淬火冷却介质对40CrNiMo钢矿用链轮轴调质后组织与力学性能的影响

苏振宁[1,2]，马坤[1,2]，王志颖[1,2]

1.中煤张家口煤矿机械有限责任公司　河北张家口　076025
2.河北省高端智能矿山装备技术创新中心　河北张家口　076025

摘要：采用力学性能测试及显微组织观察等手段，研究淬火介质对40CrNiMo钢矿用链轮轴调质后组织与力学性能的影响，发现油淬后回火样品的金相组织为致密、均匀的回火索氏体，具有较高的强硬度和较好的塑韧性。研究结果可为矿用链轮轴热处理工艺设计提供理论依据，对指导实际生产具有参考价值。

关键词：40CrNiMo钢；矿用链轮轴；淬火冷却介质；力学性能

Quenching and cooling medium on the structure of 40CrNiMo steel mining sprocket shafts after quenching and tempering the impact on mechanical properties

SU Zhenning[1,2], MA Kun[1,2], WANG Zhiying[1,2]

1. Middling Coal Zhangjiakou Coal Mining Machinery Co., Ltd., Zhangjiakou 076025, Hebei, China
2. Hebei Province High End Intelligent Mining Equipment Technology Innovation Center, Zhangjiakou 076025, Hebei, China

Abstract: By using mechanical property testing and microstructure observation, the effect of quenching medium on the microstructure and mechanical properties of 40CrNiMo steel mining sprocket shaft after quenching and tempering was studied. It was found that the metallographic structure of the tempered sample after oil quenching was dense and uniform tempered martensite, with high strength, hardness, and good plasticity and toughness. The research results can provide theoretical basis for the design of heat treatment process for mining sprocket shafts and have reference value for guiding actual production.

Keywords: 40CrNiMo steel; mining sprocket shaft; quenching cooling medium; mechanical property

1　序言

刮板输送机是煤矿井下综采工作面中的输送设备，主要作用是将采煤机采下的煤炭连续不断地运出工作面。链轮是刮板输送机的关键动力输出部件，通过电动机提供牵引力使链条和刮板运转起来，工作中承受着刮板链条、煤块及矸石等的剧烈冲击，恶劣的工作条件要求其既要有较高的强度和韧性，也要有较高的耐磨性能。陈国强[1]针对井下采煤机行走链轮损坏现象进行分析，认为主要原因为链轮强韧性差、耐磨性不足；次要原因是环境过于苛刻。链轮轴外形尺寸如图1所示，技术要求见表1。

基金项目：河北省科技重大专项（21281002Z）。

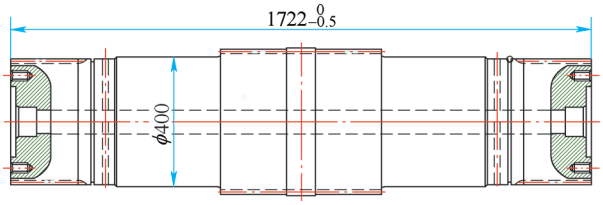


图1　链轮轴外形尺寸

表1　调质后链轮轴技术要求

金相组织	硬度HBW	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率（%）	断面收缩率（%）	冲击吸收能量/J
回火索氏体	255～320	≥900	≥750	≥12	≥45	≥60

链轮轴在井下长期服役期间，承载着巨大应力，过煤量可达每日1.5万t，常因受到交变载荷和附加冲击载荷的影响、应力集中而导致裂纹扩展，造成沿晶断裂或疲劳失效，从而面临发生生产事故的风险，40CrNiMo钢链轮轴断裂形貌如图2所示。张全新等[2]分析讨论了40CrNiMo钢轴产生开裂的主要原因是心部存在严重带状偏析，从而形成裂纹。

图2　40CrNiMo钢链轮轴断裂形貌

链轮轴所用材料40CrNiMo钢作为一种淬透性良好的中碳合金钢，其优异的强度、塑韧性及耐磨性均满足链轮轴加工及服役要求。王敬忠等[3]从表面处理、热处理、机械加工等多方面对40CrNiMo钢链轮轴进行了国内外现状的研究总结。

