

多向锻造对机械轴承用钢组织及性能的影响

李成思^{1,2}, 孟庆辉¹

(1. 河南工业职业技术学院 机械工程学院, 河南 南阳 473000; 2. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了研究多向锻造对 GCr18Mo 机械轴承用钢组织及性能的影响, 分别对未锻造试样、普通锻造试样和多向锻造试样进行了显微组织观察、高温抗氧化性能和高温耐磨损性能的测试与分析。结果表明: 与未锻造试样相比, 普通锻造试样内部的短条状和颗粒状碳化物明显增多、长条状碳化物明显变少变细; 多向锻造试样内部未见明显的长条状和短条状碳化物, 仅有大量的颗粒状碳化物。多向锻造对组织细化、组织分布均匀性的改善效果优于普通锻造。与普通锻造试样相比, 普通锻造试样经 500 °C 高温氧化 80 h 后氧化增重减小了 27.5%、500 °C 高温磨损 20 min 后磨损体积减小了 29.1%; 多向锻造试样经 500 °C 高温氧化 80 h 后氧化增重减小了 66.9%、500 °C 高温磨损 20 min 后磨损体积减小了 63.1%。多向锻造显著细化了 GCr18Mo 机械轴承用钢的内部组织, 明显提高了其高温抗氧化性能和高温耐磨损性能。

关键词: GCr18Mo 钢; 多向锻造; 显微组织; 碳化物; 高温抗氧化性能; 高温耐磨损性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.007

中图分类号: TG376.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 11-0050-05

Influence of multi-directional forging on microstructure and properties for mechanical bearing steel

Li Chengsi^{1,2}, Meng Qinghui¹

(1. College of Mechanical Engineering, Henan Industrial Vocational and Technical College, Nanyang 473000, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To study the influence of multi-directional forging on microstructure and properties of GCr18Mo mechanical bearing steel, the microstructure, high temperature oxidation resistance and high temperature wear resistance of unforged specimens, ordinary forged specimens and multi-directional forged specimens were tested and analyzed respectively. The results show that compared with the unforged specimens, the short strip and granular carbides in the ordinary forged specimen are obviously increased, and the long strip carbides are obviously reduced and refined, while there are no obvious long strip and short strip carbides in the multi-directional forged specimens, only a large number of granular carbides. The improvement effect of multi-directional forging on microstructure refinement and microstructure distribution uniformity is better than that of ordinary forging. Compared with unforged specimens, the oxidation weight gain of ordinary forged specimens after high temperature oxidation at 500 °C for 80 h decreases by 27.5%, and the wear volume decreases by 29.1% after high temperature wear at 500 °C for 20 min, while the oxidation weight gain of multi-directional forged specimens after high temperature oxidation at 500 °C for 80 h decreases by 66.9%, and the wear volume after high temperature wear at 500 °C for 20 min decreases by 63.1%. Thus, the multi-directional forging significantly refines the internal structure of GCr18Mo mechanical bearing steel and significantly improves its high temperature oxidation resistance and high temperature wear resistance.

Key words: GCr18Mo steel; multi-directional forging; microstructure; carbides; high temperature oxidation resistance; high temperature wear resistance

轴承钢作为一种常用钢材, 具有巨大的市场需求。人们也对轴承钢进行了较为广泛的研究, 取得了较多的研究成果。孙飞龙等^[1]研究了超洁净轴承

钢中夹杂物与滚动接触疲劳寿命的关系。顾超等^[2]详细阐述了高疲劳寿命轴承钢洁净度现状及研究进展。赵昌龙等^[3]探索了表面结构对 GCr15 淬硬轴承钢切削过程的影响规律。刘晓初等^[4]分析了强化研磨加工中喷射角度对 GCr15 轴承钢板塑性变形的影响。宗晓明等^[5]对 GCr15 轴承钢电火花线切割工艺参数进行了优化。秦礼彬等^[6]研究了 GCr18Mo 轴承钢的真空碳脱氧。魏巍等^[7]介绍了稀土在轴承钢生

收稿日期: 2021-12-09; 修订日期: 2022-03-09

基金项目: 2018 年河南省科技发展计划 (182102210266)

