

锻造对热锻模具钢高温性能的影响

乔宁宁¹, 王佳琪²

(1. 山西工程科技职业大学 设备工程学院, 山西 晋中 030619; 2. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了研究锻造对 4Cr5W2VSi 热锻模具钢高温性能的影响, 采用不同工艺对 4Cr5W2VSi 热锻模具钢进行了锻造试验, 并与未锻造试验钢进行了显微组织、高温磨损性能和高温抗氧化性能的测试与对比分析。结果表明: 锻造显著细化了试验钢材的显微组织, 提高了试验钢材的高温磨损性能和高温抗氧化性能。随着始锻温度从 1050 ℃ 增大至 1150 ℃, 试验钢材的高温磨损体积和高温氧化速率均先减小后增大, 高温磨损性能和高温抗氧化性能均先提高后下降。与未锻造试验钢相比, 在始锻温度为 1100 ℃、终锻温度为 900 ℃、锻造比为 5 的工艺参数下, 试验钢材高温磨损体积改善比率达 46%、高温氧化速率改善比率达 67%, 试验钢材获得了优异的高温磨损性能和高温抗氧化性能。

关键词: 锻造; 4Cr5W2VSi 热锻模具钢; 始锻温度; 高温磨损性能; 高温抗氧化性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.004

中图分类号: TG376.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0019-06

Influence of forging on high temperature properties for hot forging die steel

Qiao Ningning¹, Wang Jiaqi²

(1. Department of Mechanical Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong 030619, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan University of Technology, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to study the effect of forging on high temperature properties for 4Cr5W2VSi hot forging die steel, the forging tests of 4Cr5W2VSi hot forging die steel were carried out by different processes, and its microstructure, high temperature wear resistance property and high temperature oxidation resistance property were tested and compared with those of the unforged test steel. The results show that the forging significantly refines the microstructure of the test steel and improves the high temperature wear resistance property and high temperature oxidation resistance property of the test steel. When the initial forging temperature increases from 1050 ℃ to 1150 ℃, the high temperature wear volume and the high temperature oxidation rate of the test steel first decrease and then increase, and the high temperature wear resistance property and high temperature oxidation resistance property first increase and then decrease. Compared with the unforged test steel, under the process parameters for the initial forging temperature of 1100 ℃, the final forging temperature of 900 ℃ and the forging ratio of 5, the improvement rate of high temperature wear volume and the high temperature oxidation rate for the test steel reach by 46% and 67%, respectively. The test steels obtain the optimal high temperature wear resistance property and high temperature oxidation resistance properties.

Key words: forging; 4Cr5W2VSi hot forging die steel; initial forging temperature; high temperature wear resistance property; high temperature oxidation resistance property

热锻模具钢是一种极其重要的模具钢, 市场需求大、性能要求高, 吸引了较多科研工作者的研究兴趣, 也取得了一系列研究成果。马瑞等^[1]分析了 NOS525 钢热锻模具早期开裂失效的原因; 韦光珍等^[2]探讨和分析了锻模预热温度对含铈新型模具钢性能的影响规律; 白植雄等^[3]分析了 4Cr5Mo2V 钢曲轴热锻模具的失效原因; 金欣等^[4]研究了 Mo-W-

Co 系高热强性热锻模具钢的组织与性能; 王喜刚^[5]分析了热处理对 Cr12MoV 锻造冷作模具钢性能的影响; 殷铭等^[6]分析了锻造工艺对含钒热作模具钢组织和性能的影响; 左鹏鹏等^[7]研究了锰含量对 3Cr4MoSiV 热锻模具钢抗回火软化能力的影响; 王泽等^[8]采用数值模拟方法对高合金钢冷轧工作辊锻造过程进行了分析; 赵岩和李强军^[9]探讨和分析了锻造工艺参数对 H13 热作模具钢性能的影响。但是, 随着市场对热锻模具钢性能要求的不断提高, 迫切需要对热锻模具钢进行性能改善与提升。众所周知, 锻造能消除金属在冶炼过程中产生的铸态疏松等缺陷、优化微观组织结构、提高金属综合性能,

收稿日期: 2021-04-04; 修订日期: 2021-07-08

基金项目: 山西省科技厅课题 (2013041007-03)

作者简介: 乔宁宁 (1981-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: qiaoning1981@126.com

