



Cr12MoV 扁钢直接轧制过程中碳化物的控制 与工艺优化

赵明¹, 庞于思¹, 戴宇恒², 李朋³, 徐乐钱³, 刘宇³

(1 江阴华润制钢有限公司, 无锡 214404; 2 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444;

3 上海大学(浙江)高端装备基础件材料研究院, 嘉兴 314000)

摘要: Cr12MoV 冷作模具钢采用“90 t 超高功率电弧炉熔炼→LF+VD 精炼→弧形连铸→连铸坯一火轧制”短流程制造工艺已成功工业化生产。此工艺生产的 Cr12MoV 扁钢厚度大于 50 mm 成品存在碳化物网状级别偏高的问题, 对模具加工和使用性能有着不利的影响。为解决这一问题, 结合 Gleeble 热模拟实验与仿真模拟技术, 系统研究了加热温度和变形温度对碳化物形貌的影响。结果表明, 适当提高加热温度有助于碳化物的溶解, 但过高的温度会降低材料的塑性。尽管变形温度对碳化物形貌的影响不显著, 但通过增加变形向扁钢内部的渗透, 可以有效改善碳化物的分布。在工业生产实践中, 采用加热温度 1 170 °C, 5 h 的高温扩散工艺, 并结合前 4 个道次的控温轧制, 碳化物不均匀度评级从 4 级提升至 2 级, 显著提升了成品扁钢的碳化物质量。

关键词: Cr12MoV 连铸坯; 扁钢; 高温扩散; 控温轧制; 碳化物

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00005 **中图分类号:** TG142. 71

Control of Carbides and Process Optimization in the Direct Rolling Process of Cr12MoV Flat Steel

Zhao Ming¹, Pang Yusi¹, Dai Yuheng², Li Peng³, Xu Leqian³, Liu Yu³

(1 Jiangyin China Resources Steelmaking Co.Ltd., Wuxi 214404, China; 2 School of Materials and Science Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3 Zhejiang Institute of Advanced Materials, Jiaxing 314000, China)

Abstract: The short-process manufacturing technology of Cr12MoV cold work die steel, involving "90-ton ultra-high power electric arc furnace smelting → LF+VD refining → arc continuous casting → one-step hot rolling of continuous casting billet", has been successfully industrialized production. However, the Cr12MoV flat steel products with a thickness greater than 50 mm produced by this process exhibit a high level of carbide network, which adversely affects the machining and use performance of the molds. To address this issue, this study systematically analyzes the effects of heating temperature and deformation temperature on the morphology of carbides using Gleeble thermal simulation experiments and simulation technology. The results indicate that appropriately increasing the heating temperature facilitates the dissolution of carbides, although excessively high temperatures can reduce the plasticity of the material. While the deformation temperature has an insignificant impact on the carbide morphology, enhancing the penetration of deformation into the interior of the flat steel can effectively improve the distribution of carbides. In industrial production practice, implementing a high-temperature diffusion process at heating temperature 1 170 °C for 5 hours, combined with controlled rolling in the first four passes, with the carbide non-uniformity rating improving from level 4 to level 2, significantly improved the carbide quality of the finished flat steel.

Key Words: Cr12MoV Continuous-casting Billet; Flat Bar; High-temperature Diffusion; Temperature-controlled Rolling; Carbide

Cr12MoV 冷作模具钢以其卓越的性能而著称, 这些性能包括高耐磨性、良好的淬透性和淬硬性、优异的强韧性、热稳定性以及高抗压强度^[1-4]。尤其值得一提的是, 其耐磨性能比一般工模具钢高出 3 至 4 倍, 表现出极为优异的使用寿命^[5-6]。Cr12MoV 钢的传统生产工艺主要是以模铸、锻造/轧制开坯、多火成材为主, 存在工序繁多、能耗高、生产效率低

等劣势。为此, 本团队创新性地开发了“90 t 超高功率电弧炉熔炼→LF+VD 精炼→弧形连铸→一火轧制”的短流程制造工艺^[7]。Cr12MoV 扁钢碳化物特征对加工性能和服役性能有着重要的影响。碳化物尺寸较大且分布不均, 会使 Cr12MoV 钢的硬度分布不均, 部分尖角处容易导致应力集中, 严重降低加工性。另外, 碳化物在服役过程中脱落生成的空

作者简介: 赵明(1970—), 男, 硕士, 高级工程师; **E-mail:** zhaoming66880111@126.com; **收稿日期:** 2025-01-12