作者简介: 李成思 (1989-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: louzifan560975127@163.com

产中的应用。李新生等^[8]进行了 GCr15 高强轴承钢的疲劳性能与寿命预测研究。宋玉冰等^[9]进行了 12Cr2Mo1 大型钢锭锻造裂纹分析与控制。赵岩和李强军^[10]探讨了锻造工艺参数对 H13 热作模具钢性能的影响。但是，随着工业技术的发展，市场对机械轴承用钢性能的要求不断提高，迫切需要轴承钢具有更好的综合性能，尤其是高温抗氧化性和高温耐磨损性能。多向锻造是一种改善材料性能的有效途径。熊逸博等^[11]研究了多向锻造对电弧熔丝增材制造 300M 钢微观组织及拉伸性能的影响。张肖晓等^[12]采用数值模拟的方法研究了大截面 SDP1 塑料模具钢多向锻造过程中的微观组织演变。随着机械工业的不断发展，现有轴承钢的性能难以满足市场需要，尤其是高温抗氧化性能和高温耐磨损性能迫切需要进行大幅提高。众所周知，多向锻造是一种改善金属材料力学性能的有效途径，但是，目前关于多向锻造对机械轴承钢高温抗氧化性能和高温耐磨损性能的影响的研究还鲜有报道。本文尝试对 GCr18Mo 机械轴承用钢进行多向锻造，并探讨了多向锻造对 GCr18Mo 机械轴承用钢的显微组织、高温抗氧化性能和高温耐磨损性能的影响，为机械轴承用钢的改性提供了新的思路和相关试验数据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为感应熔炼后电渣重熔、并进行了 900 °C × 12 h 均匀化处理的 GCr18Mo 机械轴承用钢试样(以下简称试验用钢)。试验用钢为方形，尺

寸为 40 mm × 40 mm × 40 mm。试验用钢的化学成分如表 1 所示。为了研究多向锻造对试验用钢的组织性能的影响，将未经锻造的试验用钢(记为未锻造试样)、进行普通锻造的试验用钢(记为普通锻造试样)作为对比试样，将多向锻造试验用钢记为多向锻造试样。普通锻造和多向锻造均采用 315 t 四柱液压机(图 1)。普通锻造的工艺参数为：始锻温度为 1180 °C、终锻温度为 850 °C。多向锻造的工艺过程如图 2 所示。普通锻造时的锻造比(即锻前钢锭横截面积与锻后锻件横截面积的比值)选用 5。

表 1 试验用钢的化学成分(%, 质量分数)
Table 1 Chemical compositions of test steel (% mass fraction)

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	S	P	Fe
0.984	0.362	0.327	1.814	0.211	0.134	0.148	0.008	0.007	余量



图 1 锻造试验设备
Fig. 1 Forging test equipment

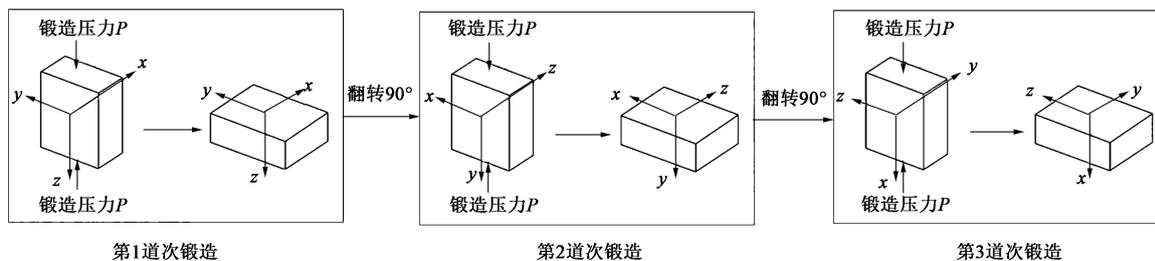


图 2 试样多向锻造过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-direction forging process for specimens

