



新型废钢剪切机刀片用钢的成分设计与组织性能调控

陈司翰¹, 李吉航², 张浩², 田家龙², 金永丽¹

(1 内蒙古科技大学稀土产业学院, 包头 014010; 2 东北大学冶金学院, 沈阳 110819)

摘要:本研究以当前广泛应用于废钢剪切机刀片的 H13 热作模具钢为基准材料, 提出“降 Si、降 V 和增 W”的合金设计思路。结合热力学理论计算与实验验证, 探究了合金元素含量变化对 H13 模具钢中碳化物析出行为的影响, 系统研究了热处理工艺对新型钢微观组织和机械性能的影响规律。结果表明, 将 $w[\text{Si}]$ 、 $w[\text{V}]$ 和 $w[\text{W}]$ 分别控制在 0.1%~0.3%、0.5%~0.6% 和 1.8%~2.2% 后, 在最优热处理制度下, 新型钢的硬度与 H13 模具钢基本一致, 但冲击吸收功是 H13 模具钢的 2 倍, 并且展现出优异的热稳定性和摩擦磨损性能。本研究成功开发出了一种专用于废钢剪切机刀片的 DPG20 热作模具钢, 该新型钢展现出优异的冲击韧性、耐磨性和热稳定性, 该研究为高性能热作模具钢的开发提供了新思路。

关键词:热作模具钢; 成分设计; 热力学计算; 冲击韧性; 摩擦磨损

DOI:10.20057/j.1003-8620.N250608 中图分类号: TG7

Regulation of Composition, Microstructure and Properties of Novel Steel Used for Blade of Scrap Steel Shearing Machine

Chen Sihan¹, Li Jihang², Zhang Hao², Tian Jialong², Jin Yongli¹

(1 School of Rare Earth Industry, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China;
2 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In this study, H13 hot work die steel, which is widely used in the blade of scrap steel shearing machine, is used as the benchmark material, and the alloy design strategy of “reducing Si, V and increasing W” is put forward. The influence of alloying element content on carbide precipitation behavior in H13 die steel was investigated, and the influence of heat treatment process on the microstructure and mechanical properties of experimental steel was systematically studied. The results show that after the contents of $w[\text{Si}]$, $w[\text{V}]$ and $w[\text{W}]$ are controlled in the ranges of 0.1%-0.3%, 0.5%-0.6% and 1.8%-2.2%, respectively, under the optimal heat treatment process, the hardness of the new steel is basically the same as that of H13 steel, but the impact toughness is twice that of H13 steel, and it shows excellent thermal stability and friction-wear properties. This study successfully developed a DPG20 hot work die steel specifically for the blade of scrap steel shearing machine, which exhibited excellent mechanical properties.

Key Words: Hot Work Die Steel; Composition Design; Thermodynamic Calculations; Impact Toughness; Wear

提高废钢利用率是钢铁行业“双减”大背景下的重要发展方向^[1-2]。废钢处理设备逐渐向大型化、持久化的方向发展^[3], 设备的性能和技术水平直接影响着废钢资源利用的效率和效益。作为废钢剪切机的核心部件, 剪切机刀片材料的服役环境极其恶劣, 剪切过程中承受着巨大的冲击载荷和剪切力^[4], 同时, 还要应对强烈的摩擦磨损和热效应。因此, 剪切机刀片的失效形式可分为磨损与破损两大类^[5-6]。当前废钢剪切机刀片主要采用 1.2767、55SiCr 和 H13 等合金钢制造。然而, 上述钢材虽各

具特点, 但在实际应用中均存在性能局限性, 难以满足剪切机刀片对成本与性能的需求, 而且刀片使用寿命远低于预期目标。针对上述问题, 迫切需要开发具有高冲击韧性、高耐磨性、高热稳定性和低成本的新型废钢剪切机刀片材料, 以满足行业需求。

通过调控合金成分及热处理工艺, 有望提升热作模具钢的综合性能^[7-9]。H13 热作模具钢因冲击韧性不足, 导致刀刃在服役过程中易发生崩口而提前失效。本研究以 H13 热作模具钢合金成分为基准, 系统分析了 H13 钢中合金元素的作用机制, 并

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U25A20279)

作者简介: 陈司翰(2005—), 男, 本科; E-mail: 2762500647@qq.com; 收稿日期: 2025-12-22

通信作者: 田家龙(1989—), 男, 博士, 副教授; E-mail: tianjialong@smm.neu.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

提出了改进策略。Si以固溶体的形态存在于铁素体或奥氏体中,能够缩小奥氏体相区,但是Si会导致材料塑性和韧性变差。V虽然能够提高钢材在高温下的强度和抗软化能力^[10],但对冲击韧性有不利影响^[11]。朱春燕等^[12]研究表明,W能有效抑制模具钢中碳化物的粗大,并增强马氏体的抗回复能力。作为强碳化物形成元素,W的引入已被广泛认可为提高模具钢耐磨性和热稳定性的有效途径^[13-14]。此外,W与Mo在钢中固溶行为及所形成的碳化物类型相似,因此添加适量W可以发挥类似Mo的作用,进一步提升材料的硬度和耐磨性^[15]。综上,本研究针对废钢剪切机刀片的特殊工况需求,提出了基于强韧性平衡和高耐磨性的合金设计策略。具体而言,采用降低Si和V的方式提高材料的韧性,增加W的方式来提高材料的耐磨性和热稳定性。

本研究在H13热作模具钢成分基础上,提出了“降Si、降V和增W”的合金设计思路,系统分析了合金元素含量变化对H13钢中碳化物析出行为的影响,并探索出了适用于新型钢的热处理工艺,揭示了新型钢的力学性能的起源与调控机制。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料制备

采用30 kg真空感应炉制备H13钢和DPG20

钢。采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP)测量了实验钢的化学成分,见表1。两种实验钢经1 250 °C均质化处理锻造,始锻温度为1 200 °C,经三墩三拔,锻成直径为 $\phi 80$ mm的圆棒。随后,进行超细化+球化退火处理,以获得球状碳化物均匀分布的退火组织。采用线切割将退火棒材加工出多个样品进行热处理工艺探索。首先,样品分别在980、1 000、1 020和1 040 °C下奥氏体化0.5 h,然后油淬,以探索最佳淬火温度。随后,分别在520、550、580和620 °C下进行两次回火,每次保温2 h后空冷。详细的热处理工艺如图1所示。

表1 实验钢的化学成分(质量分数)

钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Fe
H13	0.38	0.99	0.45	5.13	1.27	0.90	-	Bal.
DPG20	0.38	0.19	0.45	5.16	1.23	0.54	1.98	Bal.