优良的冲击性能可提高链轮轴服役寿命，并减少残次品出现的概率。钢材在不同冷却剂中淬火，由于冷却能力不同，工件冷却速度也不同，淬透层深度也不同，未淬透的混合组织相比全淬透后得到的马氏体组织冲击吸收能量偏低，因此良好的冲击性能与淬透性密切相关。淬透性主要取决于材料的临界冷却速度，可以通过改变淬火冷却介质的选择来控制冷却速度，以提升材料淬透性，同时减少淬火开裂。刘琼等[4]针对这一问题提出了采用不同淬火冷却介质来提升淬透性，并进行相关对比试验。

本文通过对比试验研究水、淬火油和浓度为6%～8%的水基淬火液这3种不同淬火冷却介质对40CrNiMo钢链轮轴热处理组织与力学性能的影响，分别进行金相组织观察、硬度检测、冲击性能和拉伸性能试验，分析试样调质处理效果并多角度对比其力学性能，选择最适合实际生产的淬火冷却介质，旨在通过改进生产工艺来提升性能，同时降低链轮轴产品质量的不合格率，减少裂纹出现情况，预防断裂产生，为生产过程中热处理工艺路线提供参考，为刮板输送机链轮组件的安全运行提供技术支持。

2　材料与试验

2.1　材料

试验采用40CrNiMo圆钢料，其化学成分见表2，满足GB/T 3077—2015《合金结构钢》要求。圆钢料经锯切-锻造-机械加工得到外形尺寸为ϕ400mm×250mm的试件3件，其中轴向中心加工有ϕ70mm的通孔。

表2　40CrNiMo圆钢料主要化学成分（质量分数）　（%）

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
实测值	0.41	0.26	0.69	0.011	0.004	0.77	0.17	1.52
标准值	0.37～0.44	0.17～0.37	0.50～0.80	＜0.03	＜0.03	0.60～0.90	0.15～0.25	1.25～1.65

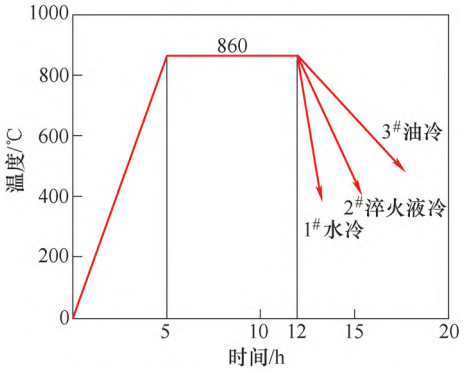
2.2　试验

（1）淬火冷却介质选择及热处理工艺制定　选用水、淬火液、淬火油3种淬火冷却介质作为研究对象，其中，水是清水；淬火液是浓度为6%～8%的水基淬火液AQUATENSID FN，外观呈现浅黄色水液，40℃时运动黏度为300mm^2/s，20℃时密度为1.06～1.10g/cm^3；淬火油是ISOMAX 169超速淬火油，外观呈现褐色油液，40℃时运动黏度为13～20mm^2/s，20℃时密度为0.83～0.87g/cm^3，燃点为188℃，闪点≥160℃。

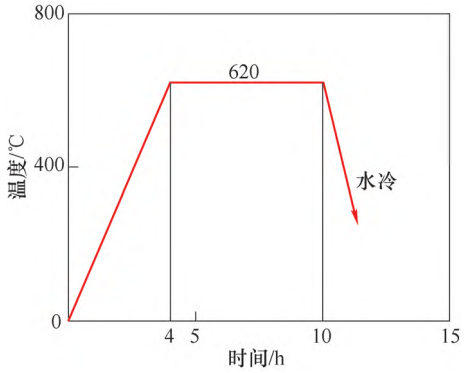
40CrNiMo钢材料临界相变Ac_1温度约为690℃、Ac_3温度约为760℃。在实际生产中，综合考虑零部件尺寸效应和生产现场的热处理工艺参数偏差等诸