通信作者: 戴宇恒(1996—), 男, 博士研究生; **E-mail:** daiyuheng921@163.com

隙往往会成为冷作模具产品裂纹的源头^[8-9]。为了有效提高冷作模具钢的力学性能和使用寿命,需要调控碳化物的尺寸、形貌和分布状况^[10-12]。本研究连铸坯直接轧制工艺生产的 Cr12MoV 扁钢碳化物的特征演变及参数调控。

1 试验材料和方法

试验材料为 Cr12MoV 冷作模具钢。工业生产流程为电弧炉→LF 炉→VD 炉→弧形连铸→红送→加热→直接轧制→退火。直接轧制工艺:连铸坯(截面尺寸为 150 mm×630 mm)加热至 1 190 °C 保温 1.25 h、经 10 个道次轧制至 52 mm 成品扁钢(截面尺寸为 52 mm×610 mm)。Cr12MoV 扁钢的化学成分见表 1。按照 GB/T1299—2014 标准^[13] 取样,在 Cr12MoV 扁钢截面的厚度 1/4 处切取金相试样(10 mm×10 mm×20 mm)观察直接轧制扁钢的碳化物形貌,取样位置如图 1 所示。

表 1 Cr12MoV 扁钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of Cr12MoV flat steel %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Mo	O	
1.53	0.25	0.28	0.014	0.006	11.52	0.18	0.43	0.002	0



图 1 Cr12MoV 扁钢(52 mm×610 mm)截面取样位置

Fig. 1 Sampling locations on the cross-section of Cr12MoV flat steel (52 mm×610 mm)

利用 Gleeble-3500 热模拟试验机研究直接轧制 Cr12MoV 扁钢的碳化物形貌。在 Cr12MoV 连铸坯芯部取样,高温拉伸试样尺寸为 φ10 mm×120 mm,压缩试样尺寸为 φ8 mm×12 mm。高温拉伸试验以 10 °C/s 速率加热至变形温度(850、900、950、1 050、1 100、1 120、1 150、1 180、1 200、1 220 °C)

后保温 10 min 进行拉伸,应变速率为 5×10⁻³ s⁻¹。压缩变形试验以 10 °C/s 速率升温至不同加热温度保温 5 min,然后以 5 °C/s 速率调控至不同变形温度保温 10 s 后进行压缩,变形速率为 1 s⁻¹,压缩变形量为 50 %,压缩变形过程中所对应不同加热温度与变形温度如图 2 所示。为保证热模拟试验的准确性和有效性,每个试验条件测试两个平行样品。利用高温退火炉对 Cr12MoV 钢连铸坯进行高温扩散退火实验,扩散退火温度分别为 1 150、1 180、1 220 °C,保温 2 h 后随炉冷却至室温,为验证试验效果,在芯部取样观察碳化物形貌。使用 Deform 有限元软件中 Forming 塑性成形模块建立扁钢直接轧制模型,模拟优化直接轧制工艺。

在 MP-2A 磨抛机上依次使用 100#、500#、1000#、1500#、2000# 砂纸进行研磨,然后使用 0.5 mm 金刚石抛光剂进行抛光。使用 10 % 硝酸酒精溶液对试样进行腐蚀。采用 Leica DM2700M 光学显微镜(OM)观察扁钢厚度 1/4 处试样的碳化物形貌以及连铸坯试样经变形后的碳化物形貌。

2 实验结果

2.1 碳化物

图 3(a) 是经工业生产直接轧制工艺的 Cr12MoV 扁钢厚度 1/4 处的碳化物形貌。由图 3(a) 可见,Cr12MoV 扁钢存在较为明显的网状碳化物。采用 JMatPro6.1 计算 Cr12MoV 碳化物溶解析出曲线如图 3(b) 所示,主要碳化物类型为 M₇C₃,完全溶解和开始析出温度为固液转化温度 1 260 °C。

2.2 加热温度和变形温度对碳化物形貌的影响

为优化直接轧制工艺获得细小且均匀分布的碳化物,截取 Cr12MoV 钢连铸坯芯部试样,利用 Gleeble-3500 热模拟试验机,进行高温压缩和高温扩散退火实验,研究经不同加热温度和变形温度后的碳化物特征。