1.2 实验方法

采用Olympus DSX510金相显微镜(OM)进行金相组织分析。利用配备EDS能谱仪的JSM-7800F扫描电子显微镜(SEM)进行微观组织分析。采用洛氏硬度仪RDS-150D测量试验钢的硬度,压头载荷为1 470 kN,保荷时间5 s,每个样品测量5次后取平均值。室温冲击试验在PSW-750摆式冲击试

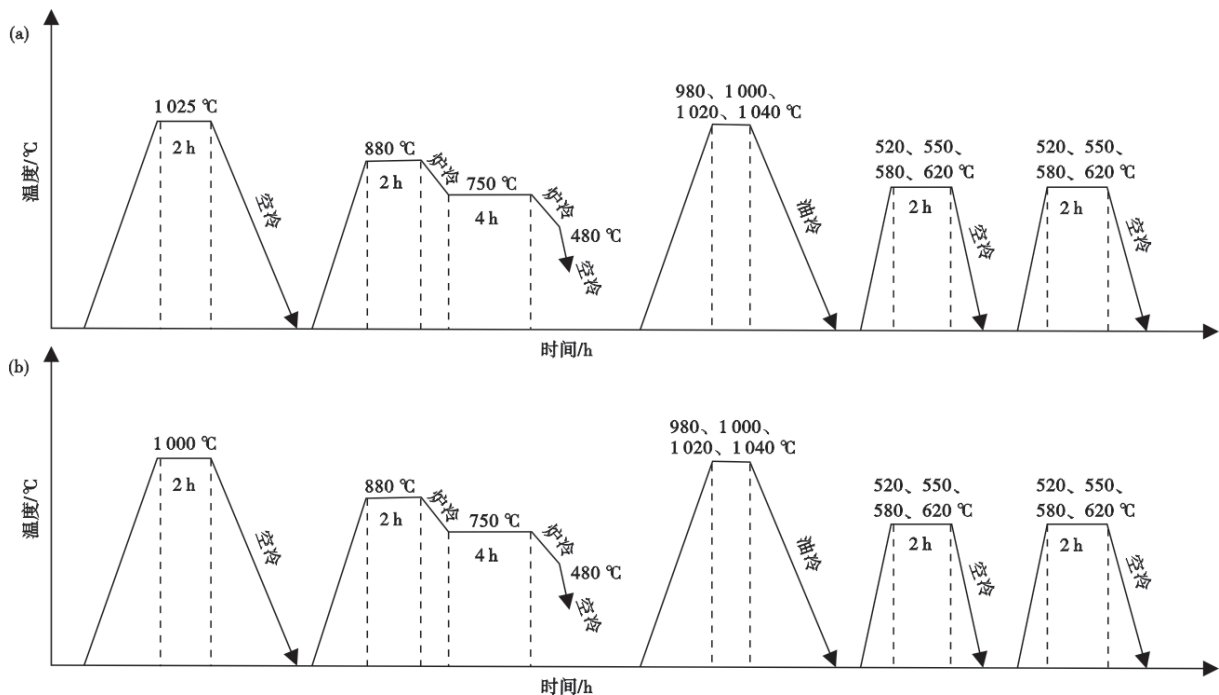


图1 热处理路线示意图:(a) H13钢,(b) DPG20钢

Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment route: (a) H13 steel, (b) DPG20 steel

验机上进行,标准夏比V型缺口冲击样品的尺寸为10 mm × 10 mm × 55 mm。每个样品条件下进行三次测试。为尽可能模拟废钢剪切机刀片服役过程中承受的高载荷,在MFT-5000高温微动磨损试验机上进行了摩擦磨损性能测试,相关参数为载荷100 N,频率2 Hz,行程10 mm,磨料直径为 $\phi 9.525$ mm的 Si_3N_4 陶瓷球,接触模式为干摩擦,测试时间为1 h。使用VR-3200型3D轮廓测量仪对摩擦磨损试验后样品损失的体积进行了测量,采用UP Series型3D光学轮廓仪对摩擦磨损后样品表面磨痕的3D形貌进行观察和分析。

2 实验结果与分析

2.1 合金成分设计

通过Thermo-Calc 2019b热力学软件计算可知,H13钢中存在 M_{23}C_6 、MC、 M_7C_3 、 M_6C 和 M_2C 五种碳化物。基于“降Si、降V和增W”的合金设计思路,在H13钢成分基础上进行了Si、V和W含量的优化。图2显示了不同Si含量对H13钢中碳化物析出行为的影响,可以看出Si含量变化对H13钢中碳化物含量的影响并不明显,这是因为Si是非碳化物形成元素。但是,高Si含量会增加热作模具钢在服役过程中突然断裂的风险^[16]。因此,建议将 $w[\text{Si}]$ 控制在0.1%~0.3%范围内。

图3显示了不同V含量对H13钢中碳化物析出

行为的影响。作为MC碳化物的主要形成元素,钢中V含量变化对MC碳化物的形成具有显著影响。结果表明, $w[\text{V}]$ 由1.0%降低至0.6%时,600 °C时MC碳化物析出量由0.95%降至0.61%,进一步将 $w[\text{V}]$ 降低至0.4%时,MC碳化物在平衡相中析出温度区间出现大幅收缩现象。此外, M_7C_3 碳化物在平衡相中析出温度区间随V含量的降低而不断扩大,其析出含量在 $w[\text{V}]$ 为0.4%时最高。因此,建议将 $w[\text{V}]$ 控制在0.5%~0.6%范围内。

W的加入能够显著提升钢的热稳定性和耐磨性。图4显示了不同W含量对H13钢中碳化物析出行为的影响,可以看出,随着W含量的增加 M_7C_3 和 M_2C 碳化物的形成受到抑制, M_6C 碳化物的形成被促进,但是对MC碳化物的影响较小。由于合金中W含量较高,大量富W的 M_6C 碳化物得以析出。作为强碳化物形成元素,W会优先与C结合,形成更稳定的碳化物。尤其是在较高的温度下, M_6C 碳化物在热力学上比 M_7C_3 碳化物具有更高的稳定性。因此,在合金成分设计中加入W后,更倾向于形成热力学更稳定的 M_6C 碳化物,从而抑制了 M_7C_3 碳化物的析出。但是,过高的W含量会增加钢中碳化物的整体含量,这不仅增加了奥氏体化的难度,而且会降低钢的韧性。因此,建议将 $w[\text{W}]$ 控制在1.8%~2.2%范围内。