多因素，淬火温度需适当提高，确保铁素体全部转变为奥氏体，以达到细化晶粒的目的。

40CrNiMo钢淬火加热温度为860℃，淬火加热时间为5h，保温7h，分别进行水冷10min（1#试样）、淬火液冷12min（2#试样）、油冷40min（3#试样），外部环境温度控制在约20℃，淬火搅拌强度均≥0.7m/s，再对淬火后的样品进行620℃×6h回火，最后水冷至室温，热处理工艺如图3所示。



a）淬火工艺



b）回火工艺

图3　不同淬火冷却介质热处理工艺

（2）试件取样　分别对热处理后的1#、2#、3#试件进行试样取样，取样位置如图4所示。首先是冲击试样，内1、中1、外1分别表示内部竖取、中部竖取、外部竖取；内2、中2、外2分别表示内部横取、中部横取、外部横取，其中每个位置取3件冲击试样。内部、中部、外部取样旨在测试试件淬火后沿轴线方向各部位的冲击韧度变化规律，横向取样是测试试件表面淬硬层的冲击韧度，竖向取样是测试试件淬硬层以下接近心部的冲击韧度。其次是拉伸试样，沿试件轴线由内向外，取内部、中部、外部，每个位置取2件。测试试件淬火后沿轴线方向各部位拉伸性能的变化规律。最后是在1#、2#、3#试件表面取一尺寸为20mm×20mm×20mm的硬度试样，既用来检测硬度，也用来观察金相组织。

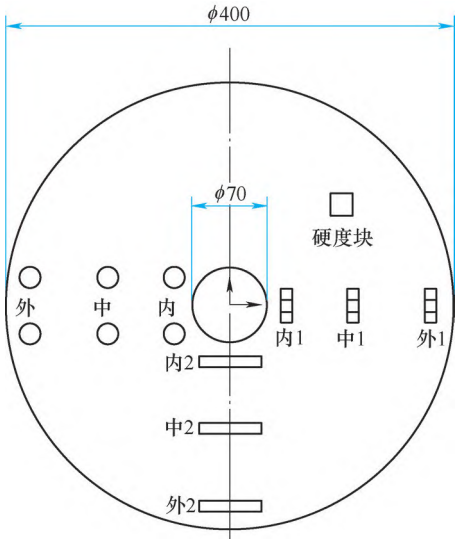


图4　取样位置

（3）金相制样　使用德国Leica的MEF4A型光学显微镜观察其金相组织。对1#、2#、3#试件切割取得金相试样，进行预磨（100目）、粗磨（400目）、精磨（1000目）、抛光，使用体积分数5%的硝酸酒精对抛光后的样品腐蚀15s，清水冲洗后吹风机烘干，最后使用显微镜记录清晰金相组织并分析。

（4）硬度检测　根据GB/T 231.1—2018《金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法》，使用美国WILSON的BH3000型布氏硬度计进行硬度检测，使用ϕ10mm的硬质合金钢球压头，载荷为3000kg（29.4kN），试验力保持3s。每个试样检测4个硬度值，去掉第一个数据以排除设备影响，余下3个数据取平均值。

（5）拉伸性能试验　根据GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》，使用SANS/SHT4106电液式万能试验机检测样品的拉伸性能，制备拉伸试棒直径20mm，测试其抗拉强度、屈服强度、断后伸长率及断面收缩率。试验测得拉伸数值在合理范围内，若并未存在较大误差，同位置两组数值取平均值进行分析。

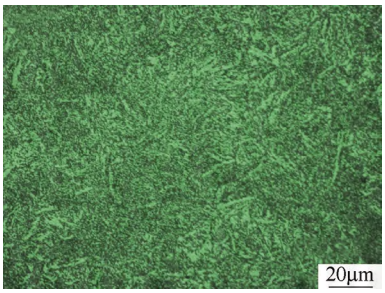
（6）冲击性能测试　根据GB/T 228—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》，使用吴忠材料试验机厂的JB-30B型冲击试验机测试样品的冲击韧度，制备冲击试样尺寸为

