

锻造

## 大型锻件内部孔隙性缺陷修复效果对疲劳性能的影响

刘前军<sup>1</sup>, 邱 垚<sup>1</sup>, 信瑞山<sup>2</sup>, 骆建彬<sup>1</sup>, 马庆贤<sup>1</sup>

(1. 清华大学 机械工程系 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084;  
2. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102211)

**摘要:** 大型锻件在内部孔隙性缺陷锻合后, 其疲劳强度等动态载荷力学性能恢复效果是决定锻件质量水平的重要因素之一。采用圆柱试件高温锻合模拟实验, 研究了不同的塑性变形工艺下锻件内部孔隙性缺陷修复结合面的组织变化效果, 以及对疲劳强度修复的影响。结果表明: 仅通过一次镦粗, 虽然锻件的内部孔隙性缺陷基本消失, 但是由于结合面上组织不均匀、存在细小析出物等, 其疲劳性能仅能部分恢复。通过高温条件下两次镦粗加两次拔长工艺, 其结合面的疲劳强度基本恢复至初始组织状态对应的性能指标。研究结果为制定合理的锻造工艺、保证锻后疲劳等力学性能恢复至初始状态提供了理论依据。

**关键词:** 大型锻件; 锻造工艺; 孔隙性缺陷修复; 显微组织; 疲劳强度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.002

**中图分类号:** TG306      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 11-0016-06

## Influence of repair effect for internal porosity defects on fatigue performance of heavy forgings

Liu Qianjun<sup>1</sup>, Qiu Yao<sup>1</sup>, Xin Ruishan<sup>2</sup>, Luo Jianbin<sup>1</sup>, Ma Qingxian<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology of Ministry of Education, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China)

**Abstract:** After the internal porosity defects of heavy forgings are forged, the recovery effect of dynamic load mechanical properties such as fatigue strength is one of the important factors determining the quality level of heavy forgings. Therefore, using the simulation experiment of high temperature forging for cylindrical specimen, the effect of microstructure change on the joint surface for internal porosity defects in forgings under different plastic deformation processes and the repair effect of fatigue strength were studied. The results show that although the internal porosity defects basically disappear through only one upsetting, the fatigue properties can only be partially repaired due to the uneven microstructure and small precipitates on the joint surface. By two upsetting and two drawing processes at high temperature, the fatigue strength of joint surface is basically restored to the performance index corresponding to the initial microstructure state. Thus, the research results provide a theoretical basis for formulating a reasonable forging process and ensuring that the mechanical properties such as fatigue after forging are restored to the initial state.

**Key words:** heavy forgings; forging process; porosity defect repair; microstructure; fatigue strength

大型锻件作为关键承载结构件, 被广泛应用于军工、交通、能源等领域, 其疲劳强度等动态载荷力学性能是关系着锻件在役安全使用的重要技术指标之一, 甚至直接关系着整个设备的使用寿命和效果。

为准确地掌握结构件承受载荷的效果, 研究人员对材料内部夹杂物等裂纹源的影响效果进行了系

统深入的探索。在材料内部组织引起裂纹产生方面, Kiedssling R<sup>[1]</sup>提出了“临界尺寸”夹杂物的观点, 当夹杂物尺寸小于 5 μm 时, 钢材承载时裂纹不再发生扩展, 将该条件作为超级洁净钢的标准之一。钢材中夹杂物的临界尺寸处于 5~8 μm 时, 一般满足断裂韧性 *K<sub>IC</sub>* 的要求。Mitchell A 等<sup>[2]</sup>提出将无法用光学显微镜观察到的钢材中尺寸小于 1 μm 的夹杂物称为“零氧化物夹杂钢”的观点, 零氧化物夹杂钢的疲劳强度将大幅度地提高。李正邦院士<sup>[3]</sup>将尺寸为 1~20 μm 的夹杂物定为显微夹杂物, 通过材料塑性变形和热处理实现组织细化, 可达到提高材料性能的目的。

**收稿日期:** 2021-11-15; **修订日期:** 2022-02-16

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51775298)

