

加热与热处理

难变形金属齿轮坯复杂精锻件锻后余热热处理工艺

肖刚锋¹, 梁敬峰¹, 刘梅华², 徐尔灵², 夏琴香¹, 利义旭²

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广东韶铸精锻有限公司, 广东 韶关 512099)

摘要: 针对齿轮坯精锻件锻后热处理耗能高、效率低等问题, 提出一种利用锻造余热进行等温正火的余热热处理工艺, 在保证锻件性能的基础上, 减少了热处理时间、节省了能源消耗。基于齿轮坯的尺寸及材料特点, 拟定了锻后余热热处理工艺, 并使用 Deform 软件建立了锻后余热热处理有限元模拟模型, 研究了热处理过程中锻件的温度、等效应力和微观组织的分布规律。结果表明: 热处理过程中, 齿轮坯内孔上端面降温速度最快、珠光体含量最高, 齿轮坯外圈心部降温速度最慢、珠光体含量最低; 在内壁处产生最大等效应力, 约为 60 MPa。在所制定的锻后余热热处理工艺, 可获得合格的微观组织和硬度, 大幅减少了等温正火热处理工艺中加热、保温的能源和时间。

关键词: 齿轮坯精锻件; 余热热处理; 等温正火; 微观组织; 硬度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.028

中图分类号: TG156

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 10-0203-06

Heat treatment process of residual heat after forging of complex precision forgings for difficult-to-deform metal gear blank

Xiao Gangfeng¹, Liang Jingfeng¹, Liu Meihua², Xu Erling², Xia Qinxia¹, Li Yixu²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Shao Casting Precision Forging Co., Ltd., Shaoguan 512099, China)

Abstract: For the problems of high energy consumption and low efficiency in heat treatment after forging of precision forgings for gear blank, an isothermal normalizing heat treatment process of residual heat by using forging residual heat was proposed, which reduced the heat treatment time and saved the energy consumption on the basis of ensuring the performance of forgings. Then, according to the dimension and material characteristics of gear blank, the heat treatment process of residual heat after forging was developed, and the finite element simulation model for the heat treatment process of residual heat after forging was established by software Deform. Furthermore, the distribution laws of temperature, equivalent stress and microstructure of forgings during heat treatment were studied. The results show that during the heat treatment process, the cooling speed for the upper end face of inner hole of gear blank is the fastest, and the pearlite content is the highest, while the cooling speed for the outer ring center of gear blank is the slowest, and the pearlite content is the lowest. The maximum equivalent stress generated at the inner wall is about 60 MPa. Thus, the developed heat treatment process of residual heat after forging can obtain qualified microstructure and hardness, and greatly reduces the energy and time of heating and holding in the isothermal normalizing heat treatment process.

Key words: precision forgings of gear blank; heat treatment of residual heat; isothermal normalizing; microstructure; hardness

齿轮是汽车中传递运动与动力的重要承载零部件, 在服役过程中需承受较大的载荷、冲击及表面剧烈的摩擦, 因此, 需具有优异的综合力学性能及表面耐磨性能^[1]。此类零件常采用锻造工艺制备,

其材料通常为钢材, 由于锻造后齿轮坯内部存在较大的残余应力, 且难以满足加工所需的力学性能, 因此, 需进行锻后热处理, 以获得均匀的铁素体+珠光体组织和所需的硬度, 生产中一般采用等温正火等预备热处理工艺来获得良好的材料性能。常规的等温正火热处理需将冷却后的锻件从室温加热至奥氏体化温度以上^[2], 不仅需要消耗较多的能源、不利于环保, 同时将制件加热至高温需较长的时间, 降低生产效率、增加生产成本。

收稿日期: 2024-01-26; 修订日期: 2024-04-08

基金项目: 广东省科技专项资金项目 (210907154533470)