10mm×10mm×55mm，V型缺口角度为45°，冲击环境为－20℃，对同位置3组试验结果取平均值。

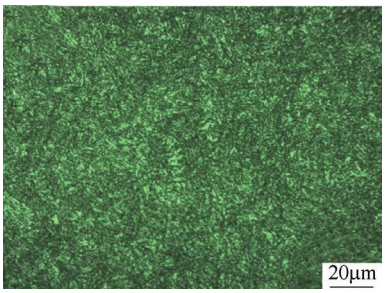
3 结果分析与讨论

3.1 显微组织分析

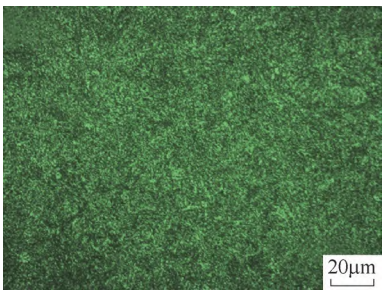
图5所示为金相试样的500倍显微镜照片，1#试件水冷后回火样品的金相组织为回火屈氏体和羽毛状上贝氏体。上贝氏体的出现主要因为水淬过程中产生蒸汽膜，所以奥氏体过冷度不足，在上贝氏体转变区停留，发生上贝氏体转变，以致淬火处理未能完全获得马氏体[5]。上贝氏体中羽毛状的铁素体易引起C、N元素，以及P、S等杂质元素在晶界、相界处偏析，使基体组织不均匀[6]，导致组织强度较低，韧性较差[7]。2#试件淬火液淬后回火样品的金相组织为回火索氏体＋铁素体。铁素体部分为针状，碳化物未形成颗粒，存在于铁素体基体上。2#试件金相组织较致密，但组织分布不均匀，存在带状偏析。3#试件油冷样品回火后金相组织为回火索氏体，淬火后产生的板条马氏体几乎全部消失，组织基本为等轴铁素体及细粒状碳化物，组织致密，分布均匀。根据GB/T 13320—2007《钢质模锻件 金相组织评级图及评定方法》判定3#油冷样品晶体组织为1级，达到调质预期。



a）水



b）AQUATENSID FN淬火液



c）ISOMAX 169淬火油

图5 不同淬火冷却介质淬回火试样的金相组织（500×）

3.2 硬度分析

1#、2#、3#试件的硬度检测结果分别为265HBW、286HBW、294HBW。硬度试验结果中1#水冷样品硬度最差，主要原因是由铁素体板条和粗大渗碳体颗粒所组成的上贝氏体使硬度降低，存在局部软点。2#淬火液淬火时，淬火液在高温时析出的聚醚，能在工件表面生成一层包裹膜，从而延缓因激冷而造成的开裂风险，在液温达到≤300℃时，此膜溶解，减缓了淬火应力的产生[8]。使用淬火液淬火冷却速度快，表面淬火硬度较高。3#油淬样品使用的超速淬火油，其黏度低，冷却速度快，淬硬效果好。油淬后回火形成了均匀致密的回火索氏体组织，细小的铁素体提升了样品的表面硬度[9]。

3.3 拉伸性能分析

图6所示为不同淬火冷却介质淬火后回火试件的拉伸试验数据。图6a、b分别是测得的抗拉强度及屈服强度。对比1#、2#、3#试件的抗拉强度及屈服强度可知，3#油淬试件的强度最高，2#淬火液淬试件强度次之，1#水淬试件强度最差。

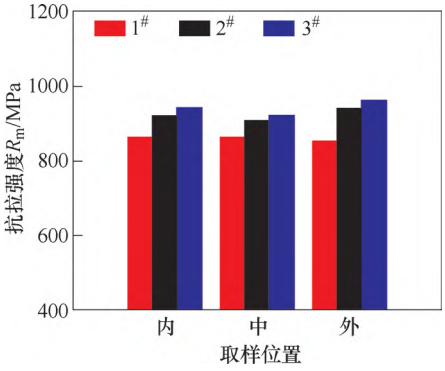
主要原因有以下3点。

1）3#油淬试件的回火索氏体组织较1#、2#试件的组织更加致密、均匀，材料的塑韧性及强度较高。

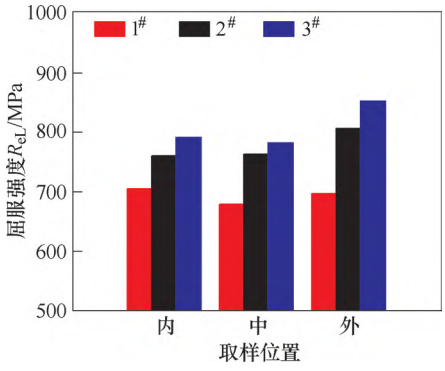
2）3#油淬试件组织为回火索氏体，回火索氏体中弥散的小颗粒状碳化物对基体起到钉扎作用，阻碍了位错运动，提升了材料的塑韧性及强度。