**作者简介:** 刘前军 (1981-), 男, 博士研究生, 工程师

**E-mail:** emiflqj@126.com

**通信作者:** 马庆贤 (1964-), 男, 博士, 教授

**E-mail:** maqxdme@mail.tsinghua.edu.cn

锻件的力学性能取决于其化学成分和组织状态。大型锻件由于采用钢锭直接锻造，内部孔隙性缺陷的锻合效果以及材料中碳氧化物、硫化物、氧化物、二次析出相等细小夹杂物的性质、尺寸和数量，直接影响着大型锻件的力学性能。

目前，国内外对锻件中裂纹等缺陷的修复效果对拉伸性能的影响规律进行了大量的研究，基本形成了缺陷修复后材料的拉伸性能能够恢复至初始组织状态的共识，裂纹修复规律已应用于实际生产，并取得了重要成果<sup>[4-9]</sup>。锻件在承受冲击载荷时，孔隙性缺陷修复效果对冲击韧性的影响与对拉伸性能的影响效果差异明显<sup>[10-11]</sup>。而锻件在承受疲劳载荷时，与拉压等静态载荷、冲击等动态载荷作用时内部裂纹产生机制、影响因素不尽相同。迄今为止，尚未检索到缺陷修复效果对疲劳强度影响的相关文献报导。对于一些承受动态载荷的大型锻件，疲劳性能是决定其在役安全的关键因素。因此，本文将针对大型锻件中孔隙性缺陷修复效果对疲劳强度的影响变化开展工作，以期为提高其使用性能提供技术支撑。

## 1 实验材料及方法

为了解锻件内部原始孔隙性缺陷修复效果对疲劳强度的影响，采用 1 对等尺寸圆柱试件进行高温锻合实验，模拟研究锻造结合面上金属组织的变化过程，以掌握其结合效果对疲劳性能的影响和作用机制。某超大型锻件所用钢锭经倒棱并大量切除水口、冒口处缺陷较多的坯料后，锻坯高径比（高度/直径）约为 1。按照坯料实际尺寸成比例缩小设计模拟试件，选取试件的直径为  $\Phi 120$  mm、高度为 120 mm。从 SA508-3 钢锻件实物上剖取材料，加工成直径为  $\Phi 120$  mm、高度为 60 mm 的圆柱体，将 2 个试件叠放并焊接外缘使其成为一体。将其加热至 1050  $^{\circ}\text{C}$ ，保温均匀后进行镦粗变形，按照变形温度保温 10 h 后，移至空气中冷却至室温。然后沿试件轴向采用线切割方法剖取多件试样材料，如图 1 所示。沿修复试件轴向加工为疲劳试件，确保结合面修复区位于平行截面的中间部分。

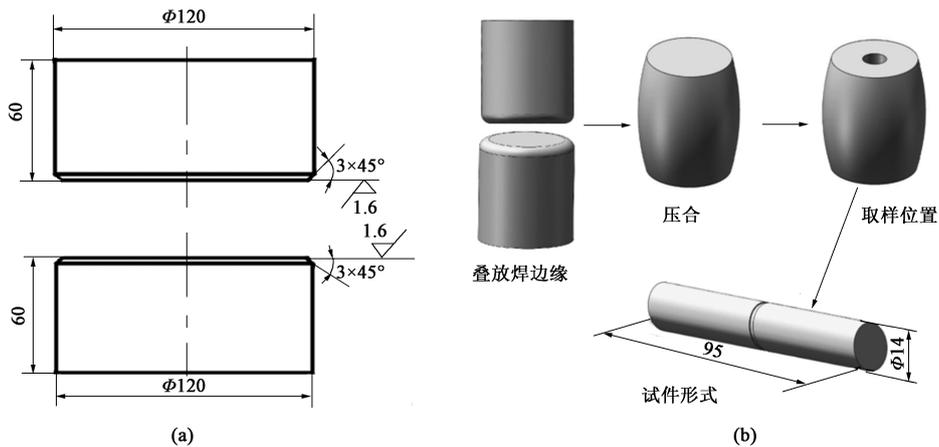


图 1 疲劳试件获取材料方法示意图

(a) 模拟试件尺寸图 (b) 实验试件获取方法

Fig. 1 Schematic diagrams of material acquisition method for fatigue specimen

(a) Dimension diagram of simulated specimen (b) Acquisition method of test specimen