但是，目前关于锻造对热锻模具钢高温性能影响的研究还很少，难以对工业化生产提供有效的指导。为此，本文尝试对 4Cr5W2VSi 热锻模具钢进行锻造试验，并与未进行锻造的 4Cr5W2VSi 热锻模具钢进行比较，研究分析了锻造对 4Cr5W2VSi 热锻模具钢高温磨损性能、高温抗氧化性能和内部组织的影响，为热锻模具钢的改性提供了思路和试验数据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

选用感应熔炼后电渣重熔的 4Cr5W2VSi 热锻模具钢（简称“试验钢材”）为试验材料，尺寸为 350 mm×180 mm×180 mm，试验钢材的热处理工艺为：1050 ℃ 油淬、570 ℃ 第 1 次回火、540 ℃ 第 2 次回火。采用 500 t 四柱液压机（图 1）进行试验钢材的锻造试验，锻造方式为单向拔长。锻造加热采用中频感应加热方式，加热炉型号为 RK5000 型中频感应加热炉，额定功率为 5000 kW、感应器电压为 2800 V；锻造采用自制模具，模具材料为进口 W360 模具钢、模具预热温度为 280 ℃。试验钢材的锻造工艺参数如表 1 所示。由于各试验钢材在锻造过程中仅改变始锻温度，经不同工艺锻造后的各试样外形无明显差异，试验钢材锻件形貌如图 2 所示。为了避免锻后内应力过大造成内部微裂纹而影响试验结果，所有试验钢材在锻造后均进行了同种工艺的退火热处理：900 ℃×3 h，炉冷至 300 ℃，再出炉空冷。为了研究锻造对热锻模具钢高温性能的影响，将未经锻造的 4Cr5W2VSi 热锻模具钢作为对比试样，记为试样 4#。



图 1 试验钢材锻造试验所用设备
Fig. 1 Equipment used in forging test for test steels

表 1 试验钢材锻造工艺参数
Table 1 Forging process parameters of test steels

试样编号	始锻温度/℃	终锻温度/℃	锻造比
1#	1050	900	5
2#	1100	900	5
3#	1150	900	5
4#	未锻造		



图 2 试验钢材锻件形貌
Fig. 2 Morphology of test steel forgings

1.2 试验方法

（1）高温磨损性能

在试验钢材两端及中间位置切取圆柱形磨损试样，直径为 $\Phi 40$ mm、高度为 15 mm。将试样加热至 500 ℃ 后在 MMU-5G 型高温摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损试验，磨损转速为 $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、试验时间为 10 min、相对滑动速度设置为 $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，对磨材料选用 45 钢。记录磨损体积，并用 JSM6510 型扫描电镜观察表面磨损形貌。为了减小试验误差，每种试验钢材取 3 个高温磨损测试试样，取其测试值的算术平均值作为试验钢材的测试值。

（2）高温抗氧化性能

在试验钢材两端及中间位置切取圆柱形高温氧化试样，直径为 $\Phi 15$ mm、长度为 30 mm、表面粗糙度 $R_a \leq 1.6 \text{ }\mu\text{m}$ 。试验前，首先用丙酮将试样表面油污等杂质清除干净，再置于 $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱中进行干燥，待试样冷却至室温后称重；然后，将试样置于 500 ℃ 马弗炉中进行高温氧化试验，氧化时间为 20 h，取出试样冷却至室温后称重，计算试样的氧化速率，即单位时间、单位面积内的质量增重量。为了减小试验误差，每种试验钢取 3 个高温氧化测试试样，取其测试值的算术平均值作为试验钢的测试值。