作者简介: 肖刚锋 (1987-), 男, 博士, 副教授

E-mail: xiaogf@scut.edu.cn

通信作者: 夏琴香 (1964-), 女, 博士, 教授

E-mail: meqxxia@scut.edu.cn

锻后余热热处理是利用终锻件自身的热量进行淬火或正火处理，使锻件的余热得到充分利用，能够有效节省热处理中加热的能源和时间^[3]。目前，国内外已有相关学者对锻后热处理工艺进行了研究。陈希原^[4]对 42CrMo 钢锻件进行了余热淬火热处理，有效地提高了锻件的硬度。童洲^[5]对 5CrNiMo 热作模具钢锻后余热热处理工艺进行研究，结果表明，采用锻后余热热处理不仅可以细化组织、降低残余应力，同时加热时间减少了 25.8%。李一振等^[6]对 35CrMo 钢大型轴类锻件的余热正火、调质热处理过程进行了研究，结果表明，相对常规热处理工艺，在确保锻件具有理想的热处理组织及良好的综合力学性能的前提下，采用余热热处理工艺能够有效地缩短热处理加热时间。翟崇琳等^[7]研究了 50CrV 钢稳定杆热弯后余热油淬火和水基溶液淬火热处理工艺，结果表明，余热水基溶液淬火热处理后的稳定杆性能良好，其热处理后的组织均匀且硬度合适，疲劳寿命高，力学性能良好，各项指标均满足汽车稳定杆的使用要求。

以上研究主要集中于余热热处理对组织及性能的影响方面，对余热热处理过程中的微观组织及性能的演变过程研究较少。本文根据 SCr420H 钢齿轮坯精锻件的力学性能、组织成分等要求制定了合理的锻后余热热处理工艺，并利用有限元数值模拟软件 Deform 研究了锻后余热热处理过程中锻件的温度变化、等效应力分布、微观组织演变及硬度变化规律，为齿轮坯类精锻件锻后余热热处理工艺的制定提供了理论依据。

1 锻后余热热处理工艺路线的制定

齿轮坯精锻件的结构尺寸如图 1 所示，具有内孔和两圈轮缘结构，其中， D 为齿轮坯精锻件的直径， d 为精锻件轮毂直径， H 为齿轮坯精锻件高度， h 为精锻件轮毂深度。锻件的材质为 SCr420H 钢，其化学成分和临界温度数值如表 1 和表 2 所示^[8]。其中， Ac_1 为加热时开始发生奥氏体转变的温度， Ac_3 为加热时完全转变为奥氏体的温度， Ar_1 为冷却时开始发生铁素体转变的温度， Ar_3 为冷却时完全转变为铁素体的温度， M_s 为淬火时马氏体转变的起始温度， M_f 为淬火时马氏体转变的终止温度。

对于齿轮坯精锻件，通常采用等温正火工艺作为其精加工前的预备热处理工艺，而传统的等温正

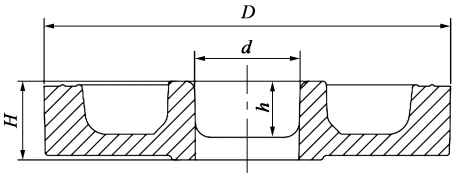


图 1 齿轮坯精锻件结构尺寸

Fig. 1 Structural dimensions for precision forgings of gear blank

表 1 SCr420H 钢的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of SCr420H steel（%，mass fraction）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0.20	0.31	0.66	0.017	0.010	0.86	0.06	余量

表 2 SCr420H 钢的临界温度（℃）

Table 2 Critical temperatures of SCr420H steel（℃）

临界温度	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3	M_s
数值	766	838	702	799	416

火工艺需将冷却至室温的齿轮坯终锻件重新加热至奥氏体化温度以上保温后冷却，获得的组织为少量铁素体+珠光体，齿轮坯精锻件的硬度要求为 160~190 HBW^[9]。

等温正火热处理的正火温度需在材料 Ac_3 以上 40~90℃^[10]，对于 SCr420H 钢，其正火温度为 878~928℃，而齿轮坯精锻件终锻后的最低温度为 950℃，可以达到保温温度的要求。因此，为充分利用锻造余热，直接将齿轮坯终锻件放入 920℃ 保温炉中保温以使锻件内外温度一致，保温时间选取原则为每 100 mm 保温 48 min^[11]，零件高度为 26.4 mm，则所需保温时间约为 12 min；同时考虑到大批量锻件同时进行热处理，保温时间取为 30 min。随后取出进行风冷以使锻件快速通过铁素体相变区域。为了在最短的时间内得到较多的珠光体，需使锻件在 TTT 曲线（Time，Temperature，Transformation，等温转变曲线）的鼻温附近等温保持一定时间。因此，在风冷一段时间后，此时锻件温度处于 600~660℃ 之间，将其置于保温炉中保温一段时间。保温温度为 SCr420H 钢的鼻温 600℃，此处的 TTT 曲线采用材料性能模拟软件 Jmatpro 生成，如图 2 所示，保温时间可参照此 TTT 曲线，并在该温度下珠光体完全转化时间的基础上稍微延长，取为 60 min。等温处理后，将锻件取出风冷或空冷至室温。齿轮坯精锻件的锻后余热热处理工艺如图 3 所示。