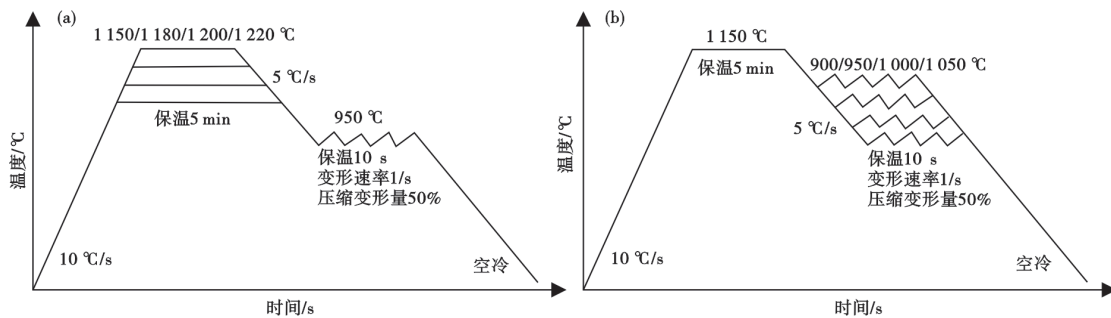


图 2 压缩变形工艺示意图;(a)不同加热温度,(b)不同变形温度

Fig. 2 Schematic diagram of the compression deformation process:(a) different heating temperature,(b) different heating temperature

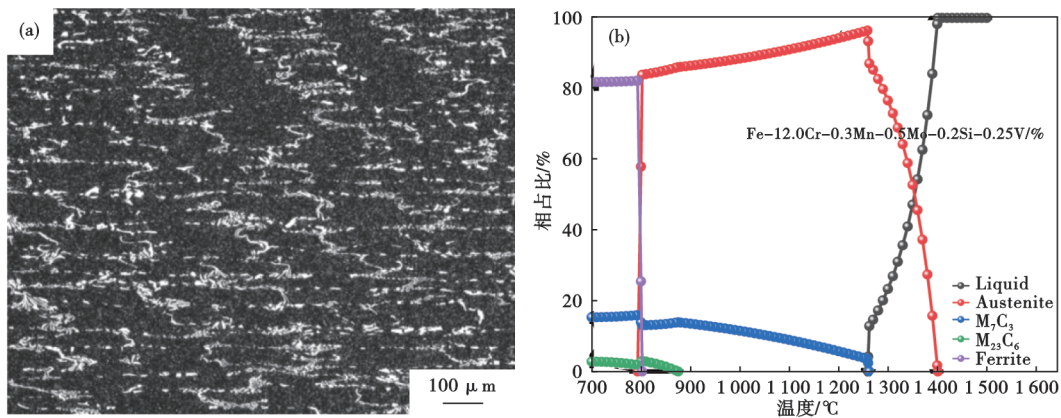


图3 Cr12MoV 扁钢直接轧制碳化物形貌(a)和溶解曲线(b)
 Fig. 3 Cr12MoV flat steel direct rolling carbide morphology (a) and dissolution curve (b)

当变形温度为 950 °C 时,加热温度为 1 150 ~ 1 220 °C,随着加热温度升高,碳化物溶解的趋势较明显,大块的团簇状碳化物变成较小的颗粒状碳化物,如图 4 所示。

利用 Gleeble-3500 热模拟试验机,当加热温度为 1 150 °C 时,在 950 ~ 1 050 °C 不同温度区间变形,压缩 50 %,碳化物形貌变化不明显,如图 5 所示。

为了明确加热温度对碳化物溶解的影响效果,截取工业生产的连铸坯芯部试样在马弗炉中进行高温扩散退火处理,扩散退火温度分别为 1 150、1 180、1 220 °C,保温 2 h 后随炉冷却至室温。由图 6 可以看出,随扩散退火温度升高,碳化物溶解明显,团簇状碳化物面积明显减少,大部分转变为短棒状。

2.3 一火轧制优化工艺

结合生产现场,轧制扁钢时要综合考虑高温扩散对碳化物溶解和材料塑性的影响,在 Cr12MoV 钢连铸坯上取样,不同温度下高温拉伸曲线及高温强度、断面收缩率分别如图 7(a)、图 7(b)所示,材料实际温度超过 1 150 °C 时,其塑性明显变差。