3）1#试件中羽毛状上贝氏体的存在使碳与合金元素从马氏体中脱溶后不断在晶间富集，形成合金渗碳体，易产生裂纹[9]，导致基体强度、硬度降低，且塑韧性变差。对比不同取样位置，中心位置样品的抗拉强度及屈服强度略低于内侧和外侧，但相差不大，其中1#试件的淬透性较好。3#试件油淬后回火的样品抗拉强度及屈服强度明显高于水淬和淬火液淬，表明油淬后回火的链轮轴具有更高的强度，工作时可以承受更高的载荷，运行更加稳定。

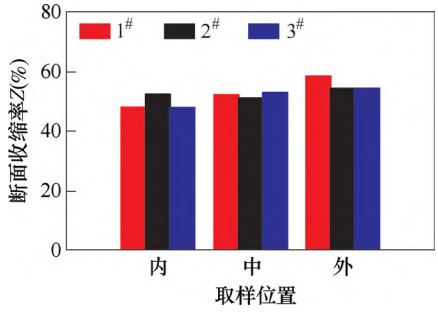
试样的断面收缩率及断后伸长率如图6c、d所示。塑性方面，1#试件水淬试件略好于2#、3#试件，因为上贝氏体＋铁素体组织具有较好的延展性[10]，但总体来看调质中使用的3种不同淬火冷却介质淬火对样品的塑性影响不大。



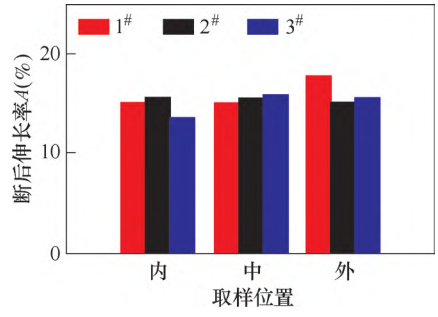
a）抗拉强度



b）屈服强度



c）断面收缩率



d）断后伸长率

图6　不同淬火冷却介质淬回火试样的拉伸试验数据

3.4　冲击性能分析

图7所示为冲击试验结果。冲击吸收能量是衡量材料内部的缺陷和抵抗冲击断裂能力的重要指标。总体来看，3#油淬试件的冲击性能优于1#、2#试件，主要由于细小的回火索氏体具有良好的塑韧性及较高强度。同时，铁素体含量相当时，样品的组织均匀性也是影响冲击性能的主要因素[11]，3#油淬试件金相组织较1#、2#试件更加均匀，碳化物颗粒阻止了位错运动，冲击性能更好；同时，1#试件中粗大上贝氏体的存在恶化了其冲击性能，为裂纹扩展提供了低能通道。对比不同取样位置的冲击吸收能量，内1、中1、外1竖取（轴向）样品的冲击吸收能量高于内2、中2、外2横取（垂直于轴向）样品，主要原因是锻造轴体时材料内部晶粒重新排列，晶粒沿轴向取向，导致力学性能呈现各向异性，材料轴体方向上具有更好的抗冲击性能。3#油淬试件的冲击吸收能量折线更加平滑，表明使用ISOMAX 169淬火油淬火可使工件内外获得更均匀的组织，油冷后回火的轴体对结构中缺口或其他应力集中不敏感，抵抗冲击断裂能力较好。