(3) 显微组织

在试验钢中间位置切取圆片状金相试样, 直径为 $\Phi 20$ mm、厚度为 8 mm。经过磨制、抛光和腐蚀后, 在 PG18 型显微镜下观察内部显微组织。

2 试验结果及讨论

2.1 高温磨损性能

采用不同工艺锻造的试验钢材及未经锻造的试验钢材, 在 500 °C 摩擦磨损环境下的高温磨损试验结果如图 3 所示。从图 3 可以看出: 与未经锻造的试验钢材相比, 锻造明显降低了试验钢材的高温磨损体积, 显著改善了试验钢材的高温磨损性能。此外, 从图 3 还可以看出: 在终锻温度为 900 °C 和锻造比为 5 均不变的情况下, 随着始锻温度从 1050 °C 提高至 1150 °C, 试验钢材的磨损体积表现为先减后增的变化趋势, 即试验钢材的高温磨损性能先升高后下降。当始锻温度为 1100 °C 时, 试验钢材的高温磨损体积最小 ($21 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$), 较未锻造钢减小了 $1.8 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$, 其减小幅度 (即改善比率) 达 46%, 试验钢材的高温磨损性能得到了显著提高。图 4 为采用不同工艺锻造的试验钢材及未经锻造的试验钢材经 500 °C 高温磨损试验后的表面形貌 SEM (扫描电镜) 照片。从图 4 可以看出: 未经锻造的试验钢材 (图 4d) 在高温磨损后表面出现较多较大尺寸的坑洞、起皮严重, 磨损现象较为严重; 锻造后的试验钢材在高温磨损后表面坑洞和起皮明显减少, 尤其当始锻温度为 1100 °C (图 4b) 时, 试验钢材高温磨损后表面未见明显的坑洞和起皮, 仅有尺寸较小的磨屑, 磨损现象明显减轻。

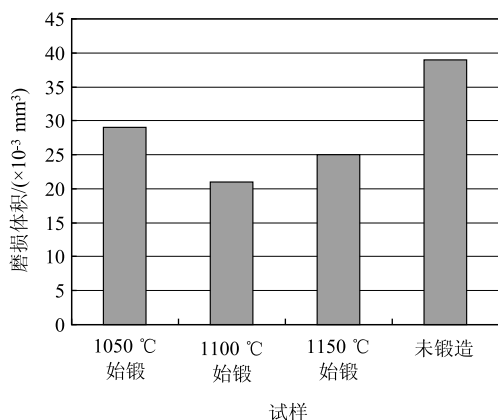


图3 试验钢材高温磨损性能测试结果

Fig. 3 Test results of high temperature wear resistance property for test steels

2.2 高温抗氧化性能

采用不同工艺锻造的试验钢材及未经锻造的试验钢材, 在 500 °C 环境下的高温氧化试验结果如图 5 所示。从图 5 可以看出: 与未经锻造的试验钢材相比, 锻造明显降低了试验钢材的氧化速率, 显著改善了试验钢材的高温抗氧化性能。此外, 从图 5 还可以看出: 在终锻温度为 900 °C 和锻造比为 5 均不变的情况下, 随着始锻温度从 1050 °C 提高至 1150 °C, 试验钢材的氧化速率表现为先减后增的变化趋势, 即试验钢材的高温抗氧化性能先升高后下降。当始锻温度为 1100 °C 时, 试验钢材的高温氧化速率最小 (为 $75 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$), 较未锻造钢材减小了 $155 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 其减小幅度 (即改善比率) 达 67%, 试验钢材的高温抗氧化性能得到了显著提高。

2.3 显微组织

采用不同工艺锻造的试验钢材及未经锻造的试验钢材显微组织照片如图 6 所示。从图 6 可以看出: 与未经锻造的试验钢材相比, 锻造明显减小了试验钢材的内部晶粒尺寸, 显著改善了试验钢材内部组织分布。未经锻造的试验钢材 (图 6d) 内部存在较为粗大的枝晶和明显的鱼骨状碳化物, 碳化物粗大且形状尖锐、分布均匀性较差; 经过锻造后试验钢材的内部未见明显的枝晶和鱼骨状碳化物, 晶粒尺寸明显减小且分布更为均匀。此外, 从图 6 还可以看出: 在终锻温度为 900 °C 和锻造比为 5 均不变的情况下, 随着始锻温度从 1050 °C 提高至 1150 °C, 试验钢材的显微组织先细化后粗化, 碳化物尺寸先减小后增大。当始锻温度为 1100 °C (图 6b) 时, 试验钢材内部显微组织最细小、呈等轴晶, 碳化物呈细小颗粒状弥散分布。

与未经锻造的 4Cr5W2VSi 热锻模具钢相比, 试验钢材经过锻造加工后, 由于金属的变形和再结晶, 使得钢中原有的粗大枝晶和鱼骨状碳化物变成晶粒更细小、尺寸更为均匀的等轴晶组织; 同时, 锻造使得钢锭内部原有的偏析、疏松、气孔、夹渣等压实和焊合, 其组织变得更加紧密^[9-11], 所以, 锻造显著改善了 4Cr5W2VSi 热锻模具钢的高温磨损性能和高温抗氧化性能。

在 4Cr5W2VSi 热锻模具钢锻造过程中, 始锻温度是一个极其重要的锻造工艺参数。始锻温度如果选择过低, 容易导致试验钢材在锻造过程中的变形抗力过大, 无法进行充分的塑性变形和回复作用, 难以使内部组织明显细化, 且很难促使内部晶粒均