1.2 试验方法

显微组织观察：在未锻造试样、普通锻造试样和多向锻造试样中部分别切取尺寸为 $\Phi 15$ mm × 10 mm 的圆片形金相试样，经过金相磨制、抛光

后，在 AxioVertA1 型金相显微镜下观察试样的显微组织并拍照记录。

高温抗氧化性能测试：在未锻造试样、普通锻造试样和多向锻造试样中部分别切取尺寸为 30 mm ×

30 mm×30 mm 的方形氧化试样, 表面磨光, 表面粗糙度 $\leq 1.6 \mu\text{m}$, 并用酒精清除表面油污, 然后置于 120 °C 烘箱内烘烤至恒重, 然后在干燥器内冷却至室温后准确称重; 再将试样置于 500 °C 高温炉中进行 500 °C×80 h 的高温氧化试验, 每隔 10 h 取出试样, 并置于干燥器内冷却至室温后准确称重。

高温耐磨损性能测试: 在未锻造试样、普通锻造试样和多向锻造试样中分别切取尺寸为 $\Phi 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆片形磨损试样, 在高温摩擦磨损试验机 (型号为 MMUD-5B) 上进行 500 °C 的高温磨损试验, 磨轮转速为 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 试验时间为 20 min, 以 45 钢为对磨材料, 记录磨损体积并在 Phenom Partical X 型扫描电子显微镜下观察试样的表面磨损情况。

2 试验结果及讨论

2.1 显微组织

未锻造试样、普通锻造试样和多向锻造试样的

显微组织如图 3 所示。从图 3a 中可以看出, 未锻造试样内部除了少部分短条状碳化物及颗粒状碳化物外, 还存在较多长条状碳化物, 组织较为粗化, 组织分布的均匀性较差。与普通锻造试样 (图 3b) 相比, 普通锻造试样内部的短条状和颗粒状碳化物明显增多, 长条状碳化物明显变少、变细, 组织更为细化, 组织分布均匀性有所提高; 多向锻造试样 (图 3c) 内部未见明显的长条状和短条状碳化物, 仅有大量的颗粒状碳化物。这主要是因为: 普通锻造在一定程度上破坏了试样内部的长条状碳化物, 在普通锻造过程中试样的动态再结晶过程不够充分, 导致仅有一部分长条状碳化物发生了破碎以及内部晶粒的细化; 但是, 在多向锻造过程中, 由于外加载荷方向不断变化, 使得变形区域内的晶粒内部相互交错、相互纠缠, 从而使得长条状或短条状碳化物被破碎为细小颗粒状碳化物, 且内部产生大量新晶粒, 达到显著细化试样内部组织、明显提高组织分布均匀性的效果。

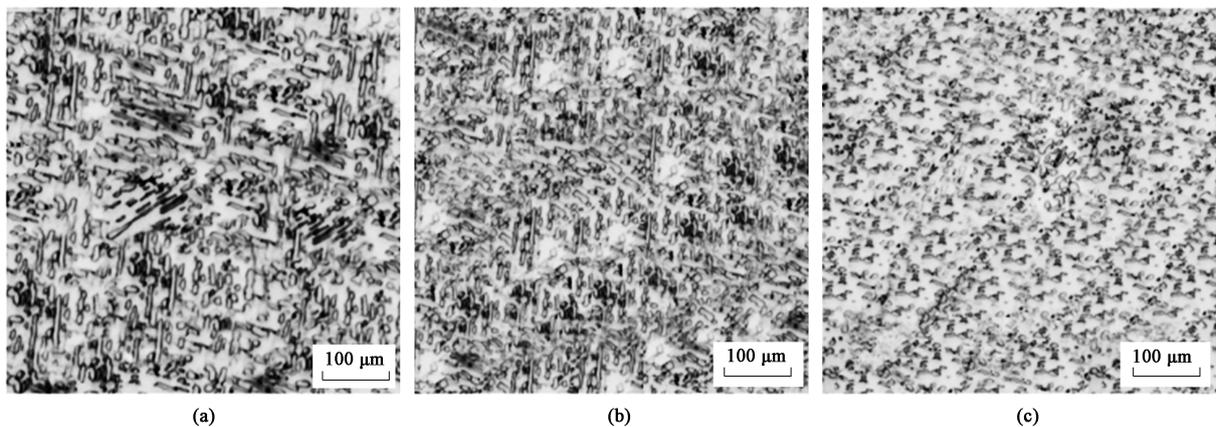


图 3 试样显微组织

(a) 未锻造试样 (b) 普通锻造试样 (c) 多向锻造试样

Fig. 3 Microstructures of specimens

(a) Unforged specimen (b) Ordinary forged specimen (c) Multi-direction forged specimen