图5显示了H13钢和新型钢中碳化物的平衡相

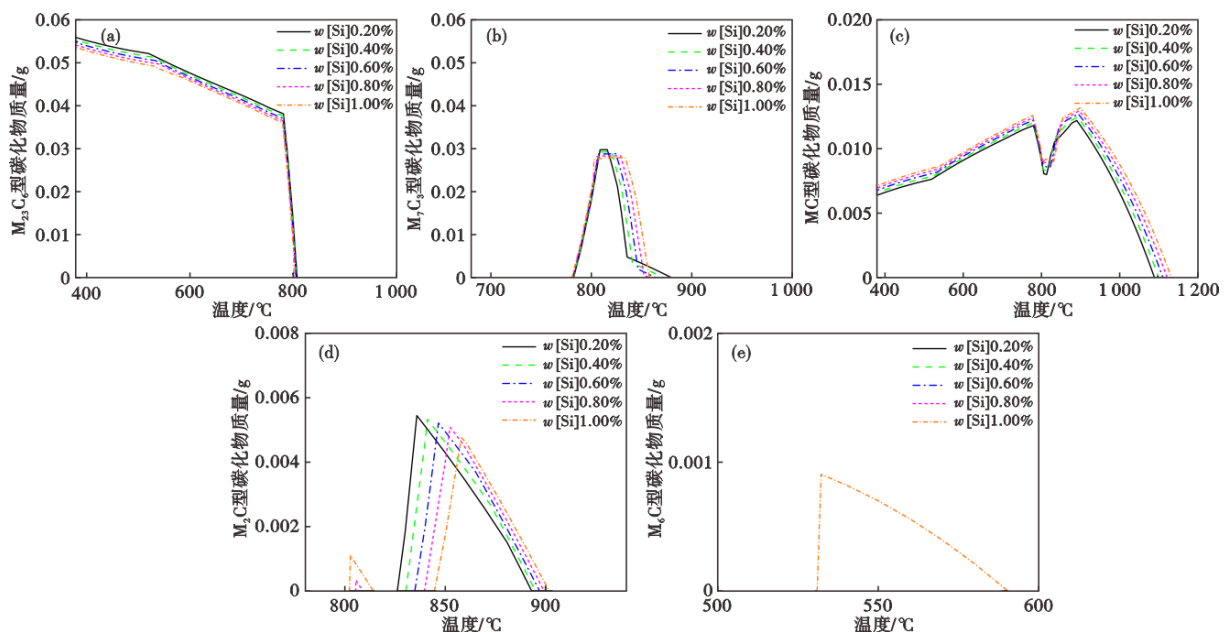


图2 不同Si含量H13钢中碳化物的平衡相图:(a) M_{23}C_6 , (b) M_7C_3 , (c) MC, (d) M_2C , (e) M_6C

Fig. 2 Equilibrium phase diagram of carbides in H13 steel with different Si contents: (a) M_{23}C_6 , (b) M_7C_3 , (c) MC, (d) M_2C , (e) M_6C

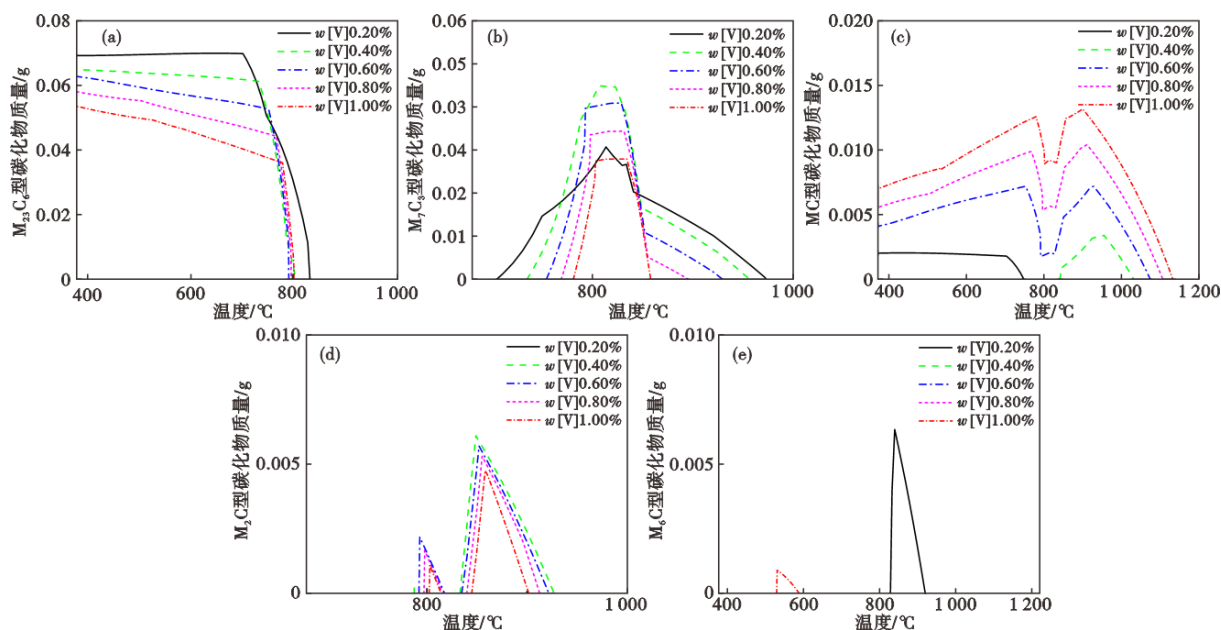


图3 不同V含量H13钢中碳化物的平衡相图:(a) $M_{23}C_6$ (b) M_7C_3 , (c) MC, (d) M_2C , (e) M_6C

Fig. 3 Equilibrium phase diagram of carbides in H13 steel with different V contents : (a) $M_{23}C_6$, (b) M_7C_3 , (c) MC, (d) M_2C , (e) M_6C

