

基于质量控制函数的锻造工艺适用性的评估方法

罗子健 杨旗 姬婉华



罗子健 教授

摘要: 介绍应用模糊数学方法建立的表征锻件晶粒度的隶属函数, 根据近代质量控制理论提出了质量控制函数及其计算方法。将表征晶粒度的隶属函数和质量控制函数引入有限元变形- 传热耦合分析方法, 首次提出了锻造工艺适用性的定量评估方法。应用所提出的方法对各种锻造工艺的评估结果与生产实践表明, 所提出的方法能揭示锻造工艺参数对锻件质量的影响, 对合理制定难变形材料锻造工艺和控制锻件质量具有指导作用。

关键词: 质量控制函数; 锻造工艺; 适用性; 评估方法

中图分类号: TG316 **文献标识码:** A

由于难变形材料的组织和性能对锻造热力参数十分敏感, 其锻件的组织和性能与所采用的锻造工艺密切相关。目前, 航空工业产品更新换代的周期越来越短, 使用的关键材料的品种不断更新。由于上述情况, 迫切需要建立评估锻造工艺适用性的科学方法, 以优化难变形材料锻造工艺和控制锻件质量。本文试图将应用模糊数学方法建立的表征锻件晶粒度的隶属函数和质量控制函数 (quality control function, QCF) 引入有限元变形- 传热耦合分析方法, 以 GH4169 合金为研究对象, 建立锻造工艺适用性的定量评估方法。

1 表征锻件晶粒度的隶属函数

在原材料冶金质量一定的条件下, GH4169 合金锻件的晶粒度取决于锻造热力参数综合作用的结果^[1], 因而这种合金的锻件晶粒度与锻造热力参数之间的关系是外延不明确的模糊概念, 只能应用模糊数学方法才能定量描述。在等温恒应变速率压缩试验结果基础上, 应用模糊数学方法表征 GH4169 合金锻件晶粒度的隶属函数为^[2]

$$\left. \begin{aligned} \mu_A &= \frac{1}{1 + \exp(-3.0y_i)} \\ y_i &= 1.143 - 0.0147 \frac{Q}{RT} - 0.0273 \ln \dot{\epsilon} + 0.3276 \ln \bar{\epsilon} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, μ_A 为隶属函数; Q 为变形激活能; R 为气体常数; T 为绝对变形温度; $\dot{\epsilon}$ 为等效应变速率; $\bar{\epsilon}$ 为等效应变。

选取不同的阈值, 就可根据式(1)确定锻件各部位的晶粒度等级。应用有限元变形- 传热耦合分

析方法能够精确地确定锻造过程中坯料内应力- 应变状态和温度场随时间变化的情况。因此, 将式(1)引入有限元变形- 传热耦合分析方法, 就可以揭示锻件内部晶粒度随时间变化的情况。

2 基于 QCF 的锻造工艺适用性的评估方法

提出质量控制函数 QCF 以及计算方法, 是为了利用所建立的表征锻件晶粒度的隶属函数和有限元变形- 传热耦合分析结果定量评估锻造工艺的适用性。

Taguchi 首先用数学方法对质量的概念进行了描述, 然后在最优化方法基础上建立了新型质量控制体系。根据 Taguchi 方法的基本思路^[3], 锻造过程中工件内任一质点的 QCF 可定义如下:

$$QCF(x_0, y_0, z_0) = \left[\frac{\int_0^t \lambda \dot{\sigma} \bar{\epsilon} dt}{\int_0^t \dot{\sigma} \bar{\epsilon} dt} \right]^2 \quad (2)$$

式中, (x_0, y_0, z_0) 为所考虑质点在工件原始构型中的坐标; t 为该质点在变形过程中经历的时间; $\bar{\sigma}$ 为该质点在变形过程中任一瞬刻的等效应力; λ 为表征质点晶粒度的特征参数。

根据式(2), 整个锻件的 QCF 可定义如下:

$$QCF = \frac{\iiint VCF(x_0, y_0, z_0) dx_0 dy_0 dz_0}{\iiint V dy_0 dz_0} \quad (3)$$

从式(2)和式(3)可看出, 在计算工件内各质点的 QCF 值时, 需对该质点经历的时间积分, 因而所确定的 QCF 值可以反映变形历史对锻件质量的影响。因此, 所建立的 QCF 是锻造热力参数与锻件质量之间的理想媒介。当以晶粒度为评估标准时, 特性参数 λ 的确定方法如下: 若变形过程中某瞬刻

收稿日期: 1999—07—26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59875071); 航空自然科学基金资助项目(96H53114)