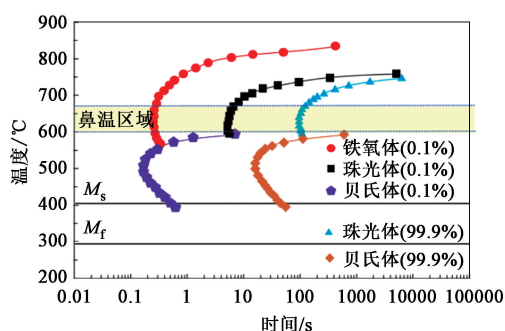


图 2 SCr420H 钢的 TTT 曲线

Fig. 2 TTT curves of SCr420H steel

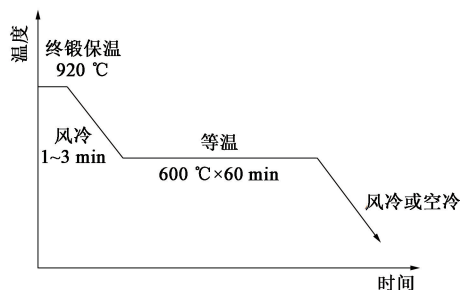
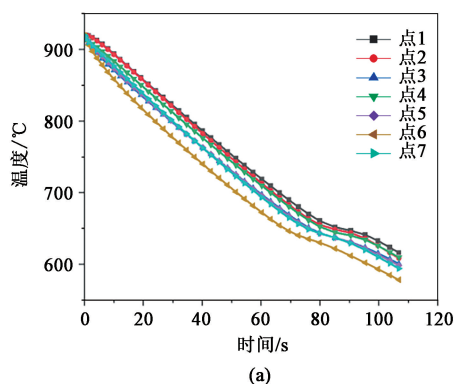


图 3 锻后余热等温正火工艺路线

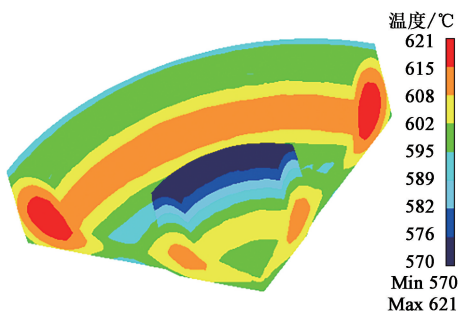
Fig. 3 Isothermal normalizing process route by residual heat after forging

2 有限元模拟结果及分析

利用三维建模软件 Solidworks 和有限元数值模



(a)



(b)

图 5 锻件风冷过程中的温度分布

(a) 风冷过程中各点的温度变化 (b) 风冷后锻件的温度分布

Fig. 5 Temperature distributions of forgings in air cooling process

(a) Temperature change at each point during air cooling (b) Temperature distribution of forgings after air cooling

2.2 等效应力分布

图 7 为各点热处理过程中的等效应力曲线。由图 7 可知，锻件风冷约 1.5 min 时各点等效应力达到峰值，此时产生的内应力主要为冷却时锻件表层

拟软件 Deform 对齿轮坯精锻件模型和热处理过程进行建模和模拟仿真，为便于获取锻件在热处理时的各项数据，选取了 7 个点进行追踪，如图 4 所示，其中点 1 和点 2 位于锻件内部，点 3 和点 6 位于锻件内孔上端面，点 4、点 5 和点 7 位于锻件内壁。