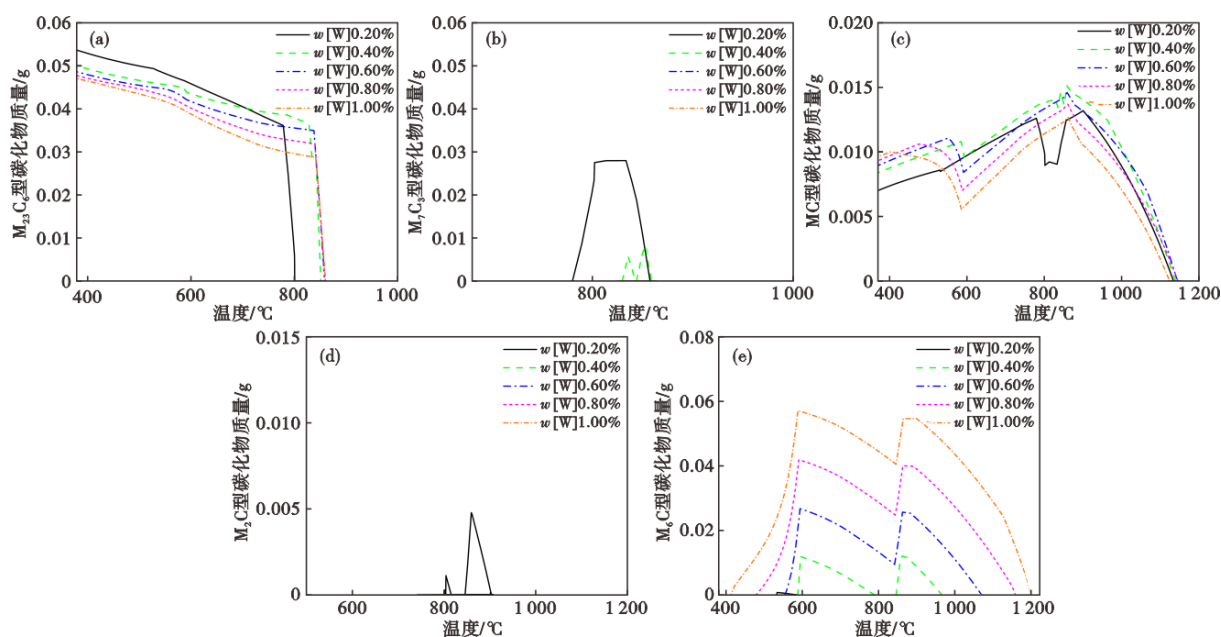


图4 不同W含量H13钢中碳化物的平衡相图:(a) $M_{23}C_6$, (b) M_7C_3 , (c) MC, (d) M_2C , (e) M_6C

Fig. 4 Equilibrium phase diagram of carbides in H13 steel with different W contents : (a) $M_{23}C_6$, (b) M_7C_3 , (c) MC, (d) M_2C , (e) M_6C

图,可以看出,新型钢中存在 $M_{23}C_6$ 、 M_6C 和 MC 三种碳化物。由于新型钢与 H13 钢的 Cr 含量保持一致, $M_{23}C_6$ 碳化物含量及形成规律相似。然而,由于加入 W 的原因,平衡相中 M_6C 碳化物成为新型钢中第二重要的碳化物,这为有效地提高材料的耐磨性和热稳定性提供了基础。此外,新型钢中 MC 碳化

物的含量与 H13 钢基本相同,但完全溶解温度略低 (1030°C)。随后,为了验证合金设计思路的有效性,制备了 H13 钢与新型钢 (DPG20),并开展了系统的实验验证。

2.2 淬火温度对实验钢微观组织的影响

利用 SEM 仔细检查了实验钢的退火态组织,如

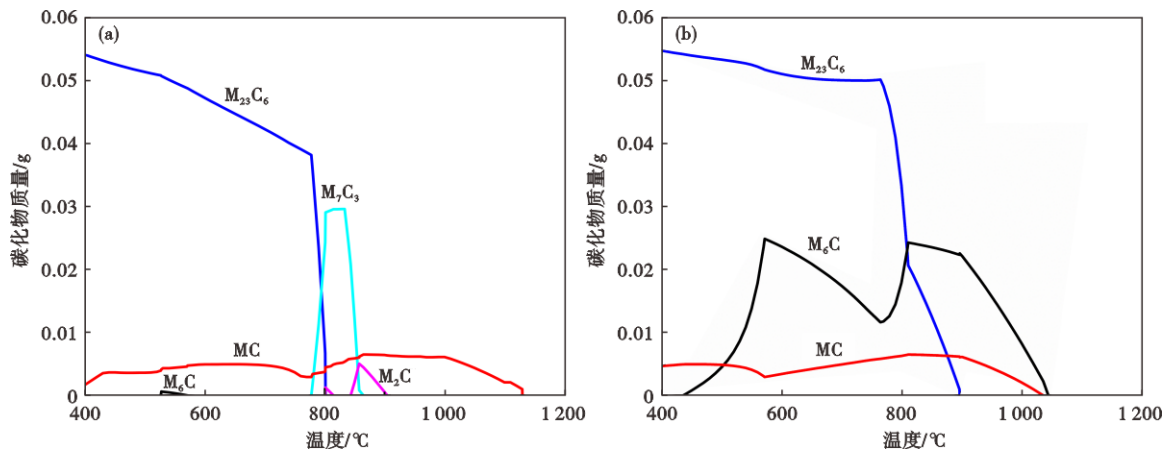


图5 实验钢中碳化物的平衡相图:(a) H13 钢, (b) DPG20 钢
 Fig. 5 Equilibrium phase diagram of carbides in experimental steels : (a) H13 steel, (b) DPG20 steel

图 6 所示。H13 钢退火组织球化效果不显著,碳化物尺寸分布不均,且存在偏聚现象。DPG20 钢中碳化物细小弥散分布,且以球形为主,表明 W 的添加有利于促进碳化物球化。采用 Image-Pro Plus 6.0 软件分析了 H13 钢和 DPG20 钢球化退火组织中碳