按照国家标准 GB/T 15248—2008<sup>[12]</sup>中的相关规定要求，加工疲劳试件尺寸如图 2 所示。在 INSTRON

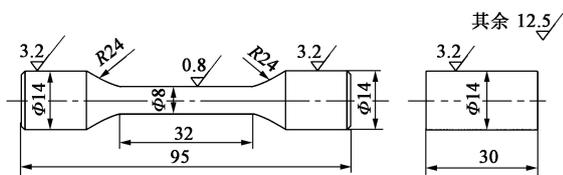


图 2 低周疲劳试件尺寸图

Fig. 2 Dimension diagram of low cycle fatigue specimen

低周疲劳试验机上进行室温实验。低周疲劳实验采用恒应变的三角波方式加载，大气室温实验环境，恒定应变幅为 0.006，加载频率为 0.83 Hz，应变速率为 0.02  $\text{s}^{-1}$ ，载荷比  $R_s = -1$ 。当载荷下降至循环稳定载荷的 25% 时，实验过程中样品断裂，即为失效。

## 2 孔隙性缺陷修复后疲劳性能及影响因素

为避免镦粗试件高径比较小时，试件内部原刚

性区与变形区交界处因产生激烈的剪切变形而引起裂纹,选择镦粗压下率为 20%,镦粗变形后试件高径比约为 0.6。当温度为 1050 ℃、镦粗变形量为 20%、锻合保温时间为 10 h 时,对结合面材料进行低周疲劳实验发现,当出现疲劳失效时,孔隙性缺陷锻合实验模拟试件的低周疲劳循环周次的中位数为 1065 次。疲劳断裂发生在试件上模拟的孔隙性缺陷修复区,通过扫描电镜 (SEM) 观察某典型试件的断口形貌,如图 3 所示<sup>[11]</sup>。

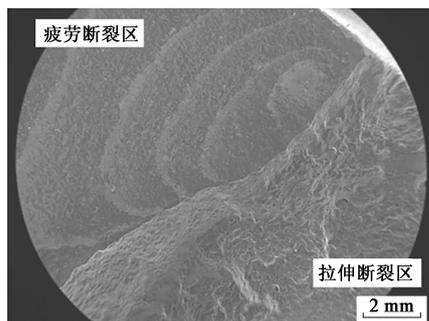


图 3 镦粗变形疲劳试件的断口形貌

Fig. 3 Fracture morphology of fatigue specimen for upsetting deformation

当应变幅为 0.0064 时,国产 SA508-3 钢材料的低周疲劳循环周次约为 17745 次<sup>[13-14]</sup>。而相同工艺条件下的结合面修复实验中,3 组 9 个试件的低周疲劳实验循环周次的平均值为 1156 次,远低于原始材料的疲劳循环周次。观察试件宏观断口均发现,其中一部分区域能够观察到疲劳弧线,表现出类似疲劳断裂的明显特征,另一部分表现为类似拉伸断口的形貌特征。由此推断,试件断口处产生断裂的机制不尽相同。

扫描电镜分析断口上疲劳断裂处的典型组织如图 4 所示。在疲劳断裂区表面上存在着明显的细小夹杂物和金属组织未完全结合的微观区域。夹杂物的长度约为 20 μm,远小于大型锻件所用超声波等无损探伤方法检测的当量尺寸。这些微观缺陷的存在直接影响了锻件材料的力学性能,特别是疲劳强度等动态载荷力学性能。

对疲劳试件断口上两类典型的夹杂性缺陷进行能谱分析,检测位置(图 5a 和图 6a 中圆圈部分)和分析结果分别如图 5 和图 6 所示。经化学成分测定,图 5 中检测位置的 C 含量较高,原子分数为 38.01%,据此分析认为夹杂物主要为碳化物。图 6 中检测位置的 C、O、Si 含量较高,原子分数分别为 64.72%、9.77% 和 0.37%,据此断定夹杂物主要为 CaCO<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 等。这些非金属夹杂物的存在显著