2.2 高温抗氧化性能

未锻造试样、普通锻造试样和多向锻造试样的高温抗氧化性能测试结果, 如图 4 所示。由图 4 可以看出, 未锻造试样在 500 °C×80 h 高温氧化过程中出现较为明显的氧化增重, 经 500 °C 高温氧化 80 h 后试样氧化增重达到 $23.6 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 氧化现象明显, 氧化较为严重。与普通锻造试样相比, 普通锻造试样的高温氧化增重明显变缓, 经 500 °C 高温氧化 80 h 后试样氧化增重为 $17.1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 较未锻造试样减小了 27.5%, 氧化情况得到较为

明显的改善; 多向锻造试样的高温氧化增重进一步变缓, 经 500 °C 高温氧化 80 h 后试样氧化增重仅为 $7.8 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 较未锻造试样减小了 66.9%, 氧化情况得到了显著改善。由此可以看出, 普通锻造在一定程度上改善了试样的高温抗氧化性能, 而多向锻造则显著改善了试样的高温抗氧化性能。这主要是因为: 在普通锻造过程中, 部分晶粒细化和有限的组织分布均匀性改善只能在一定程度上提高试样在高温氧化过程中的抵抗能力, 而多向锻造由于显著的晶粒细化和组

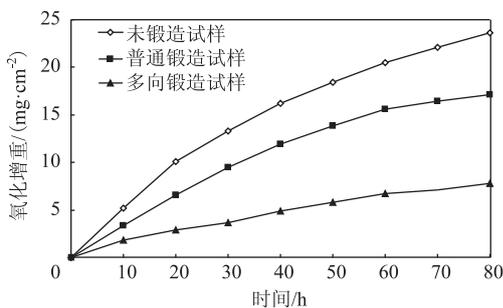


图 4 试样高温抗氧化性能测试结果

Fig. 4 Test results of high temperature oxidation resistance for specimens

织分布均匀性改善效果，使得试样在高温氧化时具有更强的抗氧化能力，明显提高了试样的高温抗氧化性能。

2.3 高温耐磨损性能

未锻造试样、普通锻造试样和多向锻造试样的高温耐磨损性能测试结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，未锻造试样在 500 °C × 20 min 高温摩擦磨损试验过程中出现较为明显的磨损现象，经 500 °C 高温磨损 20 min 后试样磨损体积达到 17.9 × 10⁻³ cm³，磨损现象明显，试样磨损较为严重。与未锻造试样相比，普通锻造试样的高温磨损体积明显减小，经 500 °C 高温磨损 20 min 后试样磨损体积为 12.7 × 10⁻³ cm³，较未锻造试样减小了 29.1%，磨损情况减轻，试样高温耐磨损性能得到了提高；多

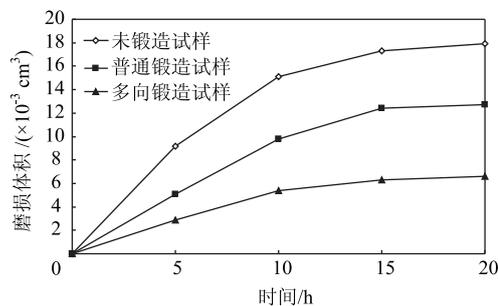


图 5 试样高温耐磨损性能测试结果

Fig. 5 Test results of high temperature wear resistance for specimens

向锻造试样的高温磨损体积进一步减小，经 500 °C 高温磨损 20 min 后试样的磨损体积为 6.6 × 10⁻³ cm³，较未锻造试样减小了 63.1%，磨损情况得到了显著减轻，试样高温耐磨损性能显著提高。