化物的平均尺寸和数量,如图 6(c)所示。从统计结果得出,DPG20 钢中碳化物的平均尺寸较小约 0.23 μm ,并且平均数量是 H13 钢的 2 倍。

为研究不同淬火温度实验钢微观组织的差异。图 7(a)显示了实验钢原始奥氏体晶粒平均尺寸与

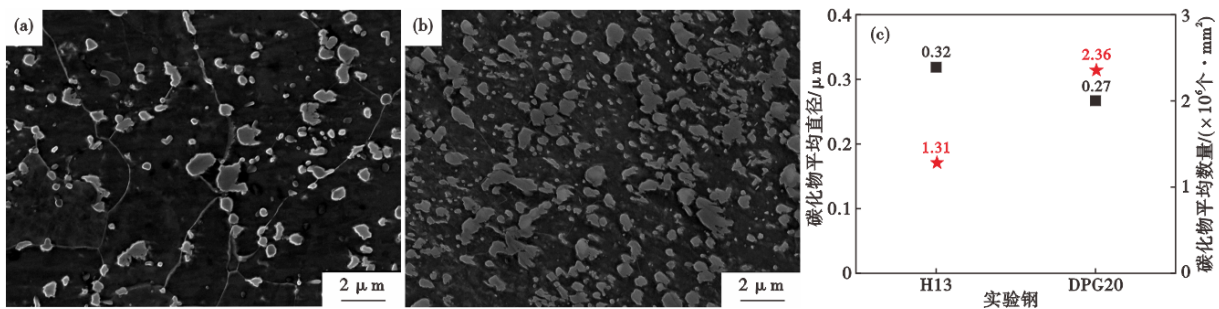


图 6 实验钢球化退火后的微观组织及碳化物的统计结果:(a) H13 钢, (b) DPG20 钢, (c) 碳化物的统计结果
 Fig. 6 Microstructure of experimental steels after spheroidizing annealing and statistical results of carbides : (a) H13 steel, (b) DPG20 steel, (c) statistical results of carbides

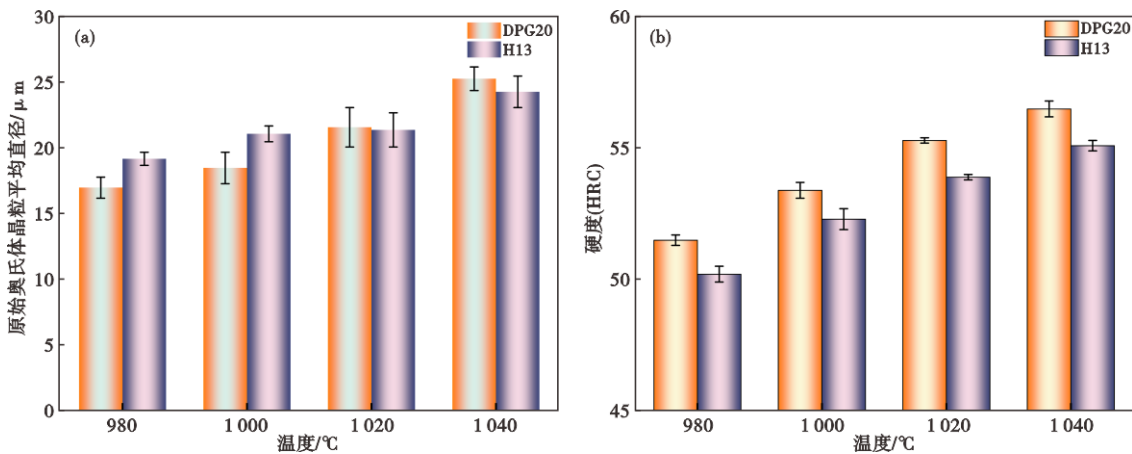


图 7 不同温度淬火后实验钢性能:(a) 原始奥氏体晶粒平均尺寸;(b) 硬度
 Fig. 7 Experimental steels property after quenching at different temperatures: (a) average size of prior austenite grains; (b) hardness

淬火温度的函数关系,可以看出,当温度淬火超过 1 000 °C后,DPG20钢的晶粒尺寸表现出明显的增长趋势,而H13钢在1 020 °C后才表现出明显的增长趋势。由热力学计算相图可知,DPG20钢中碳化物完全溶解温度较H13钢有所降低,特别是在1 020 °C后,碳化物大量回溶,从而减弱了对晶界的阻碍作用^[17]。图7(b)显示了实验钢硬度与淬火温度的函数关系,可以看出,DPG20钢的硬度明显高于H13钢。这是由于DPG20钢中添加了更多的强碳化物形成元素W,在钢中形成固溶体后,增加了晶格畸变,提升了对位错运动的阻碍作用,从而提高了钢的淬火硬度。结合平均晶粒尺寸及硬度的统计结果,确定DPG20和H13钢的淬火温度分别为1 000、1 030 °C。

2.3 回火温度对实验钢微观组织和性能的影响

影响

图8(a)显示了两种实验钢在不同回火温度下的硬度变化。可以看出,随着回火温度的升高DPG20钢的硬度降低幅度小于H13钢。同时,在相同的回火温度下,DPG20钢的硬度始终高于H13钢。图8(b)显示了两种实验钢在不同回火温度下的冲击吸收功变化。可以看出,冲击吸收功随回火温度的升高而升高。尤其是在580 °C回火后,H13钢的冲击吸收功约11.6 J,DPG20钢的冲击吸收功约24.3 J。与传统H13钢相比,新型钢实现了冲击韧性的双倍提升。

图9显示了实验钢580 °C回火处理后冲击断口的SEM图像。由于采用V型缺口冲击试样,缺口处应力集中较大,导致两种试验钢均表现出明显的脆性断裂倾向,断口形貌均以解理面为主。然而,与H13钢相比,DPG20钢在解理面附近可观察到更多

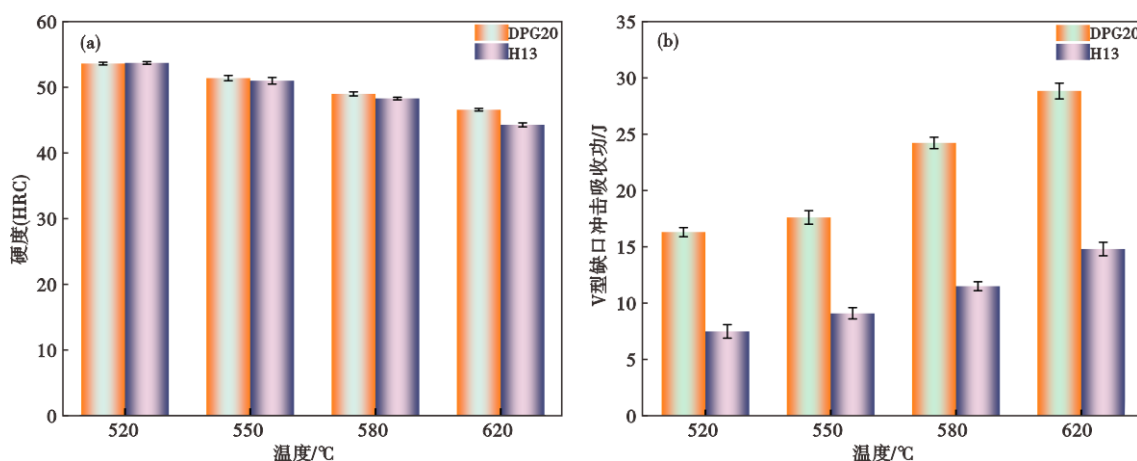


图8 不同温度回火后实验钢性能:(a) 硬度,(b) 冲击吸收功

Fig. 8 Experimental steels property after tempering at different temperatures : (a) hardness, (b) impact absorbing energy