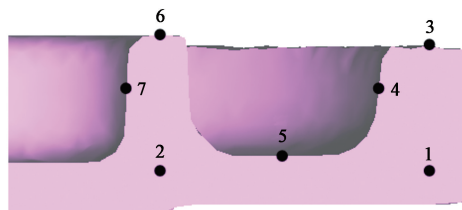


图 4 锻件上的观察点

Fig. 4 Observation points on forgings

2.1 温度分布

图 5 为锻件在 920 °C 保温后，风冷过程中 (1.75 min) 各点的温度变化曲线和风冷后的温度分布情况。由图 5 可见，锻件风冷时降温最快的是位于锻件上表面的点 6，内外温差最大达到 51 °C。风冷 1 min 时，各点降温速度略微减缓，这是由于奥氏体析出先共析铁素体，释放了相变潜热^[6]。

图 6 为锻件风冷后进入 600 °C 保温炉后各点的温度变化曲线。锻件进入等温过程后开始析出珠光体，释放的相变潜热可使锻件的整体温度在 600 °C 保温炉中上升约 50 °C。约 15 min 时，锻件整体温度达到 600 °C，保温 60 min 后锻件出炉风冷或空冷。

与心部的温差导致锻件膨胀和收缩不均而产生的热应力，以及奥氏体向先共析铁素体转变导致锻件体积变化产生的相变应力^[12]，该峰值应力为上述两种应力叠加的结果。随后内应力随着锻件内外温差的

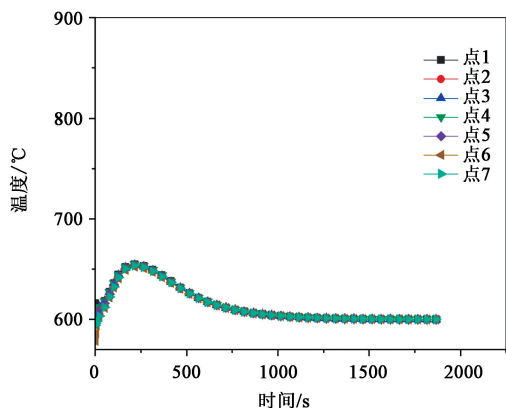


图 6 等温过程中各点的温度变化曲线

Fig. 6 Temperature change curves at each point during isothermal process

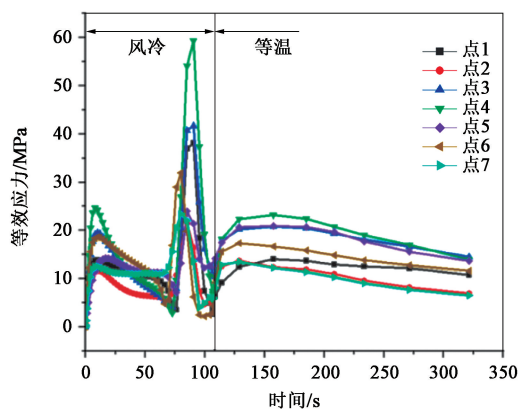


图 7 风冷和等温过程中各点等效应力变化曲线

Fig. 7 Equivalent stress change curves at each point during air cooling and isothermal processes

减小而减小。最大等效应力出现在点 4 齿轮内壁处, 约为 60 MPa, 远小于其屈服强度 450 MPa。在等温

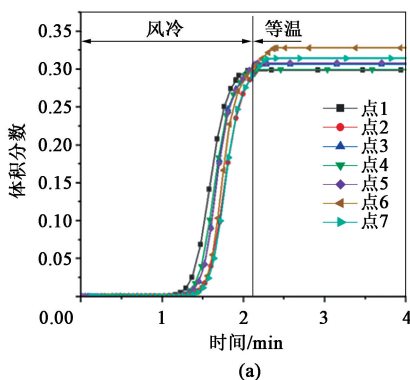
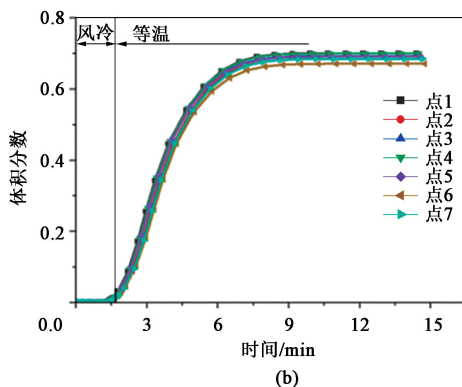