结合生产实际情况,考虑炉温与料温存在差异等因素,设定轧制加热的炉温为 1 170 °C,此温度下加热时间设定为 5 h,使碳化物充分溶解又不会过热长大。

常规工艺产品的碳化物呈网状分布。通过优化轧制压下工艺,使变形量向内部渗透,从而改善碳化物的形貌。以轧制 52 mm 厚扁钢为例,各道次变形量见表 2。

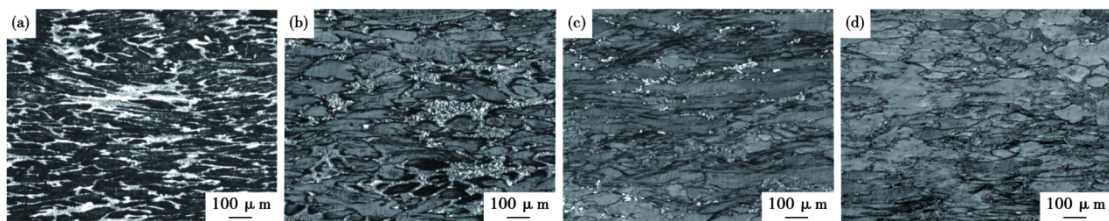


图4 Cr12MoV 钢试样不同加热温度下碳化物形貌:(a)1 150 °C, (b)1 180 °C, (c)1 200 °C, (d)1 220 °C
 Fig. 4 Carbide morphology of Cr12MoV steel sample at different heating temperatures: (a) 1 150 °C, (b) 1 180 °C, (c) 1 200 °C, (d) 1 220 °C

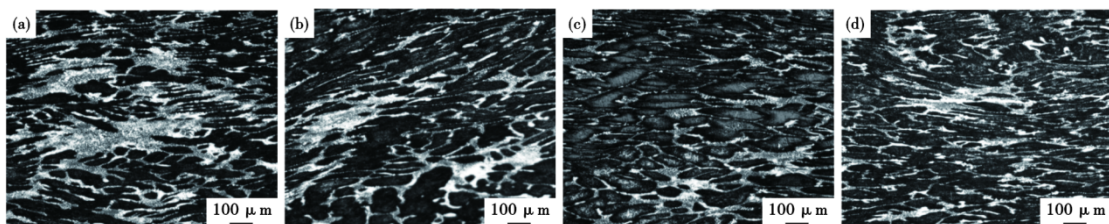


图5 Cr12MoV 钢试样不同变形温度下碳化物形貌:(a)900 °C, (b)950 °C, (c)1 000 °C, (d)1 050 °C
 Fig. 5 Morphology of carbides in Cr12MoV steel samples at different deformation temperatures: (a) 900 °C, (b) 950 °C, (c) 1 000 °C, (d) 1 050 °C

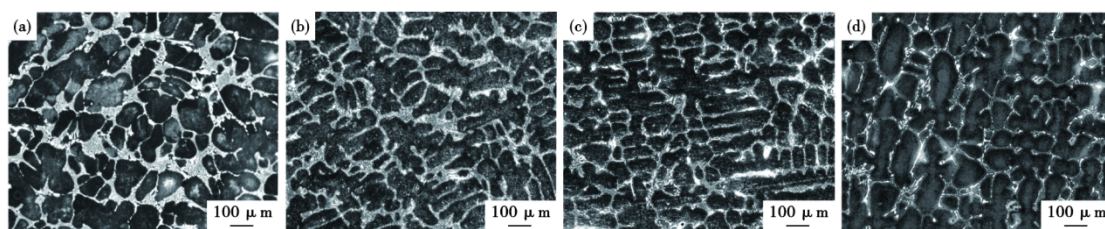


图 6 Cr12MoV 钢试样高温扩散对碳化物形貌的影响:(a)连铸坯铸态,(b)1 150 °C×2 h,(c)1 180 °C×2 h,(d)1 200 °C×2 h
Fig. 6 Effect of high temperature diffusion on carbide morphology of Cr12MoV steel sample: (a) as-cast continuous casting billet, (b) 1 150 °C×2 h, (c) 1 180 °C×2 h, (d) 1 200 °C×2 h