图 6 为未锻造试样、普通锻造试样和多向锻造试样经 500 °C × 20 min 高温摩擦磨损后的表面形貌。从图 6a 可以看出，未锻造试样高温磨损后的表面布满大块状起皮和较深磨痕，试样磨损较为严重。与未锻造试样（图 6a）相比，普通锻造试样（图 6b）高温磨损后表面大块状起皮减少，磨痕变浅，试样磨损现象减轻，高温耐磨损性能得到了提高；而多向锻造试样（图 6c）高温磨损后表面未见明显的大块状起皮，磨痕进一步变浅，试样磨损现象进一步减轻，高温耐磨损性能进一步提高。

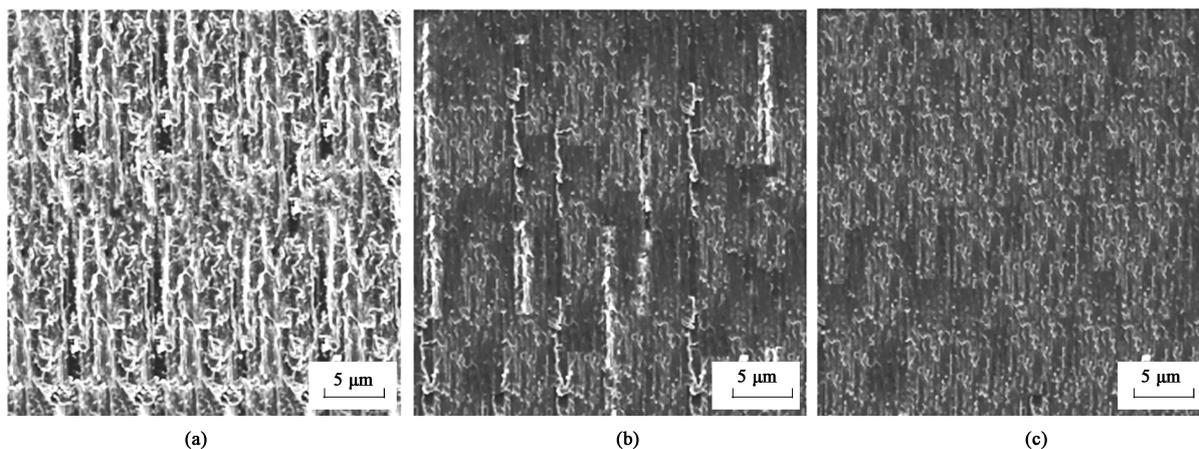


图 6 试样高温摩擦磨损后的表面形貌 SEM 照片

(a) 未锻造试样 (b) 普通锻造试样 (c) 多向锻造试样

Fig. 6 SEM photos of surface morphologies for specimens after high temperature friction and wear
(a) Unforged specimen (b) Ordinary forged specimen (c) Multi-direction forged specimen

由此可以看出，与高温抗氧化性能类似，普通锻造改善了试样的高温耐磨损性能，而多向锻造则

显著改善了试样的高温耐磨损性能。这主要是因为：在普通锻造过程中，部分的晶粒细化和有限的组织

分布均匀性对试样高温耐磨损性能的改善效果有限,但多向锻造因为对试样内部晶粒实现了明显的细化和均匀的组织分布效果,从而使得试样在高温摩擦磨损过程中,可以更好地抵抗摩擦磨损,明显减小磨损体积,显著提高试样的高温耐磨损性能。

3 结论

(1) 与未锻造 GCr18Mo 机械轴承用钢试样相比,普通锻造试样内部的短条状和颗粒状碳化物明显增多、长条状碳化物明显变少变细;多向锻造试样内部未见明显的长条状和短条状碳化物,仅有大量的颗粒状碳化物。多向锻造对组织细化、组织分布均匀性的改善效果优于普通锻造。

(2) 与未锻造 GCr18Mo 机械轴承用钢试样相比,普通锻造试样经 500 °C 高温氧化 80 h 后氧化增重减小了 27.5%、多向锻造试样氧化增重减小了 66.9%;普通锻造提高了试样高温抗氧化性能,但多向锻造试样具有更优异的高温抗氧化性能。

(3) 与未锻造 GCr18Mo 机械轴承用钢试样相比,普通锻造试样经 500 °C 高温磨损 20 min 后磨损体积减小了 29.1%,高温耐磨损性能得到了提高;多向锻造试样经 500 °C 高温磨损 20 min 后磨损体积减小了 63.1%,高温耐磨损性能显著提高。