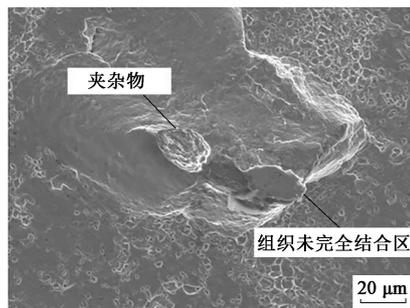


图 4 疲劳断口区域的典型缺陷形貌

Fig. 4 Typical defects morphology of fatigue fracture area

降低了疲劳强度,夹杂物在外力循环加载过程中成为裂纹萌生源,微裂纹主要沿着非金属夹杂物的边界萌生,新产生的微裂纹在疲劳循环过程中不断扩展,加速了疲劳失效。缺陷修复区结合面上夹杂物以及未完全实现组织结合的微小孔洞是造成热塑性变形缺陷修复后试件疲劳强度较低的重要原因之一。

对比前期成果<sup>[4-5,10-11]</sup>的相关数据可知,与实验试件相同的变形温度、变形量和保温条件下,拉伸强度恢复率约为 100%,冲击韧性恢复率约为 80%,疲劳强度恢复率 < 10%。经过热塑性变形和高温保温后,试件内部孔隙性缺陷基本修复,虽然存在着微小夹杂物和孔洞,但是,此时拉伸等静态载荷力学性能基本得到了恢复。冲击韧性恢复率得到了较大提升,但是疲劳性能恢复效果较差。由此可以推断出,孔隙性缺陷修复效果对拉伸、压缩等静态载荷以及冲击、疲劳等动态载荷的影响效果不成比例,材料内部的微小夹杂物和孔隙性缺陷,在不同载荷形式作用下对各种力学性能的影响效果不同。因此,应根据锻件所承受的载荷性质和特点,确定锻件内部缺陷的控制要求和方法。

### 3 孔隙性缺陷修复结合面组织特点

在进行疲劳实验前,沿试件轴向位置剖取孔隙性缺陷修复结合面,观察得到其典型组织形貌如图 7 所示。

由图 7a 可以看出,镦粗变形试件结合面组织基本呈现出“一”字形。有些位置孔隙性缺陷已完全闭合,但是晶粒组织未完全结合。有些位置不仅孔隙性缺陷已完全闭合,而且通过再结晶已呈现出明显的组织结合,产生出其他位置取向的晶粒组织。对其进行更高倍数观察,晶粒组织如图 7b 所示,其孔隙性缺陷修复结合面形成了细小的晶粒组织,与

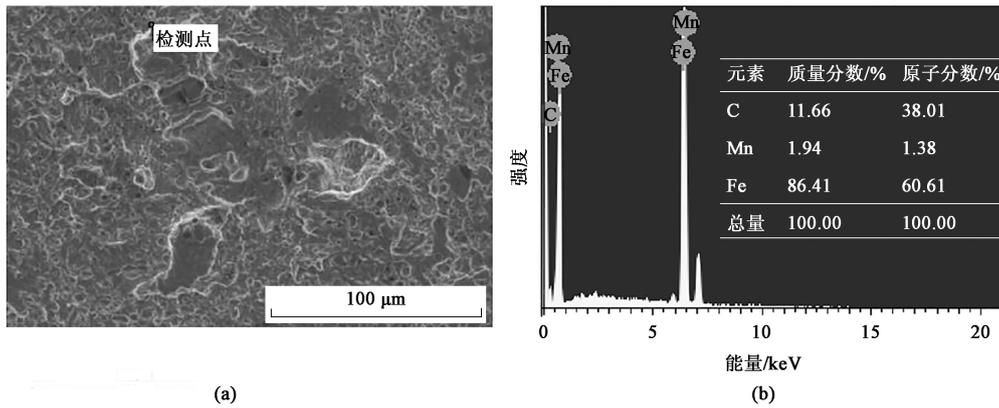


图 5 疲劳断口上典型夹杂物形貌 I 和检测位置 (a) 以及能谱分析结果 (b)