图 8 热处理过程中各点的组织变化曲线

(a) 铁素体 (b) 珠光体

Fig. 8 Microstructure change curves at each point during heat treatment

(a) Ferrite (b) Pearlite



阶段, 等效应力先略微增加, 随后小幅度下降并逐渐趋于平稳, 最终维持在 0~20 MPa。这是因为奥氏体转化为铁素体-珠光体组织过程中体积膨胀导致应力增加, 然后随转变的进行, 组织逐渐均匀化, 应力也逐渐趋于平稳。

2.3 微观组织分布

图 8a 为锻件热处理过程中各点的铁素体含量变化曲线。由图 8a 可知, 位于齿轮坯上端面的点 6 降温速度最快, 故析出先共析铁素体的时间最短, 最终生成的铁素体含量也最少, 约为 30%。相较于其他位置, 位于锻件内部的点 1 和点 2 的降温速度较慢, 先共析铁素体扩散型相变受到抑制^[13], 故析出的铁素体含量也越高, 达到了 33%。

图 8b 为锻件热处理过程中各点的珠光体含量变化曲线。由图 8b 可知, 各点在大部分先共析铁素体析出后进入等温阶段, 开始析出珠光体。等温阶段结束后, 锻件风冷或空冷至室温, 此时奥氏体已完全转变为铁素体+珠光体。同时也可以看到, 对于单个锻件, 珠光体在风冷后的 9 min 内几乎完全析出, 但考虑到大批量锻件需同时入炉进行等温处理, 因此, 等温时间需要延长至 60 min。

图 9 为锻后余热热处理结束后锻件的铁素体和珠光体分布情况。锻件热处理结束后未生成贝氏体, 组织成分为铁素体+珠光体。铁素体含量最高的区域位于齿轮坯外圈心部及其周围位置, 此处降温速度最慢, 先共析铁素体也析出得最多。铁素体含量最低的区域位于齿轮坯内孔上端面及其周围位置, 此处降温速度最快, 先共析铁素体也析出得最少。

2.4 硬度分析

锻件硬度与组织成分密切相关, 对锻件热处理

后的组织成分进行模拟, 然后根据模拟得到的各组织的成分比例计算得到锻件的硬度 H , 具体如式

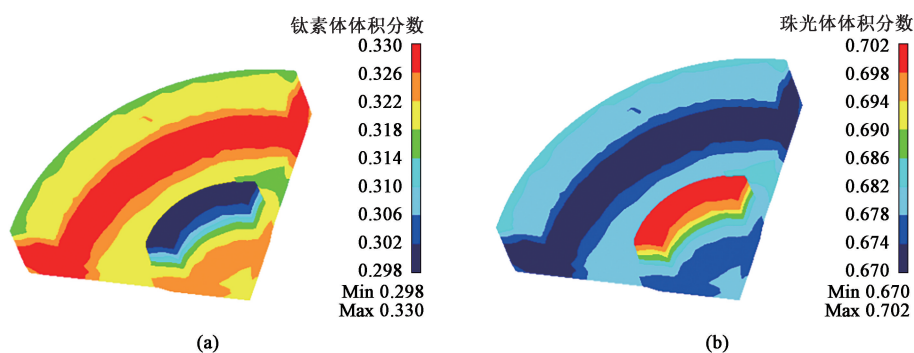


图 9 热处理结束后锻件的组织分布

(a) 铁素体 (b) 珠光体

Fig. 9 Microstructure distributions of forgings after heat treatment

(a) Ferrite (b) Pearlite

(1) 所示：

$$H = \sum_{i=1}^2 H_i v_i \quad (1)$$

式中： H_i 为锻件某点的布氏硬度，其中 H_1 和 H_2 分别为铁素体和珠光体的布氏硬度， $H_1 = 90$ HBW、 $H_2 = 200$ HBW； v_1 和 v_2 分别为该点铁素体和珠光体的体积分数。

由式 (1) 可知，珠光体含量越高，硬度越大，铁素体含量越高，硬度越小。

根据模拟结果，选取锻件上的 7 个典型位置 (图 4) 进行硬度分析，计算得到模拟余热热处理后的锻件硬度：最小硬度为 163.7 HBW，位于齿轮坯外圈心部；最大硬度为 167.2 HBW，位于齿轮坯内孔上端面。硬度值均符合零件的硬度要求。