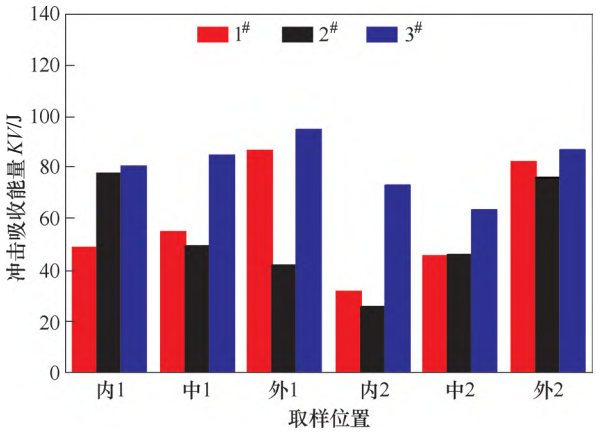


图7　不同淬火冷却介质淬回火试件的冲击吸收能量

4　结束语

本文研究了淬火冷却介质对40CrNiMo钢矿用链轮轴调质后组织与力学性能的影响。试验结果和建议如下。

1）1#水淬后回火试件的金相组织为回火屈氏体＋上贝氏体；2#淬火液淬后回火试件的金相组织为回火索氏体＋铁素体；3#油淬后回火试件的金相组织为回火索氏体。

2）3#油淬后回火试件的组织更加致密、均匀，

（下转第105页）

技术要求，耐磨减缓冲击薄壁零件合格率由原来的5%～10%，提高到100%，有效解决了薄壁零件变形问题，改善了产品质量，降低了生产成本。

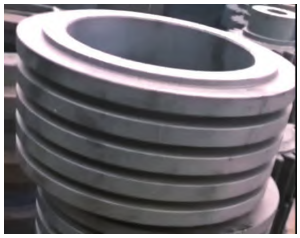


图4　环形零件渗碳毛坯实物

图5　防变形淬火后环形零件实物

图6　淬火后零件变形状态

3　结束语

1）通过加工工艺设计，更高效地实现了薄壁零件厚度方向两端面渗碳，薄壁零件渗碳过程中的变形可控。

2）通过设计薄壁零件淬火防变形装置，可减少淬火过程中热应力变形，防止因零件变形过大而产生翘曲，使零件变形具有同一性，保证零件硬化层均匀一致，表面硬度均匀。

3）通过加工工艺设计及淬火防变形装置的加持，提高了产品质量，使用寿命增加，可进一步减少渗碳淬火磨削余量，降低生产成本，节能环保。

参考文献：

[1] 刘永刚，李显. 18Cr2Ni4WA渗碳淬火工艺的改进[J]. 机械工程师，2009（10）：134-135.

[2] 张玉忠，刘保. 齿轮渗碳淬火变形分析与控制[J]. 热加工工艺，2019，48（8）：206-208.

[3] 黄春峰. 18Cr2Ni4WA钢的热处理工艺研究[J]. 制造材料，2000（3）：32-33.

[4] 乐平，黄海峰，郁凉峰. 18Cr2Ni4WA钢渗碳后淬火工艺对组织和性能的影响[J]. 热处理，2008，23（5）：28-33.

MW 20240611

（上接第102页）

弥散的细小颗粒状碳化物对基体产生钉扎效应，阻碍位错运动，提升了基体的硬度和强度。

3）3#油淬后回火试件内外组织均匀，对结构中缺口或其他应力集中不敏感，抵抗冲击断裂能力较好。

4）建议优先考虑ISOMAX 169淬火油作为40CrNiMo钢矿用链轮轴调质时的淬火冷却介质，以保证链轮轴良好的性能。

参考文献：

[1] 陈国强. 俄霍布拉克煤矿下1煤1404工作面采煤机行走链轮频繁损坏原因分析及改进对策[J]. 科技视界，2014（28）：229.

[2] 张全新，朱斌，徐鸿昊，等. 40CrNiMo钢轴开裂原因分析[J]. 物理测试，2020，38（2）：32-35.

[3] 王敬忠，李科元，刘阿娇，等. 40CrNiMo钢国内外研究现状[J]. 钢铁，2018，53（5）：1-10.

[4] 刘琼，芦志华，赵文清. 40CrNiMo钢低温冲击性能研究[J]. 金属加工（热加工），2009（23）：35-36.

[5] 周鹏飞，王东涛，张海. 铸造Al-Si-Mg-Cu合金综合性能调控研究现状[J]. 特种铸造及有色合金，2023（12）：1607-1612.

[6] 董成瑞. 微合金非调质钢[M]. 北京：冶金工业出版社，2000.

[7] 孙兴德. 40CrNiMo钢退火热处理工艺与性能的研究[J]. 金属制品，2014，40（3）：19-22.

[8] 李亚斐，范艳艳，刘经宇，等. 不同淬火介质对45钢淬火性能的影响[J]. 热加工工艺，2017（10）：213-215.

[9] 张可，魏宏宇，魏伟，等. 热处理工艺对40CrNiMo钢组织及力学性能的影响[J]. 金属功能材料，2024，31（1）：63-70.

[10] SAEIDI N，EKRAMI A. Comparison of mechanical properties of martensite/ferrite and bainite/ferritedual phase 4340 steels[J]. Materials Science & Engineering，A. Structural Materials：Properties，Misrostructure and Processing，2009，523（1/2）：125-129.

[11] 魏天，国新春，陶盈龙，等. 车轮冲击韧性关键影响因素研究[J]. 山西冶金，2023（10）：64-65.

MW 20240306