Fig. 5 Typical inclusion morphology I and detection location (a) and energy spectrum analysis result (b) on fatigue fracture

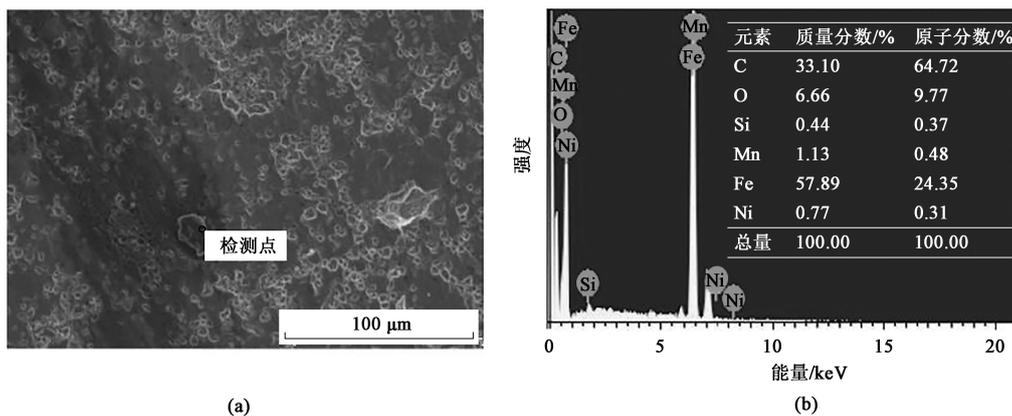


图 6 疲劳断口上典型夹杂物形貌 II 和检测位置 (a) 以及能谱分析结果 (b)

Fig. 6 Typical inclusion morphology II and detection location (a) and energy spectrum analysis result (b) on fatigue fracture

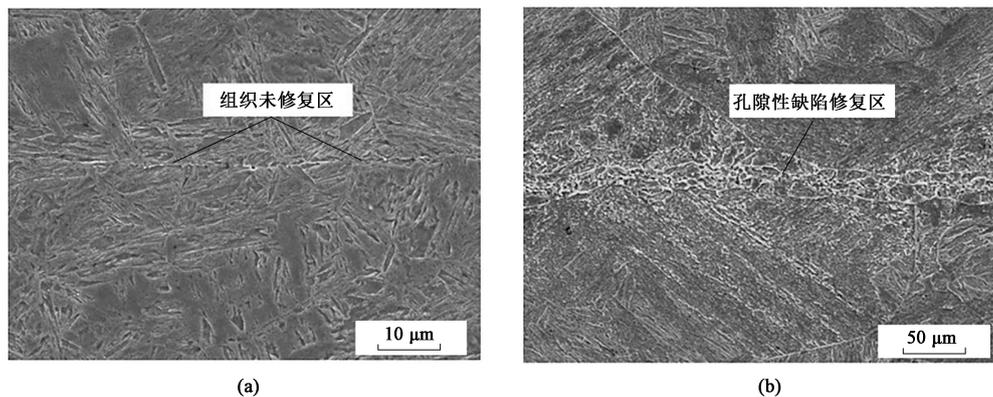


图 7 孔隙性缺陷修复结合面上的典型组织形貌

(a) 组织未修复区 (b) 修复区与基体晶粒组织

Fig. 7 Typical microstructures on repair joint surface of porosity defects

(a) Non repaired area of microstructure (b) Repaired area and matrix grain structure

基体晶粒组织尺寸差别较大。由此可知，结合面由再结晶形成的细小晶粒组成，晶粒尺寸远小于基体组织，存在着明显的“混晶”现象。在承受作用力

时，由于组织不均匀，将引起应力集中。受晶界上微小析出物和结合面之间承载能力较弱的影响，在承受较大载荷作用时可能成为“弱区”，易引起裂

纹沿晶界萌生并扩展。此外,图 4 中观察到疲劳试件断口即修复结合面上存在着夹杂物和晶粒组织未完全结合的微小孔洞,承受动态载荷作用时,夹杂物、微小孔洞和“混晶”等易成为引起缺陷产生的裂纹源。