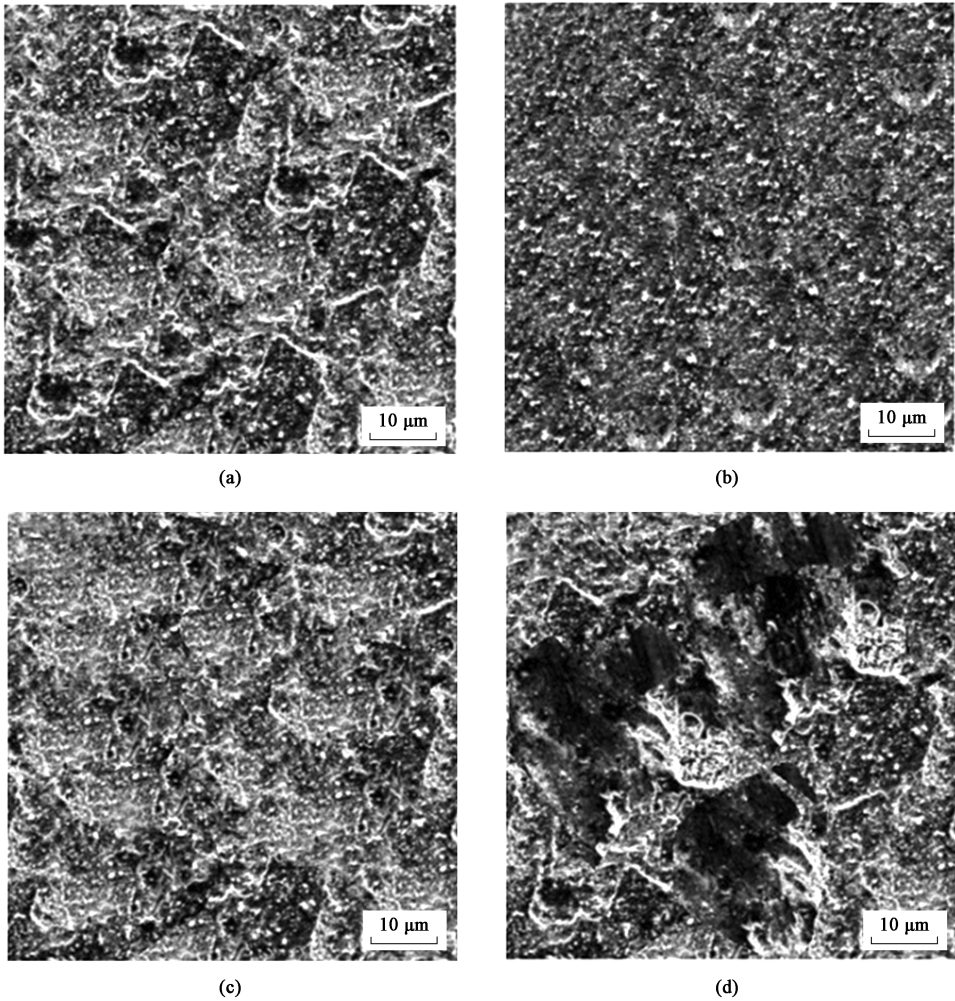


图 4 试验钢材高温磨损试验后的表面形貌 SEM 照片

(a) 1050 °C 始锻 (b) 1100 °C 始锻 (c) 1150 °C 始锻 (d) 未经锻造

Fig. 4 SEM photos of surface morphologies for test steels after high temperature wear test

(a) Initial forging at 1050 °C (b) Initial forging at 1100 °C (c) Initial forging at 1150 °C (d) Without forging

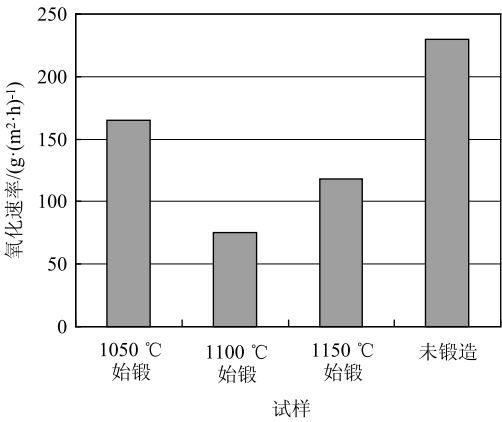


图 5 试验钢材高温抗氧化性能测试结果

Fig. 5 Test results of high temperature oxidation resistance property for test steels