所考虑质点的晶粒度达到标准, 取 $\lambda = 1$; 否则, 取 $\lambda = 0$ 。显然, 整个锻件的 QCF 值越大, 锻件的晶粒度越均匀细小; 反之亦然。根据试验研究结果, 当终锻后 GH4169 合金锻件的晶粒度要求达到 $6\mu\text{m}$ 或更细时, 晶粒度的隶属函数值应大于等于 0.82, 即 μ_{λ} 的阈值为 0.82。因此, λ 可按式(1) 计算所得晶粒度的隶属函数值确定。

至此, 对基于 QCF 的锻造工艺适用性的评估方法可表述如下: 通过式(1) ~ 式(3), 利用有限元变形 - 传热耦合分析结果, 确定锻造过程中任一时刻锻件各部位和整个锻件的 QCF 值。然后, 按照上述 QCF 的特性, 判断所考虑的锻造工艺是否适用。

3 评估方法考核

为了考核所提出的方法, 对下列 GH4169 合金锻粗工艺进行评估。

情况 1 坯料尺寸: 直径 520 mm, 高度 190 mm; 模具尺寸: 直径 1000 mm, 高度 300 mm; 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 ; 周围环境温度 20°C 。为叙述方便, 这种情况以下称为 DA 终锻过程。

情况 2 m 值提高到 0.4, 其余参数同 DA 终锻过程。

情况 3 v 下降到 0.95 mm/s , 其余参数同情况 1。

情况 4 始锻温度提高到 1000°C , 其余参数同情况 1。

情况 5 模具预热温度提高到 400°C , 其余参数同情况 1。

情况 6 锻造过程中, 工件、模具和周围环境温度都维持在 980°C ; $v = 0.95 \text{ mm/s}$, 其余参数同情况 1。这种情况以下简称等温 DA 终锻过程。

为了计算工件内所选定质点的 QCF 值, 需要跟踪计算这些质点的热力参数。跟踪质点在工件原始构形中的位置见图 1。图中数字为跟踪质点的序号。

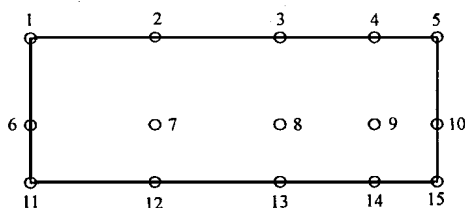


图 1 跟踪质点在工件原始构形中的位置(1/4 截面)

各种情况下跟踪质点和整个锻件的 QCF 值的计算结果见表 1。

表 1 跟踪质点和整个锻件的 QCF 值
(高度压缩率 $\epsilon = 30\%$)

情况	序号	QCF 值	序号	QCF 值	序号	QCF 值	整个锻件的 QCF 值
1	1	0.000	6	0.336	11	0.416	0.180
	2	0.000	7	0.220	12	0.248	
	3	0.000	8	0.220	13	0.218	
	4	0.000	9	0.310	14	0.285	
	5	0.285	10	0.000	15	0.000	
2	1	0.000	6	0.438	11	0.556	0.263
	2	0.000	7	0.302	12	0.327	
	3	0.000	8	0.331	13	0.303	
	4	0.000	9	0.362	14	0.250	
	5	0.601	10	0.000	15	0.000	
3	1	0.000	6	0.580	11	0.620	0.380
	2	0.000	7	0.500	12	0.540	
	3	0.000	8	0.590	13	0.600	
	4	0.000	9	0.740	14	0.700	
	5	0.000	10	0.000	15	0.000	
4	1	0.000	6	0.363	11	0.442	0.216
	2	0.000	7	0.249	12	0.277	
	3	0.000	8	0.250	13	0.276	
	4	0.000	9	0.337	14	0.314	
	5	0.318	10	0.000	15	0.000	
5	1	0.000	6	0.363	11	0.441	0.211
	2	0.000	7	0.249	12	0.277	
	3	0.000	8	0.250	13	0.276	
	4	0.000	9	0.337	14	0.313	
	5	0.343	10	0.000	15	0.000	
6	1	0.000	6	0.520	11	0.564	0.435
	2	0.376	7	0.446	12	0.469	
	3	0.426	8	0.447	13	0.469	
	4	0.420	9	0.473	14	0.449	
	5	0.618	10	0.338	15	0.280	

从表 1 数据可以看出, 基于 QCF 的锻造工艺适用性的评估方法能比较敏感地反映主要锻造工艺参数对锻件晶粒度的影响。提高始锻温度和模具预热温度, 锻件的 QCF 值略有提高。因此, 提高始锻温度和模具预热温度可以略为改善锻件的晶粒度及其均匀性。降低滑块速度, 使锻件的 QCF 值明显增大, 因而可以改善锻件的晶粒度及其均匀性。从跟踪质点的 QCF 值分布情况可知, 改善工件和模具之间的润滑条件可以改善锻件晶粒度及其均匀性。等温 DA 终锻过程中, 跟踪质点和整个锻件的 QCF 值显著增大, 因此, 可以获得晶粒细小均匀的锻件。