在承受拉伸、压缩等静态载荷时,力学性能基本得到恢复。在承受冲击、疲劳等动态载荷情况下,力学性能未能完全恢复,由此推测晶粒尺寸的不均匀性对动态载荷力学性能的影响明显大于对静态载荷力学性能的影响。材料内部的微小孔隙性缺陷、微小析出物、“混晶”等对动态载荷力学性能的影响明显强于对静态载荷力学性能的影响。因此,通过高温塑性变形使组织均匀、改善内部夹杂物形貌和分布条件,对于提高疲劳、冲击等动态载荷力学性能具有不可替代的作用。

#### 4 力学性能恢复效果分析

以采用宽砧强压锻造 (Wide Die Heavy Blow Forging, WHF) 法拔长工艺生产大型锻件为背景,制定镦粗和拔长组合工艺模拟研究其缺陷修复效果对疲劳强度的影响。经过 1050 °C 镦粗→拔长→镦粗→拔长,即两次镦粗加两次拔长组合锻造变形,镦粗和拔长的压下率均为 20%,保温 10 h 后,按照同样的方法剖取材料加工为疲劳试件,并按照同样方法和参数进行疲劳实验,3 个试件低周疲劳循环周次的平均值为 19762 次,与文献 [13] 和文献 [14] 中提供的疲劳数据较为接近。通过断口和组织分析可知,孔隙性缺陷修复结合面的修复区的组织状态与基体组织基本相同,修复区和基体的“混晶”现象被消除。拉伸、压缩等静态载荷以及冲击韧性、疲劳等动态载荷力学性能均得到了全面恢复。疲劳试件断口呈现出典型的疲劳断口特征,虽然疲劳试件断面上夹杂物形貌等无明显变化,但是对疲劳、冲击等动态载荷力学性能的影响大大降低。

对比以上研究结果可知,温度、保温时间、塑性变形量是决定内部孔隙性缺陷修复效果、保证晶粒组织均匀、夹杂物形貌合理等提高各种力学性能的重要因素。在镦粗过程中,孔隙性缺陷基本消除后,拉伸、压缩等静态载荷力学性能基本能够恢复,而疲劳强度、冲击韧性等动态载荷力学性能恢复,不仅需要将孔隙性缺陷消除,而且需要使修复结合面的晶粒组织与基体组织基本相同。动态载荷修复

效果需要在孔隙性缺陷修复后晶粒组织长大并与基体组织均匀一致后体现,这也解释了疲劳等动态载荷力学性能恢复条件较拉伸等静态载荷力学性能更加苛刻。虽然,依靠锻造工艺并不能完全消除材料内部夹杂物、化学成分偏析等不利影响,但是消除材料内部孔隙性缺陷和通过再结晶使锻件组织均匀,能够大大减少裂纹扩展的可能性。这也是锻件综合力学性能目前难以被其他加工制造方法有效取代的重要原因。若使锻件晶粒细化并有序分布,需要在高温条件下多个方向进行充分的塑性变形,并保证完成组织再结晶所需要的时间,这样无疑增加了技术难度,但是对于探索优化锻造工艺、提高产品使用寿命提供了理论支撑。

建议在现有冶炼和铸锭生产条件下,大型锻件应采用镦粗→拔长→镦粗→拔长这种至少两次以上的镦粗、拔长工序组合的锻造工艺,这样才能保证拉伸、压缩等静态载荷以及疲劳强度、冲击韧性等动态载荷的力学性能达到初始锻件组织所对应的性能水平。