匀分布，从而难以获得理想的高温磨损性能和高温

抗氧化性能^[9]。提高始锻温度，有助于促进试验钢材在锻造过程中减小变形抗力，进行充分的塑性变形和回复再结晶，不仅使得试验钢材内部晶粒明显细化，且促使组织和碳化物均匀分布，从而显著提高试验钢材的高温磨损性能和高温抗氧化性能^[9-10]。但是，始锻温度过高，容易导致组织过热、发生组织粗化，降低试验钢材的高温磨损性能和高温抗氧化性能^[11-12]。随始锻温度提高，试验钢材的高温磨损性能和高温抗氧化性能均表现为先升高后下降的原因。由此可以看出，为了获得理想的高温磨损性能和高温抗氧化性能，4Cr5W2VSi 热锻模具钢的始锻温度不宜过高也不宜过低。在始锻温度为 1100 °C、终锻温度为 900 °C、锻造比为 5 的工艺参数下锻造，4Cr5W2VSi 热锻模具钢可以获得优异的高温磨损性能和高温抗氧化性能。

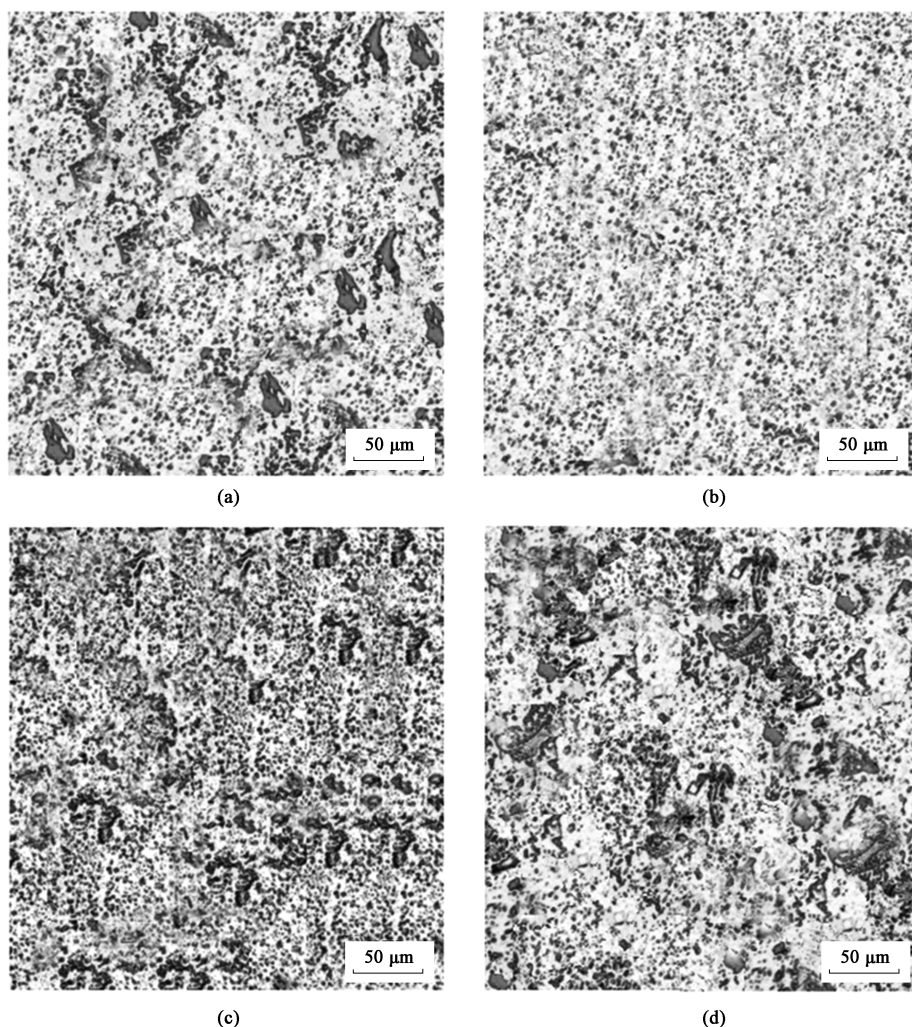


图6 不同锻造工艺的试验钢材的显微组织

(a) 1050 ℃始锻 (b) 1100 ℃始锻 (c) 1150 ℃始锻 (d) 未经锻造

Fig. 6 Microstructures of test steels for different forging processes

(a) Initial forging at 1050 ℃ (b) Initial forging at 1100 ℃ (c) Initial forging at 1150 ℃ (d) Without forging