齿轮坯精锻件进行锻后余热热处理后，对其典型位置进行硬度测试，测试结果表明，齿轮坯外圈心部 (图 4 中点 2) 硬度最低，硬度值为 156.8 HBW，而硬度最大值出现在齿轮坯内孔上端面 (图 4 中点 6)，硬度值为 175.6 HBW，与理论分析的相对误差小于 5%，验证了理论分析的准确性。

3 结论

(1) 拟定了一种针对 SCr420H 钢齿轮坯精锻件的锻后余热等温正火热处理工艺，此工艺利用锻造余热极大节省了锻件重新加热所消耗的能源和时间，经过仿真和计算，锻件通过该热处理工艺后可以获得良好的组织比例，达到合格的硬度。

(2) 锻后余热热处理风冷时，齿轮坯内孔上端面的降温速度最大，外圈心部降温速度最小，在内壁处出现最大等效应力 60 MPa，远小于 SCr420H 钢

的屈服强度，不会导致锻件出现变形、开裂等问题。

(3) 锻件的先共析铁素体在风冷阶段基本完全析出，在齿轮坯外圈心部及其周围位置析出的珠光体含量最低，在齿轮坯内孔上端面及其周围位置析出的珠光体含量最高，经所制定的锻后余热等温正火热处理后的锻件硬度在 156.8~175.6 HBW，符合零件的硬度要求。

参考文献：

- [1] 陈晖, 周细应. 汽车齿轮钢的研究进展 [J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29 (3): 478-482.
Chen H, Zhou X Y. Research progress of gear steel for automobiles [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2011, 29 (3): 478-482.
- [2] 刘玉冰, 管延锦, 李玉琦, 等. 激光热处理对 7CrSiMnMoV 模具钢组织与性能的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (11): 185-195.
Liu Y B, Guan Y J, Li Y Q, et al. Influence of laser heat treatment on microstructure and properties for 7CrSiMnMoV die steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (11): 185-195.
- [3] 黄正. 船用大型锻件余热热处理工艺方法研究及参数优化 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
Huang Z. Research on Waste Heat Heat Treatment Process Method and Parameter Optimization of Marine Large Forgings [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [4] 陈希原. 42CrMo 钢锻件的锻造余热淬火热处理 [J]. 锻造与冲压, 2008 (10): 28, 30, 32, 34.
Chen X Y. Forging residual heat quenching heat treatment of 42CrMo steel forgings [J]. Forging & Metalforming, 2008 (10): 28, 30, 32, 34.
- [5] 童洲. 5CrNiMo 热作模具钢锻后余热热处理工艺研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
Tong Z. 5CrNiMo Hot Work Mold Steel After Forging Residual Heat Treatment Process Research [D]. Guangzhou: South China

- University Of Technology, 2014.
- [6] 李一振, 黄正, 夏琴香. 轴类大锻件锻后余热热处理工艺研究 [J]. 广东造船, 2012, 31 (3): 43-46, 51.
- Li Y Z, Huang Z, Xia Q X. Research on heat treatment process for afterheat utilization of long-shaft heavy forgings [J]. Guangdong Shipbuilding, 2012, 31 (3): 43-46, 51.
- [7] 翟崇琳, 苗进, 张俊, 等. 50CrV 钢汽车稳定杆热处理工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (14): 143-145, 148.
- Zhai C L, Miao J, Zhang J, et al. Optimization of heat treatment technology of 50CrV steel automobile stabilizer [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (14): 143-145, 148.
- [8] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉. 热处理技术数据手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- Fan D L, Xu Y M, Tong X H. Heat Treatment Data Manual [M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [9] 刘澄, 杨晨, 赵振波, 等. 多步连续冷却等温正火对 20CrMnTiH 钢锻后显微组织及性能的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (8): 93-97.
- Liu C, Yang C, Zhao Z B, et al. Effect of multiple-step continuous cooling and isothermal normalizing on microstructure and mechanical properties of 20CrMnTiH forged steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42 (8): 93-97.
- [10] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- Cui Z Q, Qin Y C. Metallurgy and Heat Treatment [M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 耿学明, 黎定旺. 大型锻件的调质热处理实践 [J]. 金属加工 (热加工), 2010 (5): 40-41, 45.
- Geng X M, Li D W. Practice of tempering heat treatment for large forgings [J]. MW Metal Forming, 2010 (5): 40-41, 45.
- [12] 陈再良, 吕东显, 曹明宇, 等. 金属热处理残余应力与开裂失效关系的探讨 [J]. 金属热处理, 2007, 32 (S1): 40-44.
- Chen Z L, Lyu D X, Cao M Y, et al. Study on residual stress and crack failure in metal heat treatment [J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32 (S1): 40-44.
- [13] 张建, 李长生, 李彬周, 等. 20CrNi2MoV 钢连续冷却过程中的相变行为 [J]. 辽宁科技大学学报, 2017, 40 (1): 60-66.
- Zhang J, Li C S, Li B Z, et al. Continuous cooling transformation behavior of 20CrNi2MoV steel [J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2017, 40 (1): 60-66.