4 实际应用

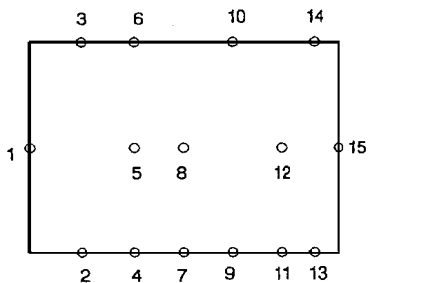
为了进一步检验所建立方法的实用性, 对以下两种 GH4169 合金涡轮盘锻件的锻造工艺进行评

估。

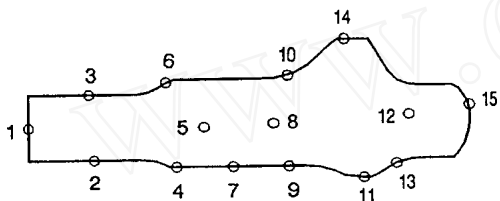
工艺一 坯料的直径 380 mm, 高度 145 mm; 始锻温度 1000 ; 在 320 MN 压力机上进行锻造, 压力机滑块速度 10 mm/s; 模具预热温度 400 ; 周围环境温度 20 ; 摩擦因子 m 取为 0.2。该工艺简称 DA 终锻工艺。

工艺二 压力机滑块速度 0.725 mm/s; 始锻温度、模具预热温度和周围环境温度均为 1000 。其余情况同工艺一。该工艺简称等温 DA 终锻工艺。

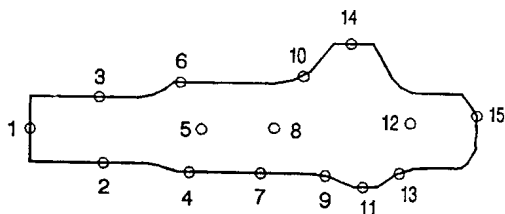
跟踪质点在工件原始和最终构形中的位置见图 2。图中数字为跟踪质点的序号。



(a) 原始构形



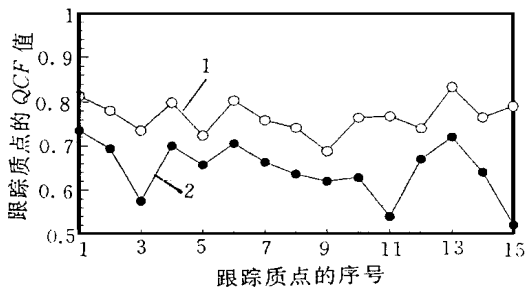
(b) DA 终锻的最终构形



(c) 等温 DA 终锻的最终构形

图 2 跟踪质点的位置

上述两种锻造工艺生产的 GH4169 合金涡轮盘锻件中, 各跟踪质点的 QCF 值见图 3。根据计算结果, DA 终锻工艺和等温 DA 终锻工艺生产的 GH4169 合金涡轮盘锻件的 QCF 值分别为 0.668 和 0.758。从上述结果可以预期, 这两种锻造工艺都可以获得晶粒度细小的 GH4169 合金涡轮盘锻件。本文所提出方法的预测结果与生产实际经验是一致的。但是, 从图 3 可以看出, 与 DA 终锻工艺相比, 采用等温 DA 终锻工艺时, 跟踪质点的 QCF 值较大, 因而整个涡轮盘锻件的 QCF 值较大。采用等



1. 等温 DA 终锻工艺 2. DA 终锻工艺

图 3 GH4169 合金涡轮盘锻件内跟踪质点的 QCF 值
 温 DA 终锻工艺时, 工件、模具和周围环境之间几乎不发生热交换过程, 因而锻造过程中锻件温度始终较高; 由于压力机滑块速度较低, 锻件内等效应变速率较低, 而且分布均匀。因此, 采用等温 DA 终锻工艺时, 锻件内动态再结晶能够充分进行, 形成均匀细小的动态再结晶晶粒。上述情况导致采用等温 DA 终锻工艺时, 各跟踪质点和整个涡轮盘锻件的 QCF 值较大。

5 结论

(1) 提出了一种基于 QCF 的锻造工艺适用性的定量评估方法。所提出的评估方法对于制定难变形材料锻造工艺和控制锻件质量具有指导意义。

(2) 为了获得优质 GH4169 合金涡轮盘锻件, 在压力机上实施 DA 终锻工艺时, 建议采用较低的滑块速度, 适当提高始锻温度和模具预热温度, 尽量改善工件与模具接触面上的润滑情况。在条件许可得情况下, 建议采用等温 DA 终锻工艺生产 GH4169 合金涡轮盘锻件。

