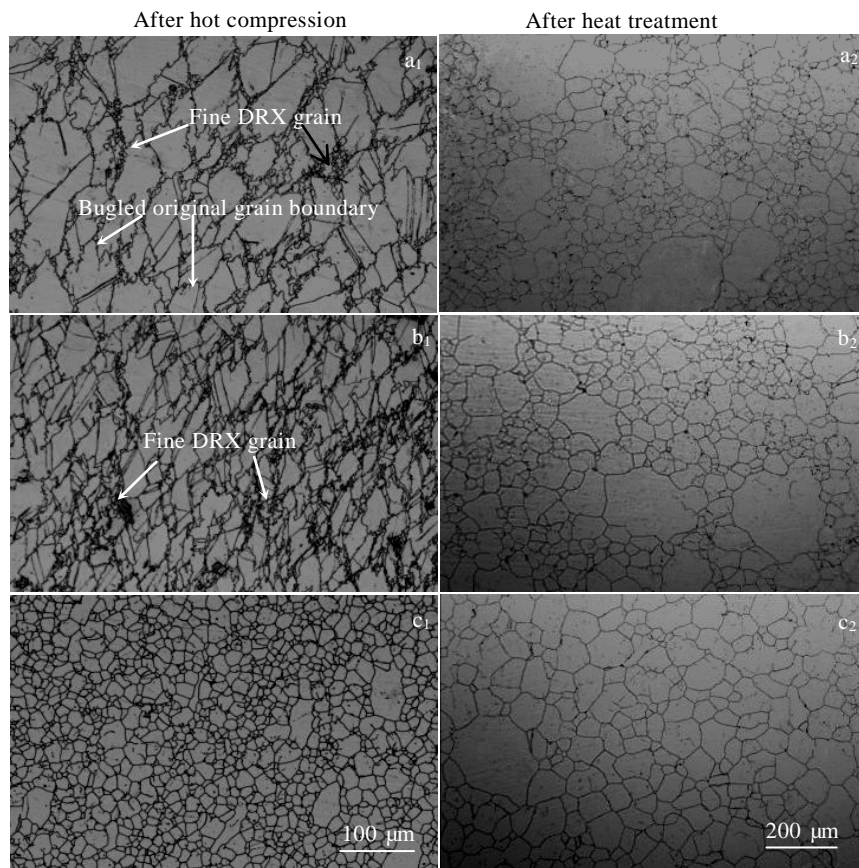


图 5 GH4738 合金在始锻温度为 1160 °C,不同终锻温度及变形量下热处理前后组织对比

Fig.5 Microstructures comparison before (a<sub>1</sub>~c<sub>1</sub>) and after (a<sub>2</sub>~c<sub>2</sub>) heat treatment of GH4738 superalloy with initial forging temperature of 1160 °C and different final forging temperatures and hot compression degrees: (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) 1042 °C-15%, (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) 930 °C-30%, and (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>) 1147 °C-30%.

### 3 结 论

1) 相同始锻温度条件下,较低的终锻温度不利于 GH4738 合金动态再结晶的发生,从组织上表现为再结

晶程度较低,从流变曲线上表现为变形抗力明显升高。

2) 热变形过程中,终锻温度过低所导致的不充分再结晶组织,在后续热处理过程中易发展为混晶组织,影响合金的组织均匀性。

## 参考文献 References

- [1] Nai Qiliang(仝启亮), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2016, 52(2): 151
- [2] Sun Jingdong(孙景冬), Zhneg Dongmei(郑冬梅). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2020, 63(12): 87
- [3] Jiang He(江河), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(9): 1211
- [4] Bi Zhongnan(毕中南), Qu Jinglong(曲敬龙), Deng Qun(邓群) *et al. Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2011(S2): 290
- [5] Yao Zhihao(姚志浩), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(11): 3382
- [6] Park N, Kim I, Na Y *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 111(1): 98
- [7] Donachie M J, Pinkowish A A, Danesi W P *et al. Metallurgical Transactions*[J], 1970, 1(9): 2623
- [8] Hong Chengmiao(洪成淼). *Investigation on Precise Microstructure Control of GH864 Ni-base Superalloy*(GH864 合金组织精确控制研究)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2008
- [9] Shen G, Semiatin S L, Shivpuri R. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 1995, 26(7): 1795
- [10] Li Linhan(李林翰), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2014, 50(7): 821
- [11] Peng Dapeng(彭大朋), Wang Jue(王珺), Cai Xuankun(蔡旋坤) *et al. Modern Metallurgy*(现代冶金)[J], 2018, 46(1): 7
- [12] Tian Peiyu(田沛玉). *Shandong Industrial Technology*(山东工业技术)[J], 2017, 11: 41
- [13] Bailey R E. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Superalloys*[C]. Pittsburgh: TMS, 1972: 1
- [14] Tai Qingan(郇清安), Li Xiaoguang(李晓光), Guo Zhenxing(国振兴) *et al. Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2013, 5(6): 7
- [15] Wu Ze(吴泽). *Effect of Repeated Firing Forging and Parameters on Grains Size and Tensile Properties of GH4133A*(终锻火次及参数对 GH4133A 合金晶粒度与拉伸性能的影响)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007
- [16] Chamanfar A, Jahazi M, Gholipour J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 615(10): 497
- [17] Amiri A, Bruschi S, Sadeghi M H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 562(2): 77
- [18] Wang Y, Shao W, Zhen L *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 486(1): 321
- [19] Wen D X, Lin Y, Chen J *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 618: 372
- [20] Lin Y, Wu X Y, Chen X M *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 640: 101
- [21] Zhang H, Zhang K, Jiang S *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 623: 374
- [22] Poelt P, Sommitsch C, Mitsche S *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2006, 420(1-2): 306
- [23] Liu Fengjun(刘丰军), Chen Guosheng(陈国胜), Wang Qingzeng(王庆增) *et al. Baosteel Technology*(宝钢技术)[J], 2011(4): 27

## Effect of Final Forging Temperature on Hot Deformation Behavior of GH4738 Superalloy

Jiang He<sup>1,2</sup>, Li Yaojun<sup>2</sup>, Liu Qiyuan<sup>2</sup>, Dong Jianxin<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Wuxi Paikexin New Materials Technology Co., Ltd, Wuxi 214161, China)

**Abstract:** A non-isothermal simulated hot compression test was designed to investigate the effect of final forging temperature on hot deformation behavior of GH4738 superalloy. Microstructure observation was carried out to explore the effect of final forging temperature on homogeneity of microstructure and microstructure heredity in following heat treatment process. The results show that in the condition of the same initial forging temperature, the dynamic recrystallization of GH4738 superalloy will be inhibited when the final forging temperature is too low. The fraction of dynamic recrystallization is relatively low and the flow stress keeps increasing during hot compression. The less developed dynamic recrystallization microstructure tends to develop into mischcrystal structure in the following heat treatment process, influencing the homogeneity of microstructure. Hence, the final forging temperature should be rationally controlled to improve the microstructure homogeneity of forgings during hot deformation.

**Key words:** nickel-base wrought superalloy; GH4738; final forging temperature; hot deformation; microstructure

Corresponding author: Jiang He, Ph. D., Lecturer, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62332884, E-mail: jianghe17@sina.cn