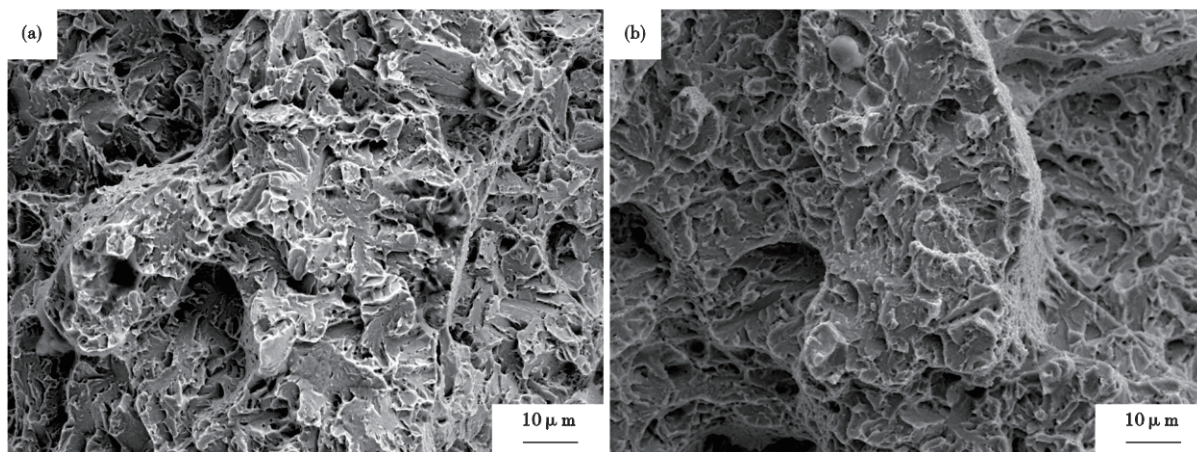


图9 实验钢580 °C回火后的冲击断口形貌:(a) H13钢,(b) DPG20钢

Fig. 9 Impact fracture morphology of experimental steel after tempering at 580 °C : (a) H13 steel, (b) DPG20 steel

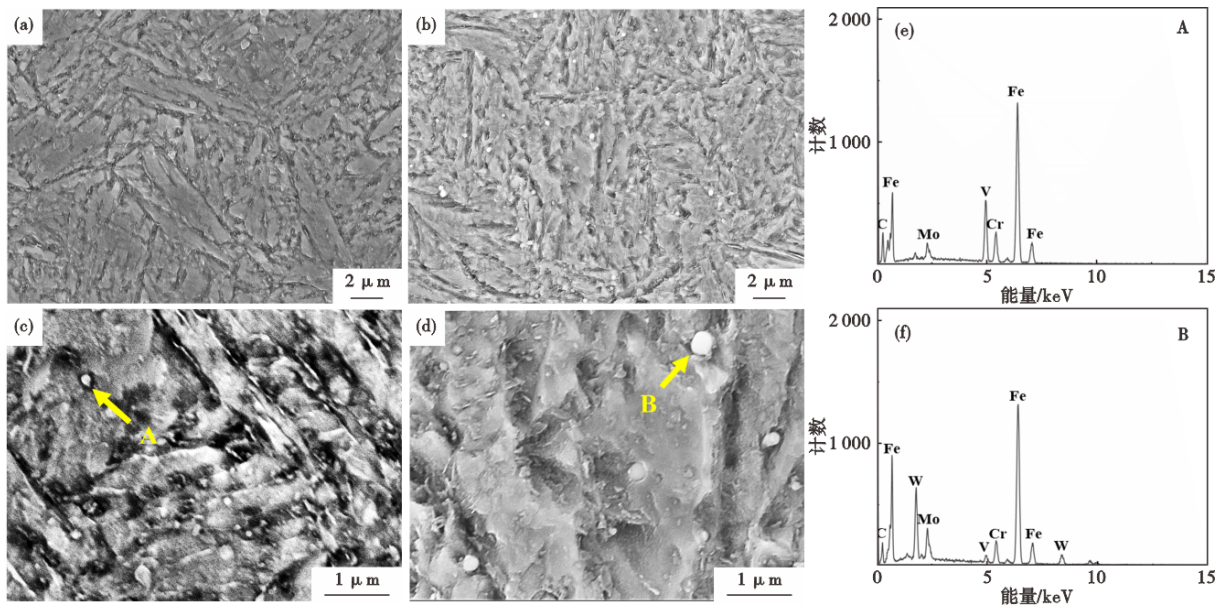


图 10 实验钢的微观组织:(a)(c) H13 钢;(b)(d)DPG20 钢;(e) 碳化物在 A 点的 EDS 能谱图;(f) 碳化物在 B 点的 EDS 能谱图
 Fig. 10 Microstructure of experimental steels : (a)(c) H13 steel; (b)(d) DPG20steel; (e) EDS energy spectrum of carbide at point A; (f) EDS energy spectrum of carbide at point B

细小的韧窝,显示出更优的韧性特征,这一形貌差异与冲击测试结果相符。DPG20 钢较低的 Si 含量降低了其对韧性不利的影响,抑制了裂纹扩展的速度。再者,DPG20 钢中形成的 M_2C 和 M_6C 碳化物呈现更加弥散的分布,并且晶界处链状碳化物更少^[18],这种优化后的微观组织有效抑制了裂纹的萌生和扩展,从而显著提升了材料的冲击韧性。