参考文献

[1] Brand J F, Krueger D D, Kopp R. Microstructural Simulation of Nickel Base Alloy Inconel 718 in Production of Turbine Disks Materials Science and Technology, 1996, 12(11): 963~ 969
 [2] 杨旗, 罗子健, 刘东 中国机械工程, 1999, 10(7): 832 ~ 834
 [3] Srinivasan R, Chaudhary A. Applying Numerical Taguchi Optimization to Metal Forming JOM, 1990, 42(2): 22~ 23 (编辑 周佑启)

作者简介: 罗子健, 男, 1934 年生, 西北工业大学(西安市 710072)材料科学与工程系教授, 博士研究生导师。研究方向为塑性加工过程智能动态数值模拟和难变形材料锻件质量最优控制, 获省部级科技进步奖 5 项, 合作出版专著 2 部, 译著 3 部, 编写高等学校教材 2 本, 发表论文 100 余篇。杨旗, 男, 1974 年生, 中国科学院力学研究所(北京市 100080)博士研究生。姬婉华, 女, 1936 年生, 西北工业大学应用物理系教授。

ISSN 1004- 132X
 CHINA MECHANICAL ENGINEERING
 (Transactions of CMES)
 Vol 12, No. 5, May, 2001
 Monthly (Serial No. 89)

Edited and Published by: CHINA MECHANICAL
 ENGINEERING Magazine Office
Add: No. 14 Shipailing Wuchang Wuhan China
Distributor: China International Book Trading
 Corporation (P. O. box 399, Beijing)
Code: 4163- MO

MA IN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Method to Evaluate the Applicability of Forging Processes Based on Quality Control Function LUO Zijian (Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China) YNAG Qi JI Wanhua p 489-491

Abstract A membership function formulated by using fuzzy mathematics for characterizing the grain size of superalloy forgings was presented in this paper. In order to form a media between the forging thermomechanical parameters and forging quality, the quality control function (QCF) and the method for its calculation were defined according to the modern quality control theory. Incorporating the QCF and membership function into thermoviscoplastic coupling analysis software based on finite element method, a method was first established to quantitatively evaluate the applicability of forging processes. The results obtained by using the proposed method and practical experience indicate that the proposed method can reveal the effect of the forging process variables on the forging quality, being a scientific method to define the forging process and control the forging quality for difficult to deformation materials.

Key words: quality control function forging process applicability evaluation method

Wear Characteristics of High-speed Roller Chain under Multicycle Impact MENG Fanzhong (Jilin University, Changchun, China) p 492-494

Abstract The high-speed and multicycle impact characteristics of an automotive chain differ from other high-speed roller chain. The double effect of multicycle impact characteristics and speed, load fluctuant characteristics set up a stern claim of wear to automotive chain. Influence of speed and load fluctuant characteristics is most important of all. Exceed the load-carrying resistance and wear resistance for top layer of pin and bush, resistance to plastic deformation for centre of pin and bush, circular softness and hardening characteristics for top layer, they are key factors for the tribology design of the high-speed automotive chain.

Key words: high-speed multicycle impact fatigue wear plastic deformation circular characteristics automotive chain

The Effects of External Vibration on the Dynamic Bal-

ance Measurement of the Precision Centrifuge LI Shunli (Harbin Institute of Technology, Harbin, China) REN Shunqing JIANG Fuxing p 494-496

Abstract In order to separate the disturbance signal of the external vibration from dynamic balance measuring signal of the precision centrifuge, this paper analyzes the measuring signal of dynamic balance measurement system of the precision centrifuge (the inertial navigation test equipment), the rotary center of the rotor acted by the static unbalance and the couple unbalance is studied respectively, the horizontal external vibration from the foundation and the effects of angle vibration on the dynamic measurement are studied respectively. The requirements for external vibration is put forward by means of signal to noise ratio of dynamic balance measuring system.

Key words: external vibration precision centrifuge dynamic balance signal to noise ratio rotor

The Application of the Hydrostatic Transmission System with Secondary Regulation in the Test Technique

JIANG Jihai (Harbin Institute of Technology, Harbin, China) ZHAO Chunbin p 496-500

Abstract The paper presents the investigation and development situation of hydrostatic transmission system with secondary regulation abroad and at home. On the basis of describing and discussing the working principle and characteristics of the hydrostatic transmission system with secondary regulation in detail, the construction, working principles and characteristics of the test system applying the hydrostatic transmission system with secondary regulation are also introduced in detail in the paper. The future application of this technology in test system is evaluated at last.

Key words: hydrostatic transmission secondary regulation technique of test energy saving technique

Study of the Arithmetic of Pelletizer's Key Parameter

LI Qiang (Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, China) p 500-501

Abstract By analyzing and deriving, the practicality arithmetic is given for determining the pelletizer's key