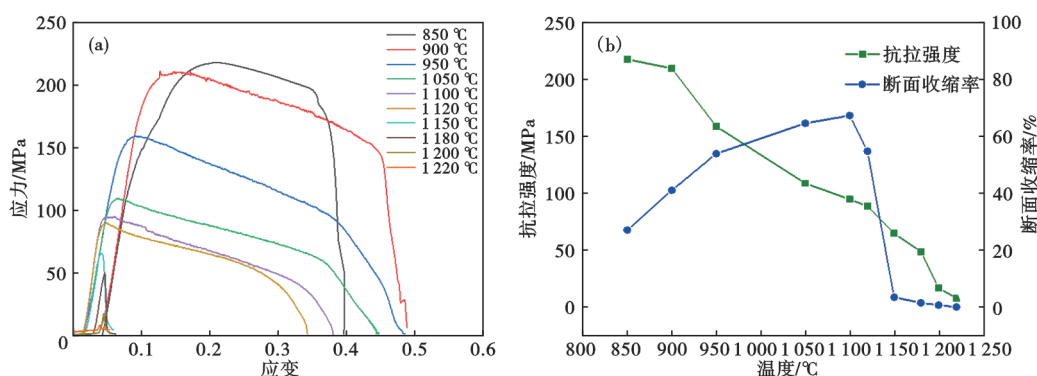


图 7 Cr12MoV 钢连铸坯试样不同温度下高温拉伸曲线:(a)应力-应变曲线,(b)高温强度与断面收缩率
Fig. 7 High temperature tensile curves of Cr12MoV steel continuous casting billet samples at different temperatures : (a) stress-strain curve, (b) high-temperature strength and reduction of area

表 2 Cr12MoV 连铸坯一火轧制 52 mm 扁钢各道次变形量
Table 2 Cr12MoV continuous casting billet one fire rolling 52 mm flat steel deformation of each pass

道次	厚度/mm	压下量/mm	压下率/%
0	150	-	-
1	142	8	5.3
2	122	20	14.1
3	110	12	9.8
4	95	15	13.6
5	78	17	17.9
6	70	8	10.3
7	64	6	8.6
8	58	6	9.4
9	55	3	5.2
10	52	3	5.5

直接轧制工艺中 1~6 道次压下率较大,通过模拟仿真计算表明,这 6 个道次变形时,扁钢内部温度较高,变形热的累积会使温度进一步升高,达到 1 229 °C,如图 8(a)所示,会引起晶界过烧,碳化物角质化。这是由于两方面的原因导致的:(1)扁钢碳化物聚集的问题,即有原始铸态凝固组织聚集;(2)在轧制过程中由于内部温度过高而恶化。结合生产现场的工况和效率等因素考虑,对前 4 个道次进

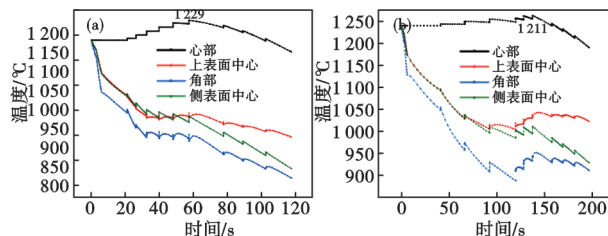


图 8 Cr12MoV 钢连铸坯一火轧制 52 mm 扁钢温度模拟:(a)原直接轧制工艺,(b)优化直接轧制工艺

Fig. 8 Temperature simulation of Cr12MoV steel continuous casting billet one fire rolling 52 mm flat steel: (a) original direct rolling process, (b) optimized direct rolling process

行控温轧制,并对温度变化情况进行模拟计算,计算结果如图 8(b)所示。钢坯截面各个位置温度均有所降低,芯部温度可降低 18 °C,低于 1 220 °C。

为了研究扁钢截面不同位置的应变情况,对前 4 个道次(1~4 道次)和后 4 个道次(7~10 道次)的控温轧制进行模拟计算。结果表明,前 4 个道次进行控温轧制,扁钢内部变形量增加较大,效果较好,如图 9 所示。

图 10 是经工业生产原直接轧制工艺与优化工艺(1 170 °C×5 h、前 4 个道次控温轧制)的 Cr12MoV 扁钢碳化物形貌。由图 10 可知,变形量向内部渗

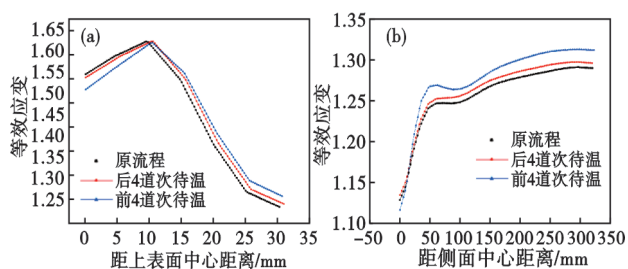


图9 Cr12MoV钢连铸坯一火轧制52 mm扁钢等效应变:(a)压下方向,(b)宽度方向

Fig. 9 Cr12MoV steel continuous casting billet one fire rolling 52 mm flat steel equivalent strain: (a) reduction direction, (b) width direction