图 10 显示了实验钢 580 °C 回火处理后微观组织的 SEM 图像。DPG20 钢和 H13 钢的回火组织均为马氏体,但是碳化物的形貌和分布存在显著差异。可以看出,H13 钢中碳化物的偏聚现象明显,尺寸分布不均,且链条状分布的情况较为显著,这是导致冲击韧性低的主要原因^[19]。经 EDS 分析表明,较粗的长链状碳化物主要为 $M_{23}C_6$ ($M = Cr$) 碳化物。DPG20 钢中碳化物呈细小均匀弥散分布,且链条状分布的情况明显减轻。图 10(e)和(f)显示了碳化物的 EDS 分析结果,可以看出,H13 钢中细小的球状碳化物主要以 MC ($M = V$) 碳化物为主,而 DPG20 钢中细小的球状碳化物主要以 M_6C ($M = W$) 碳化物为主。

2.4 新型钢的性能评价

热稳定性是考察剪切机刀片在长期使用下能否轻易软化和变形的重要参数。将经最优回火制度(580 °C 回火 2 h 两次)处理后的 DPG20 钢和 H13 钢在 600 °C 长时间保温,测定不同保温时间下实验

钢的硬度变化规律。图 11 显示了两种实验钢在 600 °C 下的热稳定性曲线。结果表明,随着回火时间的延长,两种实验钢的硬度均呈下降趋势。但是与 H13 钢相比,DPG20 钢展现出优异的抗回火软化能力。经过 20 h 回火后,DPG20 钢仍保持约 43.7 HRC 的硬度。这主要归因于 W 的添加提升了 DPG20 钢的组织稳定性^[20],且形成的 M_6C 型碳化物在高温下具有较低的粗化速率,能够更持久地钉扎晶界和位错,进而有效地抵抗组织的软化。因此,DPG20 钢的热稳定性显著优于 H13 钢。

选取最优回火制度下的 DPG20 钢与 H13 钢进

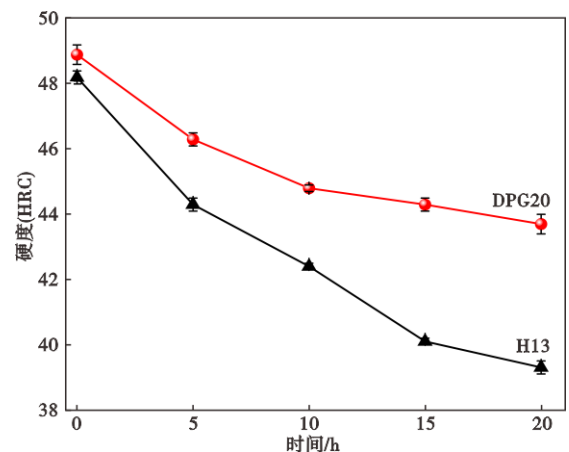


图 11 600 °C 下实验钢的热稳定曲线
 Fig. 11 Thermal stability curve of experimental steels at 600 °C

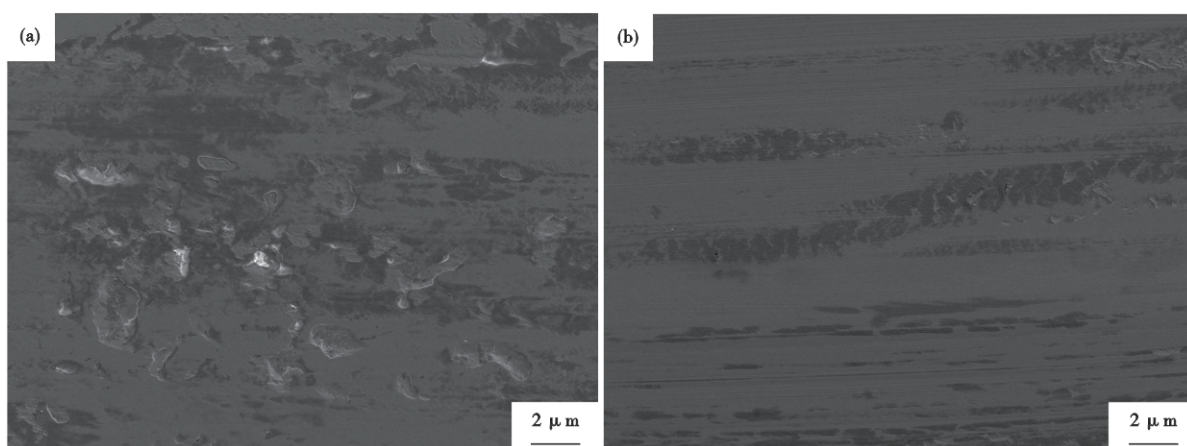


图 12 实验钢磨损表面形貌:(a) H13 钢,(b) DPG20 钢

Fig. 12 Wear surface morphology of experimental steels : (a) H13 steel, (b) DPG20 steel

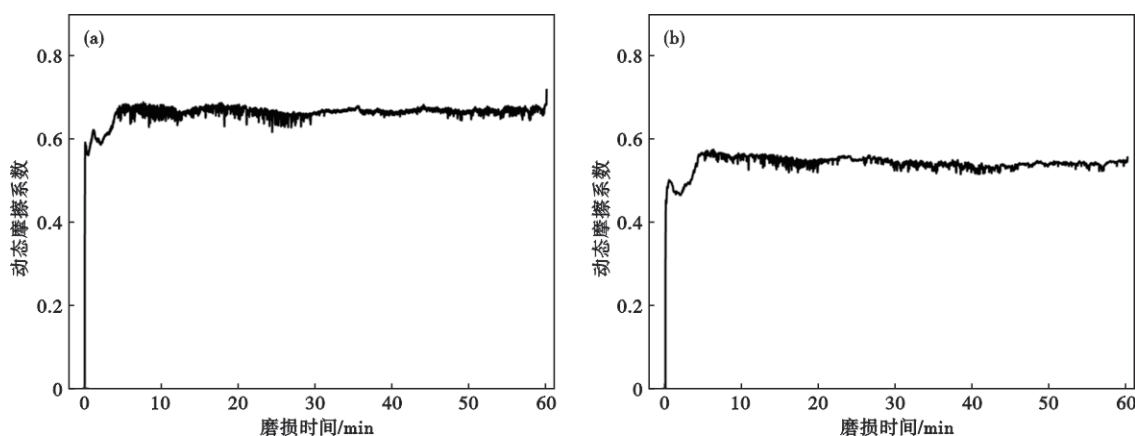


图 13 实验钢摩擦系数:(a) H13 钢,(b) DPG20 钢

Fig. 13 Friction coefficient of experimental steels : (a) H13 steel, (b) DPG20 steel