#### 5 结论

(1) 高温镦粗变形时,疲劳强度等动态载荷力学性能恢复率小于 10%,远低于拉伸等静态载荷和冲击韧性等动态载荷力学性能的恢复效果。

(2) 采用两次镦粗加两次拔长的锻造工艺,孔隙性缺陷修复结合区域的疲劳强度等动态载荷力学性能基本能够恢复至初始组织状态。

(3) 现有材料和铸锭条件下,建议大型锻件采用至少两次以上的镦粗、拔长工序组合的锻造工艺,以提高静态和动态载荷的综合力学性能。

#### 参考文献:

- [1] Kiedssling R. Non-metallic inclusion in steel [A]. Met. Soc. [C]. London, 1978.
- [2] Fukumoto S, Mitchell A. The manufacture of alloys with zero oxide inclusion content [A]. Proceedings of the 1991 Vacuum Metallurgy Conference on the Melting and Processing of Specialty Materials I and SS, Inc [C]. Pittsburgh, 1991.
- [3] 李正邦. 超纯净钢和零非金属夹杂钢 [J]. 特殊钢, 2004, 25 (4): 24-27.  
Li Z B. Super clean steels and zero non-metallic inclusion steels [J]. Special Steels, 2004, 25 (4): 24-27.
- [4] Xin R S, Ma Q X, Guo D D, et al. Restoration of impact properties of internal crack healing in a low carbon steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 682: 433-440.

- [5] Qiu Y, Xin R S, Luo J B, et al. Effect of deformation modes and heat treatment on microstructure and impact property restoration of internal crack healing in SA 508 steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 778: 139073.
- [6] Hosoi A, Nagahama T, Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 533: 38-42.
- [7] 李世键, 孙明月, 刘宏伟, 等. 25Cr2Ni4MoV 钢锻造过程孔洞缺陷愈合规律研究 [J]. 金属学报, 2011, 47 (7): 946-953.
- Li S J, Sun M Y, Liu H W, et al. Study on void healing behavior during forging process for 25Cr2Ni4MoV steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47 (7): 946-953.
- [8] 孙明月, 徐斌, 夏立军, 等. 用于金属构筑成形制造工艺的制造系统 [P]. 中国: 201610083672. 2, 2019-09-24.
- Sun M Y, Xu B, Xia L J, et al. Manufacturing system for metal structure forming and manufacturing process [P]. China: 201610083672. 2, 2019-09-24.
- [9] 王宝忠. 大型锻件的极端制造 [J]. 锻造与冲压, 2018, (21): 46-50.
- Wang B Z. Extreme manufacturing of heavy forgings [J]. Forging & Metalforming, 2018, (21): 46-50.
- [10] 周鹏, 信瑞山, 邱焱, 等. 大型锻件内部孔隙性缺陷变化对冲击性能的影响 [J]. 大型铸锻件, 2021, (3): 15-18.
- Zhou P, Xin R S, Qiu Y, et al. Influence of internal porosity defect variation on impact properties of large forgings [J]. Heavy Castings and Forgings, 2021, (3): 15-18.
- [11] Qiu Y, Xin R S, Luo J B, et al. Crack healing and mechanical properties recovery in SA508-3 steel [J]. Materials, 2019, 12 (6): 890.
- [12] GB/T 15248—2008, 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法 [S].
- GB/T 15248—2008, The test method for axial loading constant-amplitude low-cycle fatigue of metallic materials [S].
- [13] 刘哲, 佟振峰, 梁政强. 国产 A508-3 钢的低周疲劳性能研究 [J]. 原子能科学技术, 2014, 48 (1): 127-133.
- Liu Z, Tong Z F, Liang Z Q. Investigation on low-cycle fatigue property of domestic A508-3 steel [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48 (1): 127-133.
- [14] 陈红宇, 杜军毅, 邓林涛, 等. 核反应堆压力容器锻件用 SA508 系列钢的比较和分析 [J]. 大型铸锻件, 2008, (1): 1-3.
- Chen H Y, Du J Y, Deng L T, et al. The comparison and analysis of SA508 series steel used for nuclear reactor pressure vessel forgings [J]. Heavy Castings and Forgings, 2008, (1): 1-3.

## 欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

**主要栏目:** 综述、锻造、板料成形、管材成形、特种成形、轧制、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

**读者对象:** 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 232 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本(上册)(包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本(下册)(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

**邮局汇款信息:**

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-801

E-mail: fst\_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部