透,碳化物被进一步拉长,碳化物形貌由网状变为带状分布,碳化物不均匀度明显改善,由4级(GB/T 1299—2014国家标准^[13])优化提高至2级。

3 结语

采用“90吨超高功率电弧炉熔炼→LF+VD精炼→弧形连铸→连铸坯一火轧制”短流程工艺生产的Cr12MoV扁钢产品,在生产过程中,尤其是当扁钢厚度较大时,碳化物的变形不够充分,容易呈现出网状分布的现象。结合Gleeble热模拟实验与仿真模拟技术的研究结果表明,适当提高

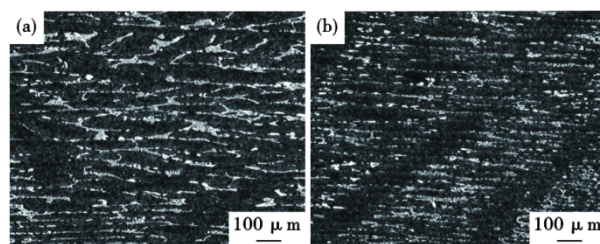


图10 Cr12MoV钢连铸坯一火轧制52 mm扁钢工艺优化前后碳化物形貌对比:(a)原工艺,(b)优化后工艺

Fig. 10 Comparison of carbide morphology before and after optimization of Cr12MoV steel continuous casting billet one fire rolling 52 mm flat steel process: (a) original process, (b) optimized process

加热温度可以有效促进碳化物的溶解。然而,过高的加热温度会导致材料的塑性下降。此外,变形温度(终轧温度)对碳化物形貌的影响并不显著,但通过增加变形向扁钢内部的渗透,可以显著改善碳化物的形貌分布。结合工业生产实践,可以得出结论,通过实施适当的高温扩散工艺(温度为1 160~1 190℃),并结合控温轧制工艺,可以显著提升成品扁钢的碳化物质量。具体表现为,碳化物不均匀度的评级从4级提升至2级。

参考文献

- [1] 赵步青,徐利建,朱昌宏,等. Cr12MoV钢的热处理[J]. 热处理, 2021, 36(2): 36-39.
- [2] Bourithis L, Papadimitriou G D, Sideris J. Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness [J]. Tribology International, 2006, 39(6): 479-489.
- [3] Chi H X, Ma D S, Xu H X, et al. Phase transformation of a cold work tool steel during tempering[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2016, 23(5): 484-488.
- [4] Bombac D., Fazahrinc M., Saha Podder A., et al. Study of carbide evolution during thermo-mechanical processing of AISI D2 tool steel[J]. J. Mater. Eng. Perform. 2013, 22:743-747.
- [5] Ortiz-Domínguez M, Keddad M, Elias-Espinosa M, et al. Investigation of boriding kinetics of AISI D2 steel[J]. Surface Engineering, 2014, 30(7): 490-497.
- [6] 孙秀华,康爱军,王琳,等. 改善Cr12MoV模具钢共晶碳化物均匀性的工艺研究[J]. 模具制造, 2020, 20(12): 81-84.
- [7] 朱喜达,陆家生,赵勇智,等. 冷作模具钢(Cr12MoV)短流程生产工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 10-13.
- [8] 王宁,丁北斗,崔萌,等. Cr12MoV钢刀具开裂原因分析[J]. 金属热处理, 2020, 45(10): 246-248.
- [9] 牟风,康爱军,马野,等. Cr12MoV钢制刀具断裂失效分析[J]. 模具制造, 2020, 20(11): 86-87+92.
- [10] 新持喜一郎,浦野元一. 工具鋼の疲れ強さ[J]. 日本金属学会会報, 1969, 8(2): 117-117.
- [11] 姚健,满廷慧,刘宇,等. 连铸对M2高速钢偏析与碳化物的影响[J]. 中国冶金, 2023, 33(3): 77-84.
- [12] 马党参,刘建华,陈再枝,等. 热处理工艺对新型Cr8Mo2VSi和D2冷作模具钢扁钢组织和力学性能的影响[J]. 钢铁, 2008, 43(9): 67-70.
- [13] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 工模具钢: GB/T 1299—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.