行了摩擦磨损性能试验。图 12 显示了两种实验钢进行磨损实验后的表面形貌,在实验钢的磨痕都观察到平行于滑动方向的细条状犁沟,这是典型的磨粒磨损形貌^[21],磨痕表面存在黑色附着层及不规则形状坑,在 H13 钢磨痕表面还观察到白色物质聚集。DPG20 钢磨痕表面剥落坑较少,损伤较小。表明新设计的 DPG20 钢具有更好的耐磨性。

图 13 显示了实验钢磨损性能试验中拟合后的动态摩擦系数曲线。从图 13 中可以看出,所有样品在摩擦磨损过程中,摩擦系数与时间的关系曲线都存在上升和稳定阶段^[22]。H13 钢的平均摩擦系数为 0.66,DPG20 钢的平均摩擦系数为 0.54。此外,还使用 3D 轮廓仪对样品损失体积进行了测量,H13 钢的损失体积为 0.240 mm³,DPG20 钢的损失体积为 0.208 mm³。DPG20 钢显示出更好的摩擦磨损性能,与表面形貌的观察结果一致。新型钢平均摩擦系数较 H13 钢更低,这是由于增 W 后钢中形成大量硬

质且细小弥散的 M₆C 碳化物,能够提升钢的耐磨性。综合评估新型钢的微观组织特征、综合性能以及成本因素,DPG20 钢完全符合废钢剪切机刀片服役过程中对材料提出的严苛性能要求。

3 结论

1)通过“降 Si、降 V 和增 W”的合金设计思路,在 H13 热作模具钢成分基础上成功开发了具有高冲击韧性、高耐磨性和高热稳定性的 DPG20 热作模具钢,其成分为:Fe-0.38C-0.19Si-0.45Mn-5.16Cr-1.23Mo-0.54V-1.98W(%) ,完全满足废钢剪切机刀片的性能要求。

2)经淬火和 580 °C 回火 2 h 在两次后,DPG20 钢的硬度达到约 48.2 HRC,与 H13 钢相当,而其冲击吸收功(24.3 J)为 H13 钢(11.6 J)的两倍。随着回火温度升高,虽然两者硬度均呈下降趋势,但 DPG20 钢的硬度下降更缓。

3) DPG20 钢展现出优异的抗回火软化能力和摩擦磨损性能。高温回火稳定性实验表明, 在 600 °C 保温 20 h 后 DPG20 钢的硬度比 H13 钢高出

3.8 HRC。摩擦磨损性能试验表明, DPG20 钢平均摩擦系数为 0.54 远低于 H13 钢的 0.66, 具有更好的耐磨性。

参考文献

- [1] 赵亚军, 郑玉荣, 张有余. 废钢产业政策及前景分析[J]. 再生资源与循环经济, 2019, 12(8): 18-21.
- [2] 上官方钦, 酆秀萍, 周继程, 等. 中国废钢资源发展战略研究[J]. 钢铁, 2020, 55(6): 8-14.
- [3] 李明波, 孙宜华, 李德容, 等. 我国废钢加工装备发展现状与展望[J]. 再生资源与循环经济, 2015, 8(7): 32-36.
- [4] 董君伟, 李吉航, 田家龙, 等. 钙含量对 H11 模具钢冲击功的影响机理[J]. 钢铁, 2024, 59(5): 125-133+160.
- [5] 潘祖诒. 液压废钢剪切机剪刀片的断裂失效分析[J]. 特殊钢, 1989, 10(6): 56-58.
- [6] 覃林盛, 郎兆林. 浅析废钢剪切机刀片的工作状况以及选材和热处理[J]. 中国资源综合利用, 2000, 18(3): 13-14.
- [7] Li B C, Peng R Z, Wu Z C, et al. Thermal stability and microstructural evolution of the novel 3% Cr hot-work die steel SDH68 [J]. Materials Today Communications, 2025, 49: 113734.
- [8] Li J H, Tian J L, Zhan D P, et al. Designing a new ultra-high strength steel with multicomponent precipitates under material genetic design [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 4449-4461.
- [9] Hengsbach F, Bürger J, Andreiev A, et al. Die steel design for additive manufacturing [J]. Acta Materialia, 2025, 284: 120326.
- [10] Zhu Z, Chen Q W, Sun S H, et al. Effect of vanadium on superhardening of 23MnNiMoCr54V steel for round-link chain in mining applications [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(5): 3884-3891.
- [11] Liu H H, Fu P X, Liu H W, et al. Effect of vanadium microalloying on the microstructure evolution and mechanical properties of 718H pre-hardened mold steel [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(11): 2526-2536.
- [12] 朱春燕, 石楠楠, 左鹏鹏, 等. Mn 和 W 元素对 4Cr2Mo2W2V 模具钢热稳定性的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S2): 66-69.
- [13] Michaud P, Delagnes D, Lamesle P, et al. The effect of the addition of alloying elements on carbide precipitation and mechanical properties in 5% chromium martensitic steels [J]. Acta Materialia, 2007, 55(14): 4877-4889.
- [14] Gong W, Yue J B, Tian J L, et al. The effect of nickel on the carbide precipitation behavior in Cr-Mo-V hot-working die steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 4452-4460.
- [15] 杨成康, 程晓农, 张 洁, 等. W-Mo-V 改进型 H13 模具钢的力学性能与磨损行为[J]. 金属热处理, 2021, 46(4): 30-37.
- [16] Borisov S, Borisova Y, Tkachev E, et al. Tempering behavior of a Si-rich low-alloy medium-carbon steel [J]. Metals, 2023, 13(8): 1403.
- [17] 李仲昱, 王晓国, 戴益波, 等. 调质处理对 22MnCrNiMo 钢闪光焊缝组织与力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(3): 71-75.
- [18] 谢亚飞, 侯廷平, 于 涛, 等. 合金碳化物 $M_{23}C_6$ 对 CLAM 钢晶界拉伸性能的影响机理研究[J]. 武汉科技大学学报, 2023, 46(6): 409-417.
- [19] 元亚莎, 殷立涛, 王文焱, 等. 新型 Cr-Mo-V 热作模具钢的高温断裂机制[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(6): 92-100.
- [20] 唐远寿, 张十庆, 李 方, 等. 淬火温度对 M_6C 强化 2200 MPa 级超高强度钢力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(5): 108-112.
- [21] Tang E, Yuan Q, Zhang R, et al. Rapid heat treatment yields excellent strength and ductility balance in a wear-resistant steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 2596-2608.
- [22] 李 爽, 陈士浩, 何西娟, 等. 两种热作模具钢高温耐磨性对比研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(1): 59-67.