参考文献:

- [1] 孙飞龙,耿克,俞峰,等.超洁净轴承钢中夹杂物与滚动接触疲劳寿命的关系[J].金属学报,2020,56(5):693-703.
Sun F L, Geng K, Yu F, et al. Relationship of inclusions and rolling contact fatigue life for ultra-clean bearing steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56 (5): 693-703.
- [2] 顾超,王仲亮,肖微,等.高疲劳寿命轴承钢洁净度现状及研究进展[J].工程科学学报,2021,43(3):299-310.
Gu C, Wang Z L, Xiao W, et al. Research status and progress on cleanliness of high-fatigue-life bearing steels [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43 (3): 299-310.
- [3] 赵昌龙,刘俊,王阔,等.表面织构对 GCr15 淬硬轴承钢切削过程影响分析[J].机床与液压,2020,48(11):76-80.
Zhao C L, Liu J, Wang K, et al. Analysis of the influence of surface texture on the cutting process of GCr15 hardened bearing steel [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48 (11): 76-80.
- [4] 刘晓初,段伟建,梁忠伟,等.强化研磨加工中喷射角度对 GCr15 轴承钢板塑性变形的影响[J].工具技术,2020,54(3):66-69.
Liu X C, Duan W J, Liang Z W, et al. Effect of injection angle on plastic deformation of GCr15 bearing steel plate during reinforced grinding [J]. Tool Engineering, 2020, 54 (3): 66-69.
- [5] 宗晓明,高飞,权超健,等.GCr15 轴承钢电火花线切割工艺参数优化[J].轴承,2020,(7):9-14.
Zong X M, Gao F, Quan C J, et al. Optimization of WEDM process parameters for GCr15 bearing steel [J]. Bearing, 2020, (7): 9-14.
- [6] 秦礼彬,郭曙强,郑红妍,等.GCr18Mo 轴承钢真空碳脱氧研究[J].上海金属,2020,42(1):60-67,76.
Qin L B, Guo S Q, Zheng H Y, et al. Study on vacuum carbon deoxidation of GCr18Mo bearing steel [J]. Shanghai Metals, 2020, 42 (1): 60-67, 76.
- [7] 魏巍,李虹,郭旭东.稀土在轴承钢生产中的应用[J].稀土,2020,41(3):139-145.
Wei W, Li H, Guo X D. The application of rare earth in the production of bearing steel [J]. Chinese Rare Earths, 2020, 41 (3): 139-145.
- [8] 李新生,李因,刘国强,等.高强轴承钢 GCr15 的疲劳性能与寿命预测研究[J].锻压装备与制造技术,2020,55(4):141-144.
Li X S, Li N, Liu G Q, et al. Study on fatigue performance and life prediction of high strength bearing steel GCr15 [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2020, 55 (4): 141-144.
- [9] 宋玉冰,陈明,郭彪,等.12Cr2Mo1 大型钢锭锻造裂纹分析与控制[J].锻压技术,2021,46(10):49-55.
Song Y B, Chen M, Guo B, et al. Analysis and control of forging cracks for 12Cr2Mo1 large ingots [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 49-55.
- [10] 赵岩,李强军.锻造工艺参数对 H13 热作模具钢性能的影响[J].锻压技术,2021,46(8):12-17.
Zhao Y, Li Q J. Influence of forging process parameters on properties of H13 hot die steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 12-17.
- [11] 熊逸博,郑志镇,温东旭,等.多向锻造对电弧熔丝增材制造 300M 钢微观组织及拉伸性能的影响[J].锻压技术,2021,46(7):1-6.
Xiong Y B, Zheng Z Z, Wen D X, et al. Influence of multi-directional forging on microstructure and tensile properties for 300M steel by arc fuse additive manufacturing [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 1-6.
- [12] 张肖晓,陈旋,李晓成,等.大截面 SDP1 塑料模具钢多向锻造过程中微观组织演变的数值研究[J].上海金属,2020,42(2):57-62.
Zhang X X, Chen X, Li X C, et al. Numerical study on microstructure evolution of large cross-section SDP1 plastic die steel during multi-directional forging [J]. Shanghai Metals, 2020, 42 (2): 57-62.