(上接第 202 页)

● 照片或灰度图应反差适当, 鲜明可见; 金相照片放大倍数均用比例尺表示, 如 $5\mu\text{m}$ 。

● 双栏排图片的宽度应控制在 7.8 cm 左右; 通栏排图片宽度应控制在 16 cm 左右。

● 表格使用三线表, 必要时可加横线, 但一般不得有竖线; 表格的宽度最好设计成 25 个汉字 (相当于 48 个字符) 以内; 表中所有文字一律左齐。

● 公式后应当注明公式中各符号的含义。

● 计量单位一律采用法定计量单位 (国际单位制)。

● 参考文献应按其在正文中被引用的顺序依次列出 (在正文中引用处务必用 “[序号]” 标注); 列出的参考文献应是重要的、近期的、已正式发表的文献资料, 每篇论文应列出 12 篇以上参考文献; 作者不多于 3 个的姓名全部写出, 多于 3 个的, 余者用 “, 等 (, et al)” 表示; 无论中外署名、一律姓 (首字大写) 先后 (例如: Zhang Y H)。

原文为非英文的参考文献, 需要同时用英文著录。

格式如下:

[1] 期刊 文章作者. 论文题目 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 起页码-终页码。

[2] 专著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 版本. 出版地: 出版社, 出版年。

[3] 译著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 译者, 译本. 出版地: 出版社, 出版年。

[4] 论文集 论文作者. 论文题目 [A]. 论文集编者. 论文集名 (英文实词首字大写) [C]. 出版地: 出版者, 出版年。

[5] 技术报告 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [R]. 地名: 责任单位, 出版年。

[6] 学位论文 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [D].

所在城市: 保存单位, 年份。

[7] 专利文献 专利申请者或所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 公告日期或公开日期 (如, 2008-02-03)。

[8] 技术标准 标准号, 标准名称 [S].

[9] 在线文献 作者. 论文题目 [EB/OL]. 获取和访问路径 <http://...>, 发表或更新日期 (如, 2008-02-03)。

[10] 光盘文献 (数据库) 作者. 论文题目 [DB/CD]. 出版地: 出版者, 出版年。

原文为非英文的参考文献著录举例:

[1] 王博, 张凯锋, 赖小明, 等. $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 复合材料板材脉冲电流辅助拉深成形 [J]. 锻压技术, 2012, 37 (5): 22-26.

Wang B, Zhang K F, Lai X M, et al. Pulse current auxiliary deep drawing of $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ composites sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37 (5): 22-26.

3 投稿方式及要求

(1) 请通过本刊网站的 “作者投稿” 系统投稿。

(2) 来稿文责自负, 请勿抄袭他人论文, 请勿一稿多投。对抄袭者和一稿多投者, 一经发现, 本刊将无条件退稿, 并作不良作者记录; 同时, 本刊将保留追索抄袭者浪费本刊资源和其他纷争的权利。

(3) 编辑部对来稿拥有修改权, 遇重大删改时将与作者协商; 排版后的清样将通过 E-mail 发给作者进行核对。

4 编辑部联系方式

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部

邮编: 100083 电话: 010-62920652, 010-82415085

E-mail: fst@263.net

网址: <http://www.fstjournal.net/>

《锻压技术》编辑部