3 结论

(1) 锻造显著细化了4Cr5W2VSi热锻模具钢的显微组织, 提高了试验钢材的高温磨损性能和高温抗氧化性能。与未锻造试验钢材, 在始锻温度为1100 ℃、终锻温度为900 ℃、锻造比为5的工艺参数下, 锻造使试验钢材的高温磨损体积改善比率达46%、高温氧化速率改善比率达67%。

(2) 随着始锻温度从1050 ℃增大至1150 ℃时, 4Cr5W2VSi热锻模具钢的高温磨损体积和高温氧化速率均先减小后增大, 高温磨损性能和高温抗氧化性能均先提高后下降。

参考文献:

- [1] 马瑞, 陈希春, 金林奎, 等. NOS525 钢热锻模具早期开裂失效分析 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (4): 170-176.
Ma R, Chen X C, Jin L K, et al. Failure analysis on early cracking of hot forging mold for NOS525 steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (4): 170-176.
- [2] 韦光珍, 张玉平, 王明. 锻模预热温度对含锶新型模具钢性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (13): 100-102, 119.
Wei G Z, Zhang Y P, Wang M. Effect of preheating temperature of forging die on properties of new die steel containing strontium [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (13): 100-102, 119.
- [3] 白植雄, 郑铭达, 王宇斌, 等. 4Cr5Mo2V 钢曲轴热锻模具失效分析 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (1): 214-218.
Bai Z X, Zheng M D, Wang Y B, et al. Failure analysis of a

- crankshaft hot forging die of 4Cr5Mo2V steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44 (1): 214-218.
- [4] 金欣, 周健, 迟宏宵, 等. Mo-W-Co 系高热强性热锻模具钢的组织与性能 [J]. 金属热处理, 2018, 43 (2): 8-15.
Jin X, Zhou J, Chi H X, et al. Microstructure and mechanical properties of Mo-W-Co high hot-strength hot-work die steels [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43 (2): 8-15.
- [5] 王喜刚. 热处理对 Cr12MoV 锻造冷作模具钢性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (12): 149-152.
Wang X G. Effect of heat treatment on properties of Cr12MoV forging cold working die steel [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (12): 149-152.
- [6] 殷铭, 李强伟. 锻造工艺对含钒热作模具钢组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (5): 94-97, 100.
Yin M, Li Q W. Effect of forging process on microstructure and properties of hot working die steel containing vanadium [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (5): 94-97, 100.
- [7] 左鹏鹏, 朱春燕, 闵娜, 等. 锰含量对 3Cr4MoSiV 热锻模具钢抗回火软化能力的影响 [J]. 机械工程材料, 2016, 40 (3): 70-73.
Zuo P P, Zhu C Y, Min N, et al. Effect of Mn content on tempering softening resistance of hot forging die steel 3Cr4MoSiV [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40 (3): 70-73.
- [8] 王泽, 王婷婷, 金东浩, 等. 高合金钢冷轧工作辊锻造过程数值模拟 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (1): 22-29.
Wang Z, Wang T T, Jin D H, et al. Numerical simulation of forging process for high alloy steel cold work roller [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (1): 22-29.
- [9] 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.
- [10] 王亚辉, 黄亮, 刘翔, 等. 基于增材制造和锻造复合成形的 TC4 钛合金组织和性能研究 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (8): 897-904.
Wang Y H, Huang L, Liu X, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 alloy formed by additive manufacturing combined with forging [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (8): 897-904.
- [11] 伍玉琴, 张家陶. 始锻温度对 2A70-0.5Ce0.25Ti 铝合金模锻叶片性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (19): 99-101.
Wu Y Q, Zhang J T. Effect of initial forging temperature on properties of 2A70-0.5Ce0.25Ti aluminum alloy die forging blades [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (19): 99-101.
- [12] 李靖南, 董瑞峰, 陈子帅, 等. 梯度加热工艺对自由锻 GH4720Li 高温合金成形性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (2): 162-168.
Li J N, Dong R F, Chen Z S, et al. Formability of free forging GH4720Li superalloy with different gradient heating process [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (2): 162-168.

《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2022 年广告征集工作已经开始。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

(1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

(2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst_linyutong@163.com

电话: 010-62920652 Http: //www.